编者按：《岩土力学》期刊社自 2021 年起开辟“岩土力学卓越论坛”栏目，主要刊登我国岩土力学与工程界著名专家学者及其研究团队的科研成果和重大项目研究新进展，进一步推动岩土力学与工程领域的学术交流，促进中国岩土力学与工程的健康可持续发展。本期推出李术才院士撰写的《超长定向钻注装备关键技术分析及发展趋势》一文，以飨读者。

岩土力学卓越论坛

DOI：10.16285/j.rsm.2022.2027

超长定向钻注装备关键技术分析及发展趋势

李术才[1]，李利平[1,2]，孙子正[1,2]，刘知辉[2]，李梦天[1,2]，潘东东[1,2]，屠文锋[1,2]

（1. 山东大学 岩土与结构工程研究中心，山东 济南 250061；2. 山东大学 齐鲁交通学院，山东 济南 250002）



摘 要：定向钻技术起源于石油钻井工业，经多年发展已拓展至隧道工程地质勘察及灾害处置、煤矿底板含水层改造、蓄能电站抽水通道施工、市政管道铺设等多个领域。地面注浆技术结合定向钻长距离精准穿越的优势，可实现地下工程不良地质高效预加固与灾害安全处置，具有广阔的应用前景。系统综述了定向钻注装备技术的发展历程、研究现状和待突破关键技术。首先，介绍了定向钻与地面注浆技术的发展历程；其次从重大科研项目、学术论文、授权专利以及工程实践等方面进行了分析与总结。结果表明：我国现阶段定向钻注技术总体已达到自主化、实用化的国际先进水平，但在千米级长距离快速钻进、复杂地质条件精准导向、地下工程精准注浆处置等核心技术方面仍存在“卡脖子”难题。面向战略性重大工程建设需求，提出了超长距离定向钻注一体化装备“预报、钻进、注浆、检测”四大功能模块，围绕随钻感知预报、快速钻进与卡钻预测、精准导向技术、远距离凝胶可控注浆材料、稳压控制分段注浆工艺、随钻检测系统六方面，开展了分析与讨论，可为我国定向钻注一体化装备技术发展和地下工程灾害防控提供参考。

关 键 词：地下工程；定向钻；地面注浆；钻注一体化装备；注浆技术

中图分类号：O 319.56 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2023) 01－0001－30

Key technology analysis and development trend of the equipment for ultra-long directional drilling and grouting

LI Shu-cai[1], LI Li-ping[1,2], SUN Zi-zheng[1,2], LIU Zhi-hui[2], LI Meng-tian[1,2], PAN Dong-dong[1,2], TU Wen-feng[1,2]

（1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China; 2. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan, Shandong 250002, China）

Abstract: Directional drilling technology (DDT) originated from oil drilling industry. After many years of development, DDT has been extended to geological investigation and disaster management for tunnel engineering, aquifer reconstruction at the bottom of coal mines, pumping channel construction for power storage stations, municipal pipeline laying and other fields. Combined with the advantages of DDT for long-distance accurate crossing, ground grouting technology can achieve safe and efficient management of underground engineering disasters, and has a broad application prospect. This paper systematically reviews the development history, research status and key technologies of DDT. Firstly, the development history of DDT is introduced. Secondly, the scientific research plan, academic paper publication, relevant patent authorization, and application exploration of DDT are analysed. The analysis results show that the DDT in China has reached an internationally advanced level of technological independence and broad-range application, but there are still some core technical problems that need to be resolved, such as thousand-meter long-distance fast drilling, accurate drilling guidance in complex geological conditions, and accurate grouting in underground engineering. Focusing on the construction

收稿日期：2022-12-20 录用日期：2023-01-04
基金项目：国家重点研发计划（No. 2022YFC3005604）。
This work was supported by the Key Basic Research Project of China(No. 2022YFC3005604).
第一作者简介：李术才，男，1965 年生，中国工程院院士，博士，教授，山东大学校长，主要从事隧道与地下工程灾害防控研究。E-mail: lishucai@sdu.edu.cn

requirements of strategic major projects, this paper proposes four functional modules, i.e., forecasting, drilling, grouting and detecting, and analyses and discusses six aspects of ultra-long directional drilling and grouting (i.e., sensing prediction while drilling, rapid drilling and sticking prediction, precision guidance technology, remote gel controllable grouting material, pressure stabilizing and controlling sectional grouting process, and detection system with drilling). This paper can provide reference for the development of DDT, and for the prevention and control of disasters in underground engineering.

Keywords: underground engineering; directional drilling; ground grouting; integrated drilling and injection equipment; grouting technique

1 引 言

交通、水电等重大基础设施是中国特色社会主义的主要物质基础，是现代化经济体系建设的重要引擎[1]。伴随交通强国、“一带一路”倡议、国家水网等国家战略持续推进，我国重大基础设施发展仍将处于“黄金时期”。然而，复杂多样的地质条件和建造环境对工程建设，尤其是作为重大基础设施“咽喉”环节的隧道工程带来了严峻的挑战。

我国已成为世界上隧道建设规模、难度和数量最大的国家，大批超级隧道工程呈现“两极”建造趋势，如川藏铁路，面临高寒环境、高地温、有毒有害气体等极端建造环境[2-3]。滇中引水，面临活动断裂带、高地应力、高水压等极端地质条件[4-5]。极端地质条件与极端建造环境条件下隧道安全建造面临重大挑战。如表 1 所示，近年来，隧道施工期发生多起重大突水突泥、围岩垮塌等灾害事故，同时频现链生突水垮塌、地表塌陷等衍生次生灾害。造成严重人员伤亡和工期延误。“两极”建造趋势下隧道灾害的防控与灾后的高效处置亦面临重大难题，以面临极端地质条件的云南滇中引水工程为例，如图 1 所示，2020 年 12 月，4#施工支洞发生突泥涌水事故，造成施工机具被埋，洞内空间受限等因素导致进展缓慢，处置一年半后方恢复至原掘进面；2022 年 5 月，长育村隧洞发生突泥涌水事故，隧道被淹没 700 余米，引发上覆山体塌陷至地表，由于缺少高效可行的处置方法，导致事故至今未能恢复，严重影响了施工进度。

党的二十大报告明确提出[6]，要提高防灾减灾救灾和急难险重突发公共事件处置保障能力。作为重大基础设施的重要组成部分，隧道在区域协同发展、国际互联互通、城市发展运行、海洋经略开发、国防建设保障等领域发挥了不可替代的关键作用。实现隧道不良地质段的预加固处理及灾害的高效处置，已成为支撑国民经济主战场、保障国家重大工程安全和人民生命财产安全的迫切需求。

多年工程实践证明[7-11]，地面注浆是隧道工程涌水失稳灾害控制和不良地质预加固的有效技术手段，相比于洞内处置，地表注浆具有两大优势：对于灾害防控，易于调节浆液胶凝时间，不占用掌子面时间；对于不良地质预注浆工程，灾害源易于治理，是“笼中打老虎”。地面注浆对工程施工安全、高效能装备布设和工序衔接具有重要的意义。



图 1 滇中引水 4#施工支洞与长育村隧洞突泥涌水事故
Fig.1 Accident of mud inrush and water gushing in the #4 construction branch tunnel and Changyucun tunnel in water diversion from central Yunnan

表 1 隧道工程突水突泥及衍生灾害典型案例统计
Table 1 Statistics of typical cases of water and mud inrush and derivative disasters in tunnel engineering

领域	工程名称	事故情况	衍生灾害情况
铁路	南广高铁白云隧道	2010 年，突水突泥、垮塌，5 人遇难，4 人受伤	地表塌陷 300 m^2
铁路	厦深铁路梁山隧道	2009 年，突水突泥、垮塌，工期延误 1 年	地表塌陷 1 500 m^2
公路	宜来高速王家隧道	2021 年，突水突泥、垮塌，设备及设施全部损毁	地表塌陷 3 166 m^2
公路	吉莲高速永莲隧道	2014 年，突水突泥、垮塌，工期延误 2 年	地表塌陷 2 000 m^2
水利	滇中引水长育村隧道	2022 年，突水突泥、垮塌，3 人遇难，被迫改线	地表塌陷 1 500 m^2
水利	广水宝林输水隧洞	2018 年，断层突水、垮塌，6 人遇难，工期延误 1 年	链生突水垮塌
市政	广州轨交 11 号线	2019 年，突水涌砂、垮塌，两车坠落，3 人遇难	地表塌陷 570 m^2
市政	珠海市石景山隧道	2021 年，拱顶坍塌透水，14 人遇难，至今未复工	吉大水库排干

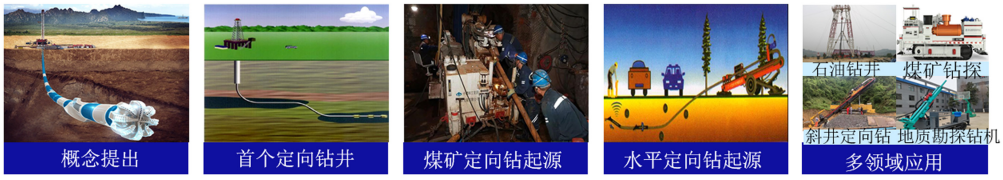
地面注浆的优势对于深长地下工程尤为重要，如以滇中引水工程为代表的小断面隧洞，机具洞内调运困难，5 m×5 m 钻洞显著限制洞内注浆工序实施，地表超长钻前进式分段注浆得到了普遍应用。

在其他地下工程建设领域，围绕地表注浆在隧道工程中灾害防控问题，国内外也已开展大量研究与相关工程应用，如青峰煤矿底板含水层改造[12]、南水北调总干渠延线注浆[13]、济南等城市地铁涌水灾害治理[14]等工作。已初步实现突泥涌水灾害洞外安全防治，但普遍存在长距离特别是超过千米后钻进效率低、浆液凝固不可控、注浆效率低下、注浆靶向性差等问题。针对上述问题，相关学者在钻进和注浆两个层次，面向快速钻进难实现、卡钻问题难预防、定向钻进难控制、材料凝塑要求高、注浆过程难反馈、长距离稳压难控制等工程技术挑战开展了大量研究，以下分别就超长距离快速钻进装备与精准控制、超长距离注浆加固封堵两个方面进行概述，并综合分析目前研究的不足，为超长距离钻注一体化装备技术研究提供参考。

2　地面钻注一体化技术发展历程

定向钻进技术（directional drilling technology，简称 DDT）是地面钻注一体化的重要支撑，该技术最早起源于石油钻井工业，经过百余年发展已应用到不同领域，其发展历程如图 2 所示[15-17]。在该技术初期阶段，旋转钻井技术代替了原有的顿钻技术，钻进后轨迹测量研究表明，钻进轨迹并非垂直向下，而呈现弯曲或螺旋状。该发现为定向钻技术的形成奠定了基础。1863 年，瑞士工程师列晓在阿尔卑斯山铁路隧道建设过程中，率先提出定向钻概念[18]；1870 年，俄罗斯沃依斯拉夫采用顿钻钻井技术完成全球第一口定向钻井的施工，钻井倾斜角为 60°[19]；1881 年美国工程师在加利福尼亚州最早完成定向分支钻井施工[20]；1941 年，工程师应用涡轮钻具在巴库油田完成了世界上第一口真正意义上的定向钻井[21]。20 世纪 80 年代之后，定向钻技术进入了快速发展阶段，逐步诞生了随钻测量、旋转导向、压力测量等现代钻井技术。

我国定向钻技术始于 1956 年[22]，并于 1965 年前后分别完成了磨-3 水平井、巴-24 水平井施工[23]，成为世界上第 2 个完成水平井的国家，施工技术已接近当时世界最高水平。然而，20 世纪 60 年代后，受诸多因素制约，我国定向钻进技术处于停滞状态。改革开放之后，定向钻技术重新得以发展，并持续处于快速发展期。



年代	1863 年	1870 年	1941 年	1957 年	1971 年	2022 年
发展历程	定向钻进概念提出	顿钻定向钻井施工	世界第一口定向钻井	煤矿定向钻进技术起源	水平定向钻进技术起源	定向钻进技术多领域应用（石油、煤层气、地热勘探）

图 2　定向钻技术发展阶段[15-17]

Fig.2　Development stage of DDT[15-17]

进入 20 世纪 90 年代以后，国内外定向钻进技术日趋成熟，已广泛应用于石油、煤层气、地热勘探行业，涉及管道穿越，地质勘察，大角度山体穿越等领域。近年来，定向钻进技术与注浆技术产生紧密结合，在煤矿、地下工程突涌水封堵与注浆加固方面也有大量工程应用。

1957 年英国首先在煤矿开采领域开展了煤层百米定向钻孔的钻具和设备的研发[24]，形成了早期煤矿井下定向钻技术的发展雏形。1964 年，美国开始对定向钻理论开展研究并进行现场试验，此后煤矿定向钻进技术进入蓬勃发展的时代[25]。定向钻进技术在煤矿领域的瓦斯抽采、地质异常体探测、水害防治等应用中表现出显著优势。我国煤矿井下定向钻技术于 1980 年左右开始起步，发展至今，煤矿井下定向钻进技术已趋近技术前沿[26]。2019 年，中国煤炭科工集团西安研究院在神东煤炭集团保德煤矿，完成了主孔深度为 3 353 m 的沿煤层超长贯通定向钻孔，刷新了我国井下定向钻进世界纪录[27]。

在非开挖施工领域，1971 年，美国加利福尼亚州的施工单位 Martin Cherrington 将石油钻机改造为水平定向钻机，巧妙结合了石油领域的定向钻井技术和非开挖管线铺设技术，创新性提出了水平定

向钻技术[29]，我国于 1980 年左右引进水平定向钻穿越技术，并于 1985 年首次完成了黄河非开挖定向穿越施工[29]。2019 年，中国石化销售华南分公司在湛江北海管道工程中完成了 4 017 m 的定向穿越施工[30]。经过多年发展，我国水平定向钻技术及装备实现了重大突破，完成了从依赖进口到自给自足的阶段性跨越[31]。

当前，定向钻装备发展迅速，形成了以主要利用重力作用钻进的直井类钻机与利用钻机提供顶推力的水平定向钻机两大类别，具体类型与主要应用领域如表 2 所示。

表 2 定向钻机分类及特点

Table 2 Classification and characteristics of directional drilling equipment

类别	钻机种类	典型应用领域	特点
直井钻机	立井钻机	石油勘探开发、突涌水注浆封堵与加固	最大钻深≥8 000 m
	车载/履带/地热钻机	突涌水封堵与加固、地热开发	最大钻深≤3 000 m
	地质钻机	地质勘探	小体积低扭矩
水平定向钻机	非开挖管网市政钻机	石油、天然气、市政管道穿越	倾斜角度＜45°
	煤炭瓦斯抽采钻机	煤炭开采/煤层气开发	小口径、防爆设计
	斜井钻机	蓄能水电站	倾斜角度为 45°～85°

国内外当前已开展针对定向钻装备系统性研制，主要厂家如表 3 所示。美国弗莱彻公司（Fletcher）研制了 LHD-15 等系列坑道定向钻机[32]，额定转矩为 3 390 N·m，主要适用于施工深度为 1 500 m 以内的各类矿山灾害防治定向钻孔，在美国、澳大利亚等地区煤矿进行了广泛应用[33]。我国徐工集团是定向钻机市场占有量最大的企业[34]，研制的全球最大吨位水平定向钻机 XZ13600，顶推力达 13 600 kN，扭矩为 260 000 N·m，设备主要应用在西气东输、南水北调、中俄油气等国家重大能源战略工程的管道铺设及城市自来水、煤气、通讯、网络等市政民生工程建设[35]。此外，国外企业如法国斯伦贝谢（Schlumberger）[36-38]、美国威猛（Vermeer）[39-41]、美国哈里伯顿（Halliburton）[42-43]，国内企业如中国煤炭科工集团、中石油宝鸡机械有限责任公司、中石油川庆钻探工程等公司，也取得了一系列技术突破。

澳大利亚威利朗沃公司（Valley Longwall Drilling）[44]研制了 DGS 等系列矿用有线随钻测量系统，千米钻孔定位精度为 2 m 左右，应用于矿山灾害防治、西气东输境外段、印度东气西送、荷兰拉尔特等大型管道及纽约、堪培拉等城市市政管道铺设工程。

表 3 国内外定向钻装备主要厂商

Table 3 Major manufacturers of directional drilling equipment in China and over the world

	企业名称	关键技术
国内企业	中石油宝鸡机械有限责任公司	“一键式”人机交互 7 000 m 自动化钻机开钻
	中石油川庆钻探工程有限公司	CG STEER 旋转地质导向钻井系统，造斜能力突破 12.5°/30 m
	中煤科工集团西安研究院	水平定向钻孔高效注浆工艺技术体系，形成了单个定向钻孔递进式分段注浆 建立集束型定向钻孔群约束注浆、跳孔注浆、错位注浆等注浆工艺
	中国徐工集团[34]	斜井定向钻机最大钻深达到 2 000 m，钻进角度可达 90° 世界最大吨位水平定向钻机技术，定向钻全球占有率第一
	奥瑞拓能源科技股份有限公司	形成钻头、钻具及仪器等全体系装备关键技术，近钻头数据传输成功率达 100%
国外企业	法国斯伦贝谢(Schlumberger)[36-38]	新型定向钻进技术将人工智能与地面和井下自动化工作流程相结合 自行确定转向顺序并按计划交付井眼轨迹
	美国威猛 (Vermeer)[39-41]	系列水平定向钻机和远距离无线随钻测量系统及导向控制和规划系统 水平定向钻机的施工数据管控平台
	美国哈里伯顿 (Halliburton)[42-43]	iCruise 智能旋转导向系统用于钻井自动化的智能设计中精确制导长水平井 旋转导向系统集成了先进的传感器、电子设备、复杂的算法以及高速处理器

2.1 国家重大科研任务立项与实施进展

在科技部、国家自然科学基金委等部委的支持下，我国推动了一大批定向钻相关重大科研项目的实施，“863 计划”、“973”计划、国家自然科学基金委重大仪器、国家重点研发计划项目相继立项。

2003 年，中联重工股份有限公司联合国防科技大学等单位获批了“863 计划”项目“智能型水平定向钻进铺管设备”[45-46]，主要开展了定位与导向仪、钻进自动控制系统、智能故障诊断系统与复杂地层中施工配套设备四方面研究与研制工作，研制了水平定向钻智能定位与导向仪、气动冲击锤与回扩锤等关键模块，形成了 KSD15 型水平定向钻机，成功实现了智能纠错和智能故障诊断、自动装卸钻杆和自动锚固、自动清泥和自动钻进的功能，并在复杂

地层中有良好的导向和扩孔能力。

2011 年，徐工基础工程机械有限公司获批了“863 计划”项目“大型智能化非开挖定向钻机关键技术及产业化”，项目由该公司联合中国地质大学、东南大学等单位承担[47]，依托该项目，开展了 32～660 t 系列大型非开挖定向钻机产品的研发，研究了大型非开挖定向钻制造工艺及试验技术、大型智能化非开挖定向钻关键技术，并构建了非开挖定向钻国家标准体系。

2011 年，中国煤炭科工集团西安研究院获批了国家科技重大专项课题“中硬煤层大功率定向钻进技术与装备”[48-49]，该项目研制了国内首台最大扭矩为 12 000 N·m 大功率定向钻机，成功解决了深孔随钻测量信号稳定传输技术难题，研发了煤矿井下泥浆脉冲无线随钻测量系统和地质导向随钻测量系统，实现了顺煤层定向长钻孔由“探着打”到“看着打”、随钻测量信号由“有线传输”到“无线传输”质的改变；钻进工艺技术实现了由连续滑动定向钻进到复合定向钻进的跨越。

2017 年，中国科学院声学研究所联合哈尔滨工业大学和中国石油大学（北京）获批了国家自然科学基金重点项目“随钻测量中的非轴对称的井孔声场”[50]。该项目分析了随钻声波的传播规律，研发了深地科学钻探和资源与能源钻探测量核心技术与装备，进行“边钻边测”，实现了非常规油气储层中的地质导向钻探测量。

2018 年，获批了国家重点研发计划“深地资源勘查开采”专项——“5 000 m 智能地质钻探技术装备研发及应用”[51]，项目由中国地质科学院勘探技术研究所联合中国地质装备集团有限公司、中国地质大学（北京）、中国地质大学（武汉）等单位承担，该项目重点研发了 5 000 m 智能交流变频电驱地质岩芯钻机、地质钻探技术智能钻进控制系统、P-5000 高性能薄壁绳索取芯钻杆、小口径高效系列钻具、绿色环保冲洗液体系与废浆处理技术等深孔钻探关键技术与装备，构建了以金刚石绳索取芯工艺为主体的 5 000 m 以内地质特深孔钻探技术体系。该项目实现了钻探装备配套集成、功能操控、钻进能力的实钻验证，并创造了两项亚洲纪录。

2022 年，中国石油大学（北京）获批了国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目“钻井复杂工况井下实时智能识别系统研制”，北京工业大学、北京信息科技大学、中国石油集团工程技术研究院有限公司等高校和企业共同承担该项目。项目聚焦钻井复杂工况井下实时智能识别难题，围绕多参数集成测量结构相间干扰特性、井下复杂工况产生机制模型及各工程参数映射关系、井下复杂工况特征数据库及智能识别模型等关键科学问题开展研究，项目成果预期将形成行业领先的先进仪器，推动我国智能钻井技术的进步。

2022 年，山东大学岩土中心团队获批了国家重点研发计划“重大自然灾害防控与公共安全专项”项目“地下空间多视域立体化灾情侦测与衍生灾害应急处置关键技术与装备”。针对地下工程突水突泥、围岩垮塌及衍生灾害的应急处置，项目承担单位山东大学联合徐工基础工程机械有限公司、中国煤炭科工集团等领域内单位，研制具备地面注浆功能的超长距离钻注一体化装备，实现地下灾害的远场精准处置，为我国地下空间重大灾害的快速定向处置提供装备支撑。

在国家重大科研项目的支持下，注浆技术也得到了快速发展，开发了注–凿、冻–注–凿、钻–注等多种平行作业技术，研发了适应千米级深井注浆的高压注浆泵[52]、止浆塞[53-54]、自动制浆设备[55]。其中，以中国煤炭科学研究总院建井研究分院为代表的科研院所从事矿山注浆技术研究，在注浆材料、注浆设备和注浆工艺方面取得了一系列研究成果[56-58]，并在矿山工程和“一带一路”沿线铁路建设等领域得到了实际应用。

2.2　相关学术论文分布与热点

定向钻技术的工程应用推动了学术科研领域对该技术的探索。以“定向钻”为主题在中国知网可检索到 2 369 篇公开发表论文（至 2022 年 11 月底）。这些发表论文的研究关注点主要分布在水平定向钻和定向钻，如图 3 所示。上述文献检索的结果对应于定向钻技术当前在工程界的应用情况。近年来，随着我国基础设施建设的不断推进，市政、石油天然气管道铺设等领域所广泛应用的水平定向钻技术成为研究热点之一。

如图 4 所示，在这些发表论文中，中国石油天然气管道科学研究院有限公司的刘艳利[59-60]、中山大学的马保松[61-62]等学者阐述了定向钻领域的关键技术和研究成果。相关研究表明定向钻技术在石油钻井、市政管道铺设等领域的应用发展已较为充分。

进一步的文献检索可知，中国煤炭科工集团有限公司的刘志强团队[63-65]在定向钻注浆处置领域发表了一系列系统的、具有引领性的论文，其团队攻克了大直径钻井偏斜控制、复杂地层钻井井帮稳定控制等技术难题，成功研制出国内首套大型反井钻机、竖井掘进机和上向反井钻机，建立了机械

破岩钻井工艺体系。高岗荣[66-68]提出并研发了双高压高喷注浆技术、深井软岩巷道围岩地面 L 型定向钻孔注浆加固技术、井筒地面预注浆化学浆技术，研制了高压（35 MPa）裂隙注浆试验装置、系列深井高压注浆泵和黏土水泥浆自动搅拌装置等。

以“directional drilling（定向钻）”为关键词，在数据库 Scopus 进行文献检索，选取前 2 000 项文献检索结果作为数据开展聚类分析，可得国际上各个国家的定向钻技术研究情况。由图 5 可知，定向钻技术的研究以我国和美国研究规模最大，其中我国定向钻技术的研究规模居全球首位，同时与其他各个主要定向钻研究国家间具有较为密切的联系。此外，由图 5 还可以看出，除中美两国外，俄罗斯、海湾产油国家在定向钻技术领域也开展了大量研究，表明定向钻技术在石油领域仍具有较为广泛的应用。

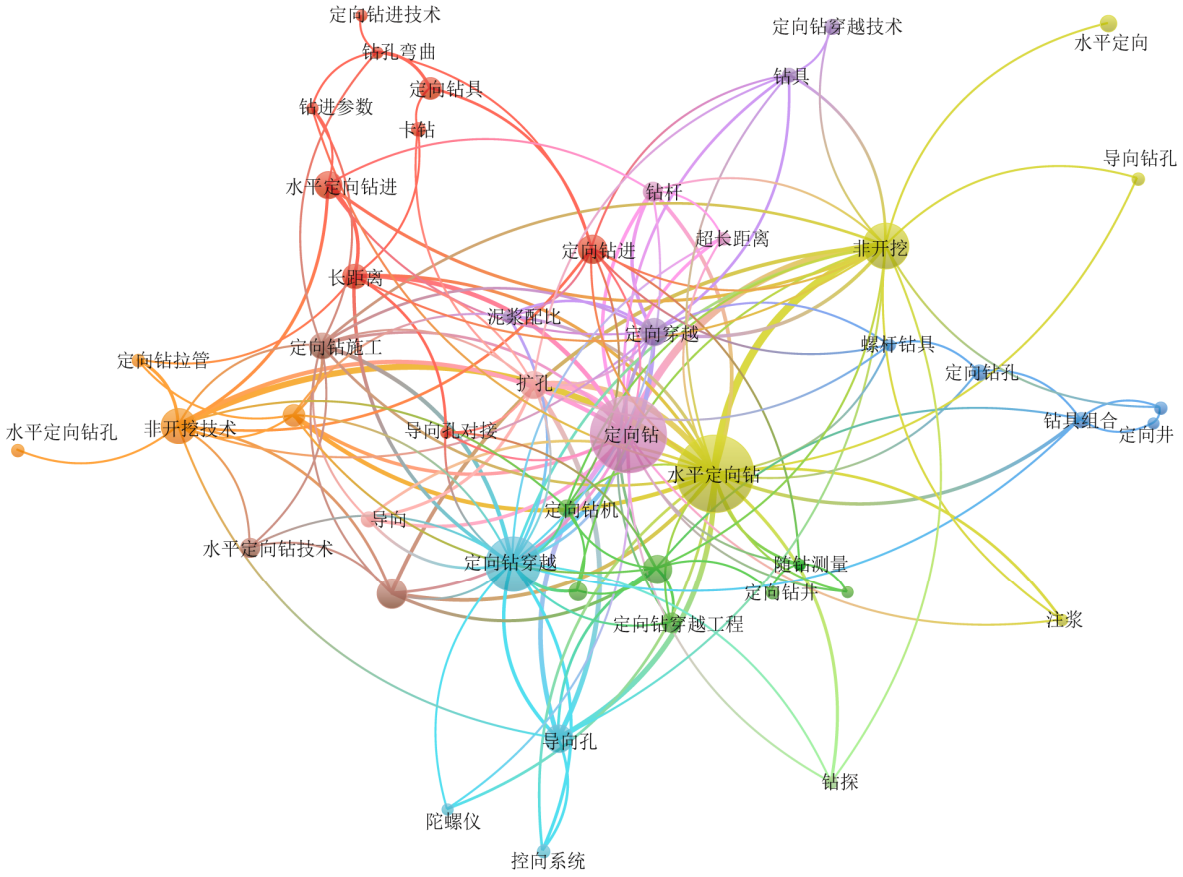


图 3　定向钻论文按研究主题分布情况

Fig.3　Distribution of papers regarding directional drilling according to research topics

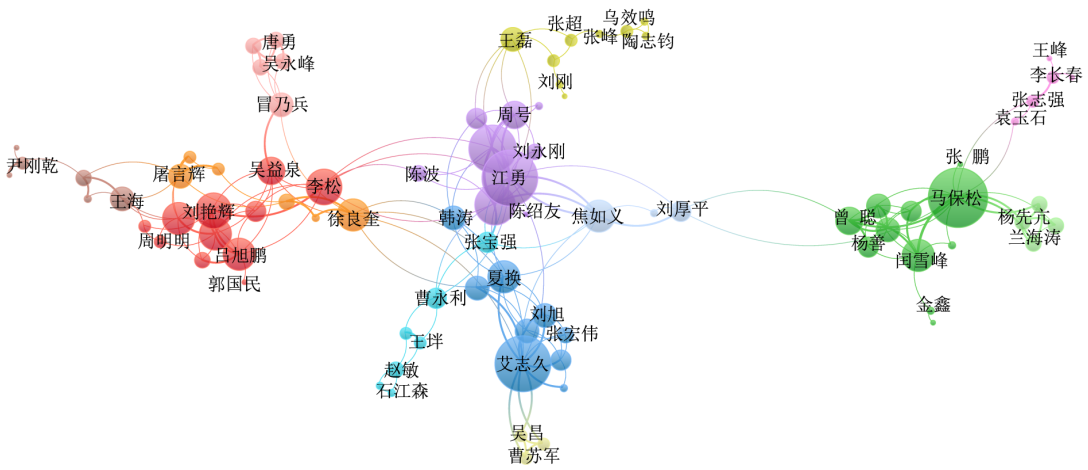


图 4　定向钻论文作者分布情况

Fig.4　Distribution of papers regarding directional drilling according to authors

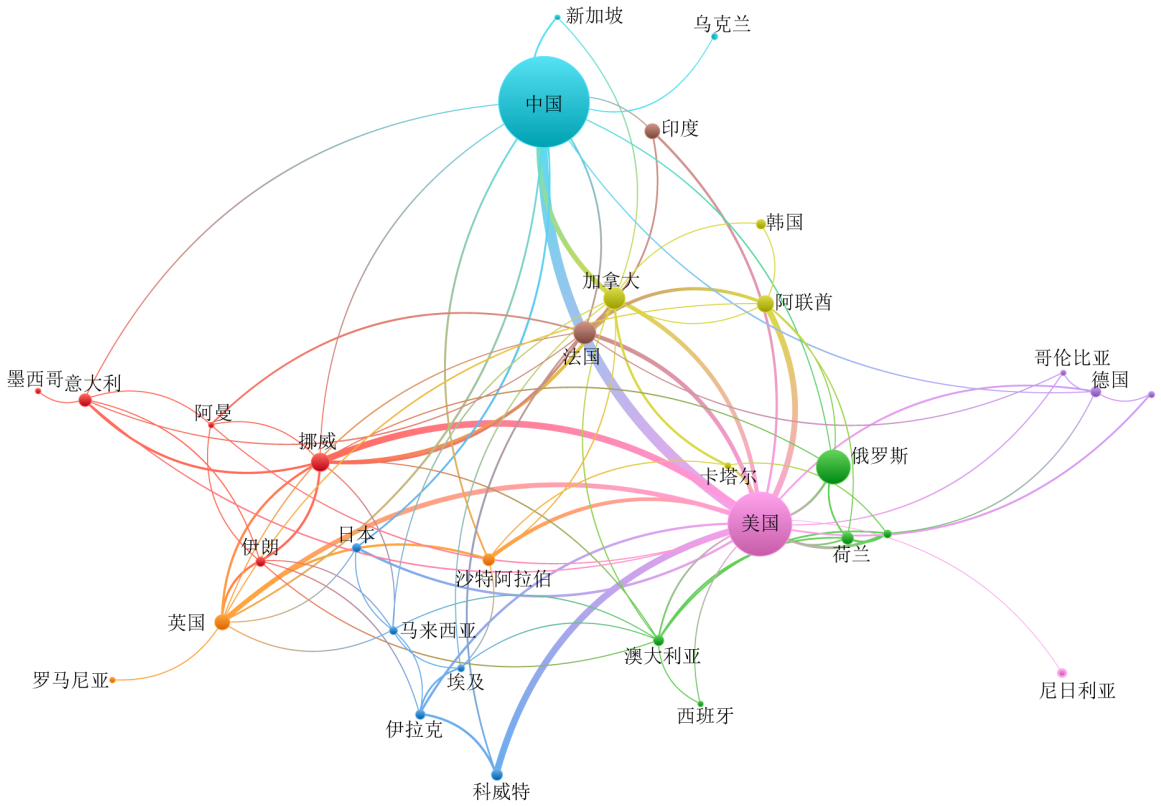


图 5　国际上开展定向钻技术的研究情况

Fig.5　International research on directional drilling technology

2.3　地面钻注一体化相关专利技术分布分析

通过 SooPAT 专利数据库对地面钻注一体化装备的授权专利情况进行检索分析。以“定向钻”为主题，检索到包括矿井、隧道等应用场景授权专利 9 800 余项，其中中煤科工集团西安研究院专利授权量最多，共计 384 项；徐工基础工程机械有限公司次之，共计 172 项。检索的“钻注一体”为主题的授权专利 167 项，来自 79 个申请单位。

专利授权时间的变化趋势如图 6 所示。由图可见，定向钻技术从 2010 年后开始增速，并逐渐进入踊跃期，表明定向钻技术越来越受到行业人员青睐。而钻注一体化技术从 2010 年后开始发展，尽管在 2018 年呈现下降趋势，但总体上看，2020 年后该技术进入快速发展时期，这一时期钻注一体化的优势得到了行业的认可。

定向钻涉及多个核心技术。通过检索“随钻”主题类专利，发现研究关注点主要分布在地面钻进或钻井（占 23.4%）、测量钻孔或钻井（占 23.0%）、传输测量信号或控制信号的装置（占 18.9%）、定向钻井（占 18.9%）、自动控制系统（占 10.9%）其他的计算机辅助设计、钻头分别占 2.6%、2.3%，如图 7 所示。

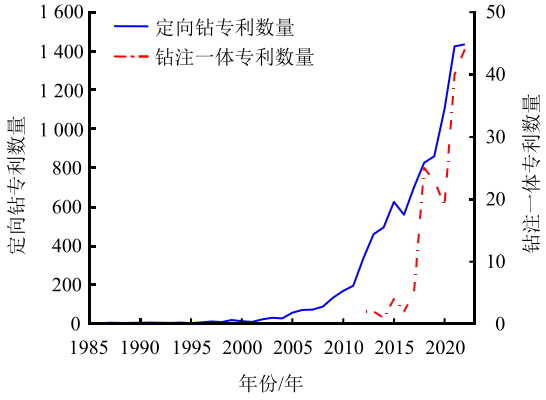


图 6　国内在地面钻注一体化方面的专利授权变化态势

Fig.6　Change of patent authorization number in integration of directional drilling and injection in China

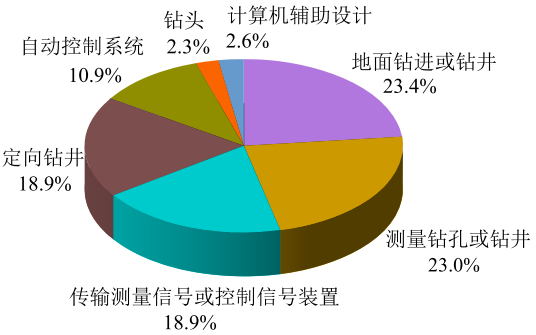


图 7　随钻专利按研究主题分布

Fig.7　Distribution of patents regarding with-drill techniques according to research topics

通过检索“快速钻进”主题类专利，发现研究关注点主要分布在钻头（占 29.9%）、钻井特殊方法或设备（占 26.4%）、钻杆或套管（占 14.4%）、钻井驱动装置（占 13.9%），其他的旋转式钻进、钻机的支撑装置、钻具附件和冲击式钻进分别占 5.5%、3.9%、3.4%和 2.6%，如图 8 所示。由此可见，当前的快速钻进技术侧重于钻头和特殊钻井方法或设备（约占 57%）。

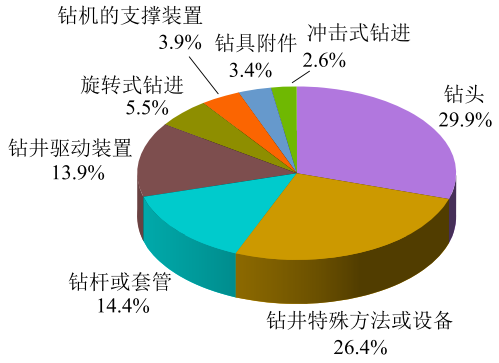


图 8 快速钻进专利按研究主题分布

Fig.8 Distribution of patents regarding fast drilling according to research topics

通过检索“精准导向”主题类专利，发现与地面钻注一体化技术相关的研究关注点主要分布在钻井方法或设备（占 56.5%），其他的测量钻孔或钻井、钻机的支撑装置和旋转式钻进分别占 15.2%、15.2%和 13.1%，如图 9 所示。由此可见，当前的精准导向技术侧重于钻井方法或设备。

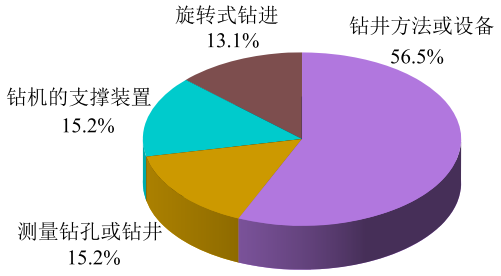


图 9 精准导向专利按研究主题分布

Fig.9 Distribution of patents regarding accurate guidance according to research topics

通过检索“注浆”主题类专利，发现研究焦点主要集中在水利工程等材料处置（占 29.0%），隧道等地下洞室、岩石等改良或保护、钻井密封或封隔、钻井的特殊方法或设备、地下或地面采矿方法、矿井或隧道的方法及装置和测量钻孔或井分别占 21.3%、21.3%、14.2%、4.7%、3.6%、3.0%和 2.9%，如图 10 所示。由此可见，当前的注浆技术侧重于材料。

通过检索“灌浆”主题类专利，发现研究焦点主要集中在建筑材料或构件现场的制备（占 23.1%），水利工程或建筑材料的处置、下部结构基础、隧道等地下洞室、架设或装配桥梁的方法或设备、钻井的特殊方法或设备、制造水泥等材料的设备或方法和作为砂浆、混凝土的有效成分，分别占 20.5%、19.9%、12.2%、11.0%、7.2%、4.4%和 1.7%，如图 11 所示。由此可见，当前的灌浆技术侧重于建筑材料或构件的现场制备。

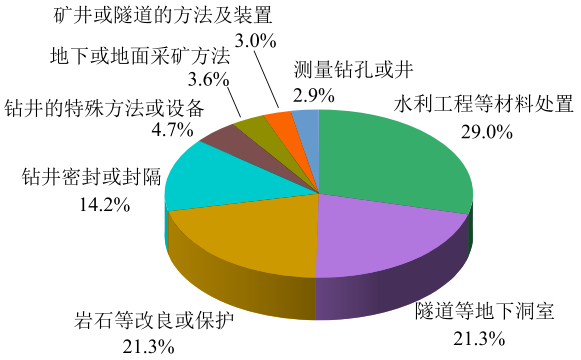


图 10 注浆专利按研究主题分布

Fig.10 Distribution of patents regarding slurry injection according to research topics

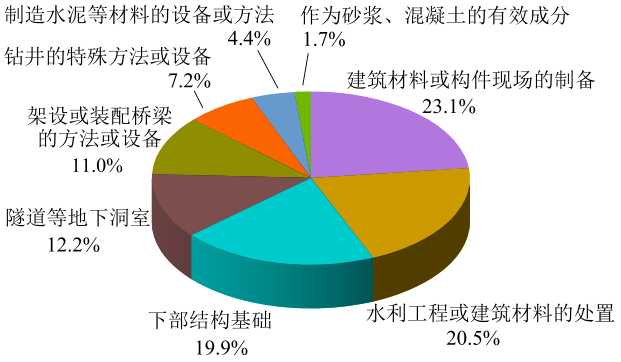


图 11 灌浆专利按研究主题分布

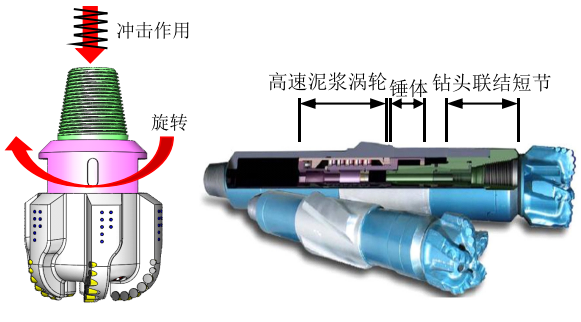
Fig.11 Distribution of patents regarding grouting according to research topics

2.4 地面钻注一体化关键技术发展现状

2.4.1 快速钻进技术

为进一步提高长距离钻进过程中的破岩效率，国内外相关学者研究了不同的钻进技术及装备，现已广泛应用于石油钻井、煤矿开采、地质勘探等领域。在快速钻进方面，复杂地层快速钻进研究主要聚焦于新型破岩方式。

在新型破岩方式方面，主要围绕轴向冲击、扭转冲击、多元复合冲击 3 种不同钻进破岩技术。轴向冲击与扭转冲击的作用模式[69]如图 12 所示。在轴向冲击方面，李思琪等[70]研制了一种新型轴向振动冲击器，可将钻井液流动过程中转化的冲击荷载传递给钻头，在砂岩、泥岩、粉砂岩等地层提速显著，不同冲击荷载作用形式（如简谐振动等）可改变岩石的损伤破坏状态，达到高效破岩的目的。田家林等[71]基于旋转冲击螺杆马达设计了一种新型旋冲提速器，经过室内试验和现场测试，其钻进速度提升了 1.57～2.65 倍。景英华等[72]将螺杆钻具与自激振荡式高速旋转冲击钻具相结合，提出了自激振荡式高速旋转冲击技术，进一步提高了钻头的转动速度和切削齿的吃入深度，最高提速可达 90.5%。两种新型钻具的应用表明：不同形式的钻具结构亦可实现冲击破岩的效果，因此，可根据不同施工场景选择合适的钻具。西南石油大学钻头研究所蔡灿等[73]研究了一种新型分离式冲击–刮切复合钻头的冲击参数和切削参数对破岩效率的影响规律，该钻具的应用可为提高破岩效率、延长钻具使用寿命提供一定的参考。在扭转冲击方面，祝效华等[74]研发了一种可依靠棘轮和涡轮机构实现扭转冲击的扭转冲击钻具，可将钻井液压力转化为脉冲扭矩，实现扭转冲击作用。该钻具结构简单，亦可在造斜和弯曲井眼中正常钻进。胜利油田钻井工艺研究院研制了一种冲锤式扭力钻具，可与普通钻头相配合，通过给 PDC 钻头施加高频、周向的冲击荷载，实现快速钻进[75]。此两种钻具的研制将扭冲破岩钻进应用到了多种施工场景，在解决钻具黏滑等方面提供了一定的技术支撑。郭元恒等[76]研究了 Torkbuster 扭转冲击钻具在元坝地区的应用，钻进速度提高了 3 倍以上，该钻具仅适用于配合 PDC 钻头使用，且成本较高，因此需加大研究力度，实现关键技术和装备的国产化，降低应用成本。



(a) 轴向冲击作用　　(b) 美国 Torkbuster 扭转冲击发生器

图 12　轴向冲击与扭转冲击作用[69]

Fig.12　Action modes of axial shock and torsional shock[69]

多元复合冲击技术是近年来发展的一种新型破岩技术，其原理如图 13 所示。柳贡惠等[77]开发了一种可同时实现轴向脉动冲击和扭转反转冲击的新型钻具，该钻具为国内较早提出的多元冲击钻具，可通过施加高幅低频的冲击荷载，实现“立体破岩”效果，为国内后续多元冲击钻具的产生和发展提供了一定的借鉴。穆总结等[78]研制了一种轴扭耦合冲击钻具，对不同的冲击参数进行了计算和分析，发现轴扭耦合钻具可集中轴向和周向两种冲击优势于一体，最大限度地发挥钻具的破岩能力，提高钻进效率。闫炎等[79]设计了一种具有轴向和周向冲击功能的旋扭复合冲击装置，并分别利用花岗岩、粉砂岩和石灰岩开展了室内试验，在复合冲击效果下岩石的破碎粒径更大，相较于常规破岩效率，钻进速率可提高 50%。此类钻具可显著提高破岩效果，但是存在钻具磨损快，使用寿命短的问题，且多数复合冲击钻具难以和定向钻进相结合。之后，彭旭[80]在结合煤矿定向钻进基础上研制了一种轴向–周向复合冲击螺杆钻具，并在现场开展了多种钻进试验，发现多元复合冲击条件下的钻进速度提高了 1.43 倍，为煤矿井下定向钻进的复合冲击螺杆研究提供了一定的借鉴意义。

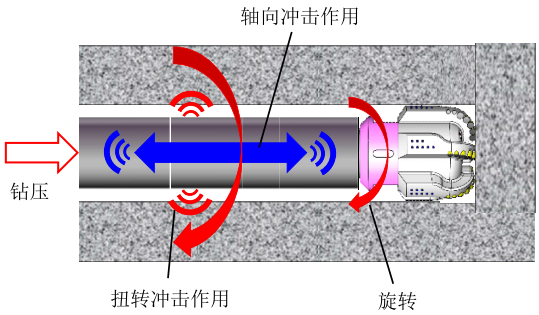


图 13　多元复合冲击模式示意图

Fig.13　Schematic diagram of multivariate composite impact mode

2.4.2　随钻感知预报技术

随钻参数反演地质信息为地质模型局部更新、钻进参数实时优化、钻头位置辅助定位、注浆参数实时优化等功能提供决策依据，以实现提高钻进速度和注浆质量、减小钻进偏差的目标。现有的随钻参数反演研究集中于工艺参数反演领域。

工艺参数反演是根据钻进过程得到的相关参数（钻速、转速、扭矩、推进力、环空压力等），通过神经网络、支持向量机、数学模型等工具，反演岩性参数、岩体结构等地质信息，以实时感知钻头处的地质环境，如图 14 所示。

国内学者在反演方法上开展了相关研究，和郑翔等[81]提出基于主成分分析法（principal component analysis，简称 PCA）和 BP 神经网络的岩性智能感知方法，基于随钻参数对理论模型进行训练，减少了模型计算量，提升岩性智预测的准确率。王琦等[82]基于支持向量机（support vector basis，简称 SVM）建立了随钻参数与单轴抗压强度（uniaxial compressive strength，简称 UCS）的关系模型，实现对岩体 UCS 的有效预测。冯志昊等[83]使用 SVM 模型与 XGBoost 模型对岩石单轴抗压强度进行预测，并对比 SVM 模型与 XGBoost 模型在不同参数数量条件下的预测效果。Zhao 等[84]基于 Python 机器学习工具包（Scikit-learn），采用网格搜索和交叉验证的方法，选用 10 种监督机器学习算法训练智能围岩分类模型，并对 10 种机器学习算法进行对比。不同研究人员使用了 BP 神经网络、支持向量机、机器学习算法等方法，研究结果表明，机器学习算法相较于其他方法在精确度、速度、鲁棒性等方面的综合性能上更具有优势。

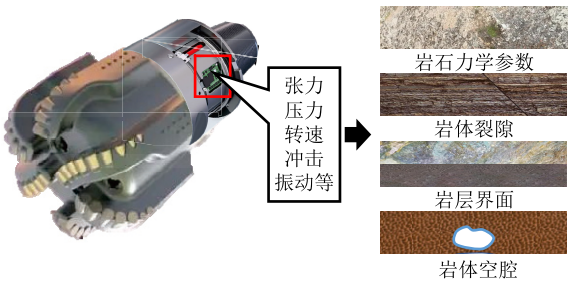


图 14 随钻感知预报技术

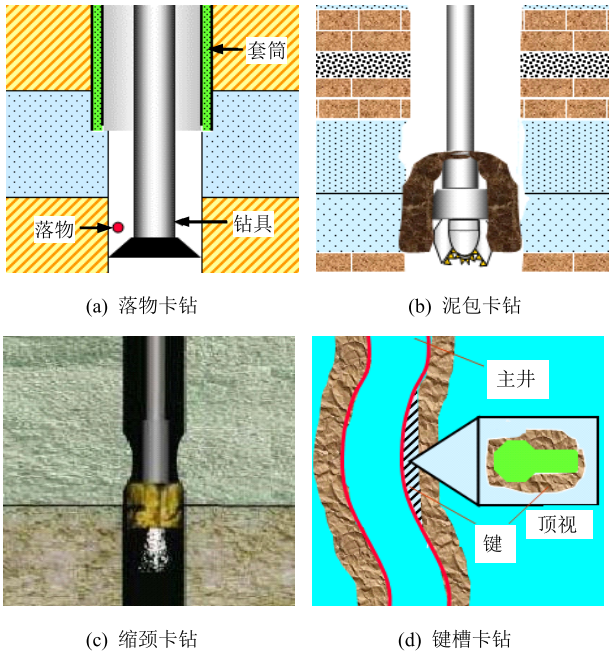
Fig.14 With-drill sensing and prediction technology

国内学者在岩性参数反演与预测岩性参数与岩体结构方面做了相关研究，周泽洪等[85]基于钻机的转速、扭矩、钻进压力，构建岩石单轴抗压强度预测模型，实现岩石抗压强度预测。Wang 等[86]建立了基于钻井参数的岩石力学参数预测模型，通过 Hoek-Brown 破坏准则预测岩石三轴抗压强度（triaxial compressive strength，简称 TCS）。随钻工艺参数也可用于反演岩体结构信息，实现空洞、断层、裂隙、岩层界面等多种岩体结构识别。国内开展的相关研究较少，Liu 等[87]基于钻井参数的岩石界面和类别，使用 BP 神经网络和支持向量机等方法，对岩层界面和岩石类别进行智能识别。

国内学者在随钻参数反演岩石力学参数和岩体结构开展了相关的研究，但基于随钻参数预测多种岩石力学参数（岩石单轴抗压强度、三轴抗压强度、抗拉强度、孔隙压力、内聚力、摩擦角等）与岩体结构（裂隙、空腔、岩层界面等）方面的研究较少。

2.4.3 卡钻预测/解除技术

钻进过程中往往伴随着事故的发生，如卡钻、井漏、钻具断落等。其中，卡钻是钻进过程中最常见的事故之一。卡钻是指在钻进过程中，由于各种原因导致钻具陷入井内无法活动的现象，其原因与分类[88]如图 15 所示。施工卡钻事故受地质因素、钻井工艺因素和物理化学因素等多种因素影响，可发生在任何地区、地层和井段中[89-90]。



(a) 落物卡钻 (b) 泥包卡钻

(c) 缩颈卡钻 (d) 键槽卡钻

图 15 卡钻事故主要模式及原因分类[88]

Fig.15 Classification for main modes and causes for drill sticking accidents[88]

卡钻事故一旦发生不但会延长钻进周期和增加工程费用，处理过程中还容易产生井壁坍塌和井漏等并发性地下复杂情况及事故，造成巨额经济损失[91-93]。虽然目前国内外对卡钻事故做了大量地研究分析工作，针对不同的卡钻类别、钻进轨迹、地域性和发生情况特性，对卡钻的发生原因进行了研究，提出了众多预防、判断和处置的方法。但是由于卡钻事故的复杂性和突发性，现场处置仍主要依赖于操作者经验。对此，卡钻事故的准确预测和高效准确处理仍然是研究学者需要进一步研究的难题。

现阶段，各国研究人员在卡钻发生机制、类别预测和处置方法等方面的都取得了一定的研究成果。然而由于不同地域地质情况的差异性和井下情况的复杂性，现有的分析方法所得到的结果仍不够理想。为保证地面钻注过程的高效性和稳定性，卡

钻事故预测及其解决方法的问题仍需进一步解决。目前国内外卡钻事故地预测与解决大部分聚焦在石油工程钻井领域。

1989 年，美国谢夫隆公司对墨西哥湾的 131 起卡钻事故资料数据进行了整合并进行了多元统计分析[94]，建立了卡钻预测模型，通过分析卡钻时的作业情况及井眼条件，将卡钻发生的区域分为黏吸卡钻区域、机械卡钻区域和未发生卡钻区域，并得到该方法对黏吸卡钻和机械卡钻的预测准确率分别为 81%和 87%，但是由于资料的地域性，该系统的普适性还有待进一步研究[95]。2006 年，Murillo 等[96]提出利用神经网络的方法来识别钻井过程中能够反映卡钻复杂情况发生的异常钻井参数，针对墨西哥湾地区井的卡钻复杂情况，该方法已实现成功应用。但由于神经网络的训练依赖于地域性，钻井过程以及深度等其他影响因素较多，其适用性有待进一步研究[97]。

2022 年，中国石油有限公司的张万栋等[98]提出了两种卡钻检测方法，分别是基于分类预测方法和基于时间序列信息的异常检测方法，文中提出的方法具有较高的准确率，但研究仍存在一定的局限性，其接受者操作特性曲线（receiver operating characteristic curve，简称 ROC）围成的面积仍有一定的提升空间，此外由于真实钻井平台卡钻事故监测数据是一个正负样本不平衡的数据，从此角度出发，研究平衡样本的算法,卡钻事故预测模型的性能仍需要进一步提升。2021 年，北京信息科技大学的富浩等[99]提出了基于井下参数的 PCA-SVM 卡钻预测方法，但该模型只使用了一口井的测量数据，只能对井眼不清洁引起的卡钻类型有效。2022 年，长江大学的李紫璇等[100]采用钻井模型与机器学习相耦合的方法，提出了基于录井数据的实时卡钻预警技术。该技术模型更适应当前区块，能够提高卡钻事故预测结果。但该模型中参数条件对于模型的准确性有较大影响，且由于试验是在模拟直井的设施上进行的，对于其他类型的井况的适用情况有待进一步论证。2021 年西安石油大学的刘海龙等[101]提出了一种基于自适应遗传算法的 BP 神经网络卡钻事故预测模型，模型的稳定性和预测能力较好，但其运用的神经网络模型的训练建立在局部地区的钻井历史数据，该模型和方法对于不同地区不同井况的适用性有待进一步验证，且该模型有易陷入局部极小值而导致模型失效的风险，模型的稳定性有待进一步提高。

在卡钻的预测与解除方面，国内外目前开展的研究主要针对特定地区和特殊井型，通过分析案例井钻井设计和钻进情况，利用经验判断卡钻类型，而后实施解卡操作[102]。对于卡钻事故的处理，可以根据卡钻事故的不同类型，分为事发前预防性措施和事发后处置性措施两方面进行考虑[103-106]，目前事发前预防性措施及采用人工智能方法进行卡钻预测已成为当前发展方向。

2.4.4 钻进导向技术

20 世纪以来，现代导向钻井技术不断发展，从早期的转盘经验钻井技术，到 20 世纪 50 年代井底动力经验钻探技术，再到滑动导向钻井技术，随着随钻测量技术的进步，在钻井的过程中装备已经可以对方位角、井斜角、井体本身的几何轨迹参数进行设置，通过自主调控钻头的方位来完成钻井[107-109]。但常用的滑动导向钻井技术，极易出现卡钻等问题，其原因在于在滑动钻进过程中，钻杆不发生转动，无法满足复杂井的开发需要，导致钻井的速度降低、成本增加。于是，旋转导向钻井技术应运而生，该技术可以有效地控制钻井工具的钻头按照预设的三维井眼轨迹进行寻踪钻进。该技术的应用使得钻井过程中不需频繁下钻，且钻井方向可实时调节，三维钻井轨迹可智能化控制，具有高效率、高精度、易于实时控制、造斜率高、井眼轨迹平滑、井眼质量好、可在艰难复杂环境中工作等显著优势[110-112]。

旋转导向钻井技术自 20 世纪末研发成功以来[113-114]，因其显著的技术优势在地面油气勘探开发中应用广泛，有效缩短了建井周期、降低了建井成本，已成为国外主流的钻井技术[115-117]。国外许多石油钻探公司长期以来都倾注了大量人力和财力来对其进行研究，旨在优先掌握这一先进钻井技术。20 世纪末这一技术分别被 BakerHughes、斯伦贝谢和哈里伯顿 3 家公司所掌握，代表产品分别是 Auto-Trak、Power Drive 和 Geo-Pilot 系统[118-120]。

由 BakerHughes 研制的 Auto-Trak 系统是属于静态偏置推靠式的旋转导向钻井工具，主要由不旋转外筒、导向执行机构和导向心轴等组成。通过控制液压配流系统来控制导向执行机构沿导向心轴周向均匀分布的 3 个支撑翼肋分别对井壁施加不同液压力，根据力的合成和作用力与反作用力的关系，可知导向心轴会受到井壁的反作用力，促使导向心轴发生偏置，从而改变钻井工具钻头的方向。Auto-Trak 系统具有集成化设计，结构紧凑，能够实现信息的双向实时通讯，具有定位精度高等优势。

Auto-Trak 系统的缺陷是导向执行机构密封性差、钻井液易泄露，井眼质量差、存在螺旋井眼。

由斯伦贝谢研制的 Power Drive 系统属于动态偏置式旋转导向钻井系统，其外壳随钻杆一起旋转，其结构[121]如图 16 所示。导向执行机构在旋转外壳内部，与井壁不产生直接接触。钻井工作中，摩擦阻力更小，钻进速度更快，能够更快地从孔中拔出，具有更高的工作效率。Power Drive 系统具有能精确地控制井眼轨迹，井眼光滑、清洁度好，具有较高的造斜率和钻井效率，能最大程度减小压差、卡钻事故，耐高温性能好等优势。

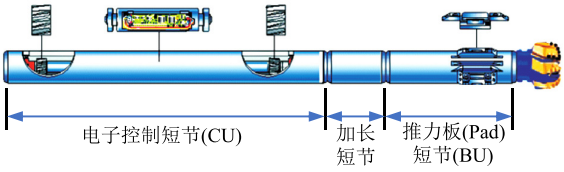


图 16 PowerDrive Orbit 结构示意图[121]
Fig.16 Schematic diagram of PowerDrive Orbit structure[121]

Power Drive 系统的缺陷是存在螺旋井眼，控制系统精度和响应速度较差。斯伦贝谢公司基于 Power Drive Xtra 系统推出多种型号，Power Drive Orbit 系统是一款动态推靠式旋转导向钻井系统[121]，Power Drive ICE RSS 系统采用了特殊材料制成的耐高温芯片，是斯伦贝谢公司研发的第一款能够在 200 °C 高温环境下稳定工作的旋转导向钻井系统[122]。如图 17 所示，Power Drive Xceed 系统[95]在分类上属于动态偏置指向式旋转导向钻井系统，PowerDrive Archer 系统是一混合式旋转导向系统，其导向执行机构在钻井工具内部，结合了推靠式和指向式钻进系统的导向功能和优点，可以实现较高的造斜率导向钻井。

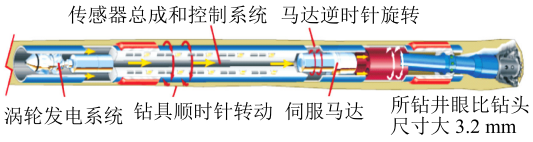


图 17 PowerDrive Xceed 结构示意图[95]
Fig.17 Schematic diagram of PowerDrive Xceed structure[95]

由哈里伯顿公司研制的静态偏置指向式结构的 Geo-Pilot 旋转导向钻井工具，为第一代闭环控制“钻头”导向工具，该系列系统由心轴、不旋转外筒、内外偏心环、离合器、减速器、联轴节等组成，开启导向时离合器工作，心轴驱动内外偏心环转动，使之按预设偏置值进行组合调整，进而使得心轴发生偏置，达到定向钻井的目的。Geo-Pilot 系统的耐温耐压性能表现最为出众，可实时调整倾斜角度，更加适应井下高温高压及地层多变的环境。Geo-Pilot 系统还具有工作时不用频繁的启停、工作效率高等优势，同时该系统钻压传递效率高，能提供持续稳定的造斜率、形成的井眼质量和井眼轨迹控制精确性高。此外，该技术在旋转外筒上有 3 个随外筒逆向旋转的支撑臂，降低了导向钻井阻力，使得钻具振动较小、稳定性好。

Geo-Pilot 系统的缺陷是没有柔性短接，刚性较大，卡钻的发生风险较大，同时岩屑容易造成支撑臂不能归回原位，增大了起钻阻力。2018 年，哈里伯顿公司推出了一种智能旋转导向工具 iCruise，该工具机械转速可达 400 r/min，造斜能力高达 18°/30 m。该工具拥有较为先进的传感器，并配备了高性能处理器[123]，可实现精确的导向控制和复杂的井下计算[124-125]。

自 20 世纪末，国际上对该项技术进行较为深入的研究，并取得了进步，部分国际公司逐渐掌握并在工程应用领域垄断了商业技术服务，我国在本领域技术开发面临巨大难题。2001 年起，在国家“863”项目和中国石化集团牵头下，胜利石油管理局与西安石油大学合作自主研发了一种可调节推靠式旋转导向钻井系统 MRSS[126]。2007 年，西安石油大学与中国海洋石油集团有限公司（简称中国海油）合作，改善了旋转导向三维轨迹控制钻井技术，成功研发泥浆动力可控偏心器[127]。2013 年，中石油川庆钻探工程有限公司成功开展旋转导向钻井系统样机现场试验[128]。同年，李远志等[129]提出了一种基于行星轮系的静态指向式导向钻井，并于 2015 年，基于圆柱螺线法的偏置机构控制算法，对样机进行了试验研究。2014 年，中国海油成功自主研发我国首套旋转导向钻井与随钻测井系统（简称“璇玑”系统）[130]。在我国海上作业中，旋转导向钻井系统造斜率达到 12.0°/30 m[131]。2022 年 4 月 20 日中国海油成功建设我国首条旋转导向钻井与随钻测井“璇玑”系统智能化生产线[132]，标志着由我国自主研发的“璇玑”系统正式迈入大规模产业化新阶段。张光伟[133]、尹福来[134]等提出了基于内偏心环、外偏心环和旋转外套组成的新型指向式旋转导向钻井工具的结构组成，提出了一种新的导向调节方法，先进行新型指向式旋转导向钻井工具角的调节，通过控制内偏心环的转动角度改变导向轴的偏置状态，进

而完成该钻井工具角的调节。此外，在本领域，斯伦贝谢公司研发了造斜率达到 16.0°/30 m 的旋转导向系统。综合来讲，国内导向钻井技术在研究人员不断地克难攻坚下已有了多项突破，但国内目前仍主要采用滑动导向钻井技术。旋转导向钻井技术目前由国外数家企业垄断，我国相关技术与设备的研究及应用还处于初级阶段。未来我国旋转导向技术的发展方向大体可总结为以下几方面：完善钻井系统和控制理论，推进超高造斜率旋转导向系统研发，以及开发新型钻井工具和技术。

2.4.5 超长距离注浆材料

地面注浆技术应用材料相比于传统材料亦存在其特殊要求。现有地表钻注浆材通常以水泥为基体，通过添加粉煤灰、水玻璃、矿粉、黏土等无机材料实现注浆材料高流动、凝结时间可控等性能，同时具有成本较低等优势，其效果如图 18 所示，曾长期应用于帷幕注浆工程[135-136]。

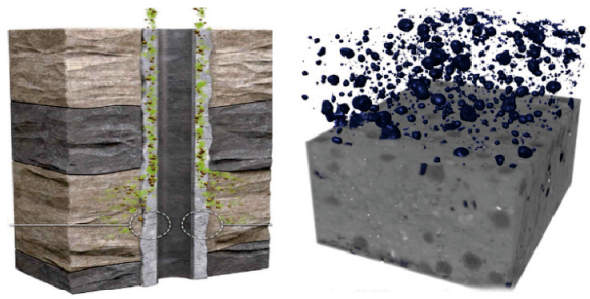


图 18　地面注浆材料界面融合黏接与自适应膨胀动态充填
Fig.18　Interface fusion bonding and adaptive expansion dynamic filling of ground grouting materials

Džunuzovic 等[137]研究了硫酸钠对粉煤灰（fly ash，简称 FA）和高炉炉渣（blast furnace slag，简称 BFS）复合材料碱激发效率影响；Puligilla 等[138]研究了粉煤灰–矿渣复合材料中游离的溶解钙离子对材料水化过程的影响；Kürklü 等[139]利用恒定的氢氧化钠摩尔浓度和恒定的固化温度，研发了一种适用于高温的地聚合物砂浆；Marjanovi 等[140]研究了碱激发材料对粉煤灰与高炉炉渣混合物抗压及抗弯性能的影响，并分析了材料的微观形貌特征；李森森[141]针对富水地层对水泥基材料设计了正交试验；赵献辉等[142]研究了以碱渣、硅酸钠和粉煤灰为主体的注浆材料，具有低收缩、高流动的特性。

以上研究在矿山、水利领域帷幕注浆工程中发挥了巨大作用，但针对超长距离钻注工艺浆液输送距离长的特点[143]，现有浆液存在以下三大问题：①超长距离浆液输送对浆液本身的流动性和强度提出了更高的要求；②针对不同类型地层调节浆液黏度、强度、动水抗分散等性能参数；③千米级超长距离泵送注浆材料扩散难以控制，对浆液的凝结时间控制提出了更高的要求[144-147]。

当前应用的注浆材料主要有以下 9 项：

（1）普通硅酸盐水泥浆液

超长钻注过程中所使用的注浆材料一般为水泥基材料，具有获取来源广、环境污染低、强度高等优势，是最常用的建筑材料之一，适用于地层的加固处理。通常为减少成本和提升浆液的稳定性，添加稳定剂、减水剂等掺料对水泥材料进行改性[148]，以满足工程需求。

（2）超细水泥浆液

普通水泥材料通常最大粒径可达 0.08 mm，难以注入微小节理、裂隙发育的地层中，为改善水泥浆液的可注性，将水泥磨细至几微米，但磨细水泥后由于颗粒粒径小，水化速率增快，初凝时间大幅降低（相比普通水泥减少数小时），在超长钻注施工时具有一定局限性[147]。

（3）水泥–粉煤灰浆液

粉煤灰是目前超长钻注施工过程中常用的固废成分之一，是燃煤副产品之一，由于其本身具有火山灰效应，掺加在水泥材料中具有一定的水化作用，并且水泥基材料掺加一定量粉煤灰后，具有较好的可注性和渗透性。但是由于材料本身活性较低，通常需要同时掺加一定碱激发材料以提升固结体强度[148]。

（4）水泥–黏土浆液

水泥–黏土浆液价格便宜、流动性好适用于超长钻注工程。黏土广泛分布在地层中，成分通常为高岭石、伊利石、蒙脱石，来源广泛，赋存在地层中一般作为隔水带，成本低，掺入水泥中，提升了水泥的抗渗性能和流动性，但由于黏土材料本身力学强度低，降低了水泥本身强度[149]。水泥–黏土浆液是目前用于地面钻注工程使用最广泛的浆液之一，有时也加入粉煤灰和矿粉等材料进一步改进材料性能。

（5）水泥–水玻璃浆液

水泥–水玻璃双液注浆材料具有凝结时间短、抗压强度大的优势，在软弱地层堵水施工被广泛应用[150]。水泥–水玻璃浆液生成产物水化硅酸钙抗压强度高，可以根据工程需要调节其凝结时间[147]。

（6）水泥–黏土–粉煤灰浆液

将水泥、黏土、粉煤灰这 3 种组分按照一定的配比加入水中，形成水泥–粉煤灰–黏土复合浆液，

既具有纯水泥浆液的强度高的优势，也具有较好的稳定性与流动性[151]。粉煤灰由于水泥水化所产生的氢氧化钙发生二次水化反应，同时黏土表面吸附了胶态氧化物，可与氢氧化钙发生反应，但反应速率较慢。

（7）水泥–粉煤灰–水玻璃浆液

为了改善水泥浆液的流动性，将水泥浆液中添加粉煤灰与水玻璃，形成水泥–粉煤灰–水玻璃浆液。其中，粉煤灰主要用于提升浆液可注性，水玻璃可缩短浆液凝固时间。通过调节水泥、粉煤灰和水玻璃 3 种材料掺量比，可提升结石体强度以满足不同的工程需求[144]。

（8）水泥–黏土–矿渣粉浆液

传统水泥浆液具有易析水、结石效果差等问题，考虑在水泥浆液中掺入黏土、矿渣粉，形成了一种低成本的符合注浆材料[143]。矿渣粉是工业废料的一种，属于环保材料，具有抗压性高、耐酸、耐碱、耐高温等优点，可降低水泥浆液成本，但矿渣活性较差，可通过添加增强剂以提升浆材力学性能。

（9）粉煤灰–偏高岭土水泥基浆液

粉煤灰–偏高岭土掺入水泥后，辅以助剂，可提升浆材物理性能，浆液的流动性随着粉煤灰掺量的增加呈现出先增后减的趋势，偏高岭土掺量的增加会降低浆材的流动性，但会提高浆液的结石率与黏度[152]。不同注浆材料适用性见表 4。

表 4 超长钻注材料特性

Table 4 Characteristics of materials used in ultra-long directional drilling and grouting

材料	优势	劣势	适用环境
普通硅酸盐水泥	强度高	稳定性较差	适用于一般地层加固
超细水泥	抗离析效果好	成本高、凝结时间快	适用于空隙小地层
水泥–粉煤灰	成本低、固废资源化利用	粉煤灰活性低	适用于岩溶等大型空腔充填
水泥–黏土	阻水效果好、成本低	强度差	适用于帷幕阻水
水泥–水玻璃	控制凝结时间	强度相对纯水泥浆差	适用于出水量较大地层
水泥–黏土–粉煤灰	流动性好、成本低	反应速率慢	适用于帷幕阻水
水泥–粉煤灰–水玻璃	强度相对水泥–水玻璃材料高，凝结时间可控	强度起效前期强度低	适用于出水量较大地层
水泥–黏土–矿渣粉	成本低、耐酸碱、污染低	强度低	适用于帷幕阻水
水泥–粉煤灰–偏高岭土	流动性高、析水率低	流动性差	适用于地层加固

2.4.6 地面定向注浆技术

传统的直孔注浆技术加固域无法一次性覆盖施工区域，L 型定向超长钻孔注浆技术应运而生[153]，即通过定向钻技术沿目标施工方向钻成超远注浆孔，结合多级套管将注浆管路输送到目标地层开展超远距离预注浆加固作业。地面定向注浆相对于洞内掌子面注浆来说，可以沿施工轴向超前、长距离预注浆，大大节约了施工工期，同时避免了洞内外复杂施工环境的障碍，大大提升了施工效率，有着明显的优势。

（1）地面定向注浆装备与技术

地面定向注浆钻注装备有立井定向钻注装备、水平定向钻注装备、斜井定向钻注装备等，其中立井定向钻注装备的性能与应用领域最具代表性，在注浆压力、钻深等方面都处于领先地位。目前，立井定向钻注装备已达最高 50 MPa 注浆压力、最深 3 000 m 钻深。在注浆装备方面，以 BQ 系列高压活塞式注浆泵应用最为广泛，其大流量、高压力满足超远定向注浆的基本要求[154]，配合手动档位或变频无极调控的注浆控制方式可以实现定向注浆各阶段的需求。

（2）定向注浆控制方法

为保证远距离注浆时浆液在目标区域的有效扩散距离，注浆压力应尽可能提高。为防止因浆液压力过高造成目标区域地应力过大、地面抬升超限、掌子面破坏等问题，注浆施工之前设置地表、掌子面监测系统，监测并记录掌子面、地表、地层的位移、应力变化等注浆监测信息。如图 19 所示，在整个注浆过程中，通过分析注浆监测信息及时调整注浆压力、浆液类型及配比等注浆控制参数[155]。

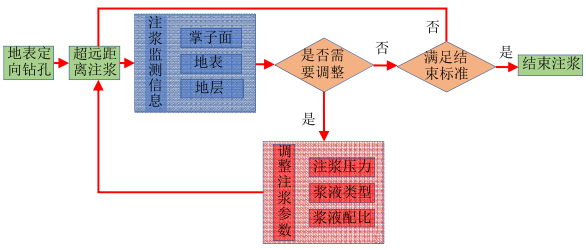


图 19 定向注浆控制措施示意

Fig.19 Schematic diagram of directional grouting control measures

（3）矿山领域地面钻注技术

地面定向注浆是矿山领域突涌水灾害治理工程的重要施工方法，以立井式定向钻注装备为主，在巷道开挖、竖井建设之前，在地面利用立井钻机对巷道、顶底板、竖井围岩的含水薄弱区进行预注浆加固，形成隔水帷幕加固圈，再进行开挖或建设[156]。如，塔山煤矿巷道掘进过程中陷落柱发生突水事故，利用定向注浆技术对目标区域进行预注浆加固治

理，最终实现有效封堵[154]。潘集二矿联络巷底板发生重大突水事故，且工作面顶部存在大面积湖泊，利用地面定向注浆技术在选定位置地面施工一个定向钻孔灌注浆液骨料，最终对破碎地层完成了成功封堵[153]。

（4）交通领域地面钻注技术

在交通隧道的突水突泥灾害防治工程中，由于在隧道内注浆加固断层、破碎带时作业空间狭窄，浆液凝固时间长，洞内施工周期长，不具备洞内施工条件。例如，厦门海底隧道洞内施工条件恶劣，选择在地面长距离注浆[157-158]；沈阳地铁亦面临类似挑战，洞内没有施工条件，且上方既有建筑物限制直接注浆，因此开展了地面远距离注浆[159]；广州地铁某砂土覆盖型岩溶地层交界面处，采用地面注浆填充的方式施工[160]；高黎贡山隧道 2 号洞水患灾害处置工作，采用地面预注浆技术，对井筒穿越的含水地层进行封堵加固治理[161]。

2.4.7 分段水力压裂技术

进入 21 世纪，水力压裂技术在油气增产领域实现了大规模应用。在地面设置高压泵站，通过钻孔向特定岩层注入大量高黏度压裂液使岩层出现高压环境，在液压作用下岩体破碎并产生裂隙。通过分段压裂技术可以实现对井底压力、岩体破坏和压裂液扩散的准确控制[162]。将水力压裂分段技术与长距离分段注浆相结合具有重要的意义。

目前，我国在水力压裂工程装备研发方面取得了显著进展。中国科学院地质力学研究所自主研发的水压致裂地应力测试系统可开展 3 000 m 以深原位地应力测试[163]。中国矿业大学研发的煤矿井下高瓦斯突出煤层脉动定向水力压裂卸压增透技术及装备揭示了高压脉动水力压裂机制，提出了高压物理密封和化学密封相结合的新思路，研究成果在铁煤集团大兴矿、晋煤集团成庄矿、通化煤业集团松树矿等矿区进行推广应用[164-165]。

在水力压裂实施工艺方面，分段压裂可以通过化学隔离、水力喷砂、机械封隔与限流压裂等技术实现。山西阳泉新景煤矿采用“定向喷砂射孔+分段加砂压裂”复合工艺技术[166]，成功提高了压裂后煤层透气性，为碎软煤层区域瓦斯治理提供技术借鉴。西南油气田高石梯−磨溪区块采用“裸眼封隔器分段+段内纤维暂堵转向分段”方案，提高了压裂体积与压裂效果[167]。陕西彬长矿区大佛寺矿 4 号煤层采用硬煤层顺层长钻孔分段压裂技术，钻孔分段压裂呈现“裂缝扩张延伸−裂隙扩展连通−裂缝扩张延伸”增透变化的特点[168]。夏永学等[169]采用超长水平孔分段压裂防冲技术，使煤层上方高位厚硬顶板内形成众多网状裂缝，压裂区域高能微震事件减少、低能事件增加，实现了工作面安全回采，防冲卸压效果显著。

水力压裂过程极具隐蔽性，作为技术的重要支撑，其理论研究更具挑战性。李明等[170]基于 PHF-LSM 模型研究了水力压裂过程中岩体力学性质和初始应力分布的影响，认为顺序压裂与两步压裂可以带来更高的起裂压力和更大的裂缝总面积。Krzaczek 等[171]采用 DEM-CFD 相结合的方法，研究了岩石大孔隙中含气量对水力压裂过程的影响，再现高压流体注入后岩石破裂的主要特征。Yang 等[172]通过考虑压裂液滤失效应的渗流−应力耦合压裂模型，解决了扩展有限元交叉裂缝处理难题。相关理论模型的研究，为水力压裂分段技术的性能优化与提升奠定了重要的理论基础。

2.5　地面钻注一体化技术的实践探索情况

煤炭科学研究总院北京建井研究所成立以来，在地面钻注技术和推广应用方面，取得了大量的科研成果[173-175]。其中在高精度定向钻进技术方面钻孔偏斜率≤3%，偏斜值≤2 m；在孔内分段止浆技术方面止浆塞耐压为 30 MPa，分段长度为 10～60 m；在高压大流量灌浆技术方面，灌浆压力是地下静水压力的 2～3 倍，灌浆泵量为 60～250 L/min，浆液扩散距离为 8～12 m。其研究成果在滇中引水香炉山隧洞等取得了应用[176]，为滇中引水工程建设保驾护航。

安徽省煤田地质局水文勘探队为解决湖南省常德青峰煤矿 4 号井三水平二采区的煤层顶板突水问题，采用地面钻空注浆法中的下行压入法进行注浆堵水[177]；山东黄金矿业（莱州）有限公司三山岛金矿为治理竖井掘进至千米以下时出现的含水裂隙带的突涌水问题[178]，采用井下工作面下行前进式注浆方法进行堵水；大柳塔煤矿附近采空区煤矿巷道垮塌严重且封闭，导致无法通过井下采取灭火措施，为解决遗煤自燃灭火的问题，采用地面打钻、干法灌注粗细骨料、渗入式注浆与静压注浆相结合的方式构筑密闭墙[179]。

3　地面钻注一体化待突破关键技术

定向钻注技术通过地面注浆，在地下空间灾害处置领域具有广泛的应用前景。依托定向钻注技术的地面注浆需具备“预报、钻进、注浆、检测”四方面的功能。预报功能通过在钻头位置安装探测系统，在定向钻进的同时探测不良地质段，明确需要开展

治理的区域；钻进是其他功能实现的基础，通过新型破岩方式的应用、卡钻问题的预报及解决、精确测斜和导向，实现超长距离的快速钻进和灾害治理区域的精准中靶；注浆功能在预报及钻进的基础上开展，通过在地面上远距离对地下灾害区域进行注浆，实现不良地质段的改性和处置；检测功能服务于注浆，通过搭载的检测设备，实现注浆效果的实时评价，从而有效指导注浆参数、注浆工艺的调整优化，上述技术体系的架构如图 20 所示。

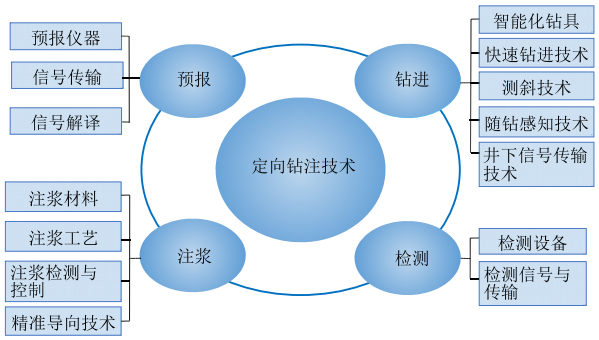


图 20 定向钻注四大技术体系

Fig.20 Four major techniques of directional drilling and grouting

3.1 智能化高效钻具组合

智能化高效钻具组合涵盖智能钻杆、智能钻机等智能钻进设备及长距离信息传输系统等。通过建立地面与地下钻孔信息的传输通道，使用钻孔信息采集系统对钻进过程中的钻孔情况进行实时探测、感知和数据传输。通过反馈的数据，进一步开展智能分析和决策，进而对钻进装备下发执行命令，实现钻进过程的智能化控制[180-181]。

高效钻具组合的智能化是实现智能钻注一体化的重要一环，钻孔数据采集技术及装备、长距离数据传输系统及装备、智能决策调控系统等将是当前研究的重点，目前已研发出了智能钻机、智能钻头、钻柱、智能导向、防黏滑钻具以及钻孔信息采集和传输、远程智能决策系统等。因此，围绕大数据、物联网、深度学习、机器视觉等技术，高效分析和解译钻进过程中的海量数据，提升人机交互和决策能力，降低施工成本将是未来重要的研究方向[182-184]。

3.2 复杂地层快速钻进

在轴向冲击钻进方面，轴向冲击钻进技术通过对岩石作用高频的冲击荷载，达到快速破岩的目的。轴向冲击钻进技术经过长时间的发展已进入相对成熟阶段，但该技术在应用过程中仍存在钻头故障、经济效益不确定的问题。因此，进一步优化冲击参数（冲击能量、冲击频率等）提高钻头寿命、减少冲击钻进引发的振动问题、与定向钻进技术紧密结合等是该技术未来发展的趋势。在扭转冲钻进方面，扭转冲击钻进技术通过给钻头施加周向冲击荷载，可以使钻头不用积蓄能量，直接进行冲击和剪切破岩，大大减少了钻头的黏滑效应，显著提高了钻进速度。延长钻具寿命、解决钻头拖压、提升在软塑性泥土中的钻进效率等是扭转冲击钻进技术未来需解决的问题。在多元复合冲方面，多元复合冲击钻进技术可以达到“立体破岩”效果。尽管该技术的提出及应用相对较晚，但通过对已有成果的调研发现，多元复合冲击钻进技术在提高钻进效率方面具有显著的优势。因此，围绕多元复合冲击钻进技术，进一步研发新型冲击钻具、研究多元复合冲击破岩机制、优化冲击钻进参数、延长钻具使用寿命等将是未来重要的研究方向。

3.3 随钻感知及预报

从现有研究工作看，在岩性预测方面，针对随钻参数反演岩石单轴抗压强度的研究较多。而对于其他岩石力学参数与随钻参数的关系研究较少，缺少随钻参数反演三轴抗压、单轴抗拉、内聚力、内摩擦角、弹性模量和泊松比等岩石力学参数的研究。

在岩体结构预测方面，相关研究极少，亟需开展随钻参数反演空腔、断层、裂隙、岩层界面等岩体结构的研究。

现有的研究工作大都基于模型试验，试验条件理想，与实际工况差别大。应开发适配于工业钻机的随钻参数采集系统，基于实际工况开展随钻参数与地质信息匹配关系的研究。

现有的随钻感知主要基于工艺参数反演，工艺参数易受施工影响，噪声大，而在石油测井领域，随钻伽马、随钻密度、随钻声波、随钻中子、随钻电磁波等运用地球物理性质的测井技术可获取岩性信息，受施工影响较小。可开展工艺参数反演与随钻测井技术相结合的随钻感知技术，拓展数据来源，实现多元数据融合的随钻感知。

3.4 卡钻预测及解除

目前的卡钻预测技术可有 2 个突破方向：一是基于不同施工参数的卡钻预测技术，如可通过钻头转速降低、泵压升高、钻具扭矩增大、钻时延长等多种参数对卡钻的可能性进行预测。二是可通过在针对上述多种施工参数对于卡钻不同影响程度的分析基础上，设计模型结构并调整参数，将试验样本在不同参数下进行模拟试验，可基于神经网络研发卡钻预测软件，识别钻进过程的异常参数变化情况，

实现对卡钻事故的预测。

3.5　精准导向技术

国内外均高度重视导向技术的研究，但目前斯伦贝谢等国外厂商的技术仍具有较大优势。在未来的钻探行业中，我国导向钻进技术还需更深入的研究，努力缩短与国际领先技术的差距。对于复杂环境下的钻进作业，钻探过程中面临数据采集难、地面与地下通讯不稳定的问题，目前亟需完善导向钻进系统，加强关键参数的采集并保障数据链接传输的稳定。发展精准导向钻进技术，改进钻进控制机制亦是重中之重，应重点推动相关理论突破，优化指令、控制偏差、缩短滞后性，并发展自主导向及全闭环导向系统。

随着技术水平的不断升级及全自动钻机的应用，未来将逐渐解放人力，实现自动化、少人化钻进，提高生产质量及效率，促进行业发展。另外，开展几何导向技术的研究及应用，可以利用三维空间来对钻孔轨迹进行几何判定，使钻进的导向及控制更加精准。

3.6　远距离凝胶可控注浆材料

传统浆液流动性、可注性难以满足超长距离泵送要求，胶凝时间难以调节，千米级超长距离泵送浆液扩散难以精细化控制。同时，需要针对不同的工程需求选择特定适合的超长距离定向注浆材料。例如，针对富水断层破碎带注浆治理，需要堵水加固一体化材料；针对大型管道、空腔等，需要低成本的固废基材料；针对碎粉岩致密地层，需要高渗–劈裂复合注浆材料。

基于定向钻注技术的地面注浆处置结合定制化注浆材料，可发挥更大效用，特别是能满足远距离凝胶可控需求。目前，超长距离注浆材料仍有以下方面亟待突破。

首先，注浆材料需要凝结时间可控。在实际操作中，千米级泵送过程中输送长度跨度大，需要达到工程中注浆的时间要求，输送至指定位置根据地层信息反馈随时调节初凝时间[149]。

其次，注浆固结体强度高。浆液结石强度与浆材的成分成型压力、水泥标号、浆液浓度及搅拌时间等因素有关，对于帷幕灌浆，要求结石密实性强，渗透性低，耐久性好；对固结灌浆，要求更高的抗压强度和黏结强度。

再其次，浆液可注性好。黏度是评价可注性的主要参数，浆液可注性好可有效降低注浆施工难度[146]，并且对于空隙、裂隙较小的地层，提升可注性能够提升有效加固圈范围。

最后，浆液需要具有较高的稳定性，为方便施工，浆液要求具有较长储存时间，搅拌后析水率低，浆液化学反应可控，受环境影响低。

因此，针对不同的超长距离注浆需求，亟需研发系列凝塑可控的水泥基、多源固废基、黏土水泥浆等新型注浆材料，满足长距离泵送、流动性好、胶凝可控、强度高、动水抗分散、环保性能好的要求。

3.7　超长距离注浆控制

现有注浆工艺在超长距离成孔技术措施方面考虑不足，针对滇中引水工程，面向深埋高应力隧道和高压大流量涌水，要全面考虑钻孔保证措施以及长距离钻孔成孔技术要求，钻孔技术要求一般包括孔径、孔斜、钻孔精确度，需要结合具体地质情况进行确定；此外，传统工艺在注浆效果检测以及监控量测方面仍存在缺陷，地面传统物探在大埋深隧道检测方面存在明显技术不足，如瞬变电磁在 1 000 m 埋深上，精度大于 50 m，显然无法指导注浆检测，而传统扫孔注水检测在超长距离注浆上适用性差，无法有效表征注浆区域治理效果。因此，需综合地面物探手段、地下工程隧洞检测和注浆过程数据分析与检测。

在注浆工艺方面，需要突破超远距离定向钻孔注浆出浆口压力实时监测与闭环控制技术，考虑浆岩耦合作用的复杂地层超远距离定域注浆多级压力监测物理模拟试验技术，并研发考虑水头差–全孔沿程损失的高压大流量大功率智能化注浆装备。此外，基于“决策方案–模型驱动–控制参数”的稳压注浆控制系统也已成为未来超长距离注浆控制的必要发展方向。

4　结　论

超长距离定向钻注一体化装备与关键技术的研发应用为地下工程灾害快速安全治理和不良地质预注浆处置提供了新的手段，为地下工程灾害防控的发展提供了新的契机。本文系统综述了地下工程利用地面注浆治理突发灾害及地层预注浆的装备技术，提出了超长定向钻注一体化装备、注浆材料思路以及亟待突破的关键技术，主要结论如下：

（1）采用地面注浆开展地下工程灾害处置与不良地质预加固具有安全、高效优势，但长期以来作业模式相对粗放，从业人员对定向钻注装备与关键技术的了解和认识还不够深刻，目前已开展的地面定向钻注装备技术整体水平处于初级阶段，成套装

备研发应用和相应性能还需要持续推进，但地下工程超长距离定向钻注一体化装备是未来地面注浆的发展方向。

（2）由于不同领域地下工程发展水平和应用需求的差异、定向钻注装备发展信息不对称等问题，导致交通、水电、矿山、市政等行业在钻注装备研发应用方面还存在重复投入，导致部分关键技术难度大的钻注装备项目启动较慢，需要从国家层面加强宏观引导，统筹规划，进一步整合优势资源，加强装备研发、应用单位间的交流与沟通，深入研究地下工程超长距离钻注一体化装备技术体系，从而实现装备高效高可靠作业。

（3）超长钻注一体化装备主要关键技术包括快速钻进、高精度定位、随钻感知、导向纠偏，其主要组成部分包括钻机、钻具、仪器、注浆设备等，其主要目的和亟待发展功能模块包括地质预报、钻进、注浆、检测。在这个过程中，鼓励加强旋转导向等关键技术研究，打破国外垄断封锁，不断提升产品性能及可靠性。同时，要关注多学科交叉融合，应用 5G、云计算、边缘计算、人工智能、物联网等技术。

参 考 文 献

[1] 国家统计局. 中华人民共和国 2021 年国民经济和社会发展统计公报[J]. 中国统计, 2022(3): 9-26.
National Bureau of Statistics. Statistical bulletin of the People’s Republic of China on national economic and social development in 2021[J]. **China Statistics**, 2022(3): 9-26.

[2] 谢和平, 张茹, 任利, 等. 川藏铁路深埋隧道围岩灾变分析与思考[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(2): 1-20.
XIE He-ping, ZHANG Ru, REN Li, et al. Analysis and thoughts on surrounding rock mass catastrophe of deep-buried tunnels along Sichuan-Tibet railway[J]. **Engineering Science and Technology**, 2022, 54(2): 1-20.

[3] 刘飞香, 姬海东, 肖正航. 川藏铁路隧道钻爆法施工成套装备技术体系研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(8): 1281-1289.
LIU Fei-xiang, JI Hai-dong, XIAO Zheng-hang. Study on technical system of complete equipment for drilling and blasting construction of Sichuan-Tibet railway tunnel[J]. **Tunnel Construction**, 2021, 41(8): 1281-1289.

[4] 温时雨, 肖洋, 秦云, 等. 滇中长大引水隧洞典型致灾地质构造分析[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(增刊 1): 719-726.
WEN Shi-yu, XIAO Yang, QIN Yun, et al. Analysis of typical disaster-causing geological structures in long and large tunnels of central Yunnan water diversion project[J]. **Modern Tunnel Technology**, 2022, 59(Suppl.1): 719-726.

[5] 王旺盛, 陈长生, 王家祥, 等. 滇中引水工程香炉山深埋长隧洞主要工程地质问题[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(9): 154-159.
WANG Wang-sheng, CHEN Chang-sheng, WANG Jia-xiang, et al. Major engineering geological problems of Xianglushan deep-buried long tunnel in Central Yunnan Water Diversion Project[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2020, 37(9): 154-159.

[6] 中国政府网. 中国共产党第二十次全国代表大会[EB/OL]. (2022-10-16)[2022-10-16]. http://www.gov.cn/-zhuanti/zggcddescqgdbdh/index.htm?nid=0.
Chinese Government Website. The twentieth national congress of the communist party of China[EB/OL]. (2022-10-16)[2022-10-16].http://www.gov.cn/zhuanti/-zggcddescqgdbdh/index.htm?nid=0.

[7] 王梦恕. 中国铁路、隧道与地下空间发展概况[J]. 隧道建设, 2010, 30(4): 351-364.
WANG Meng-shu. An overview of development of railways, tunnels and underground works in China[J]. **Tunnel Construction**, 2010, 30(4): 351-364.

[8] 赵勇. 隧道软弱围岩变形机制与控制技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
ZHAO Yong. Research on deformation mechanism and control technology of weak surrounding rock in tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.

[9] 张庆松, 李鹏, 张霄, 等. 隧道断层泥注浆加固机制模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(5): 924-934.
ZHANG Qing-song, LI Peng, ZHANG Xiao, et al. Model test study on grouting reinforcement mechanism of tunnel fault gouge[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(5): 924-934.

[10] 叶飞, 王斌, 韩鑫, 等. 盾构隧道壁后注浆试验与浆液扩散机理研究进展[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 92-104.
YE Fei, WANG Bin, HAN Xin, et al. Research progress on grouting test and slurry diffusion mechanism behind

shield tunnel wall[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2020, 33(12): 92-104.

[11] 和晓楠, 周晓敏, 郭小红, 等. 深埋隧道注浆加固围岩非达西渗流场及应力场解析[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 200-211.
HE Xiao-nan, ZHOU Xiao-min, GUO Xiao-hong, et al. Analysis of non-Darcy seepage field and stress field of surrounding rock reinforced by grouting in deep buried tunnel[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2020, 33(12): 200-211.

[12] 王强. 常德青峰煤矿地面钻孔注浆堵水实践[J]. 探矿工程（岩土钻掘工程）, 2011, 38(10): 63-65.
WANG Qiang. Grouting for water-proof of surface drilling in Qingfeng coalmine of Changde[J]. **Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)**, 2011, 38(10): 63-65.

[13] 刘春阳. 南水北调总干渠下穿五棵松地铁车站工程深孔注浆试验及成果分析[J]. 北京水务, 2008(增刊 2): 70-72.
LIU Chun-yang. Deep hole grouting test and result analysis of Wukesong Metro Station Project under the main canal of South to North Water Transfer[J]. **Beijing Water Affairs**, 2008(Suppl. 2): 70-72.

[14] 梅恒, 范瑛. 济南地铁穿越溶洞密集区注浆技术研究[J]. 公路, 2020, 65(5): 290-293.
MEI Heng, FAN Ying. Study on grouting technology of Jinan metro crossing karst cave dense area[J]. **Highway**, 2020, 65(5): 290-293.

[15] COOPER G A. Directional drilling[J]. **Scientific American**, 1994, 270(5): 82-87.

[16] NINGPING Y, JIE Z, XING J, et al. Status and development of directional drilling technology in coal mine[J]. **Procedia Engineering**, 2014, 73: 289-298.

[17] CHUR C, OPPELT J. Vertical drilling technology: a milestone in directional drilling[C]//SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam: OnePetro, 1993.

[18] DAWSON R. Drill pipe buckling in inclined holes[J]. **Journal of Petroleum Technology**, 1984, 36(10): 1734-1738.

[19] KANJ M Y, ABOUSLEIMAN Y N. Taming complexities of coupled geomechanics in rock testing: from assessing reservoir compaction to analyzing stability of expandable sand screens and solid tubulars[J]. **SPE Journal**, 2007, 12(3): 293-304.

[20] NASR-EL-DIN H A, AL-OTAIBI M B, ALTAMEIMI Y M. Wellbore cleanup by water jetting and enzyme treatment in MRC wells[C]//SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition. Dubai: OnePetro, 2005.

[21] 徐一龙, 黄凯文, 梁继文, 等. 定向井井眼轨迹与井壁稳定性关系研究[J]. 重庆科技学院学报（自然科学版）, 2011, 13(6): 51-54.
XU Yi-long, HUANG Kai-wen, LIANG Ji-wen, et al. Research on the relationship between directional well trajectory and wellbore stability[J]. **Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition)**, 2011, 13(6): 51-54.

[22] 姚宁平. 我国煤矿井下近水平定向钻进技术的发展[J]. 煤田地质与勘探, 2008(4): 81-83.
YAO Ning-ping. Development of near horizontal directional drilling technology in underground coal mines in China[J]. **Coal Geology and Exploration**, 2008(4): 81-83.

[23] 胡渤, 史军, 刘成刚, 等. 水平井钻井过程中常见的钻井损害问题解析[J]. 特种油气藏, 2004, 11(6): 68-70.
HU Bo, SHI Jun, LIU Cheng-gang, et al. Analysis of common drilling damage problems in horizontal well drilling [J]. **Special Oil & Gas Reservoirs**, 2004, 11(6): 68-70.

[24] JENKINS P, BALL T. Horizontal drilling techniques in British coal-mines[J]. **Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy Section A——Mining Industry**, 1991, 100: A11-A21.

[25] 郝世俊. 煤矿井下大直径定向钻孔的成孔工艺及瓦斯抽采效果研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2007.
HAO Shi-jun. The research on the drilling technology and the gas discharging effect of the large diameter directional borehole in coal mine[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2007.

[26] 汪皓. 突出煤层定向钻进随钻瓦斯参数动态反演及消突效果评价研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
WANG Hao. A study on the dynamic reversal of the gas data and the assessment of the anti burst effect of the directed drilling in the protruding seam[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.

[27] 石智军, 董书宁, 杨俊哲, 等. 煤矿井下 3 000 m 顺煤层定向钻孔钻进关键技术[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(6): 1-7.

SHI Zhi-jun, DONG Shu-ning, YANG Jun-zhe, et al. Key technologies of directional drilling along the coal seam 3 000 m underground[J]. **Coal Geology and Exploration**, 2019, 47(6): 1-7.

[28] 徐涛. 水平定向钻进随钻测量方法及定位技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
XU Tao. Research on MWD surveying method and locating technique of horizontal directional drilling[D]. Changsha: National University of Defense Science and Technology, 2006.

[29] 邓国庆. 基于地面磁信标的水平定向钻进实时定位系统研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
DENG Guo-qing. Study on real-time positioning system for horizontal directional drilling based on ground magnetic beacon[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.

[30] 明玉广, 王传富, 蓝强, 等. 成品油管道定向穿越通明海峡泥浆性能控制技术[J]. 油气储运, 2021, 40(4): 431-437.
MING Guang-yu, WANG Chuan-fu, LAN Qiang, et al. Control technology of drilling fluid performance in horizontal directional crossing of Tongming strait by product pipeline[J]. **Oil & Gas Storage and Transportation**, 2021, 40(4): 431-437.

[31] 周沛. 非开挖水平定向钻孔壁稳定性研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2022.
ZHOU Pei. Study on borehole wall stability using horizontal directional drilling of trenchless technology[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2022.

[32] 方鹏. 煤矿井下 12 000 N • m 全液压定向钻机关键部件及动态特性研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2019.
FANG Peng. Research on key components and dynamic characteristics of 12 000 N • m fully hydraulic directional drilling rig in coal mine[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2019.

[33] FLETCHER T. Drilling exploration boreholes beyond 4 000 m in South Africa[J]. **Mine Water and The Environment**, 1992, 11(4): 43-52.

[34] 吴霜. 徐工定向钻闪耀第 17 届中国国际非开挖展会[J]. 工程机械, 2013(6): 99-99.
WU Shuang. XCMG directional drilling shining The 17th China International Trenchless Exhibition[J]. **Construction Machinery and Equipment**, 2013(6): 99-99.

[35] 颜纯文. 我国非开挖行业现状与展望[J]. 探矿工程（岩土钻掘工程）, 2010, 37(10): 56-60.
YAN Chun-wen. Current situation and prospect of trenchless industry in China[J]. **Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)**, 2010, 37(10): 56-60.

[36] MA T S, CHEN P, ZHAO J. Overview on vertical and directional drilling technologies for the exploration and exploitation of deep petroleum resources[J]. **Geomechanics and Geophysics for Geoenergy and Georesources**, 2016, 2(4): 365-395.

[37] SCHAAF S, PAFITIS D, GUICHEMERRE E. Application of a point the bit rotary steerable system in directional drilling prototype well-bore profiles[C]// SPE/AAPG western regional meeting. Long Beach: OnePetro, 2000.

[38] STOCKHAUSEN E, LOWDON R, LESSO B. Directional drilling tests in concrete blocks yield precise measurements of borehole position and quality[C]// IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition. San Diego: OnePetro, 2012.

[39] ROOYEN N V. Drilling is thrilling[J]. **Civil Engineering**, 2009(7): 36-39.

[40] ARIARATNAM S T, HARBIN B C, STAUBER R L. Modeling of annular fluid pressures in horizontal boring[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2007, 22(5-6): 610-619.

[41] BAIK H S, ABRAHAM D M, GOKHALE S. A decision support system for horizontal directional drilling[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2003, 18(1): 99-109.

[42] SONG X, VADALI M, XUE Y, et al. Tracking control of rotary steerable tool face in directional drilling[C]//2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). Alberta: IEEE, 2016: 1210-1215.

[43] XIN-JUN G, JING L. Research on application of steering drilling technologies in shale gas development[J]. **Procedia Engineering**, 2014, 73: 269-275.

[44] WANG F, REN T X, HUNGERFORD F, et al. Advanced directional drilling technology for gas drainage and exploration in Australian coal mines[J]. **Procedia Engineering**, 2011, 26: 25-36.

[45] 梁武. 智能型水平定向钻进铺管设备[J]. 建筑机械化, 2004, 25(8): 65-67.
LIANG Wu. Intelligent horizontal directional drilling pipe laying equipment[J]. **Building Mechanization**, 2004,

25(8): 65-67.

[46] 梁武, 李桂芳, 郭岗, 等. 中联重科 KSD25A 智能型水平定向钻进铺管设备[J]. 工程机械与维修, 2005(9): 134-134.
LIANG Wu, LI Gui-fang, GUO Lan, et al. Zoomlion KSD25A intelligent horizontal directional drilling pipe laying equipment[J]. **Construction Machinery and Maintenance**, 2005(9): 134-134.

[47] 韩振. 徐工 “863” 计划项目 “大型智能化非开挖定向钻机关键技术及产业化” 荣获年度中国机械工业科学技术奖一等奖[J]. 工程机械, 2016(1): 78.
HAN Zhen. "863" plan project "Key Technology and Industrialization of Large Intelligent Trenchless Directional Drilling Rig" won the first prize of the annual China Machinery Industry Science and Technology Award[J]. **Construction Machinery and Equipment**, 2016(1): 78.

[48] 石智军, 李泉新, 姚克. 煤矿井下 1 800 m 水平定向钻进技术与装备[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(2): 109-113.
SHI Zhi-jun, LI Quan-xin, YAO Ke. Technology and equipment of 1 800 m horizontal directional drilling in coal mine[J]. **Coal Science and Technology**, 2015, 43(2): 109-113.

[49] 梅新. 井下定向钻进技术与装备创煤矿井下顺煤层定向钻孔深度新纪录[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(5): 54.
MEI Xin. Downhole directional drilling technology and equipment set a new record for the depth of directional drilling in the lower coal seam[J]. **Coal Geology & Exploration**, 2014, 42(5): 54.

[50] 刘乐. 横向各向同性地层倾斜井中声场研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
LIU Le. Study on sound field in inclined well of transversely isotropic formation[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.

[51] 张金昌, 刘凡柏, 黄洪波, 等. 5 000 m 智能地质钻探技术与装备研发[J]. 探矿工程（岩土钻掘工程）, 2020, 47(4): 1-8.
ZHANG Jin-chang, LIU Fan-bai, HUANG Hong-bo, et al. Research and development of 5 000 m intelligent geological drilling technology and equipment[J]. **Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)**, 2020, 47(4): 1-8.

[52] 蒲朝阳, 袁辉, 高岗荣, 等. 高压变频注浆泵的研制[J]. 建井技术, 2011(1): 90-92.
PU Chao-yang, YUAN Hui, GAO Gang-rong, et al. Development of high pressure variable frequency grouting pump[J]. **Mine Construction Technology**, 2011(1): 90-92.

[53] 陈振国. 复杂地层小段高井筒地面预注浆技术研究[J]. 建井技术, 2021, 42(6): 49-52, 15.
CHEN Zhen-guo. Study on ground pre-grouting technology of small section high shaft in complex stratum[J]. **Mine Construction Technology**, 2021, 42(6): 49-52, 15.

[54] 蒲朝阳, 袁辉, 邓昀, 等. 水力坐封止浆塞的研制与应用[J]. 煤炭工程, 2016, 48(10): 135-137.
PU Chao-yang, YUAN Hui, DENG Yun, et al. Development of and application of hydraulic setting packer[J]. **Coal Engineering**, 2016, 48(10): 135-137.

[55] 姚韦靖, 庞建勇, 张金松, 等. 地面预注浆施工技术在井筒涌水防治中的应用[J]. 隧道建设（中英文）, 2017, 37(5): 630-636.
YAO Wei-jing, PANG Jian-yong, ZHANG Jin-song, et al. Application of ground pre-grouting construction technology in shaft water gushing prevention[J]. **Tunnel Construction**, 2017, 37(5): 630-636.

[56] 刘志强. 矿井建设技术发展概况及展望[J]. 煤炭工程, 2018, 50(6): 44-46.
LIU Zhi-qiang. Overview and outlook on development of mine construction technologies[J]. **Coal Engineering**, 2018, 50(6): 44-46.

[57] 高岗荣. 煤矿立井预注浆堵水技术[J]. 建井技术, 2017, 38(4): 18-23.
GAO Gang-rong. Pre-grouting and water sealing technology of coal mine shaft[J]. **Mine Construction Technology**, 2017, 38(4): 18-23.

[58] 李光洪, 贺文. 大型钻注设备下放运输技术[J]. 建井技术, 2019, 40(2): 22-25.
LI Guang-hong, HE Wen. Transportation technology of large drilling and grouting equipment from surface ground to underground mine[J]. **Mine Construction Technology**, 2019, 40(2): 22-25.

[59] 刘艳利, 袁欣然, 原海嵘, 等. 管道回拖钻杆回弹原因及解决措施[J]. 油气储运, 2017, 36(5): 596-600.

LIU Yan-li, YUAN Xin-ran, YUAN Hai-rong, et al. Causes and countermeasures of drill pipe spring-back during pipeline backtow[J]. **Oil & Gas Storage and Transportation**, 2017, 36(5): 596-600.

[60] 刘艳利, 周号. 水平定向钻管道回拖受阻原因分析及措施[J]. 石油工程建设, 2016, 42(2): 55-58.
LIU Yan-li, ZHOU Hao. Causes and countermeasures of pipeline stuck during back-dragging operation of HDD[J]. **Petroleum Engineering Construction**, 2016, 42(2): 55-58.

[61] 马保松, 程勇, 刘继国, 等. 超长距离水平定向钻进技术在隧道精准地质勘察的研究及应用[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(6): 972-978.
MA Bao-song, CHENG Yong, LIU Ji-guo, et al. Tunnel accurate geological investigation using long-distance horizontal directional drilling technology[J]. **Tunnel Construction**, 2021, 41(6): 972-978.

[62] 马保松, 张祖培, 孙友宏. 钻井工程用超硬材料及钻头的发展[J]. 地质与勘探, 1998(2): 52-56.
MA Bao-song, ZHANG Zu-pei, SUN You-hong. Development of superhard materials and drill bits for drilling engineering[J]. **Geology and Exploration**, 1998 (2): 52-56.

[63] 费万堂, 马雨峰, 刘志强, 等. 大倾角斜反井导孔定向钻进应用研究[J]. 隧道建设（中英文）, 2018, 38(11): 1853-1859.
FEI Wan-tang, MA Yu-feng, LIU Zhi-qiang, et al. Application of directional drilling of oblique guide hole to inclined shaft with large dip angle constructed by raise-boring method[J]. **Tunnel Construction**, 2018, 38(11): 1853-1859.

[64] 向军文, 刘春生, 刘志强. 小直径中半径水平定向井钻探工艺研究[J]. 探矿工程（岩土钻掘工程）, 2001(增刊 1): 175-178.
XIANG Jun-wen, LIU Chun-sheng, LIU Zhi-qiang. Research on drilling technology of small diameter medium radius horizontal directional well[J]. **Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)**, 2001(Suppl. 1): 175-178.

[65] 刘志强, 宋朝阳. 大倾角压力管道斜井机械破岩钻进技术与工艺探讨[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 58-66.
LIU Zhi-qiang, SONG Chao-yang. Discussion on technology and process of mechanical rock breaking and drilling in inclined shaft of high inclined pressure pipeline[J]. **Coal Science and Technology**, 2021, 49(4): 58-66.

[66] 高岗荣. 煤矿注浆技术综述[J]. 建井技术, 2020, 41(5): 1-9.
GAO Gang-rong. Summary of coal mine grouting technology[J]. **Mine Construction Technology**, 2020, 41(5): 1-9.

[67] 高岗荣. 煤层底板灰岩区域探查注浆合理工艺参数探讨[J]. 建井技术, 2020, 41(1): 7-12.
GAO Gang-rong. Discussion on rational grouting technical parameters for search of limestone region in seam floor[J]. **Mine Construction Technology**, 2020, 41(1): 7-12.

[68] 高岗荣. 立井冻–注–凿平行与钻–注平行作业施工技术[J]. 建井技术, 2012, 33(6): 4-7.
GAO Gang-rong. Construction technology of shaft freezing-injection-drilling parallel operation and drilling-injection parallel operation[J]. **Mine Construction Technology**, 2012, 33(6): 4-7.

[69] 周燕. 扭转冲击钻井提速机理与应用研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018.
ZHOU Yan. Study on the mechanism and application of speed increase in torsional impact drilling[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018.

[70] 李思琪, 毕福庆, 李玮, 等. 扭转冲击钻井稳态钻进动力学特性及现场应用[J]. 中国石油大学学报（自然科学版）, 2019, 43(2): 97-104.
LI Si-qi, BI Fu-qing, LI Wei, et al. Dynamic characteristics of steady torsional impact drilling and its field application[J]. **Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)**, 2019, 43(2): 97-104.

[71] 田家林, 杨应林, 朱志, 等. 基于旋冲螺杆提速器的井下动力特性[J]. 石油学报, 2019, 40(2): 224-231.
TIAN Jia-lin, YANG Ying-lin, ZHU Zhi, et al. Downhole dynamic characteristics of an actuator based on rotary screw[J]. **Acta Petrolei Sinica**, 2019, 40(2): 224-231.

[72] 景英华, 袁鑫伟, 姜磊, 等. 高速旋转冲击钻井破岩数值模拟及现场实验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2019, 43(1): 75-80.
JING Ying-hua, YUAN Xin-wei, JIANG Lei, et al. Numerical simulation and field experimental study on

rock breaking in high speed rotating percussion drilling[J]. **Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)**, 2019, 43(1): 75-80.

[73] 蔡灿, 谭政博, 玄令超, 等. 分离式冲击–刮切复合钻头破岩机理及钻进破岩研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(16): 232-241.
CAI Can, TAN Zheng-bo, XUAN Ling-chao, et al. A study on drilling breakage and rock breaking mechanism by using separated impact-scraping and cutting compound bit[J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2022, 41(16): 232-241.

[74] 祝效华, 汤历平, 吴华, 等. 扭转冲击钻具设计与室内试验[J]. 石油机械, 2011, 39(5): 27-29.
ZHU Xiao-hua, TANG Li-ping, WU Hua, et al. Torsion impact drilling tool design and indoor test[J]. **Petroleum Machinery**, 2011, 39(5): 27-29.

[75] 李同同. 扭转冲击器的结构设计与实验研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2015.
LI Tong-tong. Structural design and experimental research on torsional impact generator[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015.

[76] 郭元恒, 何世明, 宋建伟, 等. TorkBuster 扭力冲击器在元坝地区提高钻速中的应用[J]. 天然气技术与经济, 2012(3): 52-54.
GUO Yuan-heng, HE Shi-ming, SONG Jian-wei, et al. Application of TorkBuster torsion impactor to drilling-speed increase in Yuanba area[J]. **Natural Gas Technology and Economy**, 2012(3): 52-54.

[77] 柳贡慧, 李玉梅, 李军, 等. 复合冲击破岩钻井新技术[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(5): 10-15.
LIU Gong-hui, LI Yu-mei, LI Jun, et al. New technology with composite percussion drilling and rock breaking[J]. **Petroleum Drilling Techniques**, 2016, 44(5): 10-15.

[78] 穆总结, 李根生, 黄中伟, 等. 轴扭耦合冲击钻井技术研究[J]. 石油机械, 2018, 46(10): 12-17.
MU Zong-jie, LI Gen-sheng, HUANG Zhong-wei, et al. Research on axial-torsional coupling percussion drilling technology[J]. **China Petroleum Machinery**, 2018, 46(10): 12-17.

[79] 闫炎, 管志川, 玄令超, 等. 复合冲击条件下 PDC 钻头破岩效率试验研究[J]. 石油钻探技术, 2017, 45(6): 24-30.
YAN Yan, GUAN Zhi-chuan, XUAN Ling-chao, et al. Experimental study on rock breaking efficiency with a PDC bit under conditions of composite percussion[J]. **Petroleum Drilling Techniques**, 2017, 45(6): 24-30.

[80] 彭旭. 煤矿井下复合冲击螺杆钻具高效破岩机理研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2021.
PENG Xu. Study on efficient rock-breaking mechanism of compound percussive PDM in underground coal mine[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2021.

[81] 和郑翔, 卢才武, 居培, 等. 基于 PCA-BP 神经网络的随钻参数岩性智能感知方法研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(7): 155-159.
HE Zheng-xiang, LU Cai-wu, JU Pei, et al. Research on lithology intelligent sensing method of drilling parameters based on PCA-BP neural network[J]. **Mining Research and Development**, 2022, 42(7): 155-159.

[82] 王琦, 孙会彬, 江贝, 等. 基于数字钻探和支持向量机预测岩体单轴抗压强度的方法[J]. 岩土力学, 2019, 40(3): 1221-1228.
WANG Qi, SUN Hui-bin, JIANG Bei, et al. A method for predicting uniaxial compressive strength of rock mass based on digital drilling test technology and support vector machine[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(3): 1221-1228.

[83] 冯志昊, 黄今, 熊珂, 等. 基于数字钻探和机器学习预测岩体单轴抗压强度的方法[J]. 有色金属(矿山部分), 2021, 73(1): 92-97.
FENG Zhi-hao, HUANG Jin, XIONG Ke, et al. UCS of rock mass based on digital drilling and machine learning regression[J]. **Nonferrous Metals(Mining Section)**, 2021, 73(1): 92-97.

[84] ZHAO S G, WANG M N, YI W H, et al. Intelligent classification of surrounding rock of tunnel based on 10 machine learning algorithms[J]. **Applied Sciences**, 2022, 12(5): 2656.

[85] 周泽洪, 张林, 刘先珊, 等. 基于旋挖桩随钻参数的地层识别方法[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(1): 86-91.
ZHOU Ze-hong, ZHANG Lin, LIU Xian-shan, et al. Formation identification method based on drilling parameters of rotary drill rig[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2018, 14(1): 86-91.

[86] WANG H T, HE M M, ZHANG Z Q, et al. Determination of the constant mi in the hoek-brown criterion of rock based on drilling parameters[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2022, 32(4): 747-759.

[87] LIU C C, ZHAN Q J, YANG L, et al. Recognition of interface and category of roadway roof strata based on drilling parameters[J]. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 2021, 204: 108724.

[88] 陶宇龙. 基于时间序列的卡钻预测方法研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2014.
TAO Yu-long. Research on prediction method of sticking based on time series[D]. Xi'an: Xi'an University of Petroleum, 2014.

[89] 兰中洋, 曹家利. 定向井预防卡钻事故措施初探[J]. 中国化工贸易, 2019, 11(5): 163-163.
LAN Zhong-yang, CAO Jia-li. Preliminary study on measures to prevent sticking accidents in directional wells[J]. **China Chemical Trade**, 2019, 11(5): 163-165.

[90] 刘福钦. 定向井预防卡钻事故措施研究[J]. 中国化工贸易, 2019, 11(3): 176-180.
LIU Fu-qin. Research on measures to prevent sticking accidents in directional wells[J]. **China Chemical Trade**, 2019, 11(3): 176-180.

[91] 李振杰, 徐云鹏. 定向井处理粘吸卡钻事故的技术方法[J]. 探矿工程（岩土钻掘工程）, 2010, 37(6): 24-27.
LI Zhen-jie, XU Yun-peng. Technical methods for dealing with sticking accidents in directional wells[J]. **Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)**, 2010, 37(6): 24-27.

[92] 任美洲. 定向井施工卡钻事故成因分析和预防措施[J]. 石化技术, 2022, 29(3): 203-204.
REN Mei-zhou. Cause analysis and preventive measures of sticking accident in directional well construction[J]. **Petrochemical Industry Technology**, 2022, 29(3): 203-204.

[93] 刘晓坡. 定向钻井中压差卡钻事故的原因及预防措施[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2014(1): 31-33.
LIU Xiao-po. Causes and preventive measures of differential pressure sticking accident in directional drilling[J]. **China Petroleum and Chemical Industry Standards and Quality**, 2014(1): 31-33.

[94] JARDINE S, MCCANN D, BARBER S. An advanced system for the early detection of sticking pipe[C]// IADC/SPE Drilling Conference. New Orleans: OnePetro, 1992.

[95] 季雯宇. 钻井过程卡钻事故智能识别方法及处置流程优化研究[D]. 北京: 中国石油大学 (北京), 2019.
JI Wen-yu. Research on intelligent identification method and disposal process optimization of sticking accident in drilling process[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019.

[96] MURILLO A, NEUMAN J, SAMUEL R. Pipe sticking prediction and avoidance using adaptive fuzzy logic modeling[C]//SPE Production and Operations Symposium. Oklahoma City: OnePetro, 2009.

[97] 朱丹. 基于神经网络的卡钻预测方法研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2013.
ZHU Dan. Research on prediction method of sticking based on neural network[D]. Xi'an: Xi'an Petroleum University, 2013.

[98] 张万栋, 郭威龙, 李炎军, 等. 多因子长时序信息联合建模的深度卷积卡钻事故预测[J]. 计算机系统应用, 2022, 31(9): 333-341.
ZHANG Wan-dong, GUO Wei-long, LI Yan-jun, et al. Deep convolution sticking prediction based on joint modeling of multi-factor long time series information[J]. **Computer System Application**, 2022, 31(9): 333-341.

[99] 富浩, 张涛, 李玉梅, 等. 基于井下参数的 PCA-SVM 卡钻预测研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(12): 386-390.
FU Hao, ZHANG Tao, LI Yu-mei, et al. Research on PCA-SVM stuck prediction based on downhole parameters[J]. **Computer Simulation**, 2021, 38(12): 386-390.

[100] 李紫璇, 张菲菲, 祝钰明, 等. 钻井模型与机器学习耦合的实时卡钻预警技术[J]. 石油机械, 2022, 50(4): 15-21.
LI Zi-xuan, ZHANG Fei-fei, ZHU Yu-ming, et al. Real-time pipe sticking early warning technology based on coupling of drilling model and machine learning[J]. **Petroleum Machinery** , 2022, 50(4): 15-21.

[101] 刘海龙, 李彤, 张奇志. 基于自适应遗传算法改进的 BP 神经网络卡钻事故预测[J]. 现代电子技术, 2021, 44(15): 149-153.
LIU Hai-long, LI Tong, ZHANG Qi-zhi. Drill bit sticking accident prediction based on BP neural network improved by adaptive genetic algorithm[J]. **Modern Electronic**

Technology, 2021, 44(15): 149-153.

[102] 李彤. 基于神经网络的井下卡钻预测研究[D]. 西安：西安石油大学, 2021.
LI Tong. Research on prediction of downhole pipe sticking based on neural network[D]. Xi'an: Xi'an Petroleum University, 2021.

[103] 尹邦勇, 刘刚, 陈红. 5 种定向井卡钻及预防措施[J]. 石油矿场机械, 2010, 39(11): 68-71.
YIN Bang-yong, LIU Gang, CHEN Hong. Study of direction well pipe-sticking problems[J]. **Oil Field Machinery**, 2010, 39(11): 68-71.

[104] 张忠廷, 梁益, 李江, 等. PDC 钻头在定向井中卡钻分析及解决措施[J]. 钻采工艺, 2014, 37(1): 105-107.
ZHANG Zhong-ting, LIANG Yi, LI Jiang, et al. Analysis and solutions of PDC bit sticking in directional wells[J]. **Drilling Technology**, 2014, 37(1): 105-107.

[105] 赵洋洋, 李鹏, 石浩. 煤矿井下近水平定向钻孔卡钻原因分析及处理方法[J]. 江西建材, 2015(15): 228-228.
ZHAO Yang-yang, LI Peng, SHI Hao. Analysis and treatment of near horizontal directional drilling sticking in coal mine[J]. **Jiangxi Building Materials**, 2015(15): 228-228.

[106] 杨虎伟, 董萌萌, 许翠华, 等. 井下定向钻进随钻螺旋解卡工具的研制及应用[J]. 煤矿安全, 2018, 49(2): 96-99.
YANG Hu-wei, DONG Meng-meng, XU Cui-hua, et al. Development and application of auger releasing tool while drilling for directional drilling in coal mine[J]. **Coal Mine Safety**, 2018, 49(2): 96-99.

[107] 艾秋波, 李培佳, 运志森, 等. 导向钻井系统在长裸眼定向井中的应用研究[J]. 钻采工艺, 2001, 24(1): 13-15.
AI Qiu-bo, LI Pei-jia, YUN Zhi-sen, et al. Application of steering drilling system in long open hole directional well[J]. **Drilling and Production Technology**, 2001, 24(1): 13-15.

[108] 李俊, 倪学莉, 张晓东. 动态指向式旋转导向钻井工具设计探讨[J]. 石油矿场机械, 2009, 38(2): 63-66.
LI Jun, NI Xue-li, ZHANG Xiao-dong. Approaching of dynamic point-the-bit rotary steering drilling tool[J]. **Oil Field Machinery**, 2009, 38(2): 4-10.

[109] 柴义, 陈晓霞, 汪澜. 水平定向钻穿越中联合控向钻进导向孔施工技术[J]. 石油工程建设, 2010, 36(5): 35-38.
CHAI Yi, CHEN Xiao-xia, WANG Lan. Combined pilot drilling direction control technique used in pipeline crossing construction with horizontal directional drilling[J]. **Petroleum Engineering Construction**, 2010, 36(5): 35-38.

[110] 李凯, 高德利, 宋执武. 定向井钻井技术及可变径稳定器应用研究[J]. 石油矿场机械, 2011, 40(7): 4-8.
LI Kai, GAO De-li, SONG Zhi-wu. Research on directional well drilling technology and application of variable diameter stabilizer[J]. **Oil Field Machinery**, 2011, 40(7): 4-8.

[111] 张克, 魏宝君, 常欣莉. 定向随钻电磁波电阻率测井仪器地质导向方法初探[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(1): 462-469.
ZHANG Ke, WEI Bao-jun, CHANG Xin-li. Preliminary geo-steering method of directional electromagnetic wave resistivity logging-while-drilling tools[J]. **Progress in Geophysics**, 2014, 29 (1): 462-469.

[112] 刘杰. 水平定向钻进导向轨迹设计算法讨论[J]. 地质装备, 2014, 15(1): 21-23.
LIU Jie. Discussion on the design algorithm of horizontal directional drilling guidance trajectory[J]. **Geological Equipment**, 2014, 15(1): 21-23.

[113] 付勇华. 旋转导向钻井技术应用于水平定向钻进中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(19): 149-151.
FU Yong-hua. Application of rotary steering drilling technology in horizontal directional drilling[J]. **China Petroleum and Chemical Standards and Quality**, 2020, 40(19): 149-151 .

[114] 张达, 高阳阳, 胡林, 等. 探讨石油定向钻井的旋转导向技术[J]. 中国科技纵横, 2021(13): 97-98.
ZHANG Da, GAO Yang-yang, HU Lin, et al. Discussion on rotary steering technology for oil directional drilling[J]. **China Science and Technology**, 2021(13): 97-98.

[115] 陈洪涛, 王绍华, 郭嘉镕, 等. 市政管线非开挖水平定向钻导向轨迹设计探讨[J]. 天津建设科技, 2021, 31(4): 72-74.
CHEN Hong-tao, WANG Shao-hua, GUO Jia-rong, et al. Discussion on the design of guide track of trenchless horizontal directional drilling for municipal pipelines[J]. **Tianjin Construction Science and Technology**, 2021, 31(4): 72-74.

[116] 王恒, 吴鹏程, 郑丁, 等. 旋转导向钻井技术在页岩气水平井定向钻进中的应用[J]. 中国科技纵横, 2021(8): 104-105.
WANG Heng, WU Peng-cheng, ZHENG Ding, et al. Application of rotary steering drilling technology in

directional drilling of shale gas horizontal wells[J]. **China Science and Technology**, 2021(8): 104-105.

[117] 章高琴. 水平定向钻进跟踪导向仪中导向检测系统的研究[D]. 南京: 东南大学, 2007.
ZHANG Gao-qin. Research on the guidance detection system in the horizontal directional drilling tracking guidance instrument[D]. Nanjing: Southeast University, 2007.

[118] 蒋伟. 水平定向钻进跟踪导向仪中导向系统的研究[D]. 南京: 东南大学, 2009.
JIANG Wei. Study on the guidance system in the horizontal directional drilling tracking guidance instrument[D]. Nanjing: Southeast University, 2009.

[119] 杨成永. 基于螺杆钻具的旋转导向钻井技术研究[D]. 青岛：中国石油大学(华东), 2018.
YANG Cheng-yong. Research on rotary steerable drilling technology based on downhole motor[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018.

[120] 王晓. 动态指向式旋转导向钻井工具测量信号的处理方法研究[D]. 青岛：中国石油大学(华东), 2019.
WANG Xiao. Research on measuring signal processing method of dynamic point-the-bit rotary steerable drilling tool[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2019.

[121] 王植锐, 王俊良. 国外旋转导向技术的发展及国内现状[J]. 钻采工艺, 2018, 41(2): 37-41.
WANG Zhi-rui, WANG Jun-liang. Development of foreign rotary steering technology and domestic status[J]. **Drilling & Production Technology**, 2018,41(2): 37-41.

[122] 朱丽华. 斯伦贝谢推出最新超高温 PowerDriveice ICE 旋转导向系统[J]. 钻采工艺, 2015, 38(4): 129.
ZHU Li-hua. Schlumberger introduces the latest ultra-high temperature PowerDrive ICE rotary steering system[J]. **Drilling & Production Technology**, 2015, 38(4): 129.

[123] 刘江民, 闫文辉, 彭勇, 等. 复合式旋转导向钻井工具原理与导向执行机构分析[J]. 机械研究与应用, 2018, 31(1): 78-80.
LIU Jiang-min, YAN Wen-hui, PENG Yong, et al. Analysis on working principle and directional actuator of the compound rotary steerable drilling tools[J]. **Research and Application of Machinery**, 2018, 31(1): 78-80.

[124] 师恬恬. 水平定向钻具姿态测量方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
SHI Tian-tian. Research on attitude measurement method of horizontal directional drilling tool[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.

[125] 李相廷. 基于不同地面磁信标的水平定向钻进实时定位方法研究[D]. 成都：电子科技大学, 2022.
LI Xiang-ting. Research on real-time positioning method of horizontal directional drilling based on different surface magnetic beacons[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2022.

[126] 彭元超. 旋转导向钻井闭环监控系统理论与技术研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2007.
PENG Yuan-chao. Research on theory and technology of closed loop monitoring system for rotary steering drilling[D]. Xi'an: Xi'an University of Petroleum, 2007.

[127] 姜伟, 蒋世全, 盛利民, 等. 旋转导向钻井工具系统的研究及应用[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(5): 21-24.
JIANG Wei, JIANG Shi-quan, SHENG Li-min, et al. Research on rotary navigation drilling tools and its application[J]. **Oil Drilling & Production Technology**, 2008, 30(5): 21-24.

[128] 朱钊, 陈钦强, 吕青莉, 等. 中国石油十大科技创新成果简介[J]. 石油科技论坛, 2021, 40(6): 67-77.
ZHU Zhao, CHEN Qin-qiang, LYU Qing-li, et al. Top 10 items of achievements from CNPC's technological innovation[J]. **Petroleum Science and Technology Forum**, 2021, 40(6): 67-77.

[129] 李远志. 新型静态偏置指向式旋转导向执行机构导向控制研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
LI Yuan-zhi. Steering control research on a new steering mechanism for static point-the-bit rotary steerable system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.

[130] 操秀英. "璇玑"系统"智造链"建成投产可年产 100 套高端装备[N]. 科技日报, 2022: 2022-04-27(005).
CAO Xiu-ying. 'Xuanji' system 'intelligent chain' built and put into operation 100 sets of high-end equipment[N]. **Science and Technology Daily**, 2022-04-27(005).

[131] 陈虎, 和鹏飞, 万圣良. 国产旋转导向及随钻测井系统在渤海某油田的应用[J]. 探矿工程 (岩土钻掘工程), 2017, 44(3): 35-38.
CHEN Hu, HE Peng-fei, WAN Sheng-liang. Application of China-made rotary steering and logging while drilling systems in adjustment well of Bohai[J]. **Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)**, 2017,

44(3): 35-38.

[132] 曲艺. 我国首条“璇玑”系统“智造链”建成投产[N]. 中国电力报, 2022: 2022-04-21(001).
QU Yi. China’s first ‘Xuanji’ system ‘intelligent chain’ put into operation[N]. **China Electric Power News**, 2022-04-21(001).

[133] 张光伟, 乔阳, 田帆, 等. 全旋转内置式导向钻井工具动力学分析及仿真[J]. 机械强度, 2021, 42(6): 1417-1423.
ZHANG Guang-wei, QIAO Yang, TIAN Fan, et al. Dynamic analysis and simulation of full rotary built-in steering drilling tools[J]. **Journal of Mechanical Strength**, 2020, 42(6): 1417-1423.

[134] 尹福来. 新型指向式旋转导向钻井工具导向控制研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2021.
YIN Fu-lai. A new type of directional rotary-guided drilling tool-oriented control research[D]. Xi’an: Xi’an University of Petroleum, 2021.

[135] 许光泉, 严家平, 夏小亮. 矿井底板突水新型注浆材料配比优化试验[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(12): 22-24.
XU Guang-quan, YAN Jia-ping, XIA Xiao-liang. Optimization experiment on mixing ratio of new grouting material to prevent mine in floor water inrush[J]. **Coal Science and Technology**, 2010, 38(12): 22-24.

[136] 徐志鹏, 韩光利, 左永江, 等. 立井地面预注浆采用钻井废弃泥浆作注浆材料[J]. 建井技术, 2011, 32(2): 80-82.
XU Zhi-peng, HAN Guang-li, ZUO Yong-jiang, et al. Ground pre-grouting of vertical shaft using waste drilling mud as grouting material[J]. **Mine Construction Technology**, 2011, 32(2): 80-82.

[137] DŽUNUZOVIC N, KOMLJENOVIC M, NIKOLIC V, et al. External sulfate attack on alkali-activated fly ash-blast furnace slag composite[J]. **Construction and Building Materials**, 2017, 157: 737-747.

[138] PULIGILLA S, MONDAL P. Role of slag in microstructural development and hardening of fly ash-slag geopolymer[J]. **Cement and Concrete Research**, 2013, 43: 70-80.

[139] KÜRKLÜ G. The effect of high temperature on the design of blast furnace slag and coarse fly ash-based geopolymer mortar[J]. **Composites Part B: Engineering**, 2016, 92: 9-18.

[140] MARJANOVIC N, KOMLJENOVIC M, BAŠCAREVIC Z, et al. Physical-mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash-blast furnace slag blends[J]. **Ceramics International**, 2015, 41(1): 1421-1435.

[141] 李森森. 新型水泥基注浆材料的特性优化试验[J]. 煤炭技术, 2017, 36(8): 169-170.
LI Sen-sen. Property optimization test of new cement-based grouting material[J]. **Coal Technology**, 2017, 36(8): 169-170.

[142] 赵献辉, 刘春原, 刘宇飞, 等. 碱渣−粉煤灰基新型注浆材料固化机理试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(4): 1417-1423.
ZHAO Xian-hui, LIU Chun-yuan, LIU Yu-fei, et al. Experimental research on solidified mechanism of new soda residue-fly ash-based grouting materials[J]. **Bulletin of the Chinese Ceramic Society**, 2017, 36(4): 1417-1423.

[143] 徐健. 水泥−黏土−矿渣粉注浆材料性能试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
XU Jian. Experimental study on properties of cement-clay-slag grouting material[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2019.

[144] 连会青, 杨俊文, 雷玉娟. 水泥−粉煤灰−水玻璃注浆材料强度影响因素试验研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(12): 107-112.
LIAN Hui-qing, YANG Jun-wen, LEI Yu-juan. Experimental study on the influence factors of strength of cement-fly ash-water-glass grouting material[J]. **Coal Engineering**, 2018, 50(12): 107-112.

[145] 张曼曼, 鲁海峰, 年宾, 等. 地面注浆加固顶板高掺量粉煤灰水泥浆液材料性能研究[J]. 煤矿安全, 2020, 51(6): 60-65.
ZHANG Man-man, LU Hai-feng, NIAN Bin, et al. Study on performance of cement slurry material with high fly ash content for roof reinforcement by grouting on the ground[J]. **Safety in Coal Mines**, 2020, 51(6): 60-65.

[146] 李福海, 胡志明, 李瑞, 等. 粉煤灰及矿粉对水泥基注浆料性能的影响[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(1): 26-31.
LI Fu-hai, HU Zhi-ming, LI Rui, et al. Effect of fly ash and mineral powder on properties of cement-based slurry[J]. **Research and Exploration in Laboratory**,

2020, 39(1): 26-31.

[147] 姜瑜, 郭飞, 孔恒, 等. 注浆材料的现状与发展策略[J]. 化工新型材料, 2022, 50(1): 282-286.
JIANG Yu, GUO Fei, KONG Heng, et al. Current situation and development strategy of grouting material[J]. **New Chemical Materials**, 2022, 50(1): 282-286.

[148] 张联志, 陈伟, 周湘凌, 等. 水泥—粉煤灰—黏土复合浆液工程特性探究[J]. 湖南工程学院学报（自然科学版）, 2014, 24(4): 76-79.
ZHANG Lian-zhi, CHEN Wei, ZHOU Xiang-ling, et al. The engineering performance of cement-fly ash-clay grout[J]. **Journal of Hunan Institute of Engineering**, 2014, 24(4): 76-79.

[149] 刘广超. 大断裂构造井上下联合注浆加固技术[J]. 煤矿安全, 2018, 49(10): 163-167.
LIU Guang-chao. Up-and-down joint grouting reinforcement technology for large faulted structure[J]. **Safety in Coal Mines**, 2018, 49(10): 163-167.

[150] 巫茂寅, 王起才, 张戎令, 等. 复合水泥基−水玻璃双液注浆材料胶凝性能及抗压强度试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(9): 2741-2746.
WU Mao-yin, WANG Qi-cai, ZHANG Rong-ling, et al. Cementing performance and compressive strength of complex cementations sodium silicate two-shot grouting materials[J]. **Bulletin of the Chinese Ceramic Society**, 2016, 35(9): 2741-2746.

[151] 闫清武. 水泥−粉煤灰−黏土复合浆材的注浆试验研究[J]. 工程建设与设计, 2015(2): 113-114.
YAN Qing-wu. Grouting study on cement-fly ash-clay composite grouting material[J]. **Construction & Design for Project**, 2015(2): 113-114.

[152] 汪宏伟, 徐辉东, 马芹永. 粉煤灰−偏高岭土水泥基复合材料性能研究[J]. 中国科技论文, 2019, 14(4): 452-457.
WANG Hong-wei, XU Hui-dong, MA Qin-yong. Performance of cement-based composite material with fly ash and metakaolin[J]. **China Science Paper**, 2019, 14(4): 452-457.

[153] 袁辉, 邓昀, 蒲朝阳, 等. 深井巷道围岩 L 型钻孔地面预注浆加固技术[J]. 煤炭科学技术, 2014(7): 10-13, 17.
YUAN Hui, DENG Yun, PU Chao-yang, et al. L-type borehole ground grouting reinforcement technology of surrounding rock in deep mine roadway[J]. **Coal Science and Technology**, 2014(7): 10-13.

[154] 张庆和, 孙睿. 千米立井综合治理方案与实践[J]. 煤炭工程, 2004(11): 21-23.
ZHANG Qing-he, SUN Rui. Comprehensive treatment scheme and practice of kilometer shaft[J]. **Coal Engineering**, 2004(11): 21-23.

[155] 袁东锋, 李方政, 周禹良, 等. 富水砂层盾构隧道侧穿建筑物水平定向钻孔注浆技术[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(4): 154-159.
YUAN Dong-feng, LI Fang-zheng, ZHOU Yu-liang, et al. Horizontal directional drilling and grouting technique for the shield tunnel passing beside buildings in water-rich sand stratum[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2019, 56(4): 154-159.

[156] 冯旭海, 赵国栋. 立井地面综合注浆技术研究与应用综述[J]. 建井技术, 2012(6): 8-11.
FENG Xu-hai, ZHAO Guo-dong. Summary of research and application of vertical shaft ground comprehensive grouting technology[J]. **Mine Construction Technology**, 2012(6): 8-11.

[157] 罗维彩. 厦门翔安海底隧道富水砂层段注浆施工技术研究[J]. 石家庄铁道学院学报（自然科学版）, 2008, 21(1): 115-118.
LUO Wei-cai. Research on grouting construction technology in water-rich sandy stratum of Xiang'an subsea tunnel in Xiamen[J]. **Journal of Shijiazhuang Railway Institute (Natural Science)**. 2008, 21(1): 115-118.

[158] 陈铁林, 滕红军, 张顶立. 厦门翔安海底隧道富水砂层注浆试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 2): 3711-3717.
CHEN Tie-lin, TENG Hong-jun, ZHANG Ding-li. Grouting test on water-enriched sand layer of Xiamen Xiang'an subsea tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Suppl.2): 3711-3717.

[159] 章邦超. 上软下硬地层区段新建地铁线路盾构法下穿既有地铁运营线路关键施工技术[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(9): 132-136.
ZHANG Bang-chao. Key construction techniques for metro lines with shield tunneling method under-crossing

existing lines in upper-soft lower-hard stra-tum[J]. **Urban Mass Transit**, 2021, 24(9): 132-136.

[160] 钱庄, 许烨霜, 沈水龙, 等. 砂土覆盖型岩溶地层盾构隧道施工地面注浆加固实例分析[J]. 隧道建设, 2016, 36(4): 479-484.
QIAN Zhuang, XU Ye-shuang, SHEN Shui-long, et al. A case study of ground surface grouting reinforcement of shield tunnel in karst strata with sandy soil cover[J]. **Tunnel Construction**, 2016, 36(4): 479-484.

[161] 梁敏. 高黎贡山隧道 2 号竖井地面预注浆施工关键技术[J]. 建井技术, 2021, 42(4): 10-13.
LIANG Min. Key technology of surface pre-grouting operation for no. 2 shaft of Gaoligong mountain tunnel[J]. **Mine Construction Technology**, 2021, 42(4): 10-13.

[162] 郑凯歌. 碎软低透煤层底板梳状长钻孔分段水力压裂增透技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(2): 272-281.
ZHENG Kai-ge. Permeability improving technology by sectional hydraulic fracturing for comb-like long drilling in floor of crushed and soft coal seam with low permeability[J]. **Journal of Mining and Safety Engineering**, 2020, 37(2): 272-281.

[163] 李金锁, 彭华, 马秀敏, 等. 水压致裂地应力测试方法在云南大理−丽江铁路隧道工程中的应用[J]. 地质通报, 2006, 25(5): 644-648.
LI Jin-suo, PENG Hua, MA Xiu-min, et al. Application of hydraulic fracturing in-situ stress measurements in tunneling along the Dali-Lijiang railway, Yunnan, China[J]. **Geological Bulletin of China**, 2006, 25(5): 644-648.

[164] 李贤忠. 高压脉动水力压裂增透机理与技术[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
LI Xian-zhong. The mechanism and technology of permeability enhancements in coal seam based on high pressure pulsating hydraulic fracturing[D]. Xuzhou: China University of Mining, 2013.

[165] 翟成, 李贤忠, 李全贵. 煤层脉动水力压裂卸压增透技术研究与应用[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12): 1996-2001.
ZHAI Cheng, LI Xian-zhong, LI quan-gui. Research and application of coal seam pulse hydraulic fracturing technology[J]. **Journal of China Coal Society**, 2011, 36(12): 1996-2001.

[166] 刘乐, 张俭, 方秦月, 等. 碎软低渗煤层顶板定向长钻孔水力加砂分段压裂工程应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(8): 91-100.
LIU Le, ZHANG Jian, FANG Qin-yue, et al. Application of hydraulic sand staged fracturing in directional long drilling of roof in broken soft and low permeability coal seam[J]. **Coal Science and Technology**, 2022, 50(8): 91-100.

[167] 朱雯钊, 苗娟, 陈思韵, 等. 深层碳酸盐岩大斜度井及水平井纤维暂堵转向分段压裂参数优化[J]. 特种油气藏, 2022, 29(3): 170-174.
ZHU Wen-zhao, MIAO Juan, CHEN Si-yun, et al. Optimization of fracture parameters for staged fracturing with temporary fiber plugging and diversion in highly deviated wells and horizontal wells in deep carbonate reservoirs[J]. **Special Oil & Gas Reservoirs**, 2022, 29(3): 170-174.

[168] 王晨阳, 李树刚, 张永涛, 等. 煤矿井下硬煤层顺层长钻孔分段压裂强化瓦斯抽采技术及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(8): 72-81.
WANG Chen-yang, LI Shu-gang, ZHANG Yong-tao, et al. Enhanced gas drainage technology by staged fracturing in long bedding borehole in hard coal bed of underground coal mine and its application[J]. **Coal Geology & Exploration**, 2022, 50(8): 72-81.

[169] 夏永学, 潘俊锋, 谢非, 等. 井下超长水平孔分段压裂防冲机理及效果[J]. 煤炭学报, 2022, 47(增刊 1): 115-124.
XIA Yong-xue, PAN Jun-feng, XIE Fei, et al. Anti-impact mechanism and effect of subsection fracturing in underground ultra-long horizontal hole[J]. **Journal of China Coal Society**, 2022, 47(Suppl. 1): 115-124.

[170] 李明, 赵岐, 张砚琨, 等. 基于 PHF-LSM-MT 的非均质岩石细观界面与水力压裂数值建模[J]. 东北大学学报（自然科学版）, 2021, 42(8): 1127-1135.
LI Ming, ZHAO Qi, ZHANG Yan-kun, et al. Numerical modeling for the material interface of heterogeneous rock at mesoscale and hydraulic fracturing based on the PHF-LSM-MT[J]. **Journal of Northeastern University (Natural Science)**, 2021, 42(8): 1127-1135.

[171] KRZACZEK M, NITKA M, TEJCHMAN J. Effect of gas content in macropores on hydraulic fracturing in rocks

using a fully coupled DEM/CFD approach[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 2021, 45(2): 234-264.

[172] YANG D, ZHOU Y, XIA X, et al. Extended finite element modeling nonlinear hydro-mechanical process in saturated porous media containing crossing fractures[J]. **Computers and Geotechnics**, 2019, 111: 209-221.

[173] 赵大奎, 郑军, 徐润. 地面预注浆与凿井平行作业施工技术[J]. 煤炭科学技术, 2000, 28(5): 10-13.
ZHAO Da-kui, ZHENG Jun, XU Run. Parallel operation construction technology of ground pre-grouting and sinking[J]. **Coal Science and Technology**, 2000, 28(5): 10-13.

[174] 李柱和, 祝树红, 顾雪明. 防渗堵漏技术在煤矿建设中的应用[J]. 建井技术, 2000, 21(1): 18-20.
LI Zhu-he, ZHU Shu-hong, GU Xue-ming. Application of anti-seepage and plugging technology in coal mine construction[J]. **Mine Construction Technology**, 2000, 21(1): 18-20.

[175] 高岗荣, 张斗群, 袁辉. 二重管旋喷注浆法及其在地基处理工程中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2001, 29(3): 19-21.
GAO Gang-rong, ZHANG Dou-qun, YUAN Hui. Double-tube jet grouting method and its application in foundation treatment engineering[J]. **Coal Science and Technology**, 2001, 29(3): 19-21.

[176] 云南省滇中引水工程建设管理局. 滇中引水工程专家委员会召开香炉山隧洞涌水突泥处理及超前地质预报专题会[EB/OL]. (2021-06-26)[2021-06-22]. http://-dzys.yn.gov.cn/dzysdt/202106/t20210622_1054930.html.
Yunnan Dianzhong Water Diversion Project Construction Management Bureau. Expert committee of water diversion project in central Yunnan held symposium on treatment of water and mud inrush and advance geological prediction in Xianglushan tunnel[EB/OL]. (2021-06-26)[2021-06-22]. http://dzys.yn.gov.cn/dzysdt/-202106/-t20210622_1054930. html.

[177] 王亮. 常德青峰煤矿四号井三水平二采区地面钻孔注浆堵水工艺[J]. 地下水, 2011, 33(3): 105-106.
WANG Liang. Grouting water plugging technology of surface borehole in third level and second mining area of No. 4 well in Changde Qingfeng coal mine[J]. **Ground Water**, 2011, 33(3): 105-106.

[178] 陈兵宇, 刘亚军, 武志明, 等. 三山岛金矿导水断裂带的危害及防治方法[J]. 现代矿业, 2013, 29(10): 139-141.
CHEN Bing-yu, LIU Ya-jun, WU Zhi-ming, et al. Hazards and control methods of water flowing fault zone in Sanshan island gold mine[J]. **Modern Mining**, 2013, 29(10): 139-141.

[179] 郭凡进. 地面钻孔注浆封堵井下巷道隔绝火区灭火技术[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(5): 52-54.
GUO Fan-jin. Fire extinguishing technology based on surface borehole grouting to seal mine roadway for insulation of fire zone[J]. **Coal Science and Technology**, 2012, 40(5): 52-54.

[180] 郑文江, 穆智蕊. 全球工程前沿发展新趋势[J]. 中国科技产业, 2022(3): 56-58.
ZHENG Wen-jiang, MU Zhi-rui. New trend of global engineering frontier development[J]. **China Science and Technology Industry**, 2022(3): 56-58.

[181] 中国工程科技知识中心. 《全球工程前沿 2021》报告发布土木、水利与建筑工程领域 top10[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(12): 2105-2105.
China Engineering Science and Technology Knowledge Center. Global engineering frontier 2021 report releases top 10 in civil, water resources and building engineering[J]. **Tunnel Construction**, 2021, 41(12): 2105-2105.

[182] 郑文江. 全球工程前沿发展趋势[J]. 科技中国, 2021(1): 8-12.
ZHENG Wen-jiang. Global engineering frontier development trend[J]. **Science and Technology China**, 2021(1): 8-12.

[183] 中国日报. 9 大领域 184 项全球工程前沿在北京发布[J]. 科技导报, 2020, 38(24): 8.
China Daily. The forefront of 184 global projects in 9 fields was released in Beijing[J]. **Science and Technology Bulletin**, 2020, 38(24): 8.

[184] 中国工程科技知识中心. 《全球工程前沿 2020》报告发布土木、水利与建筑工程领域 top10[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(12): 1741.
China Engineering Science and Technology Knowledge Center. Global engineering frontier 2020 report releases top 10 in civil, water resources and building engineering[J]. **Tunnel Construction**, 2020, 40(12): 1741.