DOI：10.16285/j.rsm.2024.0496

调控层胶结充填体三轴压缩力学性能及破坏特征研究

徐文彬[1]，赵康奇[1]，张亚伦[1]，刘成保[1]，周 磊[2]

（1. 中国矿业大学（北京） 能源与矿业学院，北京 100083；2. 安徽马钢矿业资源集团有限公司，安徽 马鞍山 243000）

摘 要：为了解决阶段空场嗣后充填法二步骤矿柱开采时一步骤采场充填体易失稳垮塌的难题，提出了充填调控层理念，以增强一步骤采场充填体的稳定性。借助三轴压缩试验仪，分析了不同调控层高度、主体层灰砂比和围压对充填体力学性能及破坏规律的影响，探究了单层充填体与含调控层充填体偏应力−应变曲线特征及破坏模式的差异性。结果表明：调控层强化了充填体的屈服阶段，进而提高了其峰值强度；调控层占比不变时，主体层灰砂比越小，强化效果越好；主体层灰砂比不变时，调控层占比越大，强化效果越好；围压与充填体峰值强度呈对数函数关系，表观黏聚力 c、表观内摩擦角 φ 值与充填体的主体层灰砂比、调控层占比大小呈线性相关；未添加调控层充填体的破坏形式以斜剪切裂纹为主，添加调控层后则以剪切、拉伸以及混合破坏 3 种形式为主；调控层占比不变，主体层灰砂比较小时，拉伸裂纹贯穿调控层；验证了含调控层充填体配比 1∶20−2/5（表示充填体的主体层灰砂比为 1∶20，调控层占比为整体的 2/5）替代某矿原充填体配比（1∶7−0）的可行性，1∶20−2/5 单位体积充填体可节约 6.85%水泥用量。研究结果可为节约矿山充填成本和提高作业安全提供一定的理论指导。

关 键 词：调控层；胶结充填体；力学性能；应力−应变曲线；破坏模式

中图分类号：TU457 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2024) 12－3658－11

Mechanical properties and failure characteristics of strengthening stratified cemented tailings backfill under triaxial compression

XU Wen-bin[1], ZHAO Kang-qi[1], ZHANG Ya-lun[1], LIU Cheng-bao[1], ZHOU Lei[2]

(1. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China;
2. Anhui Masteel Mining Resources Group Co., Ltd., Maanshan, Anhui 243000, China)

Abstract: In order to solve the collapsible difficulties of primary stope in subsequent stoping backfilling method, the idea of strengthening stratified structure in primary stoping backfill is put forward. The effect of strengthening stratified height, cement-to-tailings ratio and confining pressure on the mechanical properties and failure rules of cemented tailings backfill (CTB) is investigated by the triaxial compressive testing. The difference of deviational-stress-strain curves and failure modes between CTB and strengthening stratified CTB is investigated. The results show that the yield phase and peak strength of CTB are enhanced by the strengthening stratified structure in CTB. When the strengthening stratified thickness keeps constant, the strengthening effect is raised as the cement-to-tailings ratio in the main layer become lower. Moreover, the cement-to-tailings ratio in the main layer remains unchanged, the strengthening effect is advanced by the increase of strengthening stratified thickness as well. The peak strength of CTB is logarithmically increased with confining pressures, and the apparent cohesion and friction angle are linearly increased with cement-to-tailings ratio in the main layer and strengthening stratified thickness. The failure mode of CTB without strengthening stratified structure is mainly dominated by an oblique shear crack, and the strengthening stratified CTB presents three failure modes: shear, tensile and mixed. When the cement-to-tailings ratio in the main layer is low, tensile cracks run through the strengthening stratified structure. The feasibility of 1∶7−0 backfill replaced by 1∶20−2/5 is verified, and the backfill cost of 1∶20−2/5 can be saved by 6.85% cement cost, where 1∶20 is cement-to-tailings ratio, and 2/5 is the proportion of strengthening stratified. The results can provide theoretical references for saving backfill cost and improving operation safety.

Keywords: strengthening stratified structure; cemented tailings backfill; mechanical property; stress-strain curves; failure mode

收稿日期：2024-04-22 录用日期：2024-08-12

基金项目：中央高校基本业务费（No.2023JCCXNY01）；重点研发计划项目（No.2022AB31022）。

This work was supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2023JCCXNY01) and the Key Technologies Research & Development Program (2022AB31022).

第一作者简介：徐文彬，男，1985 年生，博士，副教授，主要从事充填采矿理论与技术、矿山压力与岩层控制及排土场边坡的研究。

E-mail: xuwb08@163.com

1　引　言

随着我国对环境保护要求越来越严格，矿产资源绿色开发已成为矿山的必然发展趋势。阶段空场嗣后充填法即能消纳尾砂，解决尾砂地表堆存问题[1]，还可高效回收矿产资源，降低矿石损失与贫化，因而该采矿方法被广泛应用于开采大规模地下金属矿床[2-4]。阶段空场嗣后充填法通常将矿块划分为矿房与矿柱，遵循一步骤采充矿房，二步骤采充矿柱的回采顺序。当回采矿柱时，需要借助矿房充填体来维持矿柱采场的稳定性。根据现场调研表明，受开采扰动影响，在回采二步骤矿柱时，一步骤矿房的充填体易垮塌[5]，尤其是充填体中部垮塌最为严重。因此，一步骤矿房充填体的强度影响二步骤矿柱采场的安全与矿石贫化率。

阶段空场嗣后充填法开采形成的采场空区体积可高达数万甚至数十万 m^3，因此，考虑到充填系统运行能力以及采空区底部充填挡墙的稳定性，矿山通常会采用分步充填采场空区，即采场空区底部和顶部采用高灰砂配比、中间采用低灰砂配比充填料浆进行充填[6-7]。分步充填使得一步骤矿房采场空区的充填体出现分层结构，其力学性能与完整充填体存在明显差异[8-11]。因此，国内外学者对分层充填体的力学特性开展了大量的研究，汪杰等[12]分析了分层效应对分层充填体强度与损伤的影响，并构建了分层充填体的本构模型；李金鑫等[13]通过分离式霍普金森压杆（split Hopkinson pressure bar，SHPB）系统开展分层充填体的动态力学试验，发现分层充填体的破坏首先发生在分层界面，且抗冲击性也比完整充填体弱；Xu 等[14]探究了分层数对分层充填体强度的影响，得出了随着层数的增加，分层充填体强度先减后增的规律，临界层数为 4 层；曹帅等[15]基于分层充填体强度结果，定义了分层折减效应系数；赵康等[9, 16]将不同灰砂比的充填体两两组合，探究了该组合体的损伤特性和协同变形规律；唐亚男等[17]通过 PFC^{2D} 软件模拟分析了不同中间层高度比分层充填体的破坏全过程特征，发现分层充填体主要破坏发生于中间层，裂纹集中于中层并逐步向顶、底部发育贯穿试件；姜立春等[18]构建了分层充填矿柱的动力响应模型，分析了其在爆破扰动下的稳定性，发现了低灰砂比的中间层是整体较薄弱的位置，极易发生失稳；Zhang 等[19]研究了应变率对分层充填体动态破坏的影响，其试验与数值模拟结果均表明了低灰砂比分层变形程度最为严重。以上研究证明，无论是动态还是静态力学试验，分层结构对充填体的稳定性都产生了弱化作用，特别是充填体的中间弱层。

为了提高一步骤矿房充填体的稳定性，学者们通过研发新型胶凝材料[20-21]、添加纤维[22-24]等方法来增强充填体的强度，取得了较好的效果。但是，上述方法会增加现场充填工序，间接地会提高矿山充填成本。基于此，作者提出调控层理念，在不增加矿山充填工序与成本的前提下，改变部分中间层的灰砂配比，在中间层增加一层或多层高灰砂配比的充填层，以增强充填体的整体稳定性。为此，本文开展了围压分别为 0、75、150 kPa 和 300 kPa 条件下的不同调控层高度占比及主体层灰砂比的充填体三轴压缩试验，分析了含调控层充填体的力学特征及破坏模式，并将含调控层的充填成本与矿山实际充填的充填成本进行了比较。此外，还探究了含调控层充填体与单层充填体偏应力−应变曲线特征及破坏模式的差异性。研究结果可为矿山预防井下采场充填体垮塌和节省充填成本提供理论依据与技术指导。

2　试验材料与方案

2.1　试验材料

试验所用尾砂取自安徽某铁矿充填站，经晒干、筛分后，测量其密度情况，测量结果表明，不同粒径范围下的尾砂密度差值不大，平均为 2.898 g/cm^3。尾砂粒径分布情况见图 1，由图可知，尾砂平均粒径为 13.85 μm＜19 μm，小于 20 μm 的细颗粒含量为 61.47%＞60%，为超细尾砂，不均匀系数 $C_u = d_{60}/d_{10} = 7.57$，曲率系数 $C_c = d_{30}^2/(d_{60}d_{10}) = 0.96$。胶凝材料选用 42.5 普通硅酸盐水泥，其化学成分见表 1。试验用水为实验室普通自来水。

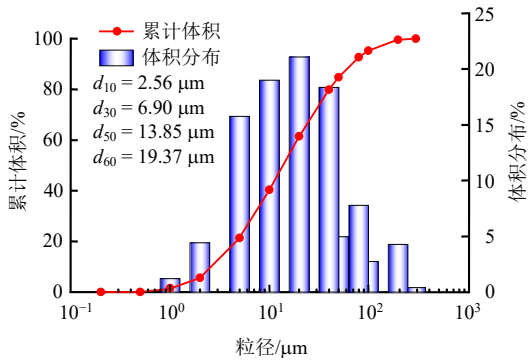


图 1　尾砂粒径分布曲线

Fig.1　Particle size distribution curve of tailings

2.2　试验方案

层状充填体的制备参考某铁矿的实际充填配

表 1 水泥化学成分

Table 1 Chemical composition of cement

成分	含量/%	成分	含量/%
CaO	64.78	K_2O	0.35
SiO_2	20.34	MgO	1.09
Fe_2O_3	3.11	SO_3	2.20
Al_2O_3	5.02	其他	3.11

比情况。采用直径 D = 39.1 mm、高度 H = 80 mm 的透明圆柱体模具，制备质量分数为 65%的含调控层的胶结充填体试样进行试验。另外，以主体层灰砂比为参考，制备 3 组单层充填体试样进行对比分析。含调控层充填体试样的层数为 3 层，即顶层、主体层和调控层，顶层灰砂比设置为 1:6，主体层灰砂比分别设置为 1:7、1:9、1:20，调控层灰砂比设置为 1:4，顶层、主体层的高度分别占整个试样的 1/10 与 9/10，调控层设置在整个试样的中部，其高度分别占整个试样高度的 0、1/5 和 2/5，即调控层占比分别为 0、1/5 和 2/5，具体参数设计位置见表 2 和图 2。

表 2 试验参数与方案设计

Table 2 Experimental parameters and program design

顶层灰砂比	主体层灰砂比	调控层	
		灰砂比	高度占比
1:6	1:7	1:4	0、1/5、2/5
1:6	1:9	1:4	2/5
1:6	1:20	1:4	2/5

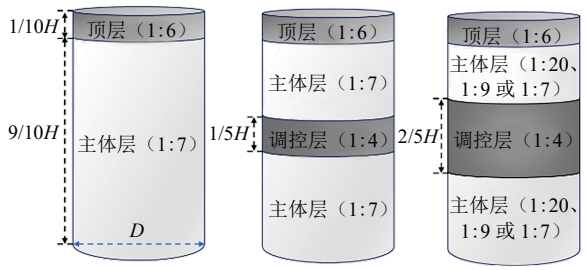


图 2 含调控层试样参数设计图

Fig.2 Parameter design of samples with strengthening stratified structure

依照设计方案与参数，将混合均匀的料浆分次进行浇筑。浇筑完成后放入温度为（20±1）℃、相对湿度为（95±5）%的养护箱中进行养护，24 h 后取出脱模，紧接着放入养护箱中进行二次养护，直至达到预设龄期（28 d）后取出，然后立即对试样开展三轴压缩试验。试样的具体制备及试验流程见图 3。

试验所用仪器为三轴剪切渗透试验仪，轴向量程为 0～60 kN，侧向加载压力量程为 0～2 MPa，采用应变控制式加载模式，加载速率为 0.5 mm/min。在加载过程中，数据通过试验仪的自动采集系统实时保存。

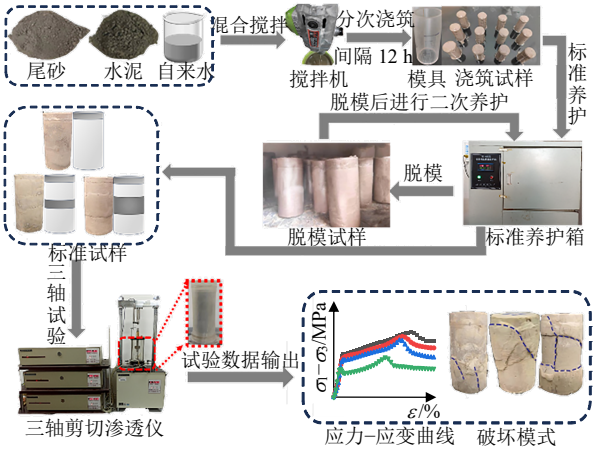


图 3 试样制备及试验流程

Fig.3 Samples preparation and test procedure

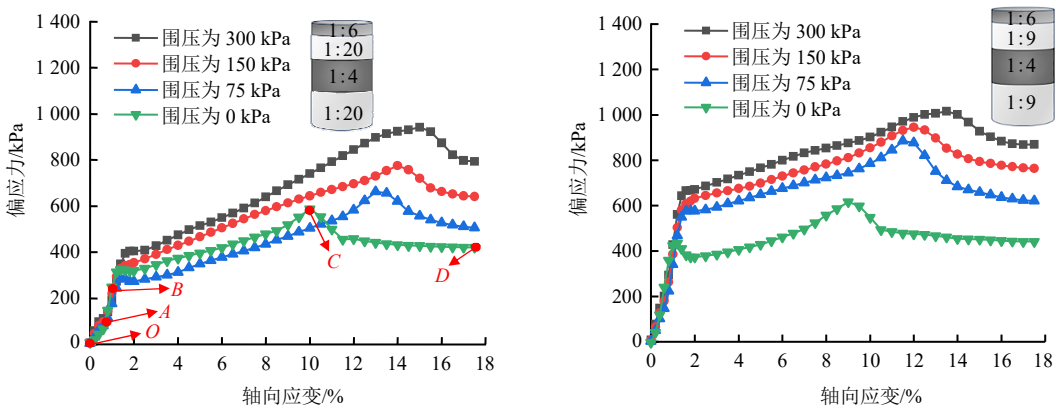
3 试验结果分析

为探究含调控层胶结充填体的力学性能及破坏特征，对试样开展围压分别为 0、75、150 kPa 和 300 kPa 的三轴压缩试验。下文部分图表中出现的试样编号以“主体层灰砂比−调控层占比”的形式进行命名，如 1:7−1/5 试样，表示充填体的主体层灰砂比为 1:7，调控层占比为整体的 1/5。

3.1 偏应力−应变曲线特征

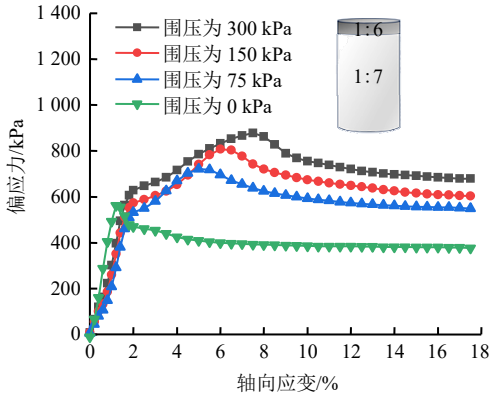
图 4 为不同条件下含调控层充填体的偏应力−应变曲线，图 5 为单层充填体的偏应力−应变曲线。由图 4、5 可知，各充填体在不同围压下的曲线变化趋势基本一致，以图 4(a)中围压 0 kPa 时的充填体曲线为例，皆可将其划分为压密（*OA*）、线弹性（*AB*）、屈服强化（*BC*）与峰后延性破坏（*CD*）4 个阶段，但受主体层灰砂比与调控层占比大小的影响，充填体曲线仍在 4 个阶段中表现出不同的性质，单层与含调控层充填体曲线也存在明显差异。具体分析情况如下：

OA 阶段：因充填体内部原生微裂纹、孔洞被压缩所引起，该阶段曲线表现为上凹形增长。由图 4 可知，围压对压密阶段的影响较小，曲线基本重叠。但个别除外，如图 4(c)所示，1:7−0 充填体曲线在施加围压后出现明显的下凹形，与灰砂比为 1:7（见图 5(c)）的单层充填体相比表现出相反的规律，即施加围压后，充填体压密情况减小[25]。主要原因为，受充填体层状结构的影响，在施加方向与之平行的

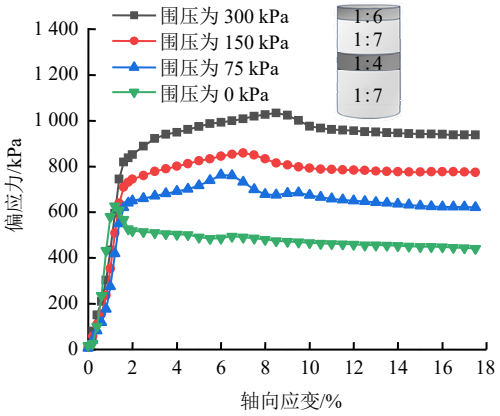


(a) 1∶20−2/5

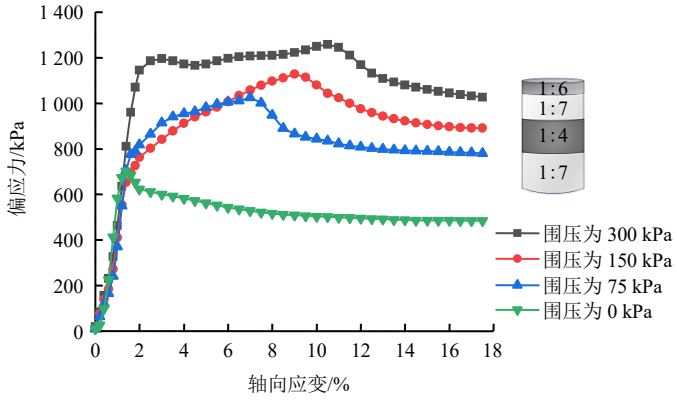
(b) 1∶9−2/5



(c) 1∶7−0



(d) 1∶7−1/5



(e) 1∶7−2/5

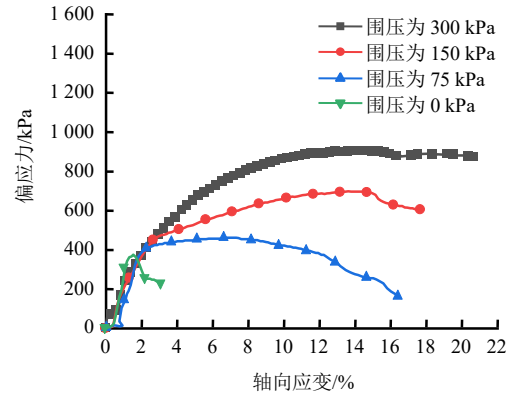
图 4　不同条件下含调控层充填体的偏应力−应变曲线

Fig.4　Deviatoric stress-strain curves of strengthening stratified cemented tailings backfill under different conditions

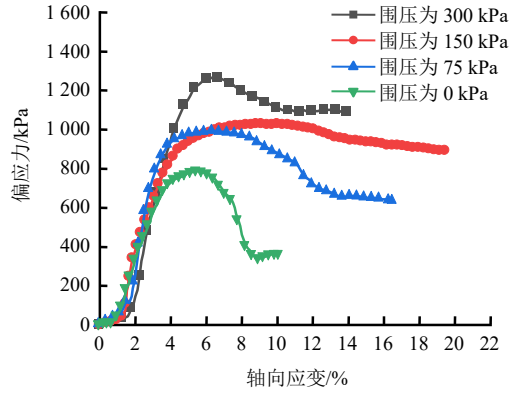
围压后，由于主体层灰砂比（1∶7）与顶层灰砂比（1∶6）相差较小，充填体侧面承受载荷较为均匀，分层界面受到围压的剪切作用，界面之间微裂纹、孔洞扩张，其扩张程度可能大于各层内部缺陷被压密闭合的程度，因而导致曲线上凹。当各层灰砂比相差较大，则承载围压的主要结构为弹性模量较大的调控层（见图 4(a)、4(b)）和顶层（见图 4(d)、4(e)），降低了围压对分层界面的剪切作用，因而曲线逐渐趋于重叠。

AB 阶段：应力−应变呈线性变化，斜率差距较小，但随着围压、主层灰砂比以及调控层占比的增大，弹性极限（*B* 点）所达的应力越大，进而增大峰值强度。

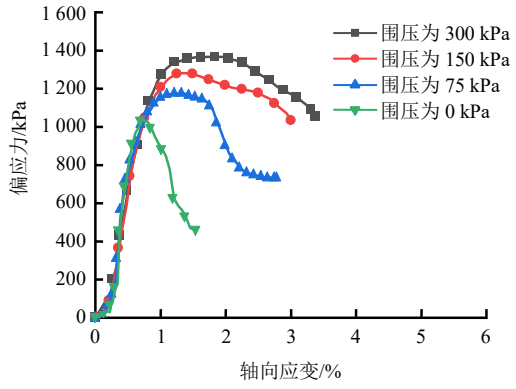
BC 阶段：曲线出现峰值点，含调控层比单层充填体多一个峰值点。当主体层灰砂比为 1∶20 时，含调控层充填体的峰值应力较高，而灰砂比为 1∶9 或 1∶7 时，单层充填体峰值应力较高，这间接表明主体层灰砂比较低时，调控层的强化效果更好，也



(a) 灰砂比 1:20



(b) 灰砂比 1:9



(c) 灰砂比 1:7

图 5 单层充填体的偏应力−应变曲线

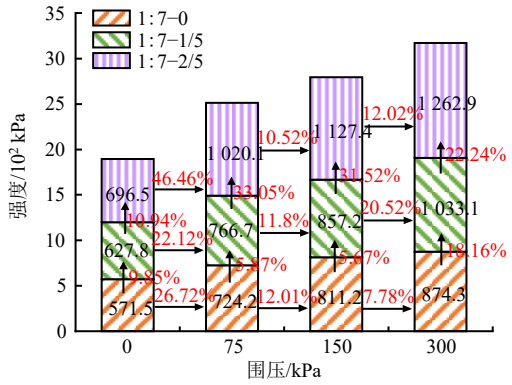
Fig.5 Deviatoric stress-strain curves of single cemented tailings backfill

说明灰砂比较小时，分层效应对充填体力学性能的弱化效果也较小。如图 4 所示，该阶段曲线出现两个峰值点，但在围压为 0 即单轴情况下，主体层灰砂比为 1:7 的充填体（见图 4(c)、4(d)、4(e)）仅出现 1 个峰值点。这可能是因为主体层与顶层的灰砂比相差不大，受力时两者各阶段同步发展，导致中部调控层无法充分体现其较高的承载能力（见图 4(d)、4(e)），但随着围压的增大，灰砂比对曲线发展的敏感性逐步增强，主体层与顶层屈服阶段错开，出现两个峰值点（见图 4(c)）。同时，由图 4(a)、4(b)、4(e)可发现，调控层占比为 2/5，当主体层灰砂比较小时，第 1 峰值点后应力出现小段跌落，并随着围压的增大而减弱，主体层灰砂比较大时，跌落现象消失。此外，由图 4 还可发现，主体层灰砂比越小，充填体的应变硬化现象越显著，这表明添加调控层在主体层灰砂比较小时能起到更好的强化作用。

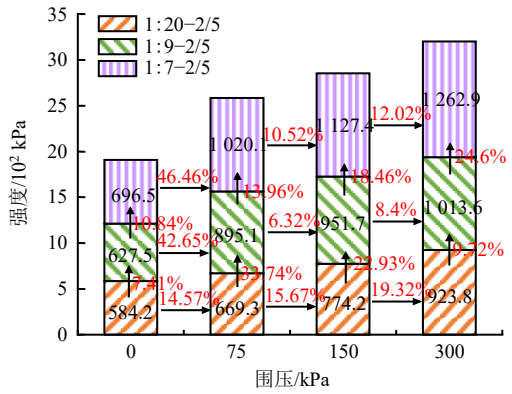
CD 阶段：与煤岩体不同，充填体峰后为延性破坏，仍有着较高的残余强度，如图 4 所示，约为峰值应力的 70%以上。当调控层占比为 2/5 时（见图 4(a)、4(b)、4(e)），随着主体层灰砂比与围压的变化，峰后应力跌落幅度差距较小；当主体层灰砂比为 1:7 时，随着调控层占比的增大，峰后应力跌落幅度呈先减后增的变化规律。

3.2 强度与变形特征分析

图 6 为不同条件下含调控层充填体的强度变化规律。由图 6(a)可知，当主体层灰砂比为 1:7 时，随着围压和调控层占比的增大，充填体的强度增大，具体为：围压为 0 kPa 时，调控层占比从 0 分别增加到 1/5 和 2/5，充填体的强度依次增大了 9.85%与 10.94%；当围压增大至 75、150、300 kPa 时，1:7−1/5 和 1:7−2/5 充填体强度分别增大了 5.86%与



(a) 主体层灰砂比为 1:7，不同调控层占比



(b) 不同主体层灰砂比，调控层占比为 2/5

图 6 不同条件下含调控层充填体的强度变化规律

Fig.6 Strength variation law of strengthening stratified cemented tailings backfill under different conditions

33.05%、5.67%与 31.52%、18.16%与 22.24%。这表明，在围压分别为 0 kPa 和 300 kPa 时，随调控层占比的增大，充填体强度增幅较稳定，而围压为 75 kPa 和 150 kPa 时，充填体强度增幅提升显著。由图 6(a)还可知，随围压增大至 75、150、300 kPa 时，充填体强度增长率总体减小，1∶7−0 充填体强度增幅为 26.72%、12.01%、7.78%，平均为 15.5%；1∶7−1/5 和 1∶7−2/5 充填体强度增幅分别为 22.12%、11.8%、20.52%和 46.46%、10.52%、12.02%，平均为 18.15%和 23%。这表明随围压的增大，调控层占比越大，对充填体强度的增幅效果越好。图 6(b)为不同主体层灰砂比，调控层占比为 2/5 的充填体强度变化规律，由图可知，在不同的围压下，主体层灰砂比越大，充填体的峰值强度越大；围压为 0 kPa 和 300 kPa，主体层灰砂比由 1∶20 增至 1∶9 时，峰值强度增幅较大；围压为 75 kPa 和 150 kPa，主体层灰砂比由 1∶9 增至 1∶7 时，增幅较大；随围压的增大，仅主体层灰砂比较低（1∶20）时，充填体强度增幅递增。

图 7 为含调控层胶结充填体与某铁矿实际配比充填体（1∶7−0）的强度对比，在围压分别为 0、75、150 kPa 和 300 kPa 时，1∶20−2/5 和 1∶9−2/5 充填体与 1∶7−0 充填体的强度差值百分比分别为 2.22%、−7.58%、−4.56%、5.67%和 9.8%、23.6%、17.32%、15.93%，平均值分别为−0.83%和 16.66%。试验结果证明，可采用 1∶20−2/5 充填配比替代 1∶7−0 充填体配比用于该矿采场充填，1∶20−2/5 单位体积充填体可节约 6.85%水泥用量。

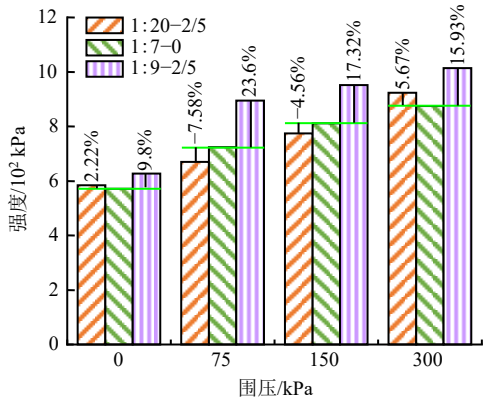


图 7　含调控层充填体与某铁矿实用充填体强度对比

Fig.7　Strength comparison between the strengthening stratified cemented tailings backfill and the practical cemented tailings backfill of an iron mine

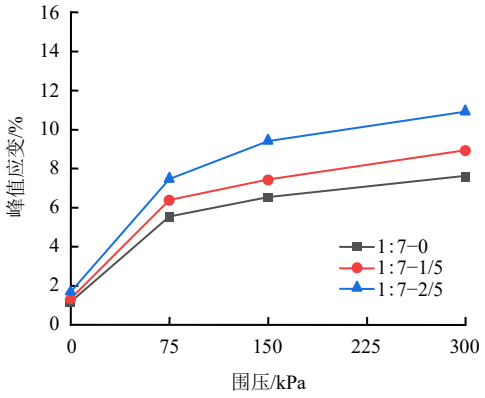
为探究围压与充填体峰值强度的关系，采用函数 $y = A\ln(x+B)+C$（y 为试样强度（kPa）；x 为围压（kPa）；A、B、C 为常数）对图 6 中的数据进行拟合，拟合结果见表 3。由表可知，充填体的峰值强度与围压的对数值呈线性变化，这表明充填体强度随着围压的增大而增大，但强度增幅逐渐减小。

表 3　充填体强度与围压的拟合关系

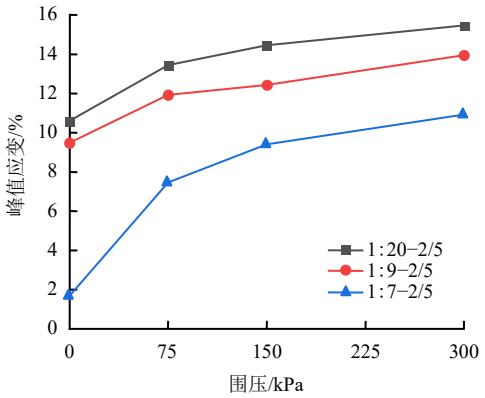
Table 3　Fitting relationship between strength and confining pressure

试样编号	拟合方程	R^2
1∶20−2/5	$y_1 = 1\,083.26\times\ln(x+802.61)-6\,663.4$	0.993 42
1∶9−2/5	$y_2 = 87.85\times\ln(x+3.78)+510.76$	0.999 90
1∶7−0	$y_3 = 129.29\times\ln(x+30.58)+128.67$	0.989 44
1∶7−1/5	$y_4 = 582.09\times\ln(x+302.24)-2\,694.48$	0.995 80
1∶7−2/5	$y_5 = 199.4\times\ln(x+18.89)+110.74$	0.999 01

峰值应变是衡量分层充填体变形能力的一项重要指标。图 8 显示了不同条件下含调控层充填体的峰值应变变化规律。由图可知，充填体的峰值应变随着围压、调控层占比以及主体层灰砂比的增大而增大，主体层灰砂比为 1∶7 时，随着围压的增大，峰值应变的增幅不断增大；调控层占比为 2/5 时，随着主体层灰砂比的增大，围压对峰值应变的增幅逐渐减小。



(a) 主体层灰砂比为 1∶7，不同调控层占比



(b) 不同主体层灰砂比，调控层占比为 2/5

图 8　不同条件下含调控层充填体的峰值应变变化规律

Fig.8　Variation of peak strain of strengthening stratified cemented tailings backfill under different conditions

3.3 表观黏聚力 c 与表观内摩擦角 φ 变化特征

岩土体的黏聚力 c 值和内摩擦角 φ 值是评价其抗剪能力的两个重要参数，c 值大小取决于骨料颗粒间的引力及胶凝物的胶结作用，φ 值大小则取决于骨料颗粒间的摩擦和连锁作用，并且还受到岩土体内部矿物成分及含量的影响[26]。充填体的表观 c、φ 值可通过 Mohr-Coulomb 强度准则计算[4, 25]，具体拟合关系式为 $y = kx+b$（式中 y 为 $(\sigma_1-\sigma_3)/2$；x 为 $(\sigma_1+\sigma_3)/2$；σ_1、σ_3 分别为轴压、围压（kPa）；k、b 为相关系数），进而由下式求得 c、φ 值：

$$\left.\begin{aligned}\varphi &= \arcsin k\\ c &= b/\cos\varphi\end{aligned}\right\} \tag{1}$$

通过式（1）与表 4 的拟合结果计算得到不同条件下含调控层充填体的表观 c、φ 值见图 9。由图可知，调控层占比为 2/5 时，表观 c、φ 值随着主体层灰砂比的增大而增大，主体层灰砂比 1:7 时，表观 c、φ 值随着调控层占比的增大而增大。前文分析了 1:20−2/5 代替 1:7−0 充填体的可行性，对比分析两者的表观 c、φ 值，可知 1:20−2/5 充填体 c 值略小于 1:7−0 充填体（相差 2.23 kPa，即 1.09%），这可能是 1:20−2/5 充填体层数较多的缘故，分层界面的弱胶结效果降低了充填体整体的黏聚力。1:20−2/5 充填体 φ 值略大于 1:7−0 充填体（相差 1.8°，即 9.23%），这是因为充填体体积一定时，添加高灰砂比调控层增大了充填体的密度，进而促进了骨料颗粒间的摩擦与连锁作用。综上所述可知，采用 1:20−2/5 充填体代替 1:7−0 充填体，虽因降低水泥的使用而使内部与骨料颗粒的胶结效果整体下降，但增强了骨料颗粒的摩擦，使得充填体的抗剪切能力并无太大的变化，这进一步表明了 1:20−2/5 代替 1:7−0 充填体的可行性。

表 4 拟合结果

Table 4 Fitting results

试样编号	拟合方程	R^2
1:20−2/5	$y = 0.363x + 190.19$	0.997 15
1:9−2/5	$y = 0.392x + 208.83$	0.848 66
1:7−0	$y = 0.333x + 194.53$	0.911 57
1:7−1/5	$y = 0.398x + 195$	0.993 03
1:7−2/5	$y = 0.48x + 200.93$	0.937 04

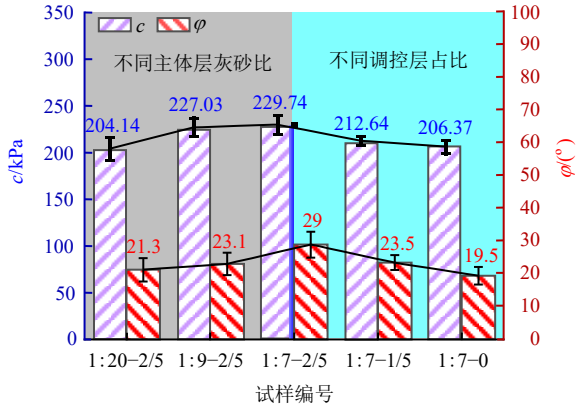


图 9 不同条件下含调控层充填体的表观 c、φ 值变化规律

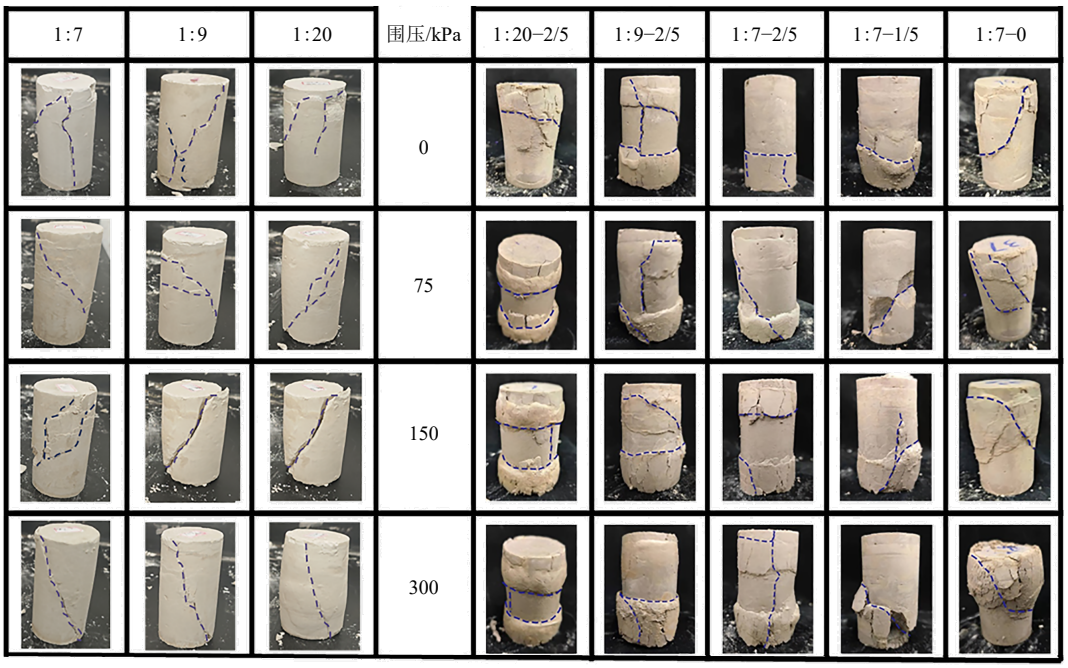
Fig.9 Change patterns in the c and φ of strengthening stratified cemented tailings backfill under different conditions

3.4 破坏模式分析

图 10(a)为单层充填体试样的破坏模式，观察到其裂纹类型单一，多为贯穿试样上下端部的剪切裂纹，与之不同的是，含调控层充填体试样裂纹复杂多样，从前文的研究结果中可得出，含调控层充填体的力学性能受到围压、主体层灰砂比和调控层占比的影响显著，其破坏模式也因这些因素而存在一定的差异。图 10(b)显示了不同条件下含调控层充填体的破坏模式，观察其外观形貌可知，主体层灰砂比为 1:7 时，大部分充填体试样结构保持完整，1:7−1/5 充填体例外，在围压的作用下充填体端部位置有块体脱落；对于 1:7−0 充填体，虽保持较完整，但块体斜分割严重，高围压时（300 kPa）更甚，顶部碎块众多，呈片状，在应变较低时，便已达到峰值强度，进入破坏阶段（见图 4(c)）；1:7−2/5 充填体整体较稳定，以上结果表明添加调控层提高了充填体的稳定性。调控层占比为 2/5 时，充填体主体层出现横向变形，并且随着主体层灰砂比的减小以及围压的增大，变形越明显，这能够有效地减缓充填体的破坏，增强其达到峰值强度时的应变值（见图 4(a)）。

观察图 10(b)还可发现，充填体的裂纹扩展模式可概括为拉伸、剪切以及混合裂纹 3 种。具体描述为：围压为 0 kPa 时，1:7−0 充填体为单一斜剪切主裂纹，随围压的增大，演变为多条剪切裂纹，裂纹交汇呈 V 状和倒 Y 状；1:7−1/5 充填体在围压 0 kPa 时为小角度剪切裂纹，随围压的增大裂纹发育角度变大；1:7−2/5 充填体为沿分层界面的剪切和拉伸混合裂纹（简称拉−剪裂纹），仅在围压 75 kPa 时出现剪切裂纹。调控层占比为 2/5，充填体以拉−剪裂纹为主，随着主体层灰砂比的减小，混合裂纹中拉裂纹不再贯穿充填体端部，仅出现在分层界面之间，裂纹总体呈工字形。

综上所述，添加调控层很大程度上改变了裂纹原扩展轨迹，即减小了剪切裂纹的倾角，由此推断出在实际充填作业时，添加调控层能够有效防止充填体侧帮出现大块剥离现象，但要注意控制顶层与主体层灰砂比的差值，差值较小时，改善效果较小，



(a) 单层充填体试样　　(b) 含调控层充填体试样

图 10　充填体的破坏模式

Fig.10　Failure modes of cemented tailings backfill under different conditions

仍有块体剥离现象或出现斜剪切裂纹，因此顶层与主体层灰砂比需保持一定差值，充填体才能在添加调控层后表现出较高的稳定性。

4　含调控层充填体调控机制分析

一般而言，单层充填体受力破坏过程可简单地概括为内部裂纹萌生、发育、汇聚，最终形成贯穿试样的单剪切裂纹的一个过程。而含调控层充填体的破坏与其各分层灰砂比的大小相关，各分层灰砂比的差异使充填体受力时各分层发生不协调变形现象，层与层之间相互约束，形成不同类型的破坏裂纹。此外，其破坏也与分层界面之间的黏结、摩擦情况相关。选取 1:20−2/5 充填体探究调控层的调控机制，具体可概括为以下 3 点：

（1）调控层与主体层强度的差异。充填体受压时，分层承受应力相等，但主体层灰砂比小，强度小，首先发生破坏，而调控层灰砂比大，强度大，相同应力条件下主体层破坏时，调控层并未达到破坏条件，其阻止了主体层的进一步破坏，使得充填体整体在该应力条件下仅局部破坏，但仍具有一定承载能力，还需较高的应力使其完全破坏。

（2）调控层增强了主体层受端部摩擦效应的影响。研究表明[27]，当试样的高径比达到 2～2.5 时，由轴向应力引起上下压板出现的端部效应已不会影响其中部的承载能力。未添加调控层（1:7−0）充填体顶层与主体层灰砂比相差不大，受压时剪切裂纹穿过分层界面，原轨迹并未发生改变（见图 10(b)）。因此，认为该充填体在分层界面处发生协同变形，受分层界面间的黏结和摩擦影响较小，受压力机上下压板的端部摩擦效应的影响较小（或无影响）。添加调控层（主体层灰砂比为 1:20）后，主体层与调控层灰砂比相差较大，受压时主体层先产生破坏趋势，裂纹至分层界面时，顶层与主体层通过黏结与层间摩擦作用阻止其发展，但相应地，调控层则会受到促进其向两侧破坏的反作用力，具体等效为刚度较大的调控层内部被施加了横向拉应力，而刚度较小的主体层则被施加了横向压应力[28]。如图 11 所示，横向压应力阻止主体层向两侧变形，使摩尔圆右移，横向拉应力则加快调控层破坏，摩尔圆左移。

（3）调控层降低了主体层受长度效应的影响。试样的尺寸效应可分为两种，一为体积效应，二为

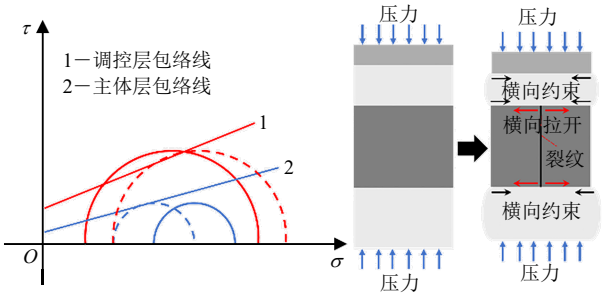


图 11　调控机制分析

Fig.11　Analysis of regulatory mechanisms

长度效应。长度效应即直径相同、高度不同的高径比的影响。添加高灰砂比调控层，缩短了主体层高度，等效于加强了层间摩擦对充填体侧向破坏的抑制效果，使其发生侧向膨胀后仍具有较高的承载能力。

5 结 论

本文开展了不同条件下含调控层胶结充填体的三轴压缩力学试验，并对比分析了单层与含调控层胶结充填体偏应力−应变曲线与破坏模式的差异，得到以下结论：

（1）含调控层充填体比单层充填体偏应力−应变曲线多了一个峰值点，并且调控层强化了充填体的屈服阶段；当调控层占比为 2/5 时，随着主体层灰砂比的减小，充填体应力−应变曲线双峰值特征越明显，并且对充填体屈服阶段的强化效果越好。

（2）随着围压、主体层灰砂比和调控层占比的增大，充填体的峰值强度增大，且峰值强度与围压呈 $y = A\ln(x + B) + C$ 的关系变化；充填体的表观黏聚力 c、表观内摩擦角 φ 与主体层灰砂比和调控层占比大小皆呈正相关。

（3）与单层充填体破坏模式相比，未添加调控层时，充填体破坏与之相同，以剪切裂纹为主，添加调控层后，充填体以拉−剪裂纹为主，且当主体层灰砂比较低时，其横向变形越明显，且拉裂纹主要出现在调控层。

参 考 文 献

[1] 程海勇, 吴爱祥, 吴顺川, 等. 金属矿山固废充填研究现状与发展趋势[J]. 工程科学学报, 2022, 44(1): 11-25.
CHENG Hai-yong, WU Ai-xiang, WU Shun-chuan, et al. Research status and development trend of solid waste backfill in metal mines[J]. **Chinese Journal of Engineering**, 2022, 44(1): 11-25.

[2] 刘光生, 杨小聪, 郭利杰. 阶段空场嗣后充填体三维拱应力及强度需求模型[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1391-1403.
LIU Guang-sheng, YANG Xiao-cong, GUO Li-jie. Models of three-dimensional arching stress and strength requirement for the backfill in open stoping with subsequent backfill mining[J]. **Journal of China Coal Society**, 2019, 44(5): 1391-1403.

[3] 徐文彬, 宋卫东, 杜建华, 等. 崩落法转阶段嗣后充填法采场稳定性分析[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(4): 415-422.
XU Wen-bin, SONG Wei-dong, DU Jian-hua, et al. Stability analysis of a backfill stope due to transforming from block caving to stage backfill[J]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 2013, 35(4): 415-422.

[4] ZHANG Chao, FU Jian-xin, SONG Wei-dong, et al. Analysis on mechanical behavior and failure characteristics of layered cemented paste backfill(LCPB) under triaxial compression[J]. **Construction and Building Materials**, 2022, 324(9): 126631.

[5] 徐文彬, 潘卫东, 刘辉. 动态扰动诱发嗣后充填采场灾变事故分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(1): 65-72.
XU Wen-bin, PAN Wei-dong, LIU Hui. Analysis on the catastrophe mechanism of backfill stope resulting from dynamic disturbance[J]. **Journal of Mining & Safety Engineering**, 2015, 32(1): 65-72.

[6] LIU En-yan, ZHANG Qin-li, FENG Yan, et al. Experimental study of static and dynamic mechanical properties of double-deck backfill body[J]. **Environmental Earth Sciences**, 2017, 76(20): 689.

[7] CHEN Shuai-jun, JIN Ai-bing, ZHAO Yi-qing, et al. Formation mechanism and deformation characteristics of stratified cemented tailings backfill under noncontinuous filling system[J]. **Construction and Building Materials**, 2023, 389: 131623.

[8] WANG Jie, SONG Wei-dong, CAO Shuai, et al. Mechanical properties and failure modes of stratified backfill under triaxial cyclic loading and unloading[J]. **International Journal of Mining Science and Technology**, 2019, 29(5): 809-814.

[9] 赵康, 何志伟, 宁富金, 等. 不同灰砂配比胶结材料组合体声发射特性[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(11): 2462-2469.
ZHAO Kang, HE Zhi-wei, NING Fu-jin, et al. Acoustic emission characteristics of cementitious material with different cement-tailing ratio[J]. **Journal of the Chinese Ceramic Society**, 2021, 49(11): 2462-2469.

[10] JIAO Hua-zhe, ZHANG Wen-xiang, YANG Yi-xuan, et al. Static mechanical characteristics and meso-damage evolution characteristics of layered backfill under the condition of inclined interface[J]. **Construction and Building Materials**, 2023, 366: 130113.

[11] SUN Wei, ZHANG Shen-you, LI Jin-xin, et al. Experimental

study on energy dissipation of layered backfill under impact load[J]. **Construction and Building Materials**, 2022, 347: 128478.

[12] 汪杰, 宋卫东, 谭玉叶, 等. 水平分层胶结充填体损伤本构模型及强度准则[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1731-1739.
WANG Jie, SONG Wei-dong, TAN Yu-ye, et al. Damage constitutive model and strength criterion of horizontal stratified cemented backfill[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(5): 1731-1739.

[13] 李金鑫, 孙伟, 赵建光, 等. 冲击荷载作用下层状充填体动力学特性及破坏模式[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(3): 944-955.
LI Jin-xin, SUN Wei, ZHAO Jian-guang, et al. Dynamic characteristics and failure mode of layered backfill under impact load[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2023, 54(3): 944-955.

[14] XU Wen-bin, CAO Yang, LIU Bing-hua. Strength efficiency evaluation of cemented tailings backfill with different stratified structures[J]. **Engineering Structures**, 2019, 180: 18-28.

[15] 曹帅, 宋卫东, 薛改利, 等. 考虑分层特性的尾砂胶结充填体强度折减试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2869-2876.
CAO Shuai, SONG Wei-dong, XUE Gai-li, et al. Tests of strength reduction of cemented tailings filling considering layering character[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(10): 2869-2876.

[16] 赵康, 黄明, 严雅静, 等. 不同灰砂比尾砂胶结充填材料组合体力学特性及协同变形研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增刊 1): 2781-2789.
ZHAO Kang, HUANG Ming, YAN Ya-jing, et al. Mechanical properties and synergistic deformation characteristics of tailings cemented filling assembled material body with different cement-tailings ratios[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2021, 40(Suppl.1): 2781-2789.

[17] 唐亚男, 付建新, 宋卫东, 等. 分层胶结充填体力学特性及裂纹演化规律[J]. 工程科学学报, 2020, 42(10): 1286-1298.
TANG Ya-nan, FU Jian-xin, SONG Wei-dong, et al. Mechanical proerties and crack evolution of interbedded cemented tailings backfill[J]. **Chinese Journal of Engineering**, 2020, 42(10): 1286-1298.

[18] 姜立春, 苏勇, 代庆松. 远场爆破水平应力波扰动下分层胶结充填体矿柱的动力响应机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 34-44.
JIANG Li-chun, SU Yong, DAI Qing-song. Dynamic response mechanisms of layered cemented backfill pillars under horizontal stress wave disturbance of far-field blasting[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(1): 34-44.

[19] ZHANG Yun-hai, WANG Xin-min, WEI Chong, et al. Dynamic mechanical properties and instability behavior of layered backfill under intermediate strain rates[J]. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, 2017, 27(7): 1608-1617.

[20] 朱茂兰, 肖妮, 谭良春, 等. 铜渣还原活化制备新型胶凝材料与矿山充填的应用[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(11): 2736-2745.
ZHU Mao-lan, XIAO Ni, TAN Liang-chun, et al. Preparation of new cementitious material by reduction and activation of copper slag and its application in mine filling[J]. **The Chinese Journal of Nonferrous Metals**, 2020, 30(11): 2736-2745.

[21] 温震江, 高谦, 王忠红, 等. 基于 RSM-DF 的矿渣胶凝材料复合激发剂配比优化[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊 1): 3103-3113.
WEN Zhen-jiang, GAO Qian, WANG Zhong-hong, et al. Optimization of compound activator ratio of the ground granulated blast furnace slag powder cementitious material based on RSM-DF[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(Suppl.1): 3103-3113.

[22] SUN Wei, GAO Tong, ZHAO Jiang-guang, et al. Research on fracture behavior and reinforcement mechanism of fiber-reinforced locally layered backfill: Experiments and models[J]. **Construction and Building Materials**, 2023, 366: 130186.

[23] ZHAO Kang, MA Chao, YANG Jian, et al. Pore fractal characteristics of fiber-reinforced backfill based on nuclear magnetic resonance[J]. **Powder Technology**, 2023, 426: 118678.

[24] 徐文彬, 李乾龙, 田明明. 聚丙烯纤维加筋固化尾砂强度及变形特性[J]. 工程科学学报, 2019, 41(12): 1618-1626.
XU Wen-bin, LI Qian-long, TIAN Ming-ming. Strength and deformation properties of polypropylene fiber-reinforced cemented tailings backfill[J]. **Chinese Journal of Engineering**, 2019, 41(12): 1618-1626.

下转第 3680 页