

文章编号: 1000-7598-(2006) 09-1523-04

# 锚索锚固力影响因素的试验分析研究

薛亚东<sup>1,2</sup>, 黄宏伟<sup>1</sup>

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 太原理工大学 采矿研究所, 太原 030024)

**摘 要:** 树脂锚索锚固力的影响因素复杂、锚固机理不完善, 造成了支护参数设计不合理, 甚至发生围岩加固失败。针对回采巷道顶板岩层含水状况, 通过室内锚索拉拔试验, 分析研究了锚索锚固长度、孔径、树脂药卷包装膜和水等对锚固力的影响规律, 总结出锚索载荷随位移变化的 4 种形式, 以及锚索轴力分布的规律, 对树脂锚索的支护参数设计及机理研究具有参考价值。

**关 键 词:** 锚索; 锚固力; 影响因素; 拉拔试验; 水

**中图分类号:** TU 458.3

**文献标识码:** A

## Experimental study on affect factors on anchoring force of cable bolts

XUE Ya-dong<sup>1,2</sup>, HUANG Hong-wei<sup>1</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Mining Technology Institute, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** The affect factors on anchoring force of resin-grouted cable bolts are numerous and complicated. And the anchoring mechanism of cable bolts is not perfect enough at now. So the supporting parameters of cable bolts are always not suitable to the roadways' condition. As the worst case, the reinforced surrounding rock may go into failure. Based on the observed results that more and more roof rock mass is bearing fracture water, some laboratory cable-bolt pull-out tests were carried out. The main factors include anchoring length, bore-hole diameter, resin capsule packaging, water, etc. A 7-wire high-strength stranded cable was used in the tests. The research results show that there are four models of cable force vs extension. The law of axial force distribution of cable bolt is obtained; and it is some different with the conventional Mindlin distribution. The achievement is valuable to the design of roadways supporting parameters and the work mechanism of cable bolts.

**Key words:** cable-bolts; anchoring force; affect factor; pull-out test; water

## 1 前 言

自上世纪 60 年代中期, 澳大利亚矿山首次使用锚索进行岩体加固以来, 经过 30 多年的发展, 从锚索的结构形式、制造与质量、配套施工机具、锚固机理、参数设计方法、应用范围到检测等各方面都得到快速的发展和提高, 特别是在上世纪 90 年代, 煤矿巷道树脂锚固锚索支护材料和技术进入快速发展阶段<sup>[1]</sup>。1992 年非饱和聚酯树脂锚固剂锚固锚索首次在美国煤矿巷道应用, 1996 年我国在煤矿回采巷道试验小孔径树脂锚固锚索获得成功, 树脂锚固锚索作为一种二次支护或补强支护方式在煤矿回采巷道得到推广应用<sup>[2~4]</sup>。由于树脂锚索具有长度大、柔性灵活、承载能力高、安装简便和早期承

载等优点, 已经成为煤矿巷道顶板支护的最新方式, 并将成为煤巷的主要支护形式<sup>[4, 5]</sup>。影响锚索系统性能的因素很多, 如地质条件、应力条件、钻孔尺寸、锚索长度 (锚固长度和自由段长度)、锚固剂配方、锚头参数、树脂定位箍、预紧力、水、锚索表面油污和搅拌时间等, 为深入研究锚索的锚固机理和合理设计锚索支护参数, 这些因素都是需要考虑的, 为此, 许多学者和相关科技人员进行了大量的室内和现场锚索拉拔试验和数值模拟试验, 取得了丰硕的成果<sup>[6~11]</sup>。但由于小孔径树脂锚索锚固影响因素多且复杂, 加上树脂锚索的推广时间还不长, 有必要系统研究树脂锚索锚固力的影响因素和规律, 这对分析锚索锚固机理和科学设计支护参数具有重要意义。

收稿日期: 2004-11-18

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (No.2004036346), 山西省科技攻关项目 (No.2004201)。

作者简介: 薛亚东, 男, 1971 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩石力学、地下工程围岩加固等方面的教学研究工作。

2 试验概况

限于篇幅,本文在结合现场调研的基础上,仅针对锚固长度、孔径、药卷包装膜和水等主要影响因素,通过室内锚索拉拔试验来研究它们对树脂锚索锚固力的影响大小和规律。试验方案见表 1。

表 1 锚索拉拔试验方案  
Table 1 The schemes of cable-bolts pull test

| 编号  | 管内径<br>/ mm | 规格/ mm   |          |          |          | 备 注     |
|-----|-------------|----------|----------|----------|----------|---------|
|     |             | 钢管<br>长度 | 锚索<br>长度 | 设计<br>锚长 | 实际<br>锚长 |         |
| 1-1 | 27.3        | 550      | 600      | 400      | 395      | 不同孔径长锚固 |
| 1-2 | 36.4        | 550      | 600      | 400      | 380      |         |
| 1-3 | 41.4        | 550      | 600      | 400      | 330      |         |
| 2-1 | 27.3        | 260      | 260      | 160      | 185      | 不同孔径短锚固 |
| 2-2 | 36.4        | 210      | 210      | 160      | 160      |         |
| 2-3 | 41.4        | 210      | 210      | 160      | 160      |         |
| 2-4 | 27.3        | 210      | 210      | 160      | 160      |         |
| 2-5 | 41.4        | 260      | 260      | 160      | 160      |         |
| 3-1 | 27.3        | 300      | 300      | 250      | 250      | 不同孔径中锚固 |
| 3-2 | 27.3        | 400      | 450      | 250      | 230      |         |
| 3-3 | 36.4        | 300      | 300      | 250      | 250      |         |
| 4-1 | 27.3        | 220      | 220      | 160      | 170      | 端头效应    |
| 4-2 | 27.3        | 230      | 230      | 160      | 180      |         |
| 4-3 | 27.3        | 280      | 300      | 210      | 260      |         |
| 4-4 | 27.3        | 350      | 350      | 210      | 260      |         |
| 5-1 | 27.3        | 550      | 550      | 400      | 290      | 水影响     |
| 5-2 | 41.4        | 550      | 550      | 400      | 350      |         |
| 6-1 | 27.3        | 260      | 260      | 160      | 185      | 药卷膜影响   |
| 6-2 | 27.3        | 400      | 400      | 250      | 320      |         |

试验锚索采用目前煤矿常用的1×7股高强度低松弛钢绞线,规格参数见表 2。树脂锚固剂采用潞安树脂锚固剂厂生产的中速锚固剂(Z2360),规格参数见表 3。

表 2 锚索规格参数  
Table 2 The properties of cable-bolts

| 直径<br>/ mm | 强度级别<br>/ MPa | 截面积<br>/ mm <sup>2</sup> | 周长<br>/ mm | 最低破<br>断荷载<br>/ kN | 质量<br>/ kg·m <sup>-1</sup> | 1 %延伸<br>率荷载<br>/ kN |
|------------|---------------|--------------------------|------------|--------------------|----------------------------|----------------------|
| 15.24      | 1 720         | 140.0                    | 63         | 240.2              | 1.094                      | 216.2                |

表 3 树脂锚固剂药卷参数  
Table 3 The properties of resin capsule

| 直径<br>/ mm | 长度<br>/ mm | 容重<br>/ g·cm <sup>-3</sup> | 抗压<br>强度<br>/ MPa | 抗拉<br>强度<br>/ MPa | 剪切<br>强度<br>/ MPa | 收缩率<br>/ % | 泊松比 |
|------------|------------|----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------|-----|
| 23         | 600        | 2.1                        | 60                | 11.5              | 35                | 0.6        | 0.3 |

试件采用厚壁钢管模拟钻孔,采用手电钻带动锚索旋转进行锚固。为测量锚索受力状态,部分锚

索沿长度方向间隔 100 mm 贴应变片(BE120-03AA 型),下端第 1 个应变片距锚索底端 50 mm。拉拔试验在 GMT5105A 型微机控制电子万能试验机上进行。试验系统如图 1 所示。

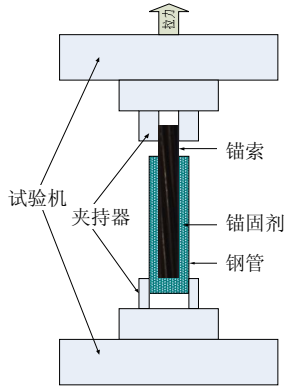


图 1 锚索拉拔试验系统示意图  
Fig. 1 The sketch of cable bolt pull-out test system

3 试验结果

3.1 锚索载荷与位移

每个试件拉拔过程中,均由控制计算机自动记录拉拔载荷和对应位移值。载荷-位移曲线可直观反映锚索的锚固性能。图 2 给出了部分典型锚索拉拔试验载荷-位移曲线图。

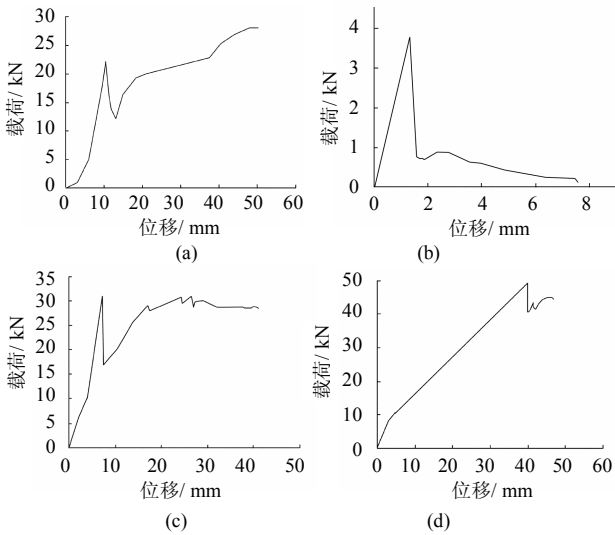


图 2 锚索拉拔载荷-位移曲线  
Fig. 2 The curves of load vs displacement

从锚索拉拔载荷-位移曲线图可以看出,不同锚固方式、参数和水等条件下,锚索受力-变形规律是不同的,但大致可划分为 4 种类型:即(a)锚索黏结破坏-摩擦增阻型;(b)黏结破坏-摩擦减阻型;(c)黏结破坏-摩擦恒阻型和(d)直接黏结破坏型。与已有大

量试验研究结果相比可以看出, 锚索载荷-位移曲线除了常见的 a 型和 c 型外, 还有类似 b 型和 d 型等其它形式, 这反映了不同因素对锚索锚固力的不同影响规律, 因此在锚索机理研究和参数设计中, 应根据应用条件重点考虑主要的影响因素。

### 3.2 锚索轴力分布

为研究沿锚索锚固长度范围内锚索的受力状况, 在 1-1、1-2、1-3、和 5-1 试样中的锚索上布置了应变片, 每根锚索布置 5 个应变片, 间隔 100 mm。由于试样 1-3 锚固体整体拉出, 测试失败, 因此只记录到其它 3 个试验结果。

根据所测得的应变, 计算出锚索轴力。图 3 给出了不同拉伸载荷条件下的锚索轴力分布。

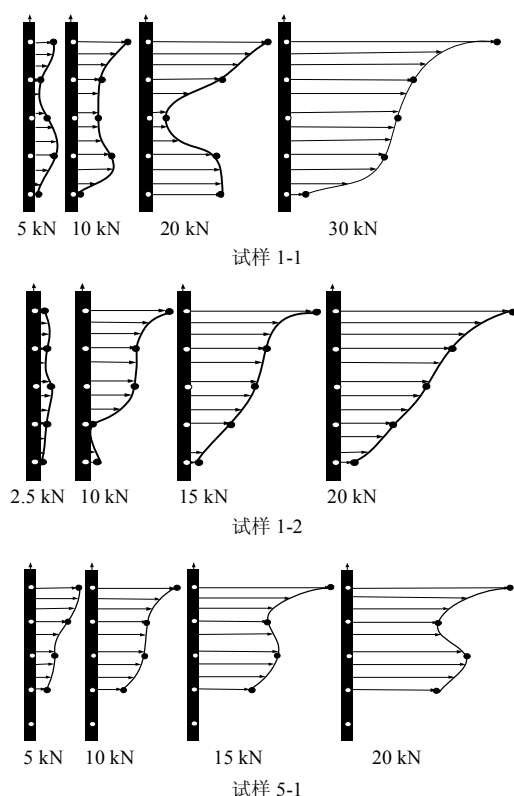


图 3 锚索轴力分布变化图

Fig. 3 Axial force distribution along cable-bolts

从锚索轴力变化示意图中可以看出, 在锚索受拉伸载荷作用过程中, 锚索不同部位的受力是不同的, 甚至存在很大的差别。从 1-1 和 1-2 轴力图看, 在拉伸初期, 轴力不是从上到下由大逐渐变小的, 这与已有的关于锚索受力满足 Mindlin 分布结论不同<sup>[12]</sup>。在拉伸初期, 由于锚索与锚固体之间的不谐调性, 锚索各点受力不同, 也没有一定的规律; 随着载荷增大, 各点的轴力变化较大, 锚索与锚固体相互作用增强, 接触面进一步挤压密实; 载荷继续

增大, 锚索与锚固体相互作用达到协调, 锚索的受力也呈现出由大到小的分布规律。运用 DataFit 软件对轴力分布曲线进行最佳拟合, 得出下面的关系式 (试样 5-1 曲线拟合较差删去):

$$\text{试样 1-1} \quad F = F_0 - 2.175Z + 0.104Z^2 \quad (1)$$

$$\text{试样 1-2} \quad F = F_0 - 0.059Z^{1.5} + 6.307e^{-Z} \quad (2)$$

式中  $F$  为锚索轴力(kN);  $F_0$  为锚索拉拔载荷(kN);  $Z$  为锚索深度坐标(cm)。

## 4 结果分析

通过室内锚索拉拔试验, 为研究不同锚索参数对锚固强度的影响关系提供了基本数据。下面分别从锚索孔径、水和药卷包装膜对锚固效果的影响进行分析和讨论。

### 4.1 孔径的影响

本次试验中, 一共采用了 3 种内径规格的钢管, 分别是  $\phi = 27.3 \text{ mm}$ ,  $\phi = 36.4 \text{ mm}$  和  $\phi = 41.4 \text{ mm}$ 。

从试验结果看, 在相同锚固长度时, 随着孔径的增大, 锚固剂黏结强度降低, 例如第 2 组试样, 锚索与锚固剂黏结强度分别为 3.57 MPa、2.34 MPa 和 0.83 MPa。分析其原因, 主要是由于孔径较锚索直径过大时, 锚索不能有效地刺破树脂药卷并均匀地搅拌混合锚固剂, 这可以从锚固体截面照片得到实证 (图 4)。另外, 在试验中发现, 锚索在高速旋转过程中, 由于离心力的作用使得树脂锚固剂向管壁四周运动, 同时, 由于锚固剂本身的黏性, 当孔径较大时, 锚固剂本身随着锚索的旋转形成一个形状不规则的柔性条带体, 该条带体随锚索旋转而改变形状和位置, 但锚索很难对条带体内部进行搅拌, 这就容易造成锚固剂搅拌不均匀, 树脂胶泥与固化剂反映不充分, 大大降低树脂锚固力。通过比较, 在只考虑锚索自转的条件下, 锚索的有效搅拌直径小于 31 mm, 因此, 在实践中采用  $\phi = 26 \sim 29 \text{ mm}$  的钻孔是合适的。

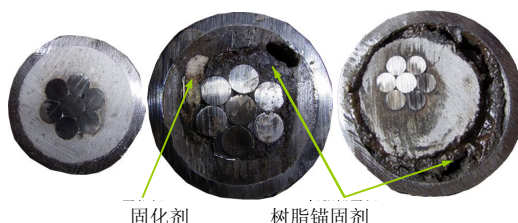


图 4 孔径对锚固效果的影响

Fig. 4 The influence of tube diameter

## 4.2 水的影响

水对树脂胶泥具有一定的稀释作用,在一定水量的条件下,锚索对树脂锚固剂的搅拌较无水条件下更均匀。另外,在锚索搅拌过程中,水也可在锚固体内形成水泡或气泡,在锚固剂反应热的作用下,水会被吸收。值得注意的是,当水量超过一定限度后,将延缓锚固剂的反应凝固速度,甚至导致锚固剂不能凝固。在顶板施工锚索时,水量较大时,锚固剂被稀释而容易产生沿锚孔滴流,造成锚固剂有效锚固长度减小,影响整体锚固力。图 5 中是在岩石孔中进行水对锚固剂影响的试验照片。对比可以发现,有水试样锚固体均质性好,但可能存在较大的水泡;无水试样锚固体均质性稍差,存在较多的小孔洞。对有水和无水试样进行单轴抗压强度测试,有水试样  $\sigma_{\text{水}} = 58.7 \text{ MPa}$ , 无水试样  $\sigma_{\text{c}} = 67.1 \text{ MPa}$ , 水造成锚固体强度降低 12.5 %。



图 5 水对锚固剂的影响  
Fig. 5 The influence of water

## 4.3 包装膜的影响

在本次试验中,专门进行了药卷包装膜对锚固强度影响的试验。从试验结果看,在充分搅拌的条件下,包装膜对锚固力的影响很小。据英国 RMT (岩石力学技术有限公司) 研究报告<sup>[13]</sup>,药卷包装膜对锚索黏结强度,特别是锚索端头有较大影响。通过试验,我们分析认为包装膜的影响,主要与锚索转速有关,当转速达到某一速度后,包装膜可被充分撕裂搅烂,同时,包装膜可以起到辅助搅拌树脂的作用,因而对锚固效果的负面影响基本可以忽略。

## 5 结 论

(1) 在不同锚固方式、参数和水等条件下,锚索受力-变形规律是不同的,大致可划分为 4 种类型,即锚索黏结破坏-摩擦增阻型、黏结破坏-摩擦减阻型、黏结破坏-摩擦恒阻型和直接黏结破坏型。

(2) 锚索轴力沿锚索长度的分布规律,在不同载荷阶段具有不同的形式,这反映了锚索与锚固体之间内在的作用机理在不同载荷阶段是不同的。

(3) 孔径、水和包装膜等对锚索锚固力有影响。对于直径为 15.24 mm 的锚索,最佳孔径范围为 26~29 mm,钻孔淋水可降低锚固体强度约 12 %,包装膜在高转速情况下对锚固力几乎没有影响。

## 参 考 文 献

- [1] Hutchinson D J, Diederichs M S. Cablebolting in underground mines[M]. Canada: BiTech Publishers Ltd, 1996.
- [2] Bouteldja M. Design of cable bolts using numerical modeling [Ph.D thesis D]. Canada: McGill University, 2000
- [3] Thomas P M. In focus-cable bolts: a “new support”[J]. **HAS Bulletin**, 1998, (3): 3—4.
- [4] Tadolini S C, Gallagher J L, Goris J M. Resin grouted cable supports for coal mine ground control[J]. **CIM Bulletin**, 1999, (3): 135—139.
- [5] 何满潮, 袁和生. 中国煤矿锚杆支护理论与实践[M]. 北京: 学出版社, 2004.
- [6] Moosavi M. Load distribution along fully grouted cable bolts based on constitutive models obtained from modified Hoek cells [Ph.D thesis D]. Canada: Queens University, 1997.
- [7] Bawden W F, Hyett A J, Lausch P. An experimental procedure for the in situ testing of cable bolts[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1992, 29(5): 525—533.
- [8] Hoek E. Practical rock engineering[C]. Rocscience Site Web (<http://www.rocscience.com>), 1998.
- [9] 李铀, 白世伟, 方昭茹, 等. 预应力锚索锚固体破坏与锚固力传递模式研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 686—690.  
LI You, BAI Shi-wei, FANG Zhao-ru, et al. Research on failure mechanism and anchoring force transmission of prestressed cable[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(5): 686—690.
- [10] 陈安敏, 顾金才, 沈俊. 预应力锚索的长度与预应力值对其加固效果的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 848—852.  
CHEN An-min, GU Jin-cai, SHEN Jun. Impact of length and prestress value of anchor cable on its reinforcement effect[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(6): 848—852.
- [11] 张发明, 陈祖煜, 刘宁. 岩体与锚固体间黏结强度的确定[J]. 岩土力学, 2001, 22(4): 470—473.  
ZHANG Fa-ming, CHEN Zu-yu, LIU Ning. Determination of cohesive strength between rock mass and anchors[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(4): 470—473.
- [12] 尤春安. 全长黏结式锚杆的受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 339—341.  
YOU Chun-an. Mechanical analysis of wholly grouted anchor[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(3): 339—341.
- [13] Rock Mechanics Technology Ltd.. Safe application of mine roadway support systems[R]. Research report 229, Health and Safety Executive, 2004.