

低预应力树脂锚杆试验研究与验证

陈晴江

(中铁十一局西安建设有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要 CZ铁路CZSCZQ-7标高ES隧道和帕M岭隧道围岩岩性以碳质板岩为主, 岩石节理发育、强度低, 设计主动支护锚杆类型为低预应力树脂中空注浆锚杆, 现场亟需解决锚杆的锚固质量问题。本研究通过开展低预应力树脂锚杆锚固支护施工中锚杆杆体适用性、“三径”匹配和施工工艺试验研究及验证, 总结出低预应力树脂锚杆的合理适用参数及施工工艺, 旨在为同类型围岩地质条件下锚杆加固施工质量控制提供借鉴。

关键词 铁路隧道; 树脂锚杆; 锚固效果试验

中图分类号: TD635

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.07.002

0 引言

随着地下工程施工技术的迅猛发展, 树脂锚杆作为现代地下工程支护体系的核心构件, 凭借其独特的材料组合与工艺设计, 已成为隧道、矿山及边坡加固等领域不可或缺的技术方案。然而, CZ铁路雅安至林芝段7标管段高ES、帕M岭隧道围岩主要以含炭板岩夹砂岩为主, IV、V级围岩占比为97.1%, 设计锚杆类型主要为低预应力树脂中空注浆锚杆, 现场亟需解决锚杆施工质量控制难题, 经过现场调研存在问题主要集中在锚杆杆体适用性、三径匹配、施工工艺等方面, 针对现场问题, 本文通过现场试验验证的方法提出具体施工参数建议和相关施工工艺控制措施, 旨在较好地解决现场实际问题。

1 树脂锚杆的研究背景及现场调研分析

1.1 研究背景

树脂锚杆在我国煤矿井巷工程支护中被广泛应用, 积累了丰富的实践经验。铁路隧道软弱围岩条件下低预应力树脂锚杆支护体系可有效控制围岩变形^[1]。等强无纵肋全螺纹树脂锚杆钢筋锚固性好、安全可靠、使用方便快捷^[2]。树脂锚杆支护三径匹配是指钻孔直径、锚杆直径、树脂药卷直径之间的最佳配合, 锚杆直径的大小对于是否能够充分有效地均匀搅拌树脂锚固剂及锚杆是否能够顺利地安装起着非常关键的作用^[3]。锚固剂环厚度对锚杆锚固性能有很大影响^[4], 施工过程中严格按照要求搅拌树脂锚固剂^[5], 使用风动锚杆搅拌器搅拌锚固剂时间需匀速推进至孔底, 保证锚固力达到要求。钻孔直径越大, 所用的锚固剂越多, 锚固成本也越高, 锚固剂的用量增加对锚杆的锚固力影响并不大, 所以一般情况下应尽量采用较小的钻孔直径更为合理、经济。对于树脂锚杆支护技术管理, 应实行全过程动态管理监督, 以保证每一道工序都符合规定要求。

1.2 现场调研

研究组在现场调研时发现主要问题集中体现在以下几个方面: 一是手持式风枪钻头直径为42 mm, 锚杆直径为22 mm, 与孔径之差为20 mm, 锚固剂直径为23 mm, 与孔径之差为19 mm, “三径匹配”不合理; 二是现场锚固施工采用传统的挤压式锚固方法, 使得锚固剂并未充分搅拌, 进而导致孔壁和杆体之间未完全均匀锚固, 锚杆锚固24小时后, 锚固力仍不能100%保证达到设计值60 kN; 三是组合锚杆锚固段为普通带纵肋螺纹钢, 带纵肋钢筋锚固段和注浆段连接不可靠, 预制连接套筒质量控制困难, 带肋锚杆搅拌锚固剂的效果有待进一步验证, 致使锚杆的抗拉强度无法保障; 四是现场设备机具的使用操作工艺不规范, 加固效果无法保障; 五是注浆效果不理想。

综上所述, 结合现场隧道锚杆支护施工中锚杆杆体材质力学性能、锚固工艺及锚杆杆体与钻孔尺寸的合理匹配关系、快速成孔的施工机具、操作工艺调研, 通过对树脂锚固剂的选型、三径匹配试验、自由段注浆工艺参数调整及操作工艺的深入研究, 解决了当前隧道锚杆施工难点。研究组在CZ铁路CZSCZQ-7标开展了锚杆施工工艺试验, 以期为保证CZ铁路高地应力软岩大变形控制过程中锚杆施工质量提供技术保障。

2 现场试验验证

本次试验选取高ES隧道进口段和帕M岭隧道进口段为工艺试验地点。

2.1 试验材料

1. 锚杆/锚索。根据前期研究和现场设计要求, 本次试验选用了两种锚杆和一种锚索: (1) 有纵肋高强锚杆, 材质为HRB500钢, 屈服强度500 MPa, 直径22 mm, 长4.0 m, 树脂锚固剂锚固。(2) 无纵肋高强

锚杆，材质为 HRB500 钢，屈服强度 500 MPa，直径 22 mm，长 4.0 m，树脂锚固剂锚固。（3）组合式锚杆，锚固段为无纵筋高强锚杆，材质为 HRB500 钢，直径 22 mm，长 2.5 m，屈服强度 500 MPa；非锚段为中空注浆锚杆，材质为 HRB500 钢，直径 22 mm，长 1.5 m，屈服强度 500 MPa，专用机械套筒连接为组合锚杆。

2. 锚固剂。根据现场需要，本次试验选用了 MSK 23*600 快速型和 MSK223*600 中速型两种树脂锚固剂，直径均为 23 mm。

3. 钻头。按照锚杆施工“三径匹配”（锚杆直径、钻孔直径、锚固剂直径）原则，现场选用两种直径的钻头匹配相应设备：直径 42 mm、32 mm 钻头配套风枪

钻机和矿用气腿式凿岩机。

4. 钻机。手持式风枪钻机在边墙位置钻孔方便快捷、矿用气腿式凿岩机（YT28 型）更适用于隧道拱顶和拱肩部位的钻孔施工。

2.2 试验过程

1. 钻孔。锚杆设计长度 4.0 m，直径 22 mm，结合现场实际和施工经验在限定药卷用量、锚固剂凝结时间的前提下对现场加固效果进行对比验证。现场共开展了 8 组 16 根锚杆的对比试验验证，分别为：是否为带纵筋锚杆、快速型和中速型锚固剂的加固效果、42 mm 和 32 mm 钻孔孔径的加固效果三个方面进行组合验证，现场试验钻孔布置如表 1 所示。

表 1 试验钻孔参数

编号	试验地点	锚杆类型	锚杆剂类型	锚固时间	直径
1	高 ES 隧道进口段	有纵筋高强锚杆	3 根快速型	7 分钟	锚杆 22 mm
	帕 M 岭隧道进口段	无纵筋高强锚杆	3 根快速型		钻孔 32 mm
2	帕 M 岭隧道进口段	有纵筋高强锚杆	3 根中速型	7 分钟	锚杆 22 mm
	帕 M 岭隧道进口段	无纵筋高强锚杆	3 根中速型		钻孔 32 mm
3	帕 M 岭隧道进口段	有纵筋高强锚杆	3 根快速型	7 分钟	锚杆 22 mm
	帕 M 岭隧道进口段	无纵筋高强锚杆	3 根快速型		钻孔 42 mm
4	帕 M 岭隧道进口段	无纵筋高强锚杆	3 根中速型	7 分钟	锚杆 22 mm
	帕 M 岭隧道进口段	无纵筋高强锚杆	3 根中速型		钻孔 42 mm
5	帕 M 岭隧道进口段	组合式半中控锚杆（锚固段有纵筋）	3 根快速型	7 分钟	锚杆 22 mm
	帕 M 岭隧道进口段	组合式半中控锚杆（锚固段无纵筋）	3 根快速型		钻孔 32 mm
6	帕 M 岭隧道进口段	组合式半中控锚杆（锚固段有纵筋）	3 根中速型	7 分钟	锚杆 22 mm
	帕 M 岭隧道进口段	组合式半中控锚杆（锚固段无纵筋）	3 根中速型		钻孔 32 mm
7	帕 M 岭隧道进口段	组合式半中控锚杆（锚固段有纵筋）	3 根快速型	7 分钟	锚杆 22 mm
	帕 M 岭隧道进口段	组合式半中控锚杆（锚固段无纵筋）	3 根快速型		钻孔 42 mm
8	帕 M 岭隧道进口段	组合式半中控锚杆（锚固段有纵筋）	3 根中速型	7 分钟	锚杆 22 mm
	帕 M 岭隧道进口段	组合式半中控锚杆（锚固段无纵筋）	3 根中速型		钻孔 42 mm

2. 锚固剂与杆体推送。首先用聚乙烯软管将锚固剂推送至孔底，然后将锚杆推送至预定深度，在推送过程中要均匀用力保证锚杆顺直、完好，并防止在推送过程中将锚固剂涨开。

3. 锚固。利用连接件将钻机和杆体尾部连接固定，保证钻机旋转方向和杆体螺纹方向一致，手持式气动钻机连接气泵提供动力。开启气泵和气动手持式钻机并确认旋转方向为顺时针，搅拌锚固剂，杆体旋转并逐步推送至孔底，推送过程不能中途停止，搅拌推送过程持续 10 ~ 20 秒，使锚固段粘接锚固。为保证锚固效果，充分搅拌锚固剂，使得孔壁与杆体内锚段均匀锚固。因此，针对不同的锚杆和钻机类型，本次试验给出了锚固改进措施：（1）当在隧道边墙使用高强预应力锚杆 / 锚索时，可采用气动手持式推送器（ZQS-50/1.8S）旋转搅拌锚固剂推送锚杆 / 锚索。（2）当采用组合锚杆时，可采用手持式风枪旋转搅拌锚固剂推送锚杆。（3）当在隧道拱顶和拱肩采用高强预应力树脂锚杆和矿用气腿式凿

岩机时，可直接使用矿用气腿式凿岩机进行锚固施工。

4. 测试。锚固施作完成后，静置 7 分钟。安装锚盘和液压油缸，并连接拉拔仪；然后开始测试锚固力，拉拔力施加至屈服强度时停止试验。

5. 注浆。对于组合式中空锚杆（锚固段无纵筋），内锚段锚固完成后，外锚段还需进行注浆。因此，本次试验提出注浆参数可注意事项如下：（1）采用螺杆式注浆机进行水泥浆液注浆。（2）水泥浆配比，水泥：水=1:0.4。（3）注浆前应先检查注浆孔和排气管是否通畅。（4）排气管插入锚杆孔内 10 cm 处，锚杆孔口用软质橡胶止浆塞进行堵塞密实。（5）注浆方式：当锚杆打设角度为仰角时，从垫板注浆孔注浆，中空杆体排气；当锚杆打设角度为水平或俯角时，从中空杆体注浆，垫板处排气管排气。（6）注浆结束标准：当锚杆打设角度为仰角时，当中空杆体流浆时结束注浆；当锚杆打设角度为水平或俯角时，浆液从岩面与锚杆垫板的缝隙中流出时则可以结束注浆。

2.3 试验结果

按照上述试验方法，课题组在高 ES 隧道进口和帕 M 岭隧道进口试验结果汇总如表 2 所示。

从试验验证结果可以得出以下结论：（1）3 根中速型锚固剂匹配 32 mm 钻孔即可在 7 分钟内达到设计强度要求，经济合理。（2）42 mm 钻孔与 23 mm 锚固

表 2 锚杆锚固试验结果

编号	试验地点	锚杆类型	锚杆剂类型	锚固时间	直径	实测锚固力	备注
1	高 ES 隧道进口段	有纵肋高强锚杆	3 根快速型	7 分	锚杆 22 mm	56 kN	施加拉拔力至屈服强度
	帕 M 岭隧道进口段	无纵肋高强锚杆	3 根快速型	钟	钻孔 32 mm	80 kN	
2	帕 M 岭隧道进口段	有纵肋高强锚杆	3 根中速型	7 分	锚杆 22 mm	41 kN	施加拉拔力至屈服强度
	帕 M 岭隧道进口段	无纵肋高强锚杆	3 根中速型	钟	钻孔 32 mm	63 kN	
3	帕 M 岭隧道进口段	有纵肋高强锚杆	3 根快速型	7 分	锚杆 22 mm	35 kN	施加拉拔力至屈服强度
	帕 M 岭隧道进口段	无纵肋高强锚杆	3 根快速型	钟	钻孔 42 mm	48 kN	
4	帕 M 岭隧道进口段	无纵肋高强锚杆	3 根中速型	7 分	锚杆 22 mm	30 kN	施加拉拔力至屈服强度
	帕 M 岭隧道进口段	无纵肋高强锚杆	3 根中速型	钟	钻孔 42 mm	38 kN	
5	帕 M 岭隧道进口段	组合式半中控锚杆（锚固段有纵肋）	3 根快速型	7 分	锚杆 22 mm	58 kN	施加拉拔力至屈服强度
	帕 M 岭隧道进口段	组合式半中控锚杆（锚固段无纵肋）	3 根快速型	钟	钻孔 32 mm	82 kN	
6	帕 M 岭隧道进口段	组合式半中控锚杆（锚固段有纵肋）	3 根中速型	7 分	锚杆 22 mm	55 kN	施加拉拔力至屈服强度
	帕 M 岭隧道进口段	组合式半中控锚杆（锚固段无纵肋）	3 根中速型	钟	钻孔 32 mm	79 kN	
7	帕 M 岭隧道进口段	组合式半中控锚杆（锚固段有纵肋）	3 根快速型	7 分	锚杆 22 mm	36 kN	施加拉拔力至屈服强度
	帕 M 岭隧道进口段	组合式半中控锚杆（锚固段无纵肋）	3 根快速型	钟	钻孔 42 mm	45 kN	
8	帕 M 岭隧道进口段	组合式半中控锚杆（锚固段有纵肋）	3 根中速型	7 分	锚杆 22 mm	31 kN	施加拉拔力至屈服强度
	帕 M 岭隧道进口段	组合式半中控锚杆（锚固段无纵肋）	3 根中速型	钟	钻孔 42 mm	43 kN	

剂、22 mm 锚杆的匹配性较差，无法达到锚固效果，需进一步增加锚固剂数量提高锚固效果，经济性方面不可取。（3）左旋无纵肋螺纹钢锚杆的左旋横肋有助于将锚固剂推向锚杆端部，使锚固段的树脂药卷充实紧密，有利于提高锚固力。人字肋有纵筋螺纹钢锚杆杆体一侧是左旋，另一侧是右旋，中间还有纵肋，因此其搅拌效果不如带纵肋螺纹钢，有可能因两纵肋处与锚固剂不能密实接触，致使锚固力不稳定。（4）当钻孔直径与锚杆直径差值控制在 10 mm 以内时，7 分钟内锚杆锚固力均大于设计值（60 kN），且能够实现快速高效锚固，满足锚杆支护施工质量要求。（5）快速型锚固剂的强度提升明显快于中速型锚固剂，在现场施工中，如果工效要求高的情况下可选用快速型锚固剂，但施工成本相对较高。（6）现场锚固力试验中采用厚度为 4 mm 的托盘进行锚固力测试时，托盘出现了明显的弯曲变形，换为 8 mm 厚的托盘则无明显变形。为保证后期锚固效果，现场施工时托盘厚度不能小于 8 mm，建议采用 10 mm 厚度的托盘。

3 结束语

本研究验证成果及施工工艺流程已应用于 CZ 铁路高 ES 隧道、帕 M 岭隧道及相关辅助坑道施工。在实际

应用过程中，针对软弱围岩的复杂地质条件，对施工参数进行了精细化调整。通过严格的质量管控措施，为锚杆施工质量提供了可靠保障，不仅可提高工效、节约成本，还凭借其创新性与实用性，为解决类似软弱围岩树脂锚杆加固施工提供了可复制的借鉴和切实指导，极具推广、应用价值。该成果经实践检验，有效增强了隧道围岩稳定性，为后续类似工程的安全高效推进积累了宝贵经验，推动了隧道施工技术的发展。

参考文献：

[1] 李贵民,郭永发,赵海燕.丽香铁路中义隧道预应力树脂锚杆设计施工关键技术[J].中国铁路,2021(02):17-26.
[2] 莱芜钢铁集团有限公司.一种高强度全螺纹等强树脂锚杆钢筋及其生产方法:CN201210337375.8[P].2014-04-23.
[3] 李庆民,陈中合.螺纹钢树脂锚杆使用中存在的问题与对策[J].山东煤炭科技,2005(05):2-3.
[4] 胡滨,林健,姜鹏飞.锚固剂环形厚度对树脂锚杆锚固性能影响的研究[J].煤矿开采,2011(04):20-22.
[5] 康红普,崔千里,胡滨,等.树脂锚杆锚固性能及影响因素分析[J].煤炭学报,2014(01):1-10.