

永 - 临支护型鸟笼锚索结构组成及其在软岩隧道中的工艺性试验

晏鹏博¹, 龚禹为², 王 勇³, 石 磊¹, 王万平⁴, 朱安龙⁵

¹甘肃长达路业有限责任公司, 甘肃 兰州

²西南交通大学, 交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都

³杭州图强工程材料有限公司, 浙江 杭州

⁴中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安

⁵中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州

Email: 496768381@QQ.com

收稿日期: 2021年5月29日; 录用日期: 2021年6月18日; 发布日期: 2021年6月25日

摘 要

为在软岩隧道中实现及时主动支护, 研制了“及时(树脂端锚) + 永久(水泥浆全长锚固)”快速预应力鸟笼锚索系统, 并依托木寨岭公路隧道, 对该鸟笼锚索的具体施工工艺、锚固及支护效果等进行了现场试验。得到结论如下: 鸟笼锚索系统的关键施工工序为搅拌锚固、张拉锁定及后注浆, 涉及搅拌时间和静置时间两个关键性参数; 在软岩大变形段开展的现场锚固拉拔试验表明, 鸟笼锚索系统具备极佳的主动支护能力, 树脂搅拌完成后15 min即可进行预应力施加, 且1 m树脂锚固长度的拉拔力能够达到400 kN以上; 依托该锚索开展的现场试验段变形实现了最大变形量由529 mm到229 mm的转变, 围岩位移控制效果显著。

关键词

隧道工程, 软岩大变形, 预应力锚固系统, 主动支护, 现场试验

Structural Composition of Permanently-Temporarily Supported Birdcage Anchor Cable and Its Processability Test in Soft Rock Tunnel

Pengbo Yan¹, Yuwei Gong², Yong Wang³, Lei Shi¹, Wanping Wang⁴, Anlong Zhu⁵

文章引用: 晏鹏博, 龚禹为, 王勇, 石磊, 王万平, 朱安龙. 永-临支护型鸟笼锚索结构组成及其在软岩隧道中的工艺性试验[J]. 土木工程, 2021, 10(6): 569-578. DOI: 10.12677/hjce.2021.106064

¹Gansu Changda Highway Co., Ltd., Lanzhou Gansu

²Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

³Hangzhou Dodrive Engineering Materials Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

⁴CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

⁵Huadong Engineering Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

Email: 496768381@QQ.com

Received: May 29th, 2021; accepted: Jun. 18th, 2021; published: Jun. 25th, 2021

Abstract

In order to realize timely active support in soft rock tunnel, the “timely (resin end anchor) + permanent (cement slurry full-length anchorage)” fast prestressed birdcage anchor system was developed. Relying on the Muzhailing Highway Tunnel, field tests were conducted on the specific construction process, anchorage and support effect of this birdcage anchor cable. The following conclusions were obtained: the key construction processes of the birdcage anchor system are mixing and anchoring, tensioning and locking, and post-grouting, which involve two key parameters: mixing time and resting time. On-site anchor pull-out tests conducted in a large deformation section of soft rock show that the birdcage anchor system has excellent active support capability, the pre-stress can be applied 15 minutes after the resin mixing is completed, and the pull-out force of 1 m resin anchorage length can reach over 400 kN. The deformation of the field test section based on this anchor cable has achieved the change of the maximum deformation from 529 mm to 229 mm, and the effect of surrounding rock displacement control is remarkable.

Keywords

Tunnel Engineering, Soft Rock Large Deformation, Prestressed Anchorage System, Active Support, On-Site Test

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国隧道建设重心逐渐向西部艰险山区转移，高应力软岩大变形隧道工程愈发普遍[1]。传统以系统砂浆锚杆、喷砼和钢架为核心的全被动型支护模式，已难以取得较好的支护效果，如兰新线上的乌鞘岭隧道、广甘路上的杜家山隧道、兰渝线上的木寨岭铁路隧道等[2] [3] [4]，均普遍出现了诸如锚杆拉断、喷射砼开裂脱落、钢支撑扭曲等问题，导致支护结构拆换率居高不下，严重影响施工进度，施工代价高昂。为此，从“调动”和“发挥”围岩自承载能力的理念出发，汪波等[5]提出的以“预应力锚固系统”为核心的快速主动支护理论预注浆成为了软岩隧道工程开挖支护的新发展趋势。

快速主动支护理论虽在我国煤矿巷道工程中已得到较多应用[6] [7] [8]，但其对应的支护构件多仅适用于巷道工程的短期服役或临时支护需求，无法满足隧道工程耐久性的要求。如在巷道工程中广泛应用的端头树脂锚固系统，其支护效用性仅依赖于端头树脂段的锚固力，而树脂作为一种遇水易失效的化学药剂，可靠性较差，因此该支护结构不宜作为交通隧道工程的支护结构。同时，限于支护理念、习惯，

隧道工程中的预应力锚索施作多是在喷砼完成之后，现有的隧道预应力锚索支护技术从环境、理念、材料等均难以实现及时主动支理论。

综上，为在软岩大变形隧道中实现主动支护技术，研发一种能实现高强预应力快速施加且能满足隧道工程长期服役要求的锚固系统及其施工工艺、锚固效果和具体的支护情况进行初步试验研究将显得尤为重要、极具实践价值。故本文将以渭武高速木寨岭公路隧道为工程依托，分析研制的适用于软岩隧道的“及时(树脂端锚) + 永久(水泥浆全长锚固)”快速预应力鸟笼锚索系统(以下简称鸟笼锚索)；同时，在现场开展施工工艺研究，并试验其主动支护能力及其围岩位移控制性能。

2. 工程概况

渭武高速木寨岭公路隧道地处秦岭构造带，穿越漳河与洮河的分水岭木寨岭，横跨漳县、岷县，是甘肃及西北地区通往西南地区的重要通道。隧道为分离式两车道隧道，左线全长 15,231 m，右线全长 15,173 m，最大埋深为 629.1 m。隧址区地质情况复杂，岩性主要为炭质板岩(见图 1)，占比约为隧道全长的 50%，单轴饱和抗压强度为 16.37~28.48 MPa，且岩体完整性差。隧址区地应力以水平构造应力为主导，由水压致裂法测得其最大水平主应力高达 24.95 MPa，方向为 N34°E，推算隧道围岩强度应力比为 0.66~1.14，隧址区内均属极高应力。

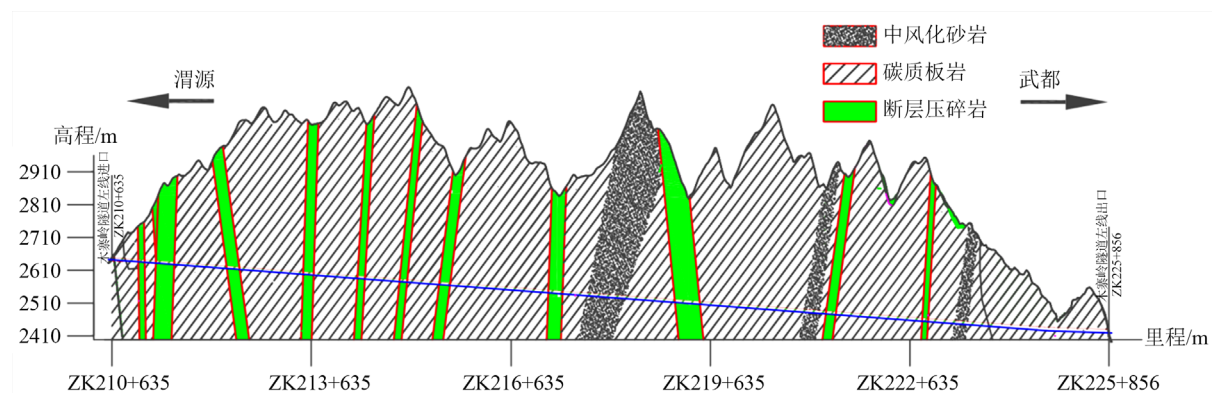


Figure 1. Longitudinal section of Muzhailing highway tunnel
图 1. 木寨岭公路隧道纵断面图

新建的木寨岭公路隧道与已建成的木寨岭铁路隧道基本平行，在充分调研铁路隧道实际大变形的基础上，隧道设计之初根据不同大变形的等级制定了相应的支护参数，以隧道右线 YK218 + 800~+820 段为例，衬砌结构支护参数如表 1。

Table 1. Design support parameters of Muzhailing tunnel
表 1. 木寨岭隧道试验段设计支护参数

岩性	预留变形量	初期支护				二次衬砌厚度	超前支护
		喷砼厚度	锚杆	钢筋网	钢架		
V 级深埋炭质板岩	20 cm	25 cm	Φ25 中空注浆锚杆 L-4.0 m	ø8 钢筋网 @15*15 cm	HW175 @80 cm	50 cm	Φ42 超前注浆小导管 L-450 cm@40 cm

表 1 可以看出，木寨岭公路隧道采用的是“及时被动强支护”模式，设计参数的取值均已达到或超过了规范推荐值[9]。在该支护模式下，YK218 + 800~+820 段累积下沉量 247~529 mm，最大收敛速率 112 mm/d，出现了局部侵限(见图 2)、钢支撑扭曲、喷射砼开裂等大变形现象，说明了“及时被动强支护”

模式在木寨岭隧道中的适用性有限。由此，结合锚杆在大变形隧道支护体系中扮演的重要角色，以现场拉拔锚固实验为依托，提出了以“预应力锚固系统”为核心的快速主动支护理论与技术。



Figure 2. Local intrusion limit
图 2. 局部侵限图

3. 新研鸟笼锚索系统的结构组成及要求

为满足软岩大变形隧道支护结构对及时主动性和耐久性需求，考虑到机械锚固在软岩隧道适用性差 [10] 及水泥基锚固等待时间偏长的不足 [11] [12]，再结合树脂锚固具备快速施加预应力的能力 [13] [14] 和水泥浆液锚固具备良好的长期支护强度 [15] 等既有研究成果的前提下，提出、并研制了“树脂端锚 + 水泥浆全长锚固”的快速预应力鸟笼锚索系统，其结构如图 3 所示。



Figure 3. Resin and grouting (birdcage type) anchor system
图 3. 树脂 + 注浆(鸟笼型)锚索系统

鸟笼锚索系统由锚索体(含鸟笼段)、注浆球垫、防腐套管、垫板和锚具等细部结构组成，其结构简图如图 4 所示，各结构依托其自身属性发挥不同的效用，具体的技术要求如下：

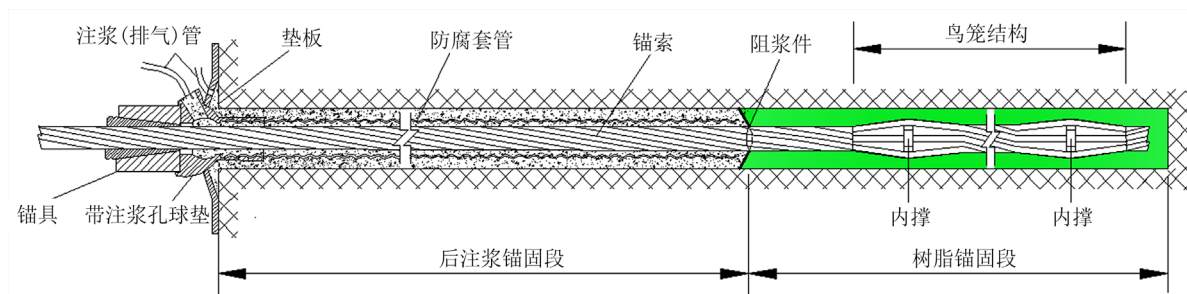


Figure 4. Sketch of birdcage anchor structure
图 4. 鸟笼锚索结构简图

1) 锚索体采用 $1 \times 19S-21.8 \text{ mm}-1860 \text{ MPa}$ 锚索，钻孔直径 45 mm。鸟笼段是在原有锚索体上加工形成多个“鸟笼形”膨胀节，膨胀节的外径小于锚孔，但大于锚索(原)本体，因其形似鸟笼而命名，最大直

径为 34 mm，其结构如图 5 所示。“鸟笼形”膨胀节的作用分为两个方面，一方面，膨胀节的端部扩大且“分散型结构”可使得树脂锚固剂的搅拌更为充分，且可使锚索居中度提升，从而进一步增强锚固剂与索体之间的粘接，能有效增强锚固力，改善前端树脂锚固的效果；另一方面，该结构使得锚索系统既满足了隧道工程相关规范对锚杆/索保护层厚度(>8 mm)的要求[16]，又实现了树脂锚固施工工艺中的三径(钻孔直径一般为 45 mm、锚固剂直径和锚杆/索直径)匹配性要求[17]。



Figure 5. The structure of the birdcage section
图 5. 鸟笼段结构形式



Figure 6. Grouting ball pad
图 6. 注浆球垫

2) 注浆球垫可视为由三部分组成：中空型球形垫圈、沿中轴线方向延伸的连接管和斜向伸出的注浆孔，其中球形垫圈的中心孔与注浆孔交汇连通，起到衔接的作用，其结构如图 6 所示。

3) 防腐套管为连续波纹型 PVC 薄壁管，长度稍短于锚索全长，尺寸为 $36 \times 32 \times 1$ mm，其结构如图 7 所示。对比一般的圆管，防腐套管凹凸起伏的波纹结构不仅提高了自身刚度，便于套管的插入，且能防止阻塞浆液流动和粘结，还能提升与注浆材料的粘结强度，使得锚固完成后的锚固力得到有效提高，具有高强性的特点。进一步，锚索体上包裹防腐套管，浆液固结后形成了“双层”保护层体系，内保护层为索体与防腐套管的灌浆体，外保护层为防腐套管与锚孔壁中的灌浆体，且内、外保护层不相互连通，即若发生砂浆开裂等侵蚀物质，防腐套管将作为屏障防止其侵入锚索体，大大提升了锚索锚固系统的防腐能力，尤其是当锚固系统处于高应力状态下，该结构的作用将大为凸显，这也为隧道的长期支护要求提供了基础。



Figure 7. Anti-corrosion casing
图 7. 防腐套管

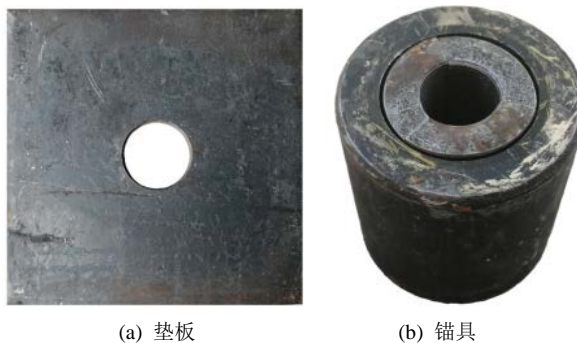


Figure 8. Pad and anchorage
图 8. 垫板与锚具

4) 垫板和锚具结构形式如图 8，垫板尺寸采用 250 × 250 × 20 mm 的大尺寸垫板，以更好地实现预应力的扩散。其中心孔直径 60 mm，该尺寸与注浆球垫尺寸相匹配；而锚具采用锥形 3 夹片形式，有利于提升锚固的可靠性。

4. 鸟笼锚索施工工艺、要点及“主动 - 永久”支护原理

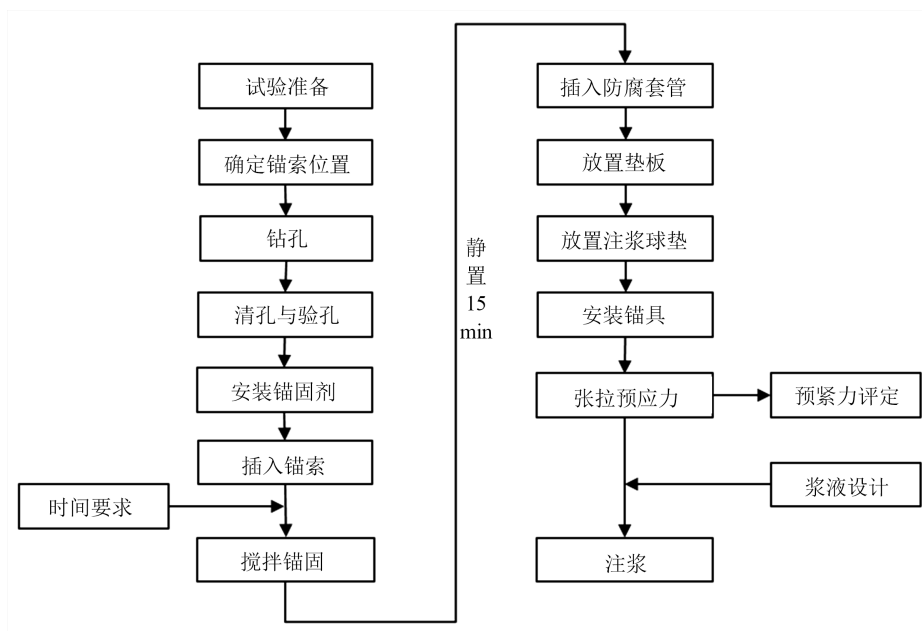


Figure 9. Construction process flow chart
图 9. 施工工艺流程图

图 9 为鸟笼锚索系统施工工艺流程图，其施工工艺核心是钻(钻孔)、锚(搅拌锚固)、注(注浆)，涉及搅拌时间和静置时间两个关键性参数。为保证施工进度推进中尽快形成“锚索 - 围岩”支护结构，应将锚索系统的施工应优先于其余常规支护措施，其施工主要控制流程包括施工准备、测量与放样(确定锚索位置)、钻孔、清孔与验孔、安装锚固剂、插入锚索、搅拌锚固、安装附件、张拉预应力和注浆。过程中的关键控制要点如下：

1) 施工准备：复核施工人员信息，材料及机械设备配套性与适用性；清除作业面杂物、附着泥土和松动岩块；施工风、水电、照明就绪。

2) 钻孔: 由专人检查复核钻孔处安全情况和钻孔位置; 钻孔方向应与岩面垂直或尽可能与岩层大角度相交, 当夹角过小时, 钻孔角度可视情况局部调整(施工中需征得监理工程师同意); 钻孔施工宜优先采用旋转式锚杆钻机, 以确保成孔质量; 每一钻孔至少应由两人协同完成, 上台阶钻孔过程中, 应密切注意顶部围岩, 以防掉块伤人; 钻孔深度以满足施加锚索预应力的要求(对照具体的预应力加载工具)并符合安装完成后锚索外露长度不大于 350 mm 的设计要求。

3) 安装锚固剂: 宜采用 PE 管, 沿钻孔壁缓慢、逐节推入至孔底; 完成后应确保锚固剂不滑落; 推入过程中应采取有效措施避免锚固剂破裂及无法推入等情况发生。

4) 插入锚索: 鸟笼锚索推入应采用人工方式; 必要时可采用钻机进行“旋转推入”(尽可能避免), 但应注意可能出现的机械伤害。

5) 搅拌锚固: 树脂锚固剂搅拌宜采用手持式钻机进行; 对不宜操作部位可采用锚杆钻机进行。搅拌时间要求根据采用树脂锚固剂的不同存在差异, 常用 CK (超快)型树脂锚固剂的一般搅拌的时间要求为 30 s 左右, 具体的时间划分要求为: 边旋转边匀速推至孔底的时间占总搅拌时间的 70% 左右, 推至孔底继续搅拌的时间 30%, 搅拌过程中不得出现后退锚索。

6) 安装附件(垫板/注浆球垫/锚具): 附件的安装应在规范规定的锚固剂等待安装时间后方可开始, CKb 系列锚固剂建议 15 min 后方可开始安装附件; 防腐套管采用旋转方式与注浆球垫进行连接; 垫板尽量在平顺的岩面上安装, 保证垫板与岩面密贴, 避免点接触与线接触等情况发生, 保证垫板发挥作用。

7) 张拉注浆: 张拉用设备、仪表应事先进行标定、复核; 张拉在附件安装完成后实施; 鸟笼锚索张拉施工宜采用气动锚索张拉机具, 控制张拉力应满足设计要求。张拉完成后立即实施注浆; 注浆材料符合设计要求; 注浆压力宜保持在 0.5 MPa 左右, 待浆液从垫板背后溢出停止注浆。图 10 为鸟笼锚索系统施工关键过程图。



Figure 10. Birdcage anchor construction process
图 10. 鸟笼锚索施工工艺图

上述鸟笼锚索系统的树脂端部在完成锚固之后, 及时施加的预应力会通过垫板及时主动地对周边隧道洞壁围岩施加约束, 并在垫板与端锚间形成压缩区, 压缩区内岩体物理力学参数会得到一定的提升, 从而达到改善变形的目的, 谓之“及时主动支护”。而后注浆技术通过注浆球垫(注浆孔、连接管)、防腐套管、锚索形成的一个注浆通道完成, 实现了浆液“自底向上”的“中空注浆”能力, 确保了注浆的可靠性与密实度。在变形基本稳定之后进行后注浆一方面能够减少预应力损失, 更重要的则是避免了锚索系统后期因端头锚固力不足失效后系统的整体失效, 从而确保锚固系统在隧道全服役期间能发挥可靠的支护效应, 从而提高结构的安全性, 实现“永久支护”。综上, 该鸟笼锚索结构实现了软岩隧道支护及时性主动性及耐久性的双重要求, 兼具了永久与临时支护的功能。

5. 鸟笼锚索支护技术的现场试验研究

1) 锚固效果试验

为检验鸟笼锚索系统在软岩大变形隧道中的适用性和可靠性，在木寨岭隧道渭源向里程 YK218+030.0~020.0 断面上、中台阶开展了鸟笼锚索现场锚固拉拔试验。该段岩性主要为薄层状炭质板岩(夹砂质板岩)(见图 11)，产状 $90(\sim 135)^\circ \angle 45(\sim 60)^\circ$ ，层厚 1~20 cm；地下水主要为基岩裂隙水、不发育；岩块的点荷载换算强度 23.3~33.4 MPa (3 组)。



Figure 11. Upper step palm surface
图 11. 上台阶掌子面围岩



Figure 12. CKb3540 resin anchoring agent
图 12. CKb3540 树脂锚固剂

试验选用锚索体为无粘结型 5 m 长 $1 \times 19s$ -21.80 mm-1860 MPa 钢绞线，最大力 583 kN，屈服力(0.2%) 513 kN，伸长率 3.5%，鸟笼段长度 1.2 m，含 4 节“鸟笼形”膨胀节，最大直径 34~35 mm (见图 5)；树脂锚固剂(见图 12)采用 3 节 CKb3540 (直径 35 mm、长度 40 cm)，换算理论锚固长度 1.02 m。

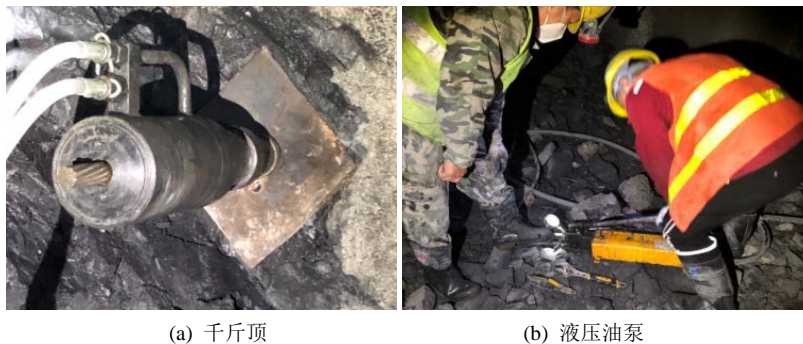


Figure 13. On-site loading
图 13. 现场加载

试验过程中使用锚杆钻机打设 $\Phi 45$ mm 锚孔后, 采用 ZQS-50/2.3S 型气动手持式钻机搅拌锚固, 锚固 15 min 后, 采用 45 t 手动油压穿心千斤顶(MQ22-450/60)进行拉拔(见图 13), 设定极限拉拔力为加载过程中索体位移出现明显增长。

Table 2. Birdcage anchor pull-out test records

表 2. 鸟笼锚索拉拔试验记录

试验序号	功效					极限拉拔力 /kN
	钻孔耗时 /min	锚固剂、锚索塞入及搅拌时间/min	静置时间 /min	安装套管、垫板 /min	后注浆时间 /min	
第 1 次试验	18					420
第 2 次试验	21	2~3	15	<1	2~3 分钟	445
第 3 次试验	16					435

备注: 试验中为获取数据采用的是人工加载的方式, 费时较长; 而工程中将采用气动液压千斤顶单根锚索的预应力张拉时间在 1~3 min 即可完成。

表 2 为让压锚索 3 次的锚固拉拔的具体耗时和极限拉拔力值, 分析可知 1 m 树脂锚固的锚固力超过了 400 kN, 显示研制的鸟笼锚索具备高强支护能力, 可加载较高的预应力; 同时, 具体的施工耗时上, 5 m 鸟笼锚索从钻孔到最终注浆完成的时间一般在 37~49 min (采用气动液压千斤顶加载预应力), 即单根锚索的施工耗时平均在 43 min 左右, 具备很好的快速支护能力。

2) 鸟笼锚索支护效果分析

对比采用原“被动强支护”型支护 YK218 + 780~+800 和采用将系统锚杆替换为鸟笼锚索系统的及时主动支护 YK218 + 800~+820 位移数据, 围岩变形控制效果极为明显, 断面最大位移由 247~529 mm 降至 132~229 mm。

6. 结论

本文提出一种适合于软岩隧道的快速预应力锚固系统, 即“及时(树脂端锚) + 永久(水泥浆全长锚固)”快速预应力鸟笼锚索系统, 并在木寨岭公路隧道典型大变形段进行了工艺性试验研究与支护效果分析, 得到主要结论如下:

1) 鸟笼锚索系统由锚索体(含鸟笼段)、注浆球垫、防腐套管、垫板和锚具等组成。其中, “鸟笼形”膨胀节的存在既增强了锚固力, 又满足了树脂锚固中的三径匹配要求, 具备实现快速高强支护的能力; 而注浆球垫与防腐套管等形成的注浆通道及多重防腐能力, 既确保了注浆的可靠性和密实度, 又提升了支护结构的长期耐久性, 确保实现了永久支护。

2) 现场拉锚固拔试验结果表明, 单根锚索的施工耗时平均在 43 min 左右, 具备很好的快速支护能力; 同时, 1 m 树脂锚固长度时, 锚固力超过了 400 kN, 具备了高强预应力主动支护能力。

3) 木寨岭公路隧道典型大变形段试验结果表明, 鸟笼锚索系统具有显著变形控制效果, 隧道断面最大位移由采用原被动支护模式下的 247~529 mm 降至了 132~229 mm。

基金项目

甘肃省科技计划资助(19ZD2GA005)。

参考文献

[1] 汪波, 郭新新, 何川, 等. 当前我国高地应力隧道支护技术特点及发展趋势浅析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(5):

- 1-10.
- [2] 李国良, 朱永全. 乌鞘岭隧道高地应力软弱围岩大变形控制技术[J]. 铁道工程学报, 2008, 3(114): 54-59.
 - [3] 汪波, 李天斌, 何川, 等. 强震区软岩隧道大变形破坏特征及其成因机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 928-936.
 - [4] 孙绍峰. 兰渝铁路软岩隧道特征及大变形控制技术[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(3): 125-130.
 - [5] 汪波, 王杰, 吴德兴, 赵玉东, 张彪, 李铮. 让压支护体系在软岩大变形公路隧道中的应用研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(10): 1985-1993.
 - [6] 康红普. 我国煤矿巷道锚杆支护技术发展 60 年及展望[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(6): 1071-1081.
 - [7] 康红普, 王金华, 林健. 煤矿巷道锚杆支护应用实例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4): 649-664.
 - [8] 何满潮, 郭志飏. 恒阻大变形锚杆力学特性及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7): 1297-1308.
 - [9] JTG D70-2004, 公路隧道设计规范[S]. 2004.
 - [10] 修作量. 英国煤矿锚杆支护技术[J]. 煤炭科学技术, 1993(12): 54-56, 62.
 - [11] 钟维昭. 水泥基药卷式锚固剂试验与应用[J]. 建井技术, 2005(Z1): 42-45, 53.
 - [12] 闫泉峰, 肖尚红, 曹国华. 全长锚固水泥药卷锚杆的试验应用[J]. 矿山压力与顶板管理, 2000(3): 67-69.
 - [13] 康红普, 崔千里, 胡滨, 吴志刚. 树脂锚杆锚固性能及影响因素分析[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 1-10.
 - [14] 胡滨, 康红普, 林健, 蔡嘉芳. 水对树脂锚杆锚固性能影响研究[J]. 煤矿开采, 2013, 18(5): 44-47, 51.
 - [15] 汪波, 王振宇, 郭新新, 朱安龙, 王志伟. 软岩隧道中基于快速预应力锚固支护的变形控制技术研究[EB/OL]. 中国公路学报, 1-16. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20201204.1838.004.html>, 2021-03-31.
 - [16] JTG 3370.1-2018, 公路隧道设计规范第一册土建工程[S]. 2018.
 - [17] 马念杰, 郭励生, 杜木民. 锚杆三径的合理匹配[J]. 中国煤炭, 1998(1): 35-37, 55.