

引用本文:王永刚,尉敏,王江,等.涨壳式预应力中空锚杆支护效果及注浆工艺改进研究[J].建筑科学与工程学报,2023,40(3):142-151.
WANG Yonggang, YU Min, WANG Jiang, et al. Study on supporting effect of expansion-shell pre-stressed hollow anchor and improvement of grouting technology[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(3): 142-151.

DOI:10.19815/j.jace.2022.12055

涨壳式预应力中空锚杆支护效果及注浆工艺改进研究

王永刚¹,尉敏¹,王江¹,董耀斌¹,车志远¹,魏彬²,杨御博³,王志丰³

(1. 中铁北京工程局集团第一工程有限公司,陕西西安 710100; 2. 河南省新乡市交通运输局,河南新乡 453000; 3. 长安大学公路学院,陕西西安 710064)

摘要:为了研究涨壳式预应力中空锚杆对深埋隧道的支护效果,并对现有注浆工艺提出改进措施,依托中兰铁路香山隧道工程,采用有限差分数值分析软件 FLAC3D,对比分析了普通砂浆锚杆和涨壳式预应力中空锚杆支护作用下的隧道围岩变形及应力状态变化情况;开展现场锚固试验研究,分析了锚杆长度和注浆体龄期对锚杆锚固效果的影响;进行现场注浆试验研究,分析了注浆方式和注浆压力对涨壳式预应力中空锚杆注浆密实度的影响,并对现有注浆工艺提出了改进措施。结果表明:与普通砂浆锚杆相比,涨壳式预应力中空锚杆控制围岩变形、改善围岩应力状态等的效果更佳,其中围岩变形可减小约40%;相比于锚固长度,注浆体养护龄期对涨壳式预应力中空锚杆的支护效果影响更为显著,当养护龄期为28 d时,支护效果可提升50.12%;采用中空杆体内注浆方式时,注浆压力需大于0.8 MPa方可达到最佳效果,且该注浆方式适用于涨壳式预应力中空锚杆水平或向下安装;采用中空杆体外注浆方式时,宜采用更大的注浆压力,且该注浆方式适用于锚杆向上安装;改进后的锚杆注浆口可以有效防止漏浆,保证了注浆的密实度,对保护锚杆和加强锚杆与地层联结均有积极作用。

关键词:隧道工程;涨壳式预应力中空锚杆;支护效果;注浆工艺;数值模拟

中图分类号: TU472

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)03-0142-10

Study on supporting effect of expansion-shell pre-stressed hollow anchor and improvement of grouting technology

WANG Yonggang¹, YU Min¹, WANG Jiang¹, DONG Yaobin¹, CHE Zhiyuan¹, WEI Bin²,
YANG Yubo³, WANG Zhifeng³

(1. The First Engineering Co., Ltd of China Railway Beijing Engineering Group, Xi'an 710100, Shaanxi, China;
2. Xinxiang Transportation Bureau, Xinxiang 453000, Henan, China; 3. School of Highway,
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the supporting effect of expansion-shell pre-stressed hollow anchor on deep-buried tunnels and put forward improvement measures for the existing grouting technology, based on the Xiangshan Tunnel project of Zhongwei-Lanzhou Railway, the finite difference numerical analysis software FLAC3D was used to compare and analyze the deformation and stress state of tunnel surrounding rock under the support of ordinary mortar anchor and expansion-shell

收稿日期: 2022-12-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600404); 国家自然科学基金项目(52178310)

作者简介: 王永刚(1979-), 男, 高级工程师, E-mail: 16831211@qq.com。

通信作者: 王志丰(1986-), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, E-mail: zhifeng.wang@chd.edu.cn。

pre-stressed hollow anchor. The influence of anchor length and grouting age on the anchoring effect was analyzed by field anchoring test. Based on the field grouting test, the influence of grouting method and grouting pressure on the grouting compactness of expansion-shell pre-stressed hollow anchor was analyzed, and the improvement measures for the existing grouting technology were put forward. The results show that compared with the ordinary mortar anchor, the expansion-shell pre-stressed hollow anchor has better effect on controlling the deformation and stress state of the surrounding rock, and the deformation of surrounding rock can be reduced by about 40%. Compared with the anchorage length, the curing age of grouting has a more significant effect on the supporting effect of expansion-shell pre-stressed hollow anchor. When the curing age is 28 d, the supporting effect can be improved by 50.12%. When the internal grouting of anchor is adopted, the grouting pressure needs to be greater than 0.8 MPa to achieve the best effect, and the grouting method is suitable for the horizontal and downward installation of the expansion-shell pre-stressed hollow anchor. When the external grouting of anchor is adopted, the greater grouting pressure should be adopted, and the grouting method is suitable for the upward installation of the anchor. The improved grouting port of anchor can effectively prevent slurry leakage and ensure the compactness of grouting, which plays a positive role in protecting anchor and strengthening the connection between anchor and stratum.

Key words: tunnel engineering; expansion-shell pre-stressed hollow anchor; supporting effect; grouting technology; numerical simulation

0 引言

随着中国交通建设重心逐渐向中西部地区转移,西部地区成为中国高速铁路建设的活跃区域之一^[1]。由于西部地区地质条件复杂,隧道修建埋深大,构造应力场发育,隧道在施工过程中经常会面临诸如围岩大变形、岩爆等工程灾害。因此,工程中常常采用锚杆支护加固的方法进行灾害预防和处置。涨壳式预应力中空锚杆因具有主动支护、快速锚固的优点,在隧道岩爆区段的施工中得到广泛应用,但受锚固长度、注浆体龄期、支护时机以及注浆工艺等多方面因素影响,支护效果有所不同。

由于涨壳式预应力中空锚杆施工快捷方便,能够及时对围岩进行支护,对高地应力下的围岩变形和岩爆能起到良好的削弱和控制效果,涨壳式预应力中空锚杆在中国最早应用于雅砻江干流锦屏大河湾上的锦屏二级水电站地下厂房洞室的建设中^[2-3]。中国学者针对涨壳式预应力中空锚杆展开了大量研究工作。卢小刚^[4]通过研究锚杆对隧洞围岩塑性范围、位移变化的控制以及锚杆支护轴力的变化,证明了涨壳式预应力中空锚杆在高地应力、地质条件复杂情况下的支护效果更佳。冯艺等^[5]依托锦屏二级水电站引水隧洞建设工程,在隧洞强烈至极强烈岩爆段使用涨壳式预应力中空锚杆支护,认为该锚杆

能够起到及时、安全支护作用,一定程度上削弱和抑制了岩爆的破坏。杨瑞莲等^[6]针对大型地下洞室边墙围岩自稳时间短、变形不确定的特点,提出了一种采用钢质楔头涨壳式预应力中空锚杆的新技术,成功解决了软弱页岩层的深、浅层锚固问题。吴大伟等^[7]采用中空预应力注浆锚杆支护工艺处理大断面巷道在强构造应力作用下围岩的严重变形,结果表明中空预应力注浆锚杆能够主动加固围岩,提供支护刚度,支护效果明显。刘江等^[8]对机械化施工隧道条件下的涨壳式预应力中空锚杆支护进行研究,表明该锚杆在隧道机械化施工中具有快捷稳定的优势,提高了隧道机械化施工的效率。张喜涛等^[9]利用力学数学模型,分析锚杆和注浆体之间共同作用的效果,结果表明锚杆支护效果与锚杆和注浆体直径线性相关,且预应力的施加能更好地限制围岩变形。陈琼等^[10]利用数值软件模拟巴基斯坦 N-J 水电站引水隧洞岩爆区域涨壳式预应力中空锚杆的抗冲击性能,结果表明未注浆情况下,涨壳头在破碎岩体中锚固效果差,且爆破荷载作用下锚杆最大应力远小于设计值。为此,吴德兴等^[11-13]对涨壳式中空注浆锚杆的端头结构进行了改进,利用树脂锚固剂与围岩的黏结作用代替涨壳头与围岩的挤压作用,研究发现通过此结构施加预应力对围岩扰动小,且能较好适用于软岩隧道中;此外,对不同预应力及间

距下预应力中空锚杆的防岩爆效果也进行了分析研究,并提出了一种适用于中等岩爆段隧道的锚杆设计防岩爆原则。针对隧道开挖后围岩产生的大变形,朱珍德等^[14]利用数值模拟分析锚杆连接段螺纹螺距、连接长度、外壁厚度等对锚杆变形的影响,并得到使锚杆连接段抗拉性能最佳的参数,满足软岩大变形支护要求。

注浆体作为联结锚杆杆体和地层围岩的介质,其界面黏结强度受注浆压力、注浆密实度等多种因素影响,而界面黏结强度又会影响锚杆的锚固效果。陈昌富等^[15-16]通过室内试验和 Kriging 模型预测,证明了注浆压力的增加可使锚杆与土体界面的黏结强度显著增加,从而提高锚杆的锚固效果。许万忠等^[17]通过理论推导与试验对比分析,证明采用压力注浆的方式可以有效提高加锚层理边坡的抗剪强度和黏结强度。叶新宇等^[18]通过拉拔试验,提出抗拔力计算的双曲模型,认为压密效应对抗拔力影响显著,且注浆压力越大影响越大。张广兴等^[19]通过调整注浆压力参数对土钉进行现场拉拔试验,结果表明注浆浆液水灰比与注浆量对土钉的极限抗拉强度影响显著。此外,Hong 等^[20]、Yin 等^[21]、Wang 等^[22]也通过大量的室内与室外试验,对压力注浆可以显著增加锚杆与土体的黏结强度,进而提高锚杆的承载能力这一结论进行了研究和证明。

综上所述,既有研究主要针对涨壳式预应力中空锚杆的支护效果进行了大量现场试验及室内试验,但鲜有与普通砂浆锚杆支护效果的数值分析比较,并且缺少对注浆方式、注浆参数影响的考虑。因此,本文依托中兰铁路香山隧道,对涨壳式预应力中空锚杆的支护效果展开研究,利用现场锚固试验以及有限差分数值分析软件 FLAC3D,对比分析了普通砂浆锚杆与涨壳式预应力中空锚杆的支护效果,并通过现场注浆试验对其注浆方式和注浆参数等进行了研究和改进,研究成果可为类似工程提供一定参考。

1 工程概况

1.1 依托工程

香山隧道位于中卫至兰州铁路,穿越香山山脉,为双线高铁隧道。隧道里程桩号为 DK39+990~DK57+753.3,全长 17 763.3 m,最大埋深 390 m。隧址区地貌单元为低中山区,地形起伏,间歇性沟谷发育,呈“V”型谷,海拔高程为 1 430~1 930 m。隧

道场地围岩主要以Ⅳ级和Ⅴ级围岩为主,部分区段为Ⅲ级围岩。本文研究 DK53+000~DK55+000 区段隧道,其地质纵剖面图如图 1 所示。

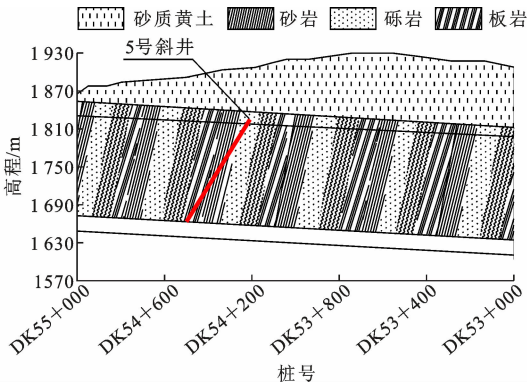


图 1 DK53+000~DK55+000 段地质纵剖面图

Fig. 1 Geological profile of DK53+000-DK55+000

1.2 支护形式

根据施工组织设计及该隧道区段地质条件,DK53+000~DK55+000 区段隧道采用两台阶法施工,隧道断面采取三心圆加仰拱形式,洞跨 14.98 m,洞高 13.09 m。由于该区段隧道埋深最大约 300 m,可能会发生岩爆现象,因此设计初期支护锚杆采用涨壳式预应力中空锚杆,以及时对围岩提供抗力,改善围岩应力状态,支护断面如图 2 所示。

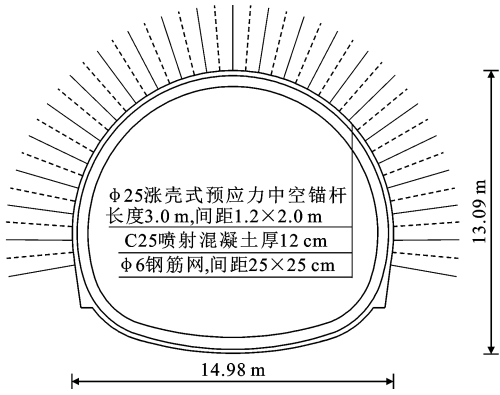


图 2 隧道初期支护断面

Fig. 2 Initial support section of tunnel

涨壳式预应力中空锚杆主要由涨壳式锚头、中空杆体、垫板、螺母和注浆孔等组成,其结构如图 3 所示。在支护初期,由涨壳式锚头与孔壁摩擦形成的抗拔力加上所施加的预应力,使锚杆和围岩可以第一时间形成压力拱效应,减缓围岩的松弛变形;锚杆注浆将锚杆杆体与围岩黏结成为整体,提高围岩的完整性,同时使锚杆与围岩的应力传递更加紧密,以达到同步传递效果。

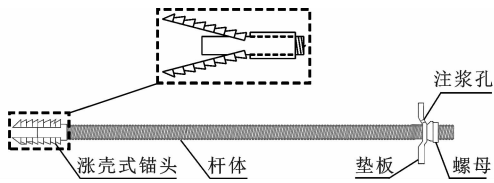


图 3 涨壳式预应力中空锚杆

Fig. 3 Expansion-shell pre-stressed hollow anchor

2 支护效果数值模拟

2.1 模型与参数

为研究涨壳式预应力中空锚杆的支护效果,根据香山隧道地质勘察资料,采用有限差分分析软件 FLAC3D 对涨壳式预应力中空锚杆和普通砂浆锚杆的支护效果进行数值模拟。

以图 2 所示的隧道断面为基准进行建模,考虑到施工过程中的空间效应,根据既有结构尺寸大小,计算模型横向为 100 m,竖向为 100 m,纵向为 20 m。隧道开挖采用两台阶法模拟,且每次进尺 2 m,共计开挖 10 个循环。隧道 300 m 埋深通过在模型顶部施加土覆相应厚度的地层荷载压力来控制。模型侧面及地面边界均为法向位移约束,上边界为自由边界。采用 RHINO 软件进行建模,将其导入 FLAC3D 进行赋值计算。模型采用 Mohr-Coulomb 屈服准则,地层采用实体单元模拟,初支喷混采用 Shell 单元模拟,锚杆采用 Cable 单元模拟,其中涨壳式预应力中空锚杆施加预应力为 80 kN。FLAC3D 三维模型及支护模型如图 4 所示,模型参数如表 1、2 所示。

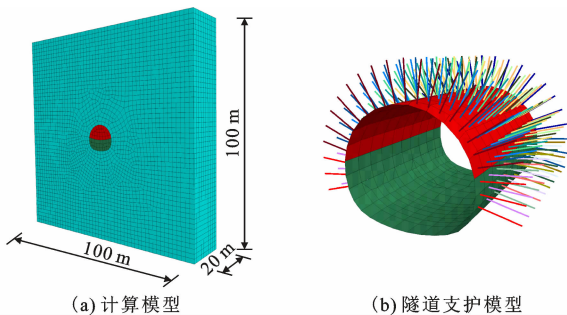


图 4 数值计算模型

Fig. 4 Numerical calculation model

表 1 围岩参数

Table 1 Parameters of surrounding rock

弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ $(^\circ)$
15	0.26	2 400	1.0	47

2.2 涨壳式预应力中空锚杆模拟

FLAC3D 中常用 Cable 单元模拟锚杆,它假设

表 2 初期支护参数

Table 2 Parameters of initial supporting

材料	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa
锚杆	210.0	0.20	7 850	600	800
喷混	25.5	0.20	2 245		

锚杆为 2 个节点之间具有相同的横截面及材料参数的直线段,每个 Cable 单元由 2 个节点和之间的构件连接组成。Cable 单元对围岩的加固机制是通过围岩变形将外荷载通过注浆体传递作用在节点上,节点变形进而影响锚杆杆体的力学响应,力学响应结果又通过相同路径反向作用于围岩,最终达到力学平衡^[23]。

普通砂浆锚杆受力需要建立在围岩变形的前提下,相对被动;而预应力锚杆在安装后即可立刻产生支护作用^[24]。基于此,普通砂浆锚杆以简单 Cable 单元模拟即可,而涨壳式预应力中空锚杆则需分为托盘段、自由段、锚固段 3 个部分进行模拟,且对 3 个部分的锚固剂赋值不同参数(即对锚固剂刚度、黏结力、内摩擦角 3 个参数进行调整)以模拟真实应用状况^[25],而锚固段最后一个节点通过参数调整以模拟涨壳式预应力中空锚杆涨壳头的作用。涨壳式预应力中空锚杆程序模拟实现示意图如图 5 所示^[25]。其中,预应力只施加在自由段,且自由段杆体不发生位移传导和力的作用,实现与围岩的分离,因此锚固剂刚度、黏结力、内摩擦角均为 0;而托盘段和锚固段均有与围岩的相互作用,因此 3 个参数均需赋值计算。

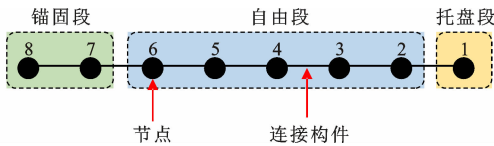


图 5 涨壳式预应力中空锚杆程序实现示意图

Fig. 5 Schematic diagram of program realization of expansion-shell pre-stressed hollow anchor

2.3 结果分析

数值模拟计算得到的普通砂浆锚杆与涨壳式预应力中空锚杆两种支护方式下的围岩竖向位移云图如图 6 所示。此外,在隧道拱顶每间隔 5 m 选取一个监测点,其沉降曲线如图 7 所示。

由位移云图和拱顶沉降曲线分析可知,相比于普通砂浆锚杆,使用涨壳式预应力中空锚杆对隧道拱顶位移的控制效果比较显著,可使拱顶沉降变形减小约 40%。究其原因,在围岩开挖支护初期,涨

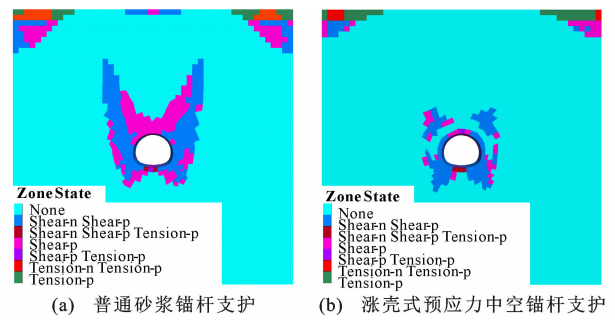


图 9 围岩塑性区云图

Fig. 9 Nephograms of surrounding rock plastic zone

岩变形、围岩应力等均有显著的控制作用。因此,在
高地应力、围岩条件一般的情况下,选用涨壳式预应
力中空锚杆的支护效果更佳。

3 现场试验

3.1 现场锚固试验

为探究不同锚固长度以及注浆材料不同龄期对
锚杆支护效果的影响,根据现场围岩条件,选用尺寸
为 $\phi 25$ mm(直径) $\times 5$ mm(壁厚)的涨壳式预应力中
空锚杆以及配合比为 1 : 0.4 的水泥净浆进行锚固
试验,预应力统一施加 80 kN。共设置 6 组工况展
开现场锚固试验,工况设计如表 3 所示。

表 3 现场锚固试验工况设计

Table 3 Condition design of field anchoring test			
试验类别	工况	锚杆长度/m	注浆体龄期/d
试验 1	1	3	28
	2	4	28
	3	5	28
试验 2	4	3	1
	5	3	7
	6	3	28

现场锚固试验分别对锚杆逐级施加轴向荷载并
记录其端部位移值,得到荷载-位移曲线如图 10 所
示。由图 10(a)可知,锚杆长度对涨壳式预应力中
空锚杆的支护效果有一定程度的影响,随着锚杆长
度的增加,其极限锚固力逐渐增大。极限锚固力范
围为 230~267 kN,差值较小,说明锚杆长度的变化
对涨壳式预应力中空锚杆的支护效果影响有限,需
要采取其他措施进一步提高其支护效果。

从图 10(b)分析注浆体不同养护龄期下涨壳式
预应力中空锚杆的支护效果可知,注浆体龄期对其
支护效果影响显著。随着注浆体养护龄期的增加,
其极限锚固力显著增大,范围为 164~246 kN,相较
养护 1 d,养护 7、28 d 的支护效果分别提升 10.98%

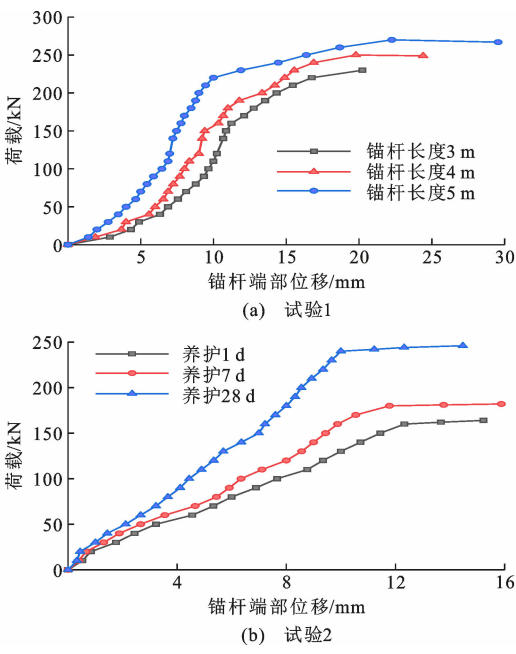


图 10 现场锚固试验结果

Fig. 10 Results of field anchoring test

和 50.12%,说明注浆体养护龄期对涨壳式预应力
中空锚杆支护效果的影响比锚固长度更为显著。

3.2 现场注浆试验

注浆体作为锚杆和地层围岩之间联结的主要介
质,可以有效黏结孔壁围岩和锚杆并传递地层围岩
的各种应力变形作用^[27],同时也可作为锚杆杆体
的保护层,有效防止锚杆锈蚀失效。由于锚杆系统属
于隐蔽性工程,因此其注浆密实度直接关系到地下
工程结构能否长期、安全、稳定的运行^[28]。然而,
传统的材料试验以及锚杆抗拔力试验已无法满足锚杆
锚固质量的检测,因此需采用一种技术先进、安全、
经济、准确且无损的声波反射检测法^[29],以客观地
反映锚杆注浆密实度。

香山隧道现场注浆试验采用 JL-MG(D)锚杆质
量检测仪进行现场数据采集分析,现场测试工作如
图 11 所示。为保证试验结果的准确性,所有测试锚
杆插入孔中长度不能低于设计要求的 95%,且锚杆
注浆量均应超过设计量的 80%,并在注浆完成后统
一养护 7 d。由于涨壳式预应力中空锚杆的特殊性,
其注浆方式可分为中空杆体内和中空杆体外注浆两
种(图 12),因此,根据注浆方式和压力的不同共设
置 10 组不同工况条件的注浆试验,具体工况如表 4
所示。

根据现行《锚杆锚固质量无损检测技术规程》
(JGJ/T 182—2009)中的相关要求,对于Ⅲ级锚杆,
长度合格时,锚杆注浆密实度需要大于或等于

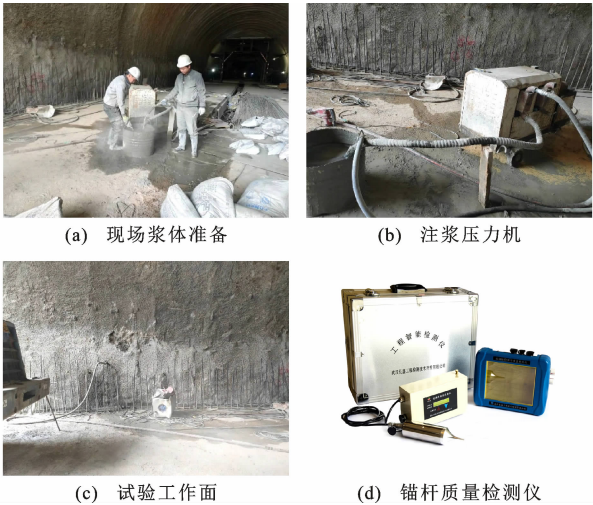


图 11 现场注浆试验
Fig. 11 Field grouting test

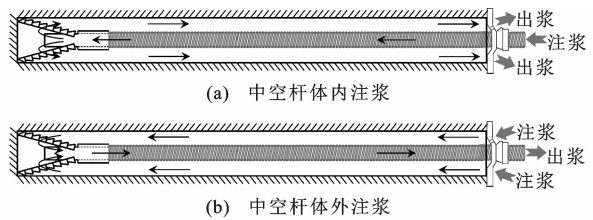


图 12 不同注浆方式
Fig. 12 Different grouting method

表 4 现场注浆试验工况设计及注浆结果
Table 4 Condition design and grouting results of field grouting test

注浆方式	工况	注浆压力/ MPa	注浆结果
中空杆体内注浆	1	0.2	注浆不饱满, 空腔较多
	2	0.4	注浆较饱满, 空腔较少
	3	0.6	注浆饱满
	4	0.8	注浆饱满
	5	1.0	注浆饱满
中空杆体外注浆	6	0.2	注浆不饱满, 空腔较多
	7	0.4	注浆不饱满, 空腔较多
	8	0.6	注浆较饱满, 空腔较少
	9	0.8	注浆较饱满, 空腔较少
	10	1.0	注浆饱满

75%。现场注浆试验结果见图 13, 可以看出注浆密实度与注浆压力呈现一定线性增加关系, 且与注浆方式也密切相关。

当注浆方式为中空杆体内注浆时, 随着注浆压力的增大, 注浆逐渐密实, 但超过一定的注浆压力后, 注浆密实度有所下降, 这是因为注浆压力过大, 导致部分浆体从排气塑料管溢出, 使孔口处注浆不

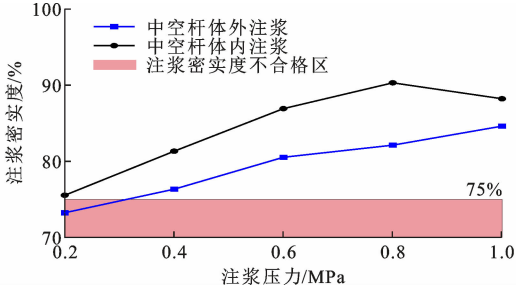


图 13 注浆密实度曲线
Fig. 13 Curves of grouting compactness

饱满; 当注浆方式为杆体外注浆时, 随着注浆压力的增大, 注浆逐渐密实, 注浆密实度与注浆压力呈线性递增关系。当注浆压力大于 0.4 MPa 时, 各工况锚杆注浆密实度均大于 75%, 满足技术规程要求。中空杆体内注浆方式的最佳注浆压力为 0.8 MPa, 而中空杆体外注浆方式由于试验组数量限制, 本次现场注浆试验最佳注浆压力为 1.0 MPa。

结合现场实际支护情况与现场注浆试验结果, 对两种不同注浆方式的使用条件加以分析可知: 中空杆体内注浆方式适合锚杆水平或向下安装, 涨壳式预应力中空锚杆杆体为注浆管进浆, 塑料管为排气道, 注浆时浆体从涨壳锚固件底部出浆, 并逐渐充溢钻孔道, 空气通过排气管排出, 当浆体从排气塑料管溢出时, 完成注浆; 而中空杆体外注浆方式则适合锚杆向上安装, 注浆体从注浆管进浆, 浆体逐渐充溢钻孔并向上流动, 此时中空杆体的空腔成为排气道, 当空气排完时, 注浆体从涨壳锚固件尾端进浆, 充满空腔, 从锚杆端部溢出, 注浆完成。

4 注浆工艺改进

虽然采用涨壳式预应力中空锚杆体内注浆和体外注浆可以有效提高注浆密实度, 但难免存在一些不足, 如: 安装锚杆作业中, 注浆后卸下注浆接头时, 注浆体难免从注浆口中漏出一部分, 导致接近锚杆自由端的部分杆体形成空腔, 或者导致顶部的浆液下落使锚固端形成局部空腔, 造成注浆不饱满的缺陷; 同时也会导致锚杆体没有注浆体包裹的部位过早锈蚀失效, 严重时会使支护失效, 造成地层的变形甚至塌陷, 造成人员伤亡或经济损失。

针对注浆工艺中存在的问题, 对锚杆注浆口进行简单的改进以满足注浆饱满度的要求。对锚杆注浆口和止浆塞重新设计, 在止浆塞的注浆口中设计 2 片同性磁极单轴半圆形止浆片, 在止浆片两侧均设有限位凸台, 使其无法向锚杆自由端转动, 具体装

置见图14。改进后的注浆口可以保证止浆片在注浆结束后快速回位,封闭注浆口,防止内部浆液漏出导致的注浆不饱满问题,且该装置普适性强,适用于各类砂浆锚杆注浆。

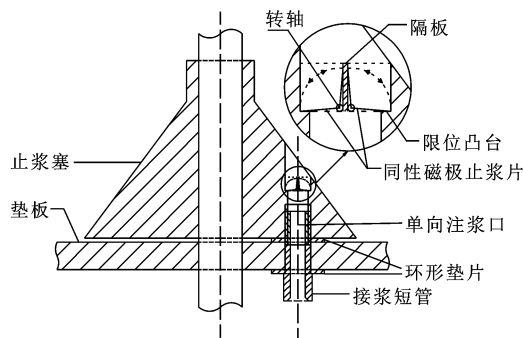


图14 装置示意图

Fig. 14 Schematic diagram of device

5 结 语

(1)相比于普通砂浆锚杆,涨壳式预应力中空锚杆对围岩沉降变形控制效果更显著,可使沉降变形降低约40%;此外,涨壳式预应力中空锚杆能较好地改善隧道围岩应力状态,减小拉应力区范围,充分发挥主动支护的作用。

(2)现场锚固试验结果表明,相较于锚杆体锚固长度,注浆体养护龄期对锚杆支护效果的影响更为显著,当养护龄期为28d时,可使锚杆支护效果提升50.12%,且使极限锚固力显著增大。

(3)涨壳式预应力中空锚杆体内注浆时,注浆压力需大于0.8MPa方可达到最佳效果,中空杆体外注浆则需选用更大的注浆压力;中空杆体内、体外两种注浆方式分别适用于水平、向上布设锚杆时使用;改进后的注浆工艺可以及时封堵注浆口,保证了注浆密实度。

参考文献:

References:

- [1] 新华社. 中共中央 国务院印发《交通强国建设纲要》[EB/OL]. (2019-09-19)[2023-04-11]. http://www.gov.cn/zhengce/2019-09/19/content_5431432.htm. Xinhua News Agency. The CPC Central Committee and State Council issued *Outline of Building a Strong Transportation Country*[EB/OL]. (2019-09-19)[2023-04-11]. http://www.gov.cn/zhengce/2019-09/19/content_5431432.htm.
- [2] 张建均,荣春堂. 锦屏二级水电站涨壳式预应力中空注浆锚杆施工[J]. 水力发电,2008,34(9):43-45.

- ZHANG Jianjun, RONG Chuntang. Construction technique of expanding-shell pre-stressed hollow pouring anchorage rod of Jinping cascade-II hydropower station[J]. *Water Power*,2008,34(9):43-45.
- [3] 张全彪. 锦屏二级水电站机械涨壳式预应力中空注浆锚杆施工技术[J]. 水利水电技术,2008,39(11):46-48.
- ZHANG Quanbiao. Construction technology of mechanical shell expansion prestressed hollow grouting anchor rod in Jinping II hydropower station[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*,2008,39(11):46-48.
- [4] 卢小刚. 涨壳式预应力中空锚杆的研究与应用[J]. 铁道建筑技术,2009(11):96-98,121.
- LU Xiaogang. Study and application of the expanding-shell pre-stressed hollow anchor rod [J]. *Railway Construction Technology*,2009(11):96-98,121.
- [5] 冯 艺,石 钊,张照太,等. 涨壳式中空预应力锚杆在TBM法隧洞施工中的应用和改进[J]. 现代隧道技术,2011,48(1):160-164.
- FENG Yi,SHI Zhao,ZHANG Zhaotai,et al. Application and modification of swelling prestressed bolts in a TBM excavated tunnel [J]. *Modern Tunnelling Technology*,2011,48(1):160-164.
- [6] 杨瑞莲,刘 文. 大型地下洞室高边墙围岩固壁预应力锚固新技术研究[J]. 隧道建设,2010,30(4):439-445,464.
- YANG Ruilian,LIU Wen. Study on prestressed anchoring technology used in large-scale underground power plant [J]. *Tunnel Construction*,2010,30(4):439-445,464.
- [7] 吴大伟,吴爱军,苏华友. 大断面巷道中空预应力注浆锚杆的支护效果研究[J]. 中国安全生产科学技术,2015,11(8):90-95.
- WU Dawei,WU Aijun,SU Huayou. Study on support effect of hollow pre-stress grouting anchor in large section roadway [J]. *Journal of Safety Science and Technology*,2015,11(8):90-95.
- [8] 刘 江,王 军,徐腾辉. 涨壳式预应力中空锚杆在机械化开挖大断面隧道中的施工应用研究[J]. 隧道建设(中英文),2018,38(增2):324-329.
- LIU Jiang,WANG Jun,XU Tenghui. Research of swelling prestressed bolts using in mechanized excavation of large section tunnel [J]. *Tunnel Construction*,2018,38(S2):324-329.
- [9] 张喜涛,苏华友,吴爱军,等. 预应力中空注浆锚杆锚固机理与参数分析[J]. 中国安全生产科学技术,2015,11(9):31-37.

- ZHANG Xitao, SU Huayou, WU Aijun, et al. Analysis on anchoring mechanism and parameters of prestressed hollow grouting bolt[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(9): 31-37.
- [10] 陈琼, 庞琦, 隋学华, 等. 涨壳式中空锚杆抗冲击性能现场试验研究[J]. 价值工程, 2019, 38(34): 130-131.
- CHEN Qiong, PANG Qi, SUI Xuehua, et al. Field test study on impact resistance of shell-type hollow anchor[J]. Value Engineering, 2019, 38(34): 130-131.
- [11] 吴德兴, 汪波, 孙钧. 新型锚杆支护技术与工程实践[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2020.
- WU Dexing, WANG Bo, SUN Jun. New bolt support technology and engineering practice[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2020.
- [12] 汪波, 何川. 预应力中空注浆锚杆在苍岭隧道防岩爆设计中的应用[J]. 公路, 2011, 56(10): 206-210.
- WANG Bo, HE Chuan. Application of prestressed hollow grouting anchor in rock burst prevention design of cangling tunnel[J]. Highway, 2011, 56(10): 206-210.
- [13] 汪波, 喻炜, 刘锦超, 等. 交通/水工隧道中基于预应力锚固系统的及时主动支护理念及其技术实现[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 118-129.
- WANG Bo, YU Wei, LIU Jinchao, et al. Timely-active support theory and its application in transportation/hydraulic tunnels based on pre-stressed anchorage system[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(12): 118-129.
- [14] 朱珍德, 舒晓云, 陈卫忠, 等. 一种改进的中空注浆锚杆连接段螺纹参数优化分析[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2300-2310.
- ZHU Zhende, SHU Xiaoyun, CHEN Weizhong, et al. Optimization analysis on thread connection parameters of an improved hollow grouting bolt[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2300-2310.
- [15] 陈昌富, 朱世民, 高杰, 等. 考虑注浆压力影响锚-土界面剪切蠕变 Kriging 模型[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增1): 125-128.
- CHEN Changfu, ZHU Shimin, GAO Jie, et al. Kriging method-based creep model for anchor-soil interface considering grouting pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1): 125-128.
- [16] 陈昌富, 刘俊斌, 徐优林, 等. 锚-土界面剪切蠕变试验及其经验模型研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(10): 1762-1768.
- CHEN Changfu, LIU Junbin, XU Youlin, et al. Tests on shearing creep of anchor-soil interface and its empirical model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(10): 1762-1768.
- [17] 许万忠, 曹平, 彭振斌, 等. 考虑弱面注浆因素对加锚层理边坡抗剪性能影响的力学机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1475-1480.
- XU Wanzhong, CAO Ping, PENG Zhenbin, et al. Analysis of mechanical mechanism of shear characteristic of bolted layered slope considering grouting factor of weak plane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1475-1480.
- [18] 叶新宇, 彭锐, 马新岩, 等. 压密效应对新型压密注浆土钉的强化研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(9): 1649-1656, 1738.
- YE Xinyu, PENG Rui, MA Xinyan, et al. Enhancement of compaction grouting on a compaction-grouted soil nail in sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(9): 1649-1656, 1738.
- [19] 张广兴, 管林波. 压力注浆参数对土钉受力性状影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增2): 489-494.
- ZHANG Guangxing, GUAN Linbo. Experimental study on effect of pressure grouting parameters on bearing capacity behavior of soil nailings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 489-494.
- [20] HONG C Y, YIN J H, PEI H, et al. Experimental study on the pullout resistance of pressure-grouted soil nails in the field[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50: 693-704.
- [21] YIN J H, ZHOU W H. Influence of grouting pressure and overburden stress on the interface resistance of a soil nail[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(9): 1198-1208.
- [22] WANG Q, YE X Y, WANG S Y, et al. Experimental investigation of compaction grouted soil nails[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(12): 1728-1738.
- [23] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- CHEN Yumin, XU Dingping. FLAC/FLAC3D foundation and engineering example[M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2013.
- [24] 黄庆享. 公路隧道 TZL 预应力锚杆支护效果对比试验研究[J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20(4): 39-42.
- HUANG Qingxiang. The contrast bolting test on TZL pretension bolt in highway tunnel[J]. Journal of Xi'an Highway University, 2000, 20(4): 39-42.

- [25] 刘林胜,李 洋,李为腾,等. 地铁暗挖车站端锚锚杆预应力功效研究[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(增2):255-260.
- LIU Linsheng, LI Yang, LI Weiteng, et al. Prestress effect of end anchor bolt in mined metro station[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S2): 255-260.
- [26] 康红普,姜铁明,高富强. 预应力锚杆支护参数的设计[J]. 煤炭学报,2008,33(7):721-726.
- KANG Hongpu, JIANG Tieming, GAO Fuqiang. Design for pretensioned rock bolting parameters[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(7): 721-726.
- [27] 赵明华,刘峻龙,龙 照. 锚杆变形分析与临界锚固长度计算[J]. 建筑科学与工程学报,2008,25(3):17-21.
- ZHAO Minghua, LIU Junlong, LONG Zhao. Deformation analysis of bolt and calculation of critical anchorage length[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(3): 17-21.
- [28] 张建清,吴继敏,彭 冈,等. 基于声波无损检测的特殊锚杆质量影响因素[J]. 河海大学学报(自然科学版),2009,37(2):179-184.
- ZHANG Jianqing, WU Jimin, PENG Gang, et al. Factors in quality of special bolts based on sonic non-destructive detection[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2009, 37(2): 179-184.
- [29] 杨江华,朱国进. 声波反射法在锚杆锚固质量检测中的应用[J]. 云南大学学报(自然科学版),2017,39(增2):302-304.
- YANG Jianghua, ZHU Guojin. Application of acoustic reflection method in quality inspection of anchor bolt[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2017, 39(S2): 302-304.