

高楼山特长公路隧道主洞送风口顶隔板技术研究

成昭, 张建, 连鹏, 徐荣文, 王文

(甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 甘肃 兰州 730030)

摘要: 特长公路隧道主洞送风口采用混凝土顶隔板会导致施工进度缓慢且通风阻力增大, 针对这一弊端, 提出钢波纹板代替混凝土的新型顶隔板技术。通过理论分析, 从通风沿程阻力、结构力学性能等方面对新技术进行可行性分析。结果表明: 采用钢波纹板作为送风道顶隔板材料时, 其沿程阻力为混凝土顶隔板的60%左右; 新方案下钢波纹板、锚固吊杆及堵头钢板结构的受力结果均在材料安全限值范围以内, 新型结构安全稳定; 新型钢波纹板顶隔板方案不仅可以满足送风口通风的基本要求, 尤其结构采用装配化的施工工艺后, 有效克服了传统混凝土结构不节能、不便捷的短板, 并提升了施工速度, 缩短了建设工期。

关键词: 特长公路隧道; 送风口; 顶隔板; 钢波纹板

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)05-0348-05

Study on Top Partition Technology for Air Supply Outlet of Main Tunnel of Gaoloushan Extra-long Highway Tunnel

CHENG Zhao, ZHANG Jian, LIAN Peng, XU Rongwen, WANG Wen

(Gansu Transportation Planning, Survey and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730030, China)

Abstract: The use of concrete top partitions for the air supply outlet of the main tunnel of a super-long highway tunnel can lead to slowing the construction progress and increasing the ventilation resistance. To address this drawback, a new top partition technology using steel corrugated panels instead of concrete is proposed. Through the theoretical analysis, the feasibility analysis is conducted on the new technology from the aspects of ventilation resistance along the line, structural mechanical performance etc. The results show that when using the steel corrugated plates as the top partition material of the air supply duct, its resistance along the line is about 60% of that of the concrete top partition. The stress results of the steel corrugated plate, anchor suspension rod and plug steel plate structure under the new scheme are all within the material safety limit range, and the new structure is safe and stable. The new type of steel corrugated plate top partition scheme can not only meet the basic requirements of ventilation for air supply outlets, but also effectively overcome the shortcomings of not energy-saving and inconvenient after adopting the assembly construction technology, which improves the construction speed and shortens the construction period.

Keywords: extra-long highway tunnel; air supply outlet; top partition; steel corrugated plate

0 引言

“十四五”现代综合交通运输体系发展规划提出全面推进乡村振兴的要求, 补齐西部地区路网空白, 加快公路建设覆盖偏远山岭地区, 更好地服务当地经济建设。西部地区地形以山地、高原为主, 随着公路里程长度逐年增加, 特长公路隧道座数也越来越多, 往往成为项目建设的主要控制性工程。为保障

特长公路隧道运营期通风需要, 通过设置于隧道拱部的送风口与隧道主洞相连将新鲜空气送入洞内。

目前, 送风口顶隔板一般采用施工技术及设备相对成熟的钢筋混凝土结构。李爱玲^[1]提出通过改进模板台车有序施工衬砌结构与隔板部分; 徐志胜等^[2]采用数值模拟分析了顶隔板与二次衬砌通过植筋连接的可行性; 张焱^[3]对钢筋混凝土顶隔板抗火性能开展了模型试验研究。尽管混凝土顶隔板技术比较成熟, 但仍然存在施工工艺复杂、施工周期长、施工质量不易保证等问题。本文提出采用装配化的钢波纹板替代传统混凝土隔板的新型送风口顶隔板技术。

钢波纹板具有表面光滑、安装便捷、耐腐蚀、工厂化制造、运输方便等优点, 已在各类工程中得到了

收稿日期: 2024-02-26

基金项目: 甘肃省交通运输厅科技项目, 公路隧道波纹钢装配式支护结构关键技术研究与应用(2022-01)

作者简介: 成昭(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁与隧道工程设计工作。

广泛应用^[4-6]。但将钢波纹板应用于特长公路隧道顶隔板实际工程中的案例鲜有少见,陈小峰等^[7]以鹧鸪山隧道为依托工程,对钢波纹板在平导中隔墙中的应用进行了研究。本文依托高楼山特长公路隧道,论证了钢波纹板在隧道主洞送风口顶隔板中的应用,为特长公路隧道通风设计提供一定的参考价值。

1 工程概况

高楼山隧道工程是武九高速(武都—九寨沟)建设项目的关键控制性工程,右线长 12 180 m,左线长 12 272 m,采用三段式通风方案,设置两座斜井(见图 1)作为通风井。

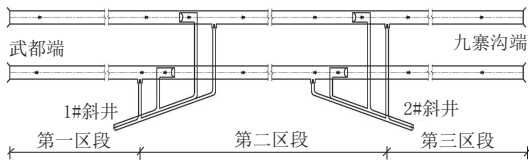


图 1 高楼山隧道通风平面布置图

根据《高楼山隧道送风口断面两阶段施工图设计》文件,送风口顶隔板为 30 cm 厚现浇 C30 钢筋混凝土,见图 2。

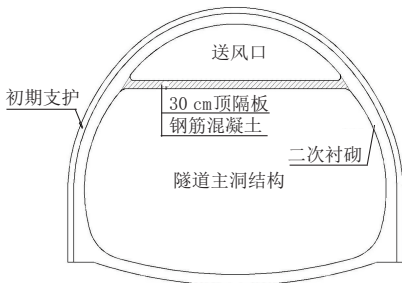


图 2 送风口钢筋混凝土顶隔板断面布置图

2 钢波纹板顶隔板技术

拟采用 3.5 mm 厚 Q355 钢波纹板代替钢筋混凝土作为送风口顶隔板,钢波纹板波形为 150 mm×50 mm(波长×波高),具体尺寸见图 3。

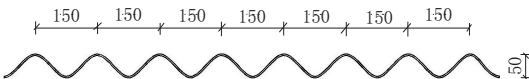


图 3 钢波纹板大样图(单位:mm)

为便于运输与施工,钢波纹板采用单元形式,每个单元板件沿隧道纵向长 120 cm,横向长度根据设置高度与二次衬砌内缘密贴。板件之间通过螺栓连接,采用 4 根 $\phi 22$ mm 锚杆与二次衬砌锚定,并设置 2 根 $\phi 22$ mm 钢筋吊杆。具体连接固定方式见图 4。

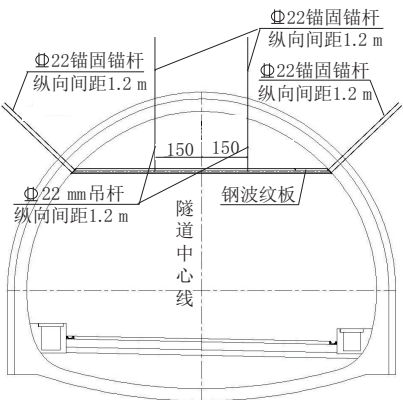


图 4 送风口钢波纹板顶隔板断面布置图(单位:cm)

3 可行性分析

结合新型钢波纹板顶隔板的布置形式,本文分别对送风口通风沿程阻力、钢波纹板及堵头板结构力学性能进行力学分析,并对其耐腐蚀性、密封性及耐火性进行研究。

3.1 送风口沿程阻力对比

本文所依托工程的两处斜井送风口处在主线直线段上,不考虑隧道平面曲率对通风阻力的影响,沿程阻力系数计算采用式(1)^[8]:

$$\lambda = \frac{1}{\left[1.1138 - 2 \lg \left(\frac{\Delta}{D}\right)\right]^2} \quad (1)$$

式中: Δ 为平均壁面粗糙度,mm,其中混凝土壁面取值 2.5 mm^[8],镀锌钢波纹板取值 0.15 mm^[9];D 为送风道断面当量直径,m,采用式(2)计算:

$$D = \frac{4A}{U} \quad (2)$$

式中:A 为送风道过流断面面积,m²;U 为送风道过流断面周长,m。其中混凝土顶隔板 A 为 12.00 m²,U 为 17.21 m;钢波纹板顶隔板 A 为 13.95 m²,U 为 18.72 m。

考虑钢波纹板作为顶隔板结构的材料时,送风道断面材料由二次衬砌混凝土壁面与钢波纹板隔板共同组成,对其平均壁面粗糙度采用加权平均值方法式(3)计算。

$$\Delta = \frac{\sum_{i=1}^n L_i \Delta_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (3)$$

式中: L_i 为各材料对应的长度,m; Δ_i 为各材料对应的平均壁面粗糙度。

在隧道工程中,风流的沿程阻力(摩阻力)采用式(4)^[8]计算:

$$h_f = \frac{\lambda L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \tag{4}$$

式中: h_f 为隧道通风的沿程阻力,Pa; ρ 为送风道空气密度^[8],kg/m³,取1.20 kg/m³; v 为送风道的风速,m/s; L 为送风口长度,m,本文依托工程送风口长度为20 m。

近期、远期两种方案的沿程阻力计算结果见表1。其中依托工程近期方案设计需风量为178.8 m³/s,远期方案设计需风量为357.6 m³/s;平均风速值为需风量与风道过流断面面积的比值。

表1 沿程阻力对比

	类别	平均风速值/ (m·s ⁻¹)	当量 直径/m	沿程阻 力系数	沿程 阻力/Pa
近期	钢波纹隔板	12.82	2.98	0.017	9.81
	混凝土隔板	14.90	2.79	0.019	16.39
远期	钢波纹隔板	25.64	2.98	0.017	39.25
	混凝土隔板	29.80	2.79	0.019	65.55

通过理论数值计算可知,采用钢波纹板作为送风道顶隔板时,其沿程阻力可降低40%左右。

3.2 钢波纹板力学性能分析

3.2.1 力学结构分析

本文选取一个安装区段纵向长度1.2 m的钢波纹板作为分析对象,将空间结构简化为二维平面杆件结构进行力学分析,波纹板力学参数见表2。其中竖向吊杆与钢波纹板连接处简化为竖向支撑约束,板件两端与衬砌结构连接处采用固结约束,顶隔板结构可简化为三跨连续结构,跨度布置为(277.5+300+277.5) cm,简化后的受力分析结构与约束反力见图5和图6。

表2 钢波纹板截面力学参数

1.2 m 节段钢波纹板横截面力学参数	
惯性矩 I/m^4	9.39×10^{-7}
截面面积 A/m^2	4.39×10^{-3}
弹性模量 E/GPa	206
剪切模量 G/GPa	79

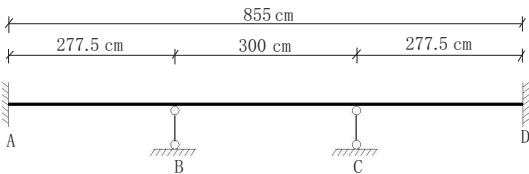


图5 钢波纹板结构简化图示

根据伯努利风压简化计算方程,其中风速取远期通风方案的钢波纹板结构的平均风速值25.64 m/s, $P = v^2/1\,600 = 25.64^2/1\,600 = 0.41\text{ kPa}$,可知作用在钢波纹板的最大平均风压值为0.41 kN/m²,结合标

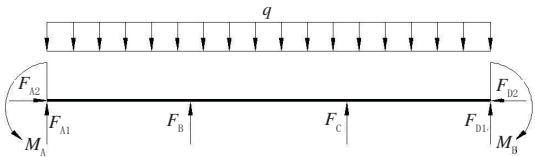


图6 钢波纹板力学简化图示

准^[8,10],人群荷载取值1.0 kN/m²,取恒荷载与人群荷载的作用效应组合对波纹板的承载力极限状态与正常使用极限状态进行设计计算。

3.2.2 结果分析

钢波纹板在正常使用极限状态下,通过对结构的力学分析得知,顶隔板最大位移见图7。顶隔板最大挠度位于中间一跨跨中处,数值为2.22 mm。结合标准^[8],顶隔板最大挠度限值为 $L_0/400=7.5\text{ mm}$,未超过限值。

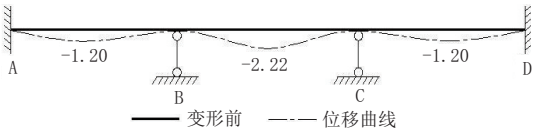


图7 顶隔板位移图示(单位:mm)

钢波纹板在承载力极限状态下,弯矩见图8、剪力见图9,可知钢波纹板截面最大弯矩为中支点处,其值为1.7 kN·m,最大剪力为3.5 kN。采用应力校核的方法,由材料力学应力计算式(5)和式(6)^[12]进行计算。各参数详见表3。

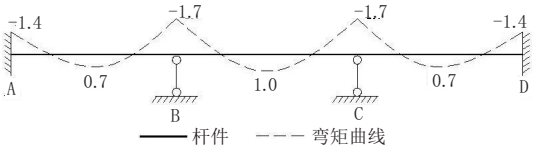


图8 顶隔板弯矩图示(单位:kN·m)

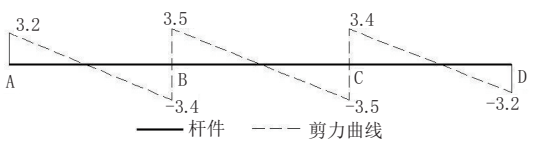


图9 顶隔板剪力图示(单位:kN)

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{I} \cdot y_{\max} \tag{5}$$

$$\tau_{\max} = \frac{F_{\max} \cdot S_z^*}{I \cdot b} \tag{6}$$

将表3参数代入式(5)、式(6),得到截面最大正

表3 钢波纹板力学参数

参数	数值
惯性矩 I/m^4	9.39×10^{-7}
最大弯矩 $M_{\max}/(\text{kN} \cdot \text{m})$	1.70
$y_{\max}/\text{cm}$	2.45
最大剪力 $F_{\max}/\text{kN}$	3.50
静矩 S_z^*/m^3	3.02×10^{-4}
腹板宽度 b/cm	9.70

表6 单根钢管力学计算结果

受力	设计值 max	容许值
截面正应力/MPa	105.4	215
截面剪应力/MPa	2.7	125
扰度/mm	16.8	18.8

选用 $\phi 89\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 钢管作为堵头板的承重构件,其挠度与应力均能满足标准^[14]规定的要求,且堵头板顶部与衬砌结构通过锚固锚杆紧固连接,进一步提高了堵头钢板结构的稳定性和安全可靠度。

3.4 其他性能分析

3.4.1 耐腐蚀性

送风口钢波纹顶隔板及附属金属构件采用热镀锌处理,镀层材料采用0号锌锭,单面附着量为 350 g/m^2 ,镀层局部最小厚度为 $55\text{ }\mu\text{m}$,镀层最小平均厚度为 $70\text{ }\mu\text{m}$ 。依据现行有关标准^[15]关于金属构件防腐性能的要求,本文所采用镀锌防腐措施符合标准规定。

3.4.2 密封性

本文中钢波纹板件与横向钢板、纵向钢板焊接连接,密封性能满足要求。其中横向钢板间、纵向连接钢板与二次衬砌间分别采用螺栓、锚杆连接,密封材料采用XB450型耐高温的石棉橡胶板。文献^[16]通过模拟试验证实石棉橡胶板密封效果良好,可满足连接件之间密封性能的要求。

3.4.3 耐火性

文献^[17]通过研究得出镀锌钢板在 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下高温烘烤下镀层未发生明显变化,本文中钢构件表面均采用采用0号锌锭镀层,镀层的单位面积质量不低于 350 g/m^2 ,镀层厚度不小于 $70\text{ }\mu\text{m}$,同时连接件接缝处采用防火漆进行封堵,进一步提高了整个结构的耐火性能安全储备。

4 结 语

本文以武九高速高楼山隧道送风口为例,基于传统钢筋混凝土隔板自重大、施工难度高、施工周期

长等弊端,提出了钢波纹板方案,并从通风沿程阻力、结构力学性能、耐腐蚀性、密封性及耐火性等主要性能方面进行了研究,得出以下主要结论。

(1)钢波纹板隔板、锚固吊杆及堵头钢板结构性能均满足规范要求,新型结构安全可靠。

(2)采用钢波纹板作为送风道顶隔板材料时,其沿程阻力较传统钢筋混凝土方案可减少40%左右。

(3)钢波纹板顶隔板方案较传统钢筋混凝土结构可有效提高施工速度、提升了地下工程装配化程度,具有较高的推广价值。

参考文献:

[1] 李爱玲. 特长公路隧道顶隔板施工技术及应用[J]. 铁道建筑技术, 2013(8): 88-91.

[2] 徐志胜, 黄益良, 李勇. 火灾下隧道顶隔板植筋胶的安全性研究[J]. 消防科学与技术, 2008(10): 763-765.

[3] 张焱. 特长公路隧道排烟道顶隔板结构抗火性能试验研究[D]. 长沙:中南大学, 2010.

[4] 李建旺. 铁路隧道拱顶波纹板加固专项施工技术分析[J]. 工程机械与维修, 2020(6): 72-73.

[5] 李国锋, 丁文其, 业海, 等. 隧道波纹钢装配式初期支护结构施工技术研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊1): 178-184.

[6] 付兵先. 隧道洞口波纹板防护结构的动态性能[J]. 铁道建筑, 2019, 59(5): 68-72.

[7] 陈小峰, 王兴平, 郭春, 等. 鸛鹑山特长公路隧道通风平导新型中隔墙技术可行性研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(5): 702-710.

[8] JTG/T D70/2-02—2014, 公路隧道通风设计细则[S].

[9] 龙开天, 赵建华, 郭春. 隧道平导中隔板结构及平导断面形式对通风效果的影响研究[J]. 隧道建设(中英文), 2023(4): 658-664.

[10] JTG/T D70—2010, 公路隧道设计细则[S].

[11] GB 55006—2021, 钢结构通用规范[S].

[12] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学(I) [M]. 北京:高等教育出版社, 2009.

[13] GB 50086—2015, 岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范[S].

[14] GB 50017—2017, 钢结构设计标准[S].

[15] JT/T 791—2010, 公路涵洞通道用波纹钢管(板)[S].

[16] 雷建斌. 石棉橡胶板蒸气密封性能试验研究[J]. 非金属矿, 1997(1): 65-67.

[17] 温乃盟, 任玉苓. 热镀55%Al-Zn钢板的耐热性能[J]. 机械工程材料, 2018, 42(5): 32-34; 39.