

文章编号:1671-8879(2015)04-0083-06

隧道通风井喷射混凝土壁面沿程 阻力系数测试

王亚琼^{1,2}, 张素磊³, 夏丰勇¹, 谢永利¹

(1. 长安大学 陕西省公路桥梁与隧道重点实验室, 陕西 西安 710064; 2. 弗吉尼亚理工大学
土木工程与环境工程系, 弗吉尼亚 黑堡 24061; 3. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要:壁面摩阻损失系数是公路隧道通风系统设计计算的重要参数,现场实测是获取壁面摩阻损失系数实际值的重要有效手段。以茅荆坝隧道通风斜井为实体工程,现场测试了隧址空气密度、隧道内温度、湿度、风速、静压等通风参数,并结合理论计算法得到了喷射混凝土衬砌的壁面摩阻损失系数,并与经验公式法得到的壁面摩阻损失系数进行了对比分析。研究表明:茅荆坝隧道通风斜井喷射混凝土衬砌段的壁面摩阻损失系数在测试工况条件下为 0.037,该值高于经验公式计算值和模筑混凝土衬砌的壁面沿程阻力系数,测试结果为该通风井采用喷射混凝土作为永久衬砌提供了重要基础参数。

关键词:隧道工程;通风斜井;阻力系数;现场测试

中图分类号:U453.5 **文献标志码:**A

Test on surface frictional resistant coefficient of ventilation shaft for tunnel

WANG Ya-qiong^{1,2}, ZHANG Su-lei³, XIA Feng-yong¹, XIE Yong-li¹

(1. Key Laboratory for Highway Bridge and Tunnel Engineering of Shaanxi, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Department of Civil and Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg 24061, Virginia, USA; 3. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract: Surface frictional resistant coefficient is one of the important parameters of highway tunnel ventilation system design and calculation. Field measurement is an important and effective means to obtain the actual value of surface frictional resistant coefficient. Maojing dam tunnel ventilation inclined shaft was selected as entity engineering for analysis. Ventilation parameters including the tunnel site air density, temperature, humidity, wind speed in tunnel, and the static pressure were tested on site, and surface frictional resistant coefficient of the shotcrete lining was got and compared with the coefficient resulting from empirical formula calculation methods. The results show that under the condition of test modes, surface frictional resistant coefficient of shotcrete lining of Maojing dam tunnel ventilation inclined shaft is 0.037. The value is higher

收稿日期:2015-03-27

基金项目:陕西省自然科学基金项目(2014JM7245);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013G1502027,2013G3214011)

作者简介:王亚琼(1975-),男,安徽太湖人,副教授,工学博士,E-mail:ys08@gl.chd.edu.cn。

than the calculation value of empirical formula and the surface frictional resistant coefficient of the form working concrete lining, which provides an important basic parameter for the ventilation shaft as permanent shotcrete lining. 3 tabs, 4 figs, 16 refs.

Key words: tunnel engineering; ventilation inclined shaft; resistant coefficient; site test

0 引言

喷射混凝土作为永久性衬砌结构在中国应用较少,欧洲用喷射混凝土作为永久性衬砌较多,世界最长的挪威莱尔多公路隧道是采用喷射混凝土作为隧道永久衬砌。喷射混凝土作为永久性衬砌除了受围岩条件限制外,通风摩擦阻力也是非常重要的影响因素。在通风系统设计阶段,通风竖井或斜井的壁面摩阻损失系数对隧道通风系统的配置影响很大,是通风系统设计的敏感参数^[1-2],通风井喷射混凝土壁面摩阻损失系数的大小关系到能否采用喷射混凝土作为永久衬砌支护的关键,与隧道建设成本密切相关。如何合理准确地确定壁面摩阻损失系数是采用通风竖井或斜井的通风系统设计计算的重要内容。由于现场实测的复杂性和容易对施工工期造成影响,目前针对喷射混凝土衬砌壁面摩阻损失系数的现场测试研究较少。鲜林等系统地介绍了煤矿巷道通风阻力测定方法、测点布置和测定路线选择^[3];黄俊升等通过对煤矿井下通风系统各测点实际测定数据的综合分析,为矿井的通风设计、通风系统优化改造、风压调节和矿井火灾治理提供可靠的基础资料^[4];王文才等采用基点气压计法测定矿井通风阻力,计算了矿井总风阻、自然风压、等积孔和矿井外部漏风率,对该煤矿通风系统在进风段、用风段和回风段的通风阻力分布及成因进行了分析^[5];蒋仲安等运用条件平差方法对通风阻力测量数据进行处理,通过理论公式计算得到测定结果,然后对矿井通风系统进行分析,找出了造成部分区段通风阻力过大的原因,并提出改进措施^[6];蒋雅君等通过对喷射混凝土基面实际表面形态的分析,将其表面粗糙度的影响因素分为表观粗糙度和细观粗糙度两大类,并建立相应的喷射混凝土基面简化表面形态模型,以期对喷射混凝土表面粗糙度评价更为合理^[7-8];仇玉良等对秦岭终南山特长公路隧道的主洞壁面摩阻损失系数进行了现场实测研究,但由于当时处于该隧道施工期,测试区段内存在风管和建筑材料堆积等影响因素,测试条件与正常运营条件不一致,获取的壁面摩阻损失系数与实际值难免存在

偏差^[9-11]。

上述通风阻力测试研究主要集中在煤矿井中,公路隧道通风阻力测试研究非常少,针对通风壁面摩阻损失系数的现场测试除文献^[9]外无资料可查;然而通风壁面摩阻损失系数对通风系统规模和造价是非常重要和敏感的参数,目前学者对喷射混凝土摩阻损失系数尚未形成统一认识。隧道通风井中风速高,隧道壁面产生摩擦阻力是消耗能量最大的部分,因此如何减小阻力是隧道通风研究的一个重要方面。基于此,本文以茅荆坝隧道通风斜井为依托,分析了喷射混凝土衬砌段的壁面摩阻损失系数测试原理和方法,采用理论计算法与经验计算法对得到的测试成果进行对比分析,得出喷射混凝土衬砌段的壁面摩阻损失系数值,为通风阻力计算提供了真实可靠的基础资料。

1 依托工程概况

茅荆坝隧道位于大庆—广州高速公路赤峰—茅荆坝段,全长 6 774 m,为双向分离式隧道,采用斜井送排式纵向通风系统。通风斜井总长 802.5 m,纵坡坡度为 13.59%,斜井底部设置 100 m 长缓坡(坡度 1%),并分离为送风通道和排风通道与主线相交。设计初期拟采用模筑衬砌作为永久性衬砌,施工后发现围岩条件好,为了降低建设成本和缩短工期,决定改用喷射混凝土衬砌结构作为永久支护。采用喷射混凝土衬砌结构作为通风斜井永久支护的最大制约问题是其壁面摩阻损失系数较模筑混凝土大,造成通风阻力增大,后期运营阶段的通风成本提高^[12]。目前,确定通风竖井或斜井壁面摩阻损失系数的方法主要有经验公式法、经验值法和现场试验法。模筑混凝土衬砌由于施工质量容易控制,表面粗糙程度相差不大,通过经验公式法或经验值法确定的壁面摩阻损失系数与实测值较为接近;然而,对喷射混凝土衬砌来说,由于各施工单位隧道工程施工技术水平的参差不齐,其施工质量(超欠挖质量、喷射混凝土质量)难以控制,喷射混凝土衬砌表面粗糙程度差异较大,单纯通过经验公式法或经验值法确定喷射混凝土衬砌壁面摩阻损失系数难免与实测

值产生偏差。因此,有必要采用现场实测与理论计算相结合的方法来确定喷射混凝土衬砌的壁面摩阻损失系数,为隧道通风斜井是否可以采用喷射混凝土衬砌结构作为永久支护提供计算依据。

2 现场测试方案

2.1 测试区段选择

本次测试时,利用钢尺在斜井进口段附近选取 100 m(K0+45~K1+145)范围作为测试区段,选取该 100 m 测试区段的两端断面(测试断面 1(K0+055)和测试断面 2(K0+155))进行相关参数的数据采集工作,测试区段布置如图 1 所示。

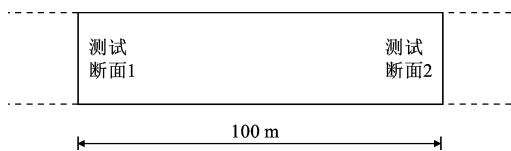


图 1 测试区段示意

Fig. 1 Test section

测试区段内支护为喷射混凝土支护,部分区域进行了表面抹平处理,施工期间超欠挖控制良好,测试期内没有施工车辆、机械、台架和大的土石方堆积,测试区段内隧道通风斜井断面尺寸基本一致。

2.2 测试方法与步骤

(1) 大气物理参数测试

用数显气压计测量测试断面 1、2 的大气压力;用通风干湿温度计测量测试断面 1、2 的空气温度与湿度,待数据稳定后,每 10 min 各测 1 次,共测 3 次,取其平均值。

(2) 风速测试

在进行壁面摩阻损失系数现场测试时,隧道的风速应满足一定条件。在有压管道中,通风壁面摩阻损失系数 α 与雷诺数 Re 及管壁的相对粗糙程度 Δ/d (Δ 为管壁的绝对粗糙度; d 为管道内径)有关。尼古拉兹等通过研究发现,不同雷诺数范围内,壁面摩阻损失系数 α 有着不同的变化规律,在雷诺数足够大时,壁面摩阻损失系数 α 仅取决于相对粗糙程度 Δ/d 。而对于隧道正常运营时的风速状况来说,雷诺数 Re 较大,此时空气处于紊流状态,壁面摩阻损失系数 α 与雷诺数 Re 无关。因此,在隧道内进行壁面摩阻损失系数 α 的测定,只要满足隧道内平均风速大于 1.0 m/s,测试结果即可保证与运营期的通风工况相一致。

本次风速测试采用 ZRQF 智能型数显风速仪

进行,测试精度 0.01 m/s。测量断面 1、2 的平均风速,将需测定的隧道断面划分成若干面积大致相等的小块(见图 2),再逐块在其中心测量各点的平均风速 v_1, v_2, \dots, v_n 。最后取各分块平均风速的平均值作为整个隧道断面的平均风速 v ,即

$$v = \frac{v_1 + v_2 + \dots + v_n}{N} \quad (1)$$

式中: N 为划分的等面积小块数。

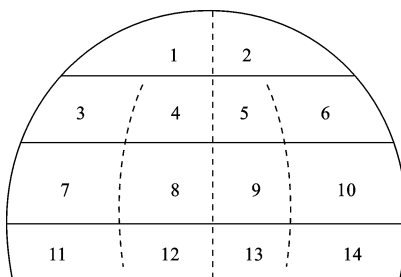


图 2 隧道断面测区划分示意

Fig. 2 Test area division of tunnel section

每个分块测点采集 20 次数据,取其平均值。现场的风速测试采用“侧面法”,即具体测试时,在测试断面 1、2 处分 2 组进行测试,每组分为测风员和记录员 2 人,测风员背向隧道壁站立,记录员与测风员在隧道纵向平行站立,2 组人员同步记录测试断面 1、2 同一位置测点的风速,现场测试情况见图 3。



图 3 现场测试

Fig. 3 Site test

采用侧面法进行测试时,由于测试人员与风表同在一个断面内,造成流经风表的流速增加,需要对风速进行修正,如果测得测试断面的平均风速为 v ,则可用式(2)修正平均风速^[13-15]

$$v' = \frac{v(S-0.4)}{S} \quad (2)$$

式中: v' 为修正后的隧道断面平均风速(m/s); S 为所测隧道断面的面积(m²)。

(3)静压测试

按图 2 所示的测试区块划分情况,在测试断面 1、2 对应测块位置布置测点,正对风流分别设置皮托管。在两测点间距测点不小于 10 m 处设置 1 台微压差计,应安设平稳,调零或记下初始读数。胶管要防止折叠和被水、污物等堵塞,待胶管内的空气温度等于隧道内的空气温度后,将 2 个胶管接在微压差计上,待微压差计稳定后读数,每个分块测点采集 20 次数据,取其平均值。设各测块中心测点的平均静压差为 h_1, h_2, \dots, h_n , 取各分块平均静压差的平均值作为整个隧道断面的平均静压差 h , 即

$$h=\frac{h_1+h_2+\cdots+h_n}{N}$$

(3)

3 测试结果处理与分析

3.1 测试数据处理

隧道壁面摩擦因数计算测试参数主要包括隧址区空气密度、气压、隧道过风断面风速。通过测试与计算分析来求取隧道壁面摩阻损失系数。

(1)空气密度

空气密度计算式为

$$\rho=3.484\times10^{-3}\frac{P_0-0.377\ 9\Psi P_{sh}}{273.15+t}$$

(4)

式中: ρ 为测试断面的空气密度(kg/m^3); P_0 为测试断面的大气压力(Pa); Ψ 为空气相对湿度(%); P_{sh} 为测试断面温度为 t 时,空气的绝对饱和和蒸汽压力(Pa),可通过查表获取; t 为测试断面的空气温度($^{\circ}\text{C}$)。

(2)平均风量

首先计算各测试断面的风量

$$q_v=Sv'$$

(5)

式中: q_v 为测试断面的风量(m^3/s)。

2 个监测断面的平均风量为

$$q_{\text{vep}}=\frac{q_{v1}+q_{v2}}{2}$$

(6)

式中: q_{vep} 为平均风量(m^3/s); q_{v1} 为断面 1 的平均风量(m^3/s); q_{v2} 为断面 2 的平均风量(m^3/s)。

(3)动压

动压计算式为

$$h_d=\frac{\rho v^2}{2}$$

(7)

式中: h_d 为测试断面处的动压(Pa)。

(4)通风阻力

两测试断面间的通风阻力为

$$h_r=h+(h_{d1}-h_{d2})$$

(8)

式中: h_r 为两测试断面间的通风阻力(Pa); h_{d1} 为测试断面 1 处的动压(Pa); h_{d2} 为测试断面 2 处的动压(Pa)。

(5) 壁面摩阻损失系数

隧道内沿程阻力系数为

$$\lambda=\frac{\Delta P_d+\Delta P_s}{v_r^2}\frac{D}{L}\frac{2}{\rho}$$

(9)

式中: λ 为隧道沿程阻力系数; ΔP_d 为两测试断面间的动压差(Pa); ΔP_s 为两测试断面间的静压差(Pa); L 为两测试断面间的距离(m); D 为两测试断面间的隧道当量直径(m); v_r 为测试区间的平均风速(m/s)。

3.2 测试结果分析

测试断面 1、2 中各有 14 个测区,各测区风速测试结果如下页图 4 所示。

从测试断面 1、2 各测区风速测试结果中可以看出,各测区的风速分布呈明显的紊流特征,紊流脉动现象明显,整体上满足隧道中心部分测区风速大,而靠近隧道周边测区风速相对较小的规律。

结合实测数据,参照相关公式,计算测试断面 1、2 的空气密度、平均风速、平均风量、动压、通风阻力、静压差等特征参数,测试及计算结果见表 1~表 3。

表 1 测试断面 1 处的特征参数

Tab. 1 Characteristic parameters of test section 1

参数	断面积 S_1/m^2	周长 U_1/m	空气密度 $\rho_1/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	平均风速 $v_1/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	风量 $q_{v1}/$ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	动压 h_{d1}/Pa
数值	46.71	25.61	1.016	1.43	66.80	1.04

表 2 测试断面 2 处的特征参数

Tab. 2 Characteristic parameters of test section 2

参数	断面积 S_2/m^2	周长 U_2/m	空气密度 $\rho_2/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	平均风速 $v_2/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	风量 $q_{v2}/$ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	动压 h_{d2}/Pa
数值	45.81	25.35	1.021	1.07	49.02	0.58

表 3 壁面摩阻损失系数计算

Tab. 3 Calculation for surface frictional resistant coefficient

参数	测试断面 平均面积 S_{cp}/m^2	测试断面 平均周长 U_{cp}/m	测试断面 面间距 L/m	测试断面平 均风量 $q_{\text{vep}}/$ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	测试断面 静压差 h/Pa	测试断面 通风阻力 h_r/Pa
数值	46.26	25.48	100	57.91	1.23	3.14

结合表 1~表 3 的相关测试数据,根据式(9)即可计算出该通风斜井测试区段的通风沿程阻力系数为 0.037。

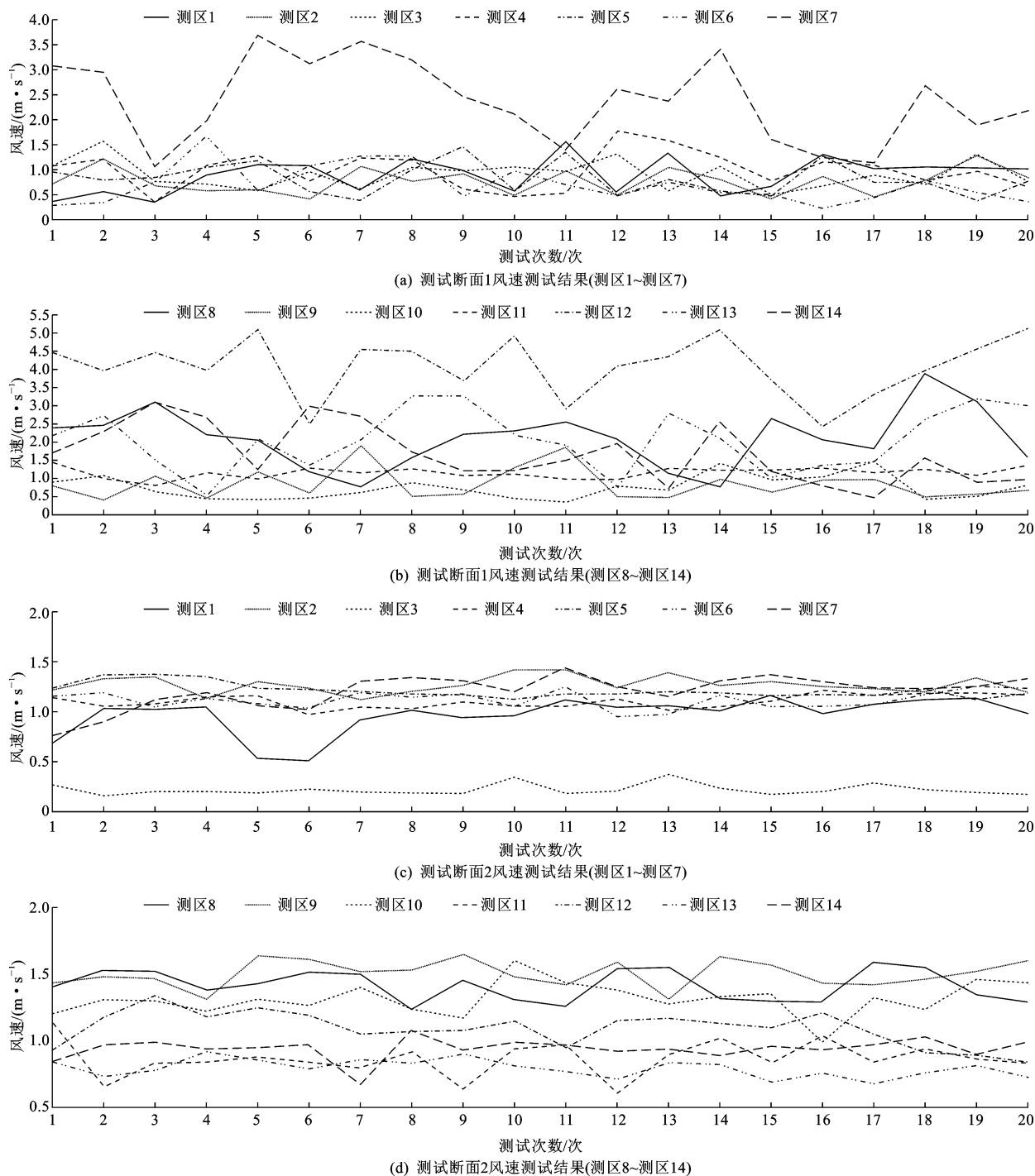


图 4 风速测试结果

Fig. 4 Wind speed test results

4 实测值与经验公式计算结果对比

目前,隧道壁面摩阻损失系数通常根据经验公式计算确定。正常运营期的隧道内雷诺数 Re 较大,空气处于紊流状态,壁面摩阻损失系数受雷诺数 Re 影响不大,可以忽略不计。而壁面摩阻损失系数仅与隧道衬砌表面粗糙度有关,其计算公式可参照《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ 026.1—1999)

推荐的公式计算^[16]

$$\lambda' = \frac{1}{[1.1138 - 2\lg(\Delta_d/D_d)]^2} \quad (10)$$

式中: λ' 为壁面摩阻损失系数的计算值; Δ_d 为隧道衬砌平均壁面粗糙度(mm); D_d 为隧道测试断面当量直径(mm)。

根据该隧道通风斜井喷射混凝土初期支护的检测数据计算可知,隧道喷射混凝土衬砌表面平均粗

糙度为 22 mm,测试断面隧道斜井的当量直径为 3 838 mm,壁面摩阻损失系数的计算值为 0.032,小于现场实测的喷射混凝土沿程阻力损失系数。

5 结 语

(1)通过现场实测及计算分析,得出茅荆坝隧道通风斜井的壁面摩阻损失系数测试值为 0.037。大于经验公式计算所得喷射混凝土摩阻损失系数 0.032。

(2)隧道通风计算中,模筑混凝土的壁面摩阻损失系数一般取值 0.025。喷射混凝土衬砌的壁面摩阻损失系数偏大,依托工程测试段在局部区域做了抹平处理,因此 0.037 是较为接近真实值的摩阻损失系数。

(3)喷射混凝土壁面摩阻损失系数是通风设计敏感参数,测试值为该通风井最终确定采用喷射混凝土作为永久衬砌提供了重要的基础参数。对不同断面型式、不同抹平效果的隧道壁面摩阻损失系数进行大量测试,并依据实测结果对现有经验公式进行修正是下一步研究的重点。

参考文献:

References:

- [1] 王晓雯. 摩阻损失对隧道通风影响的研究[J]. 公路交通技术, 2004(3): 87-91.
WANG Xiao-wen. Study on frictional loss for ventilation of highway tunnels[J]. Technology of Highway and Transport, 2004(3): 87-91. (in Chinese)
- [2] Xue W J, Wang D, Wang L B. A review and perspective about pavement monitoring [J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2012, 5(5): 295-302.
- [3] 鲜林, 高朋杰. 矿井通风阻力测定结果分析与对策措施[J]. 中国安全生产科学技术, 2010, 6(1): 100-103.
XIAN Lin, GAO Peng-jie. Analysis and countermeasures of measuring result for ventilation resistance in mine[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2010, 6(1): 100-103. (in Chinese)
- [4] 黄俊升, 李宗远, 韩永强. 矿井通风阻力测定数据的综合分析[J]. 中州煤炭, 2010(12): 82-84.
HUANG Jun-sheng, LI Zong-yuan, HAN Yong-qiang. Comprehensive analysis on ventilation resistance measurement data in coal mine[J]. Zhongzhou Coal, 2010(12): 82-84. (in Chinese)
- [5] 王文才, 王俊峰, 刘靖元, 等. 王晁煤矿通风系统阻力

测定及优化方案[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(2): 63-66.

WANG Wen-cai, WANG Jun-feng, LIU Jing-yuan, et al. Resistance measurement and optimized plan of ventilation system in Wangchao mine[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(2): 63-66. (in Chinese)

- [6] 蒋仲安, 宋洋洋, 丁伟, 等. 平煤八矿丁一风井通风阻力测定与结果分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(9): 11-16.

JIANG Zhong-an, SONG Yang-yang, DING Wei, et al. Resistance measure and analysis on dingyi ventilating shaft in Pingdingshan group 8th mine[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(9): 11-16. (in Chinese)

- [7] 蒋雅君, 陶双江. 隧道工程喷射混凝土衬砌基面粗糙度的面积扩大系数评定方法[J]. 铁道学报, 2010, 32(3): 95-99.

JIANG Ya-jun, TAO Shuang-jiang. Area-expanding coefficient evaluation method for roughness of shotcrete lining surfaces in tunnel engineering[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(3): 95-99. (in Chinese)

- [8] 程红强, 高丹盈, 张启明. 老混凝土表面粗糙度的一种简单测定法[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2006, 27(1): 24-26.

CHENG Hong-qiang, GAO Dan-ying, ZHANG Qi-ming. An easy method to measure the roughness of old concrete surface[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2006, 27(1): 24-26. (in Chinese)

- [9] 仇玉良, 李宁军, 谢永利. 喷射混凝土衬砌隧道通风阻力系数测试研究[J]. 中国公路学报, 2005, 18(1): 81-84.

QIU Yu-liang, LI Ning-jun, XIE Yong-li. Site test for ventilation resistance coefficient of shotcrete lining tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(1): 81-84. (in Chinese)

- [10] 葛少成, 刘雅俊, 贾宝山. 锚喷巷道通风阻力系数的计算式研究[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2000, 19(5): 466-469.

GE Shao-cheng, LIU Ya-jun, JIA Bao-shan. The research on calculating formula of coefficient of frictional resistance of bolting and shotcreting road ways[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2000, 19(5): 466-469. (in Chinese)

- [11] 长安大学. 秦岭终南山隧道运营通风研究报告[R]. 西安: 长安大学, 2003.