

DOI: 10.20174/j.juse.2026.02.33

壁面粗糙度对隧道施工期通风阻力系数影响

邓发义¹, 王国丰¹, 任开富¹, 张恒², 徐海岩³

(1. 贵州路桥集团有限公司, 贵阳 550001; 2. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031;
3. 四川农业大学 土木工程学院, 四川 都江堰 611830)

摘要:对隧道壁面沿程阻力系数的认识有助于优化隧道施工通风设计,提高通风方案的合理性。本研究探讨了隧道壁面粗糙单元高度、形状及间距等对沿程阻力系数的具体影响,通过模型试验及数值分析,探究了计算沿程阻力系数的经验公式结果与数值模拟结果的差异。研究表明:隧道壁面粗糙单元高度越高,对沿程阻力系数影响趋势逐渐减小;隧道壁面粗糙单元形状对沿程阻力系数影响较大,半球形粗糙单元对应的沿程阻力系数最小;比较沿程阻力系数经验公式计算结果与数值模拟结果,两者的差距较为稳定,与粗糙单元高度有关;对经验公式提出修正系数 α ,得到 α 与壁面平均粗糙高度 Δ 的对应关系为 $\alpha=1.29+0.0248\Delta$ 。

关键词:隧道通风;壁面粗糙;沿程阻力系数;数值模拟;修正系数

中图分类号:U455

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2026)02-0714-10

The Influence of Wall Roughness on the Ventilation Resistance Coefficient during Tunnel Construction Period

Deng Fayi¹, Wang Guofeng¹, Ren Kaifu¹, Zhang Heng², Xu Haiyan³

(1. Guizhou Road and Bridge Group Co., Ltd., Guiyang 550001, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China; 3. School of Civil Engineering, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan, Sichuan 611830, P. R. China)

Abstract: Understanding the resistance coefficient along the tunnel wall is helpful to optimize the ventilation design of tunnel construction and improve the rationality of ventilation scheme. The influence of the height, shape and spacing of rough elements on the resistance coefficient along the tunnel wall is studied. Through the model test and the numerical model, the difference between the empirical formula and the numerical simulation results was explored. The results show that: With the higher height of the rough element on the tunnel wall, the influence on the resistance coefficient along the tunnel wall is less. The shape of rough elements on the tunnel wall has a great influence on the resistance coefficient along the tunnel, and the semi-spherical rough elements have the smallest resistance coefficient along the way. Comparing the calculated results of empirical formula with the numerical simulation results, the difference between them is relatively stable, which is related to the height of rough elements. The correction coefficient α is proposed for the empirical formula, and the corresponding relationship between α and the average roughness height Δ of the wall is $\alpha=1.29+0.0248\Delta$.

Keywords: tunnel ventilation; rough wall; resistance coefficient along the way; numerical simulation; correction coefficient

收稿日期:2025-06-25(修改稿)

作者简介:邓发义(1986—),男,贵州安顺人,高级工程师,主要从事土木工程施工与管理方向的研究。

E-mail:3550476317@qq.com

通讯作者:张恒(1985—),男,贵州铜仁人,博士,副教授,主要从事隧道及地下工程方向的研究。

E-mail:tunnelzh@swjtu.edu.cn

基金项目:贵州省交通运输厅科技项目(2022-122-025);国家自然科学基金(51508477)

0 引言

随着我国交通网络的快速发展,长隧道通风系统的设计要求发生了重大变化。在隧道施工中,有害气体和粉尘的产生难以避免,这些物质会直接危害施工人员的健康,因此通风设计显得尤为关键^[1-3]。阻力系数是该设计的一个关键参数,影响空气需求的评估,而空气需求与隧道壁面的沿程阻力系数^[4]精度直接影响施工通风需风量计算的准确性,进而关系到通风设备的合理选型与运行能耗的控制,有助于实现隧道施工通风的经济性与高效性。因此,合理确定隧道壁面的沿程阻力系数,是一个具有重要意义的研究课题。

大多数现有的隧道粗糙度估算方法与尼古拉斯试验得出的经验公式有关。然而,通常有两个问题。首先,施工中不均匀隧道壁的粗糙度难以确定,导致计算偏差^[5]。其次,尼古拉斯试验的实验装置简单且与现场条件不同,当涉及隧道工程时需要进一步修改。准确的洞壁阻力系数值有利于确定通风设备和能耗,保证经济高效的通风,因此本研究具有广阔的应用前景。

已有研究表明,沿程阻力系数在管道和隧道中都是影响流体的运动的重要参数^[6]。徐鹏辉等^[7]利用相似理论建立了隧道排烟阻力试验模型,介绍隧道排烟模型试验系统的组成及沿程阻力系数的试验测定方法,利用 Colebrook 公式验证了该试验方法的正确性,分析排烟道壁面绝对粗糙度和漏风对沿程阻力系数测定的影响。张恒^[8]采用数值计算方法对隧道壁面粗糙度对通风效果的影响研究,通过建立典型粗糙壁面模型对粗糙单元形状、粗糙单元高度、粗糙单元间距以及同一粗糙条件下断面直径对流体流通的影响进行了深入分析,定义了壁面平均粗糙高度,提出了壁面粗糙常数的取值计算方法。Zhang 等^[9]为了提供充足的新鲜空气、将环境温度和湿度降低到可接受的水平以及控制有害气体和灰尘的传播,为保障隧道空间的安全与舒适,本研究采用模型试验与数值模拟相结合的方式,分析了粗糙单元的高度、形状及间距对隧道壁面阻力系数的影响。Lim^[10]通过在大气边界层风洞中设置不同粗糙度的表面,测量其近壁流动与压力分布。结果表明,面积密度增大,屋顶表面压力随之升高。王亚琼等^[11]以茅荆坝隧道通风斜井为实体工程,通过现场实测隧址空气密度及隧道内的温度、湿度、风速与静压等通风参数,基于理论计算获得了喷射混凝土衬砌的壁面摩阻损失系数,并与

经验公式法的计算结果进行了对比分析。

Wang 等^[12]针对隧道横向通风系统,深入探究了气流经风道阻尼器排出时形成的局部阻力系数,通过三维与二维数值模拟结果的交叉验证,结合伯努利方程开展理论推导,构建起局部阻力系数与压力损失之间的对应关系。高峰等^[13]以重庆解放碑地下环道三期工程中嘉滨路连接隧道的通风项目为实际工程背景,运用 CFD 数值模拟技术,对不同平面曲线半径及纵坡率条件下的隧道流场特性进行仿真分析,优化了适用于半径范围 30~200 m 的城市超小半径隧道沿程阻力系数计算表达式。吴斌等^[14]依托跑马山 1 号隧道实际工程案例,采用三维数值模拟方法,系统分析了不同曲率半径、不同反向次数的蛇形曲线隧道内风流分布规律及沿程阻力特性,明确了该类隧道的风流运动特征,掌握了其沿程阻力系数的变化规律及相应计算方法。

本文提出了一种更加准确的隧道通风阻力系数计算方法。首先,进行隧道通风模型试验,并在此基础上验证数值参数;然后,通过改变验证数值模型中粗糙元的高度、形状和间距,得到不同粗糙元对应的阻力系数;最后,利用现场试验获得的阻力系数进一步验证了结论。在上述大量数据的基础上,对现有的经验公式提出了修正系数 α ,并确定了 α 与隧道壁平均粗糙高度之间的关系,可在实际工程中改进通风系统。

1 模型试验平台

为使隧道模型内的流场与温度场特性贴合实际工程情况,首先作出如下假设:①将空气视为不可压缩流体;②假定风流属于连续介质;③空气流动过程遵循能量守恒定律。

模型试验需满足与原型在尺寸、速度、力等维度的相似性要求。试验中需优先保证几何相似,在此基础上实现运动相似与动力相似。鉴于实际场景中难以满足全部相似准则,试验设计仅聚焦于起主导作用的准则。其中,欧拉准则对应压力相似条件,当原型与模型流态保持一致时,该准则可自然成立;对于管道内受迫流动的不可压缩流体,重力作用远弱于压力作用,因此可忽略弗劳德准则的影响。本次模型试验采用铝合金板制作隧道模型,隧道模型长度为 25 m,断面高度为 0.67 m,宽度为 1.03 m,断面面积为 0.59 m²,当量直径为 0.79 m,缩尺比例为 1:10,原型与模型主体尺寸比较如图 1 所示。隧道模型采用高度为 0.6 m 的角钢支架进行支撑固定。为确保试验期间无漏风现象发生,铝

合金板的拼接缝隙处及与底板的衔接位置,均采用 铝箔胶带粘贴密封处理,如图 1 所示。

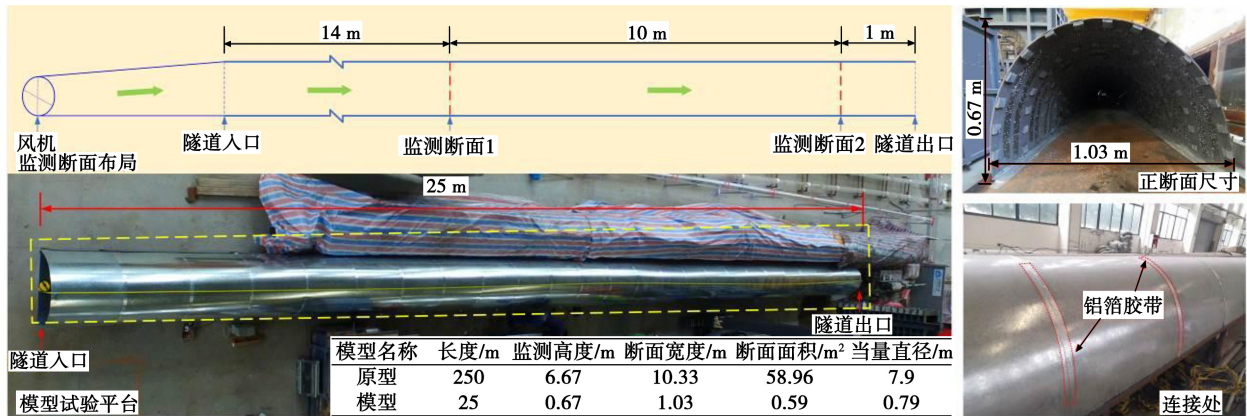


图 1 模型试验平台及监测断面的布局

Fig. 1 Layout of model test platform and monitoring section

除了隧道模型外,在隧道入口处还安装了一个送风装置(长 1.5 m),为隧道模型提供恒定的空气流量。风扇是气流的来源。通过调节变频器(1~50 Hz)控制风机的输出转速,实现不同的试验风速。隧道模型中有两个监测段,两个监测段之间的距离为 10 m。为了使气流在进入监测段之前尽可能稳定,监测段 1 距离隧道入口 14 m,监测段 2 距离隧道出口 1 m。为了准确采集测试数据,在每个监测断面上设置了 5 个监测点。监测断面布局如图 1 所示,监测点布局如图 2 所示。

器输出到计算机进行实时显示。测量仪器如表 1 示,测试系统如图 2 所示。

试验中,方形底座和不同高度的矩形橡胶块被用作粗糙元件(表 2)。分别设置了 5 mm、10 mm、15 mm 和 20 mm 4 种不同高度的粗糙元素。粗糙元的截面尺寸为 4 cm × 4 cm,周向间距为 8 cm,纵向间距为 20 cm,相邻环的粗糙元交错设置。

表 1 测量仪器

Table 1 Measuring instruments

仪器名称	规格	数量	测量内容
热膜式风速传感器	杆长 50 cm, 量程 0~5 m·s ⁻¹ , 精度 3%	2	风速
微压差变送器	量程 -50 Pa~50 Pa, 精度 0.5%	2	风压
皮托管	杆长 50 cm, 直径 6 mm, 皮托管系数 0.99	2	风压
数据接口转换器	RS485 转 RS232	1	转换数据

表 2 试验工况

Table 2 Test conditions

工况	粗糙单元宽度/cm	环向间距/cm	纵向间距/cm	粗糙单元高度/mm
1				5
2	4	8	20	10
3				15
4				20

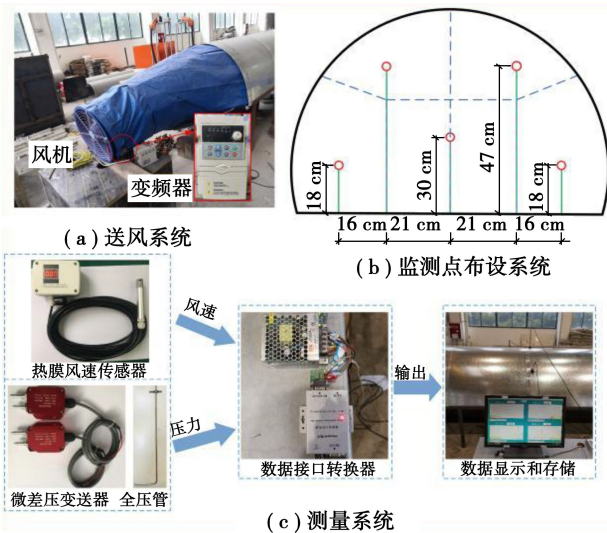


图 2 模型试验平台所需系统及测量仪器

Fig. 2 Systems and measuring instruments required for the model test platform

模型试验的测试内容为监测断面的平均压力和平均风速。微差压变送器和皮托管用于采集气流总压,得到截面平均压力。热膜风速传感器用于测量监测点的风速。测试数据通过数据接口转换

为了便于胶块的粘贴,将胶块紧密粘贴在厚 5 mm 的垫层上,然后将垫层铺设在隧道模型的壁上。同时,为了使隧道模型的壁更接近真实情况,

在垫层表面随机铺上粒径为 2 mm 的细砂。隧道

模型壁上粗糙度元素的布局如图 3 所示。

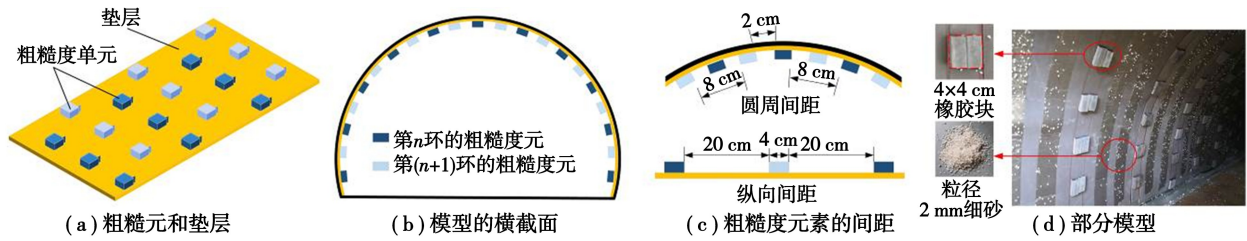


图 3 粗糙单元布设

Fig. 3 The arrangement of rough elements

2 模型试验结果

2.1 数据处理理论基础

该模型试验基于流体力学基本理论。

2.1.1 连续性方程

根据质量守恒定律流入与流出断面的流体质量相等。假设流体不可压缩,则连续性方程为:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (1)$$

式中: A 为过流断面面积, m^2 ; v 为过流断面平均流速, m/s 。

2.1.2 能量方程

从功能原理出发,推证的不可压缩恒定流能量方程为:

$$p_1 + \rho g Z_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \rho g Z_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} + h_a \quad (2)$$

式中: p_1, p_2 为断面静压, Pa ; Z 为选定基准面的高度, m ; h_a 为两端面间的能量损失, Pa 。

模型隧道在纵向上断面面积不变,断面平均风速不变,模型隧道置于同一高度上,得到两断面能量损失为:

$$h_a = (p_1 - p_2) + \rho \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} \quad (3)$$

等式右边的第一部分为静压差,记为 $\Delta p_{静}$;第二部分为动压差,记为 $\Delta p_{动}$ 。因此,在试验过程中测量两监测段面的压力及速度得到两端面间的能量损失。

2.1.3 阻力系数公式

隧道内沿程阻力系数测试计算公式:

$$\lambda = \frac{\Delta p_{静} + \Delta p_{动}}{v^2} \cdot \frac{D}{L} \cdot \frac{2}{\rho} \quad (4)$$

式中: $\Delta p_{静}, \Delta p_{动}$ 分别为两测试断面间的动压差和静压差, Pa ; v 为隧道内平均风速, m/s ; L 为两测试断面间的距离; D 为隧道当量直径,为 $0.79 m$; ρ 为隧道空气密度,取 $1.125 kg/m^3$ 。

2.2 试验结果

在不同进口风速、温度 $20^\circ C$ 、大气压 $96.7 kPa$

工况进行了 4 组沿程阻力系数的试验,对试验数据进行整理后得到 4 种粗糙高度单元下两个断面的大气压差、风速以及计算得到的沿程阻力系数如表 3 所示。

表 3 模型试验数据

Table 3 Model test data

单元高度/cm	大气压差/ Pa	入口风速/($m \cdot s^{-1}$)	出口风速/($m \cdot s^{-1}$)	沿程阻力系数 λ
0.095	0.095 2	0.43	0.42	0.069 108 1
	0.169 4	0.70	0.68	0.046 653 6
	0.258 9	0.95	0.91	0.039 249 6
	0.364 1	1.25	1.20	0.031 814 0
0.5	0.464 5	1.48	1.39	0.029 576 8
	0.100 6	0.43	0.42	0.073 028 1
	0.194 8	0.69	0.66	0.056 059 7
	0.296 8	0.90	0.87	0.049 687 5
1	0.418 2	1.23	1.14	0.039 049 6
	0.526 4	1.45	1.31	0.036 243 3
	0.109 4	0.43	0.41	0.081 318 3
	0.234 8	0.69	0.65	0.068 583 3
1.5	0.311 2	0.90	0.85	0.053 295 8
	0.504 3	1.23	1.13	0.047 489 2
	0.675 5	1.43	1.35	0.045 842 2
	0.113 8	0.42	0.4	0.088 765 5
2	0.243 6	0.67	0.61	0.077 980 7
	0.373 1	0.87	0.85	0.066 145 2
	0.581 4	1.18	1.10	0.058 659 0
	0.772 9	1.42	1.29	0.055 196 9

表 3 中,4 组数据的趋势基本一致:在粗糙元高度相同的情况下,两个截面的气压差随着气流速度的增加而增加。在相同的入口风速下,监测断面

的平均风速随着粗糙高度的增加而减小。如图 4 所示,阻力系数曲线以 $\lg Re$ 为横坐标绘制。

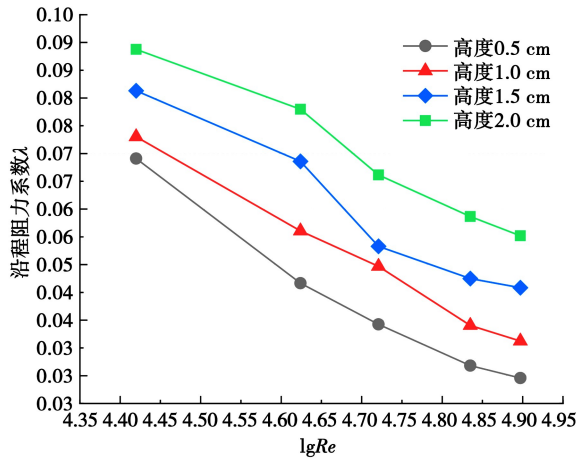


图 4 矩形粗糙单元模型沿程阻力系数试验结果

Fig. 4 Test results of resistance coefficient along rectangular rough element model

在相同雷诺数下,阻力系数随着粗糙元高度的增加而增加。对于同一高度,随着风速的增大,系数呈现减小趋势,但这种减小的速率逐渐放缓。模型试验结果与尼古拉斯试验结果基本一致。在低风速工况下,雷诺数处于较低水平,此时气流会发生层流向湍流的转变,流动阻力由粘性阻力与惯性力共同构成。阻力系数受雷诺数及壁面粗糙度的双重影响,因此其数值随雷诺数和壁面粗糙高度的变化较为显著。随着入口风速的提升,雷诺数同步增大,此时流动阻力主要由惯性力主导,阻力系数会缓慢下降,最终趋于稳定不变。

依据阻力系数的变化特性,尼古拉斯试验曲线可划分为 5 个区域(如图 5),分别为层流区、过渡区、湍流平滑区、湍流过渡区及湍流粗糙区。随着流体速度和雷诺数的增加,流体进入湍流粗糙区,阻力系数只与粗糙高度有关。在本次模型试验中,当入口速度为 1.5 m/s 时,雷诺数($Re = 0.75 \times 10^5$, $\lg Re = 4.90$)足够大,表明气流已进入湍流粗糙区,对应的阻力系数即为隧道模型的沿程阻力系数。当入口风速为 1.5 m/s 时,实测阻力系数见表 4。

表 4 隧道模型试验对应沿程阻力系数

Table 4 Resistance coefficients along the tunnel model tests

单元高度/cm	0.5	1.0	1.5	2.0
沿程阻力系数	0.029 58	0.036 24	0.045 84	0.055 20

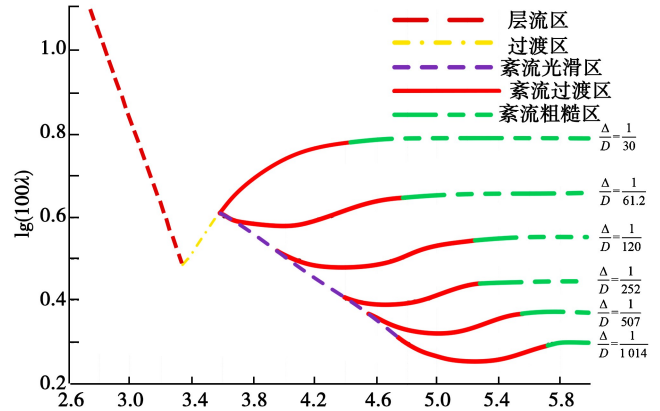


图 5 尼古拉兹曲线图

Fig. 5 Nicholas curves

3 数值模拟

为了进一步研究,根据模型试验的几何尺寸和矩形粗糙元的布局,构建了 4 组含不同高度粗糙元(0.5 cm、1.0 cm、1.5 cm、2.0 cm)的三维数值模型。数值模拟过程中,共设置 11 组不同进口风速,形成 44 种试验工况,采用 ANSYS FLUENT 软件完成计算,隧道模型示意如图 6 所示。该数值模型选用标准 $k-\epsilon$ 方程,对应的边界条件:(1)入口:采用速度入口边界,空气沿隧道轴向流动;(2)出口:采用外流边界条件;(3)墙体:隧道所有墙体均定义为绝热防滑边界。

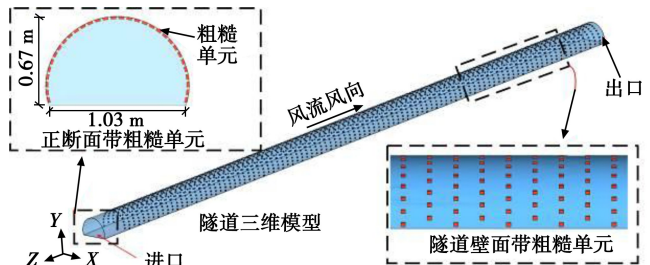


图 6 矩形粗糙单元三维模型

Fig. 6 3D model of rectangular rough element

如图 7 所示的数值模拟结果与模型试验和 Nicholas 试验的结果基本一致。当入口风速一定时,粗糙元的高度越高,阻力系数越大。当粗糙元高度一定时,阻力系数随着入口风速的增大而迅速减小,然后随着入口风速的进一步增大而缓慢减小。与模型试验相比,数值模拟研究了更多更大的进口风速。从阻力系数曲线的发展趋势可以看出,由阻力系数曲线的变化趋势可见,若进一步提高进口风速,该曲线将逐渐趋于平缓。这一现象表明气流雷诺数达到足够大时,沿程阻力系数不再受雷诺数影响,仅受粗糙元高度影响。入口风速为 1.5 m/s

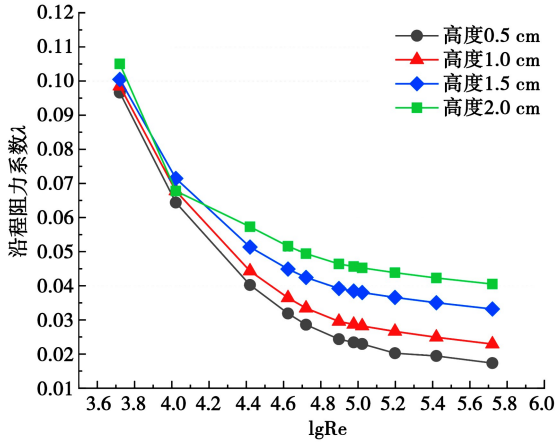


图 7 矩形粗糙单元模型沿程阻力系数数值模拟结果

Fig. 7 Numerical simulation results of resistance coefficient along rectangular rough element model

($\lg Re = 4.90$)时,得到的阻力系数数据见表 5。

表 5 隧道模型数值模拟对应沿程阻力系数

Table 5 Corresponding resistance coefficient along the tunnel model numerical simulation

单元高度/cm	0.5	1.0	1.5	2.0
沿程阻力系数	0.024 36	0.029 54	0.039 21	0.046 39

3.1 模型试验和数值模拟结果对比

通过对模型试验和数值模拟结果的分析可以得出结论:当入口速度为 1.5 m/s ($\lg Re = 4.90$)时,气流已经进入湍流粗糙区,随着雷诺数的增加,沿程阻力系数的变化很小。可以认为此时的阻力系数就是隧道的途中阻力系数。为了比较模型试验和数值模拟之间的差异,并突出两种方法之间的关系,有必要对两种方法的结果进行比较分析。这里以粗糙高度为 1.0 cm 的模型试验和数值模拟结果为例进行对比,绘制阻力系数变化趋势对比曲线,如图 8 所示。其他粗糙高度条件下阻力系数的变化趋势与之相似。

模型试验结果与数值模拟结果存在一定偏差,数值模拟阻力系数小于模型试验阻力系数。当雷诺数较小时,两者结果偏差较大,随着雷诺数的增大,偏差明显减小。但区别总是存在的,产生偏差的原因如下:(1)数值模拟方法基于一定的假设,模拟过程较为理想。(2)隧道模型可能存在局部漏风,接缝不平整,测量仪器的布置可能影响空气流动。(3)除了粗糙单元外,粒径为 2 mm 的细砂随机散布在隧道上部模型的壁和底部,这在一定程度上增加了隧道壁的粗糙度。

由于隧道内气流进入湍流粗糙区后阻力系数变化不大,因此认为两者结果偏差基本稳定。当入

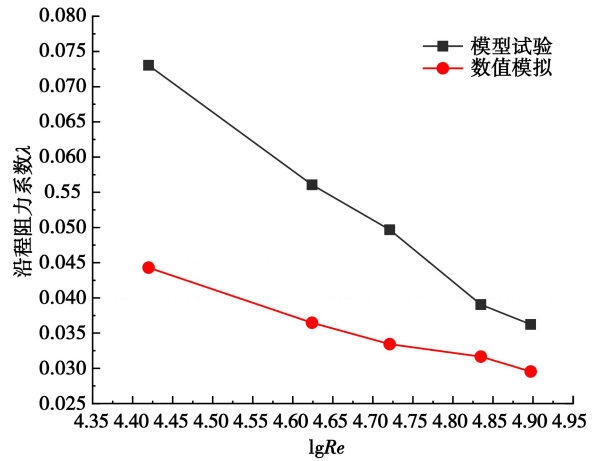


图 8 高度 1.0 cm 的模型试验与数值模拟结果对比

Fig. 8 Comparison of model test and numerical simulation results with height of 1.0 cm

口风速为 1.5 m/s 时,计算不同粗糙高度下两种方法的偏差,如表 6 所示。

表 6 模型试验与数值模拟结果的偏差统计

Table 6 Deviation statistics of model test and numerical simulation results

$\lg Re$	模型试验与数值模拟结果的偏差统计/%				
	0.5 cm	1.0 cm	1.5 cm	2.0 cm	平均误差
4.9	17.3	18.4	14.3	15.8	16.5

在不同的粗糙高度条件下,模型试验和数值模拟获得的阻力系数偏差相接近,最大偏差为 18.4%,最小偏差为 14.3%,平均偏差为 16.5%,这表明两种方法在本研究中具有较高的一致性,数值模拟方法可用于研究模型试验难以实现的复杂情况。

3.2 利用数值模拟分析阻力系数的影响因素

3.2.1 粗糙单元的形状

在实际隧道施工过程中,隧道壁面超欠挖的形状存在多样性,不同的粗糙形状对隧道沿程阻力系数的影响也会不同。为探究壁面粗糙形状对沿程阻力系数的影响,按模型试验的隧道尺寸建立隧道三维模型,并根据模型试验布置粗糙单元的方式,分别建立高度 2 cm 的矩形、半球形、圆锥形 3 种壁面粗糙单元(粗糙单元形状大小与前文一致),半球形和圆锥形壁面如图 9 所示。

结合等式(4)分析可知,图 10 呈现的结果与模型试验所得趋势保持一致。当 $\lg Re = 4.90$ 时,其前后阻力系数变化特征存在差异:此前,阻力系数随雷诺数增大呈显著下降趋势;此后,阻力系数变化幅度大幅减小,可视为基本保持稳定。在 $\lg Re = 4.90$ 的工况下,存在矩形 0.045 2、半球形 0.025 6、

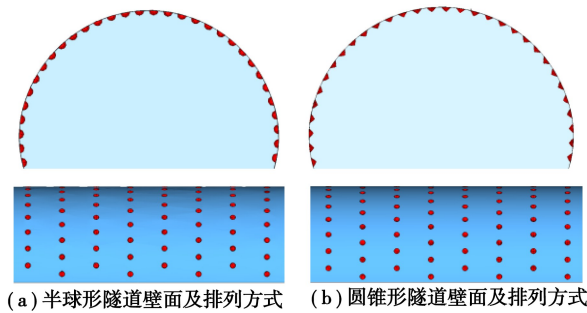


图 9 半球形和圆锥形模型壁面

Fig. 9 Wall surface of hemispherical and conical models

圆锥形 0.027 5 这 3 种不同形状粗糙元阻力系数。其中,粗糙元阻力系数最大的为矩形,较为接近的为半球形与圆锥形,粗糙元的形状对阻力系数的影响从大到小依次为矩形、锥形、半球形。结合图 7 数据进一步分析发现,当矩形粗糙元高度从 2.0 cm 降至 1.0 cm 时,隧道沿程阻力系数下降 36.3%;而将矩形粗糙元替换为半球形时,阻力系数下降幅度达 43.4%。由此可见,相较于粗糙元高度,其形状对阻力系数的影响更为显著。

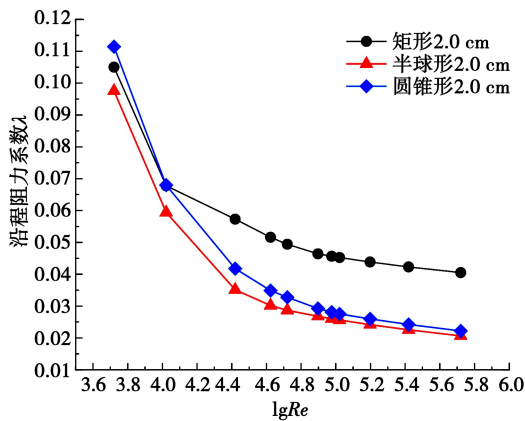


图 10 不同形状粗糙单元模型沿程阻力系数

Fig. 10 Resistance coefficients along the rough element model with different shapes

3.2.2 粗糙单元间距

在单元间距的数值研究中,以矩形粗糙单元为研究对象。矩形粗糙单元的高度分别为 0.5 cm、1.0 cm、1.5 cm、2.0 cm,粗糙单元间距分别为 5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、25 cm、30 cm、35 cm、40 cm、45 cm、50 cm,此外,入口风速设定为 1.5 m/s。部分数值模型如图 11 所示。

根据公式(4)和两段(14 m 和 24 m)的压差和风速模拟结果,计算阻力系数,如图 12 所示,粗糙元间距增大,隧道沿程阻力系数呈下降趋势,且间距对阻力系数的影响程度随间距递增逐渐弱化。当粗糙元间距小于 15 cm 时,阻力系数随间距增大呈明

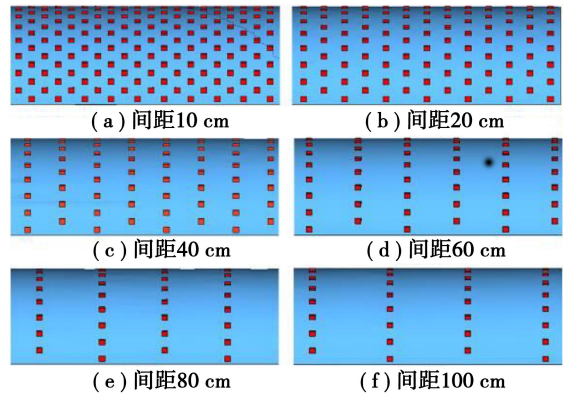


图 11 不同间距的粗糙单元隧道模型

显下降趋势,间距每增加 5 cm,阻力系数相应减小 0.004~0.006;间距处于 15~40 cm 区间时,每增大 5 cm,阻力系数减小幅度降至 0.001~0.003;当间距为 40~50 cm 时,间距每增加 5 cm,阻力系数的减小量已低于 0.001。这一规律的本质的是,粗糙元对气流的阻挡作用随高度降低而减弱,且间距扩大使粗糙元分布更稀疏,进一步削弱了对气流的阻碍,最终导致阻力系数变化趋缓并趋于稳定。

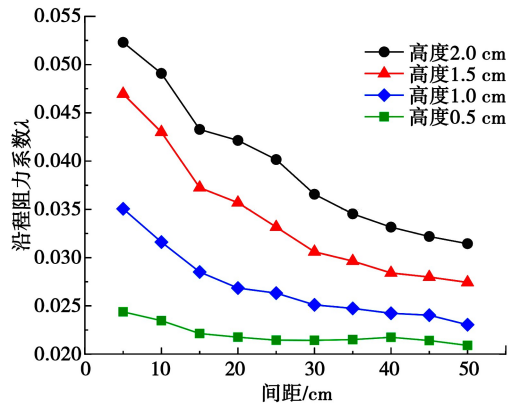


图 12 不同间距下矩形粗糙单元模型沿程阻力系数

Fig. 12 Resistance coefficients of rectangular rough element model with different spacing

4 讨论

4.1 尼古拉斯经验公式的修正

目前,用于计算隧道沿程阻力系数的公式是由尼古拉试验曲线推导出来的。Nicholas 试验在人工粗糙管道中进行,管道内壁粘贴粒度均匀的细砂以模拟相对粗糙高度,试验装置如图 13 所示。

Nicholas 对不同直径和粒度的管道进行了大量试验,得到了 Nicholas 试验曲线,如图 5 所示。基于尼古拉斯曲线,得到阻力系数的计算公式为:

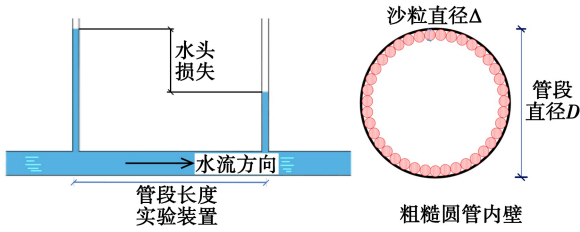


图 13 尼古拉兹实验

Fig. 13 Nicholastest

$$\lambda = \frac{1}{\left(1.1138 - 2\lg \frac{\Delta}{D}\right)^2} \quad (5)$$

式中: Δ 为平均壁面粗糙高度, mm; D 为隧道断面当量直径, m。

实际开挖轮廓与设计开挖轮廓之间的平均距离为平均粗糙高度。计算每个数值模拟案例的平均粗糙高度, 并将其代入公式(5)以计算阻力系数, 这称为经验公式的结果。将经验公式的结果与第 3 节中获得的数值模拟结果进行比较, 如图 14 和 15 所示。

可以看出, 经验公式的结果通常小于数值模拟

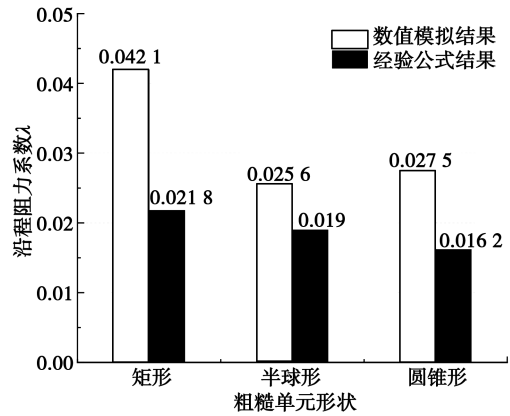


图 14 隧道模型壁面粗糙单元形状对比

Fig. 14 Comparison of rough element shapes of tunnel model wall

的结果。如图 14 所示, 单元形状对阻力系数的影响很明显, 矩形、锥形和半球形单元的差异分别为 53%、41% 和 26%。如图 15 所示, 单元间距变化引起的阻力系数变化很小, 在四种粗糙高度下, 有必要对经验公式进行修正。不同粗糙高度的校正系数如表 7 所示。进一步拟合校正系数, 得到校正系数与平均粗糙高度之间的关系, 如图 16 所示。

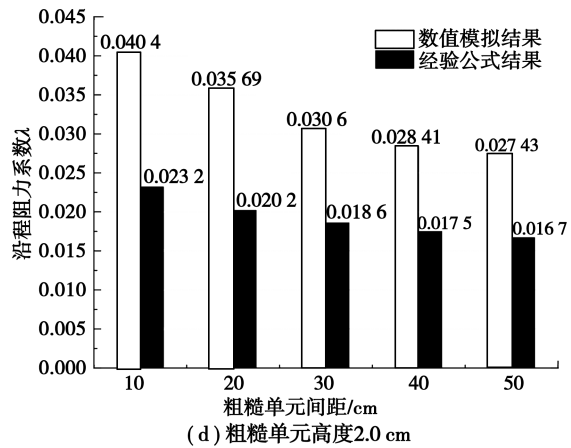
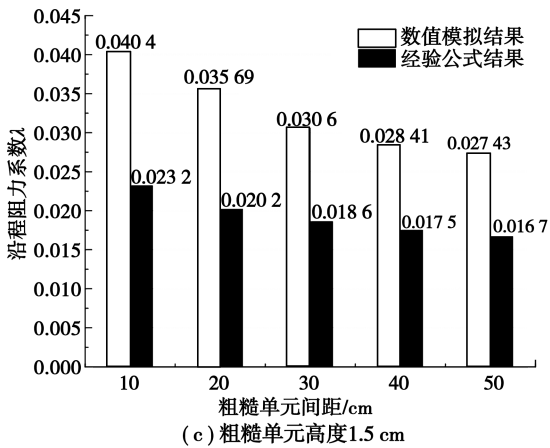
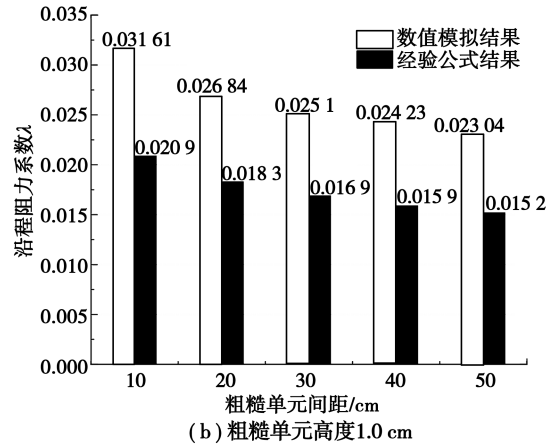
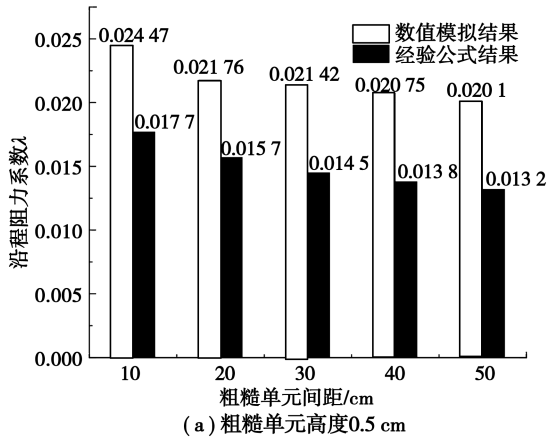


图 15 隧道模型壁面粗糙单元高度及间距对比

Fig. 15 Comparison of height and spacing of rough elements on tunnel model wall

校正系数(α)和平均粗糙高度(δ)之间的关系为： $\alpha = 1.29 + 0.0248\Delta$ 。因此，隧道沿程阻力系数的修正计算公式为：

$$\lambda = \frac{\alpha}{(1.1138 - 21g \frac{\Delta}{D})^2} \quad (6)$$

表 7 隧道模型壁面粗糙高度对应修正系数

Table 7 Corresponding correction coefficient of roughness height of tunnel model wall

平均粗糙高度/cm	5	10	15	20
修正系数 α	1.43	1.51	1.67	1.79

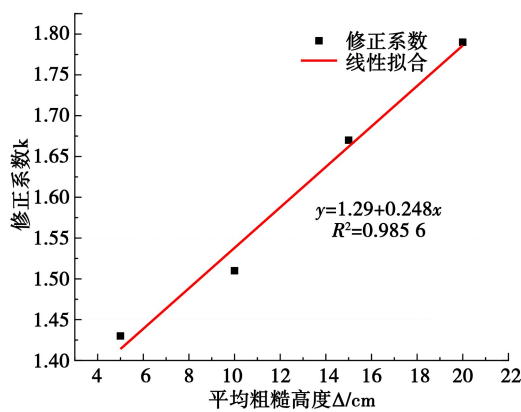


图 16 平均粗糙高度与修正系数关系

Fig. 16 Relationship between average roughness height and correction coefficient

4.2 校正系数 α 的现场应用

试验段选取一个 100 m 长的隧道施工段，其等效直径为 7.9 m，衬砌为喷射混凝土。试验段两端的横截面分为 10 个部分，如图 17 所示。每个部分中心的风速和压力经过 10 次采集后获得现场数据。最后，取每个测试点有效面积的加权平均值作为横截面的平均风速和风压。收集的数据如表 8 所示。

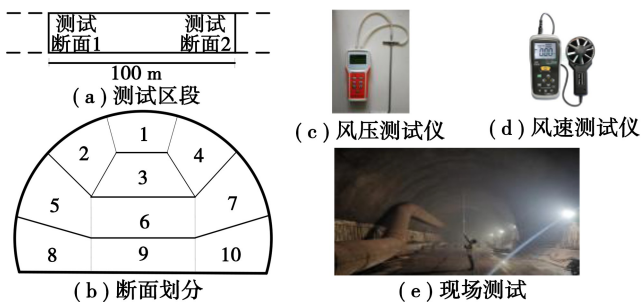


图 17 现场测试

Fig. 17 Fieldtest

根据试验数据，试验段隧道壁阻力系数计算公式为：

$$\lambda = \frac{\Delta P}{\left(\frac{v_{r1} + v_{r2}}{2}\right)^2} \cdot \frac{D}{L} \cdot \frac{2}{\rho} = 0.0600 \quad (7)$$

表 8 现场测试数据

Table 8 Fieldtest data

测点编号	面积 A_i/m^2	断面压差 $\Delta P/Pa$	断面 1 风速 $v_{11}/(m \cdot s^{-1})$	断面 2 风速 $v_{12}/(m \cdot s^{-1})$
1	5.92	1.12	1.52	2.75
2	7.62	1.36	1.41	2.40
3	6.68	2.05	1.91	3.18
4	7.47	1.42	1.37	2.38
5	8.53	1.93	1.20	2.27
6	8.21	2.16	1.96	3.21
7	8.05	1.87	1.28	2.25
8	7.25	0.77	0.91	1.71
9	8.42	0.81	0.92	1.71
10	6.87	0.76	0.87	1.68
均值		1.442	1.329	2.343

通过扫描测量，试验段的平均粗糙高度(δ)为 10 cm。然后，用公式(5)和公式(6)计算隧道的沿程阻力系数，经验公式的结果为 0.041 5，与现场测试结果差距较大，两者相差 30.8%。然而，修正公式的计算结果为 0.063 8，与现场测试结果相差仅 6.4%。与经验公式相比，修正公式计算的阻力系数更准确。

5 结论

(1)粗糙元素的高度、几何形状以及布置间距都会对隧道沿程的阻力系数产生影响。一般来说，粗糙元越高，阻力系数就越大；而随着雷诺数升高，阻力系数会逐渐下降并趋于稳定。

(2)阻力系数受粗糙元形状的影响更为显著。在隧道壁 2.0 cm 高度处，将矩形粗糙元替换为半球形粗糙元后，阻力系数降低了 43.4%。矩形粗糙元的阻力系数明显高于半球形和锥形粗糙元。

(3)粗糙元的间距越大，其对阻力系数的作用越弱。经验公式与数值模拟结果的偏差受单元间距影响较小，而受单元高度影响更为显著。

(4)经验公式计算的阻力系数较小。元素高度在 0.5 cm、1.0 cm、1.5 cm 和 2.0 cm 处的差异分别约为 32%、33%、41%和 45%。通过对现场监测数据的研究发现，现有经验公式应采用修正系数 α 进行修正。

参考文献(References)

- [1] 门本,马强. 隧道粉尘颗粒物的危害及控制措施分析[J]. 交通节能与环保, 2021, 17(1): 144-147. (Men Ben, Ma Qiang. Harm of tunnel dust particles and control measures[J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2021, 17(1): 144-147. (in Chinese))
- [2] 王林峰,冉捷,钟宜宏,等. 考虑风筒破损对隧道施工过程中CO排出的影响机制[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(24): 10718-10725. (Wang Linfeng, Ran Jian, Zhong Yihong, et al. Considering the influence mechanism of damaged duct on CO emission process during tunnel construction [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(24): 10718-10725. (in Chinese))
- [3] 黄强. 地铁中间风井隧道通风系统布置优化研究[J]. 建筑热能通风空调, 2021, 40(4): 81-84, 91. (Huang Qiang. Optimization design of ventilation saystem in the middle ventilation shaft tunnel of subway [J]. Building Energy & Environment, 2021, 40(4): 81-84, 91. (in Chinese))
- [4] 张恒,孙建春,向芬,等. 隧道施工通风壁面粗糙度评定方法及其工程应用[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(1): 217-225. (Zhang Heng, Sun Jianchun, Xiang Fen, et al. Assessment method to deal with the wall face roughness in the tunnel construction and its application[J]. Journal of Safety and Environment, 2019, 19(1): 217-225. (in Chinese))
- [5] Zhou Y, Yang Y, Bu R W, et al. Effect of press-in ventilation technology on pollutant transport in a railway tunnel under construction [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 243: 118590.
- [6] Fang Y, Yao Z G, Lei S. Air flow and gas dispersion in the forced ventilation of a road tunnel during construction[J]. Underground Space, 2019, 4(2): 168-179.
- [7] 徐鹏辉,刘万福,倪照鹏. 隧道集中排烟道沿程阻力系数模型[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(6): 734-739. (Xu Penghui, Liu Wanfu, Ni Zhaopeng. Model test research on friction resistance coefficient for smoke extracting gallery of tunnel [J]. Fire Science and Technology, 2015, 34(6): 734-739. (in Chinese))
- [8] 张恒. 复杂网络隧洞群施工通风技术研究[D]. 成都:西南交通大学, 2014. (Zhang Heng. Construction ventilation technology of complex network tunnel group [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese))
- [9] Zhang Z Q, Tan Y J, Zhang H, et al. Experimental and numerical study on the influence of wall roughness on the ventilation resistance coefficient in a tunnel under construction [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 119: 104198.
- [10] Lim H. Experimental study of the influence of roughness area density and surface pattern on near wall flow and surface pressure [J]. Fluid Dynamics Research, IOP Publishing, 2020, 52(5): 055508.
- [11] 王亚琼,张素磊,夏丰勇,等. 隧道通风井喷射混凝土壁面沿程阻力系数测试[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, 35(4): 83-88, 94. (Wang Yaqiong, Zhang Sulei, Xia Fengyong, et al. Test on surface frictional resistant coefficient of ventilation shaft for tunnel [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2015, 35(4): 83-88, 94. (in Chinese))
- [12] Wang M N, Deng T, Yu L, et al. A uniform air flow distribution design strategy for use in tunnel transverse ventilation systems[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2019, 20(2): 98-108.
- [13] 高峰,何江,冉飞,等. 城市超小半径隧道沿程阻力系数研究[J]. 公路工程, 2022, 47(2): 49-54, 60. (Gao Feng, He Jiang, Ran Fei, et al. Study on drag coefficient of urban ultra-small radius tunnel [J]. Highway Engineering, 2022, 47(2): 49-54, 60. (in Chinese))
- [14] 吴斌,杨建平,袁松,等. 蛇型曲线公路隧道风流分布及沿程阻力特征研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(增2): 123-128. (Wu Bin, Yang Jianping, Yuan Song, et al. Study on characteristics of velocity distribution and resistance loss in serpentine curved road tunnel [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(Supp. 2): 123-128. (in Chinese))