

粗糙元特征对风洞中大气表面层模拟的影响

王丽, 王元, 王大伟

(西安交通大学流体工程系, 710049, 西安)

摘要: 采用不同尺度、不同铺设密度的二维正方形粗糙元, 在环境风洞中对大气表面层进行了模拟. 使用粒子图像速度场仪对所模拟的大气表面层风速廓线、湍流强度进行了测量. 结果表明: 当粗糙元的铺设长度达到实验段入口高度的12倍以上时, 依靠自然形成法所模拟的对数风速廓线高度可达实验段高度的60%; 空气动力学粗糙度 Z_0 最高可达粗糙元尺度的0.4~0.5倍, 且 Z_0 随粗糙元铺设区到测量断面的距离呈指数变化; 同一高度上湍流强度随粗糙元铺设间距的增加而减小, 当廓线高度达到实验段高度的40%以上时, 湍流强度不随粗糙元大小及铺设密度的变化而变化, 其大小为12%~13%. 实际应用中, 在已知所需 Z_0 和摩阻风速 U_* 的情况下, 可通过粗糙元尺度及铺设密度的不同组合获得满足要求的大气表面层, 并确定实验模型区的位置和实验段的入口风速.

关键词: 大气表面层; 自然形成法; 粗糙元; 粒子图像速度场仪

中图分类号: O357.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)03-0087-05

Effect of Roughness Elements on the Wind Tunnel Simulation of Atmospheric Surface Layer

WANG Li, WANG Yuan, WANG Dawei

(Department of Fluid Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In the wind tunnel, the atmospheric surface layer was simulated by the naturally forming method with square-bar roughness elements having different height and different paving density. The atmospheric surface layer profiles and turbulence intensities were measured by particle image velocimetry. The results show that when the paving length is more than 12 times of the inlet height of the experimental section, and the profiles' logarithmic height can be 60% of the experimental section height. The maximum value of the aerodynamics roughness, Z_0 , is about 40%-50% of the roughness element height, and Z_0 changes exponentially with the distance from the last roughness element to model position. Moreover, at the same level, the turbulence intensities decrease with the increase of the paving distance. When the level reaches more than 40% of the experimental section height, the turbulence intensities are almost the same. Our results indicate that, in the practical application, the required atmospheric surface layer can be achieved by the different combination of roughness element height with paving density, and the experimental model position and the section inlet velocity can be determined if the needed Z_0 and U_* are known.

Keywords: atmospheric surface layer; naturally forming method; roughness element; particle image velocimetry

大气表面层又称近地层, 其厚度约占整个大气边界层高度的15%, 是整个大气边界层中直接和地

球下垫面发生相互作用的部分^[1-2]. 该层中湍流量与高度无关,可近似认为是常数,并等于其地面值. 大气表面层与人类的生活和生产活动密切相关,沙尘的蠕移、跃移、低矮建筑物风载、桥梁风振等许多风工程学问题都发生在大气表面层中,因此在风洞中模拟大气表面层是风工程学研究的一项重要的基础性工作.

通常对于整个大气边界层的风洞模拟,最有效的方法是用长实验段($L/H > 12$, L 、 H 分别为实验段的长度和高度)生成. Cermake^[3] 和 Davenport 都一致认为,要得到发展平衡的速度剖面和湍流特性,必须根据边界层的自然增长获得. 一般来说,只要粗糙元配合得当,则其自然形成的边界层湍流结构和自然条件下的边界层结构是相吻合的^[4]. Perry、Antonia、Liu 等人^[5-7] 在风洞中利用二维锐边粗糙元曾对湍流边界层特性进行了研究. Lee 等人^[8] 研究了三维粗糙元对整个湍流边界层的影响. Sill 等人^[9] 分析了立方体粗糙元的尺寸和排列方式与粗糙参数的关系. 王元等人根据渐近相似分析^[10] 得出,在大气表面层的风洞模拟中,最重要的相似参数是对数风速廓线和地表粗糙参数,其次是湍流强度. 然而,目前在风洞中针对大气表面层模拟的实验开展得并不多.

本文依靠自然形成法,在环境风洞中通过调整二维粗糙元的大小和分布密度,获得了符合条件的大气表面层速度分布,得到了对应的空气动力学粗糙度 Z_0 . 随粗糙元铺设区到测量断面距离的变化规律,为在环境风洞中快速有效地模拟符合实验要求的大气表面层和正确地选择实验模型区位置提供了依据.

1 实验条件与参数

1.1 风洞与粗糙元参数

实验在西安交通大学流体工程系的环境风洞

(见图 1)中进行. 该风洞为直流吸入式,其截面尺寸为 0.6 m (宽) $\times 0.5 \text{ m}$ (高),有 2 个实验段. 第 1 实验段长度为 5 m ,该实验段的顶部安装有可调顶板以保证轴向压力平衡. 在第 2 实验段得到合适的大气表面层后,可直接在该尺寸的环境风洞中进行沙尘的蠕移、跃移,低矮建筑物风载等风沙动力学实验. 由于本研究的结果均采用量纲一的参数,若需要在其他尺寸的风洞中进行实验,可以通过缩放有关参数至符合其他尺寸的风洞再应用.

选择正方形截面的二维粗糙元对问题进行研究. 图 2 为粗糙元铺设参数的示意图,图 3 为风洞中某一尺度粗糙元的一种铺设情况. k 为粗糙元的尺寸($k=10, 20, 30, 40 \text{ mm}$ 4 种不同尺度的粗糙元); s 为粗糙元的间距,通过调整该间距来控制粗糙元的铺设密度; X 为粗糙元铺设区到测量断面的距离.

1.2 测量仪器

实验采用 TSI 公司生产的二维粒子图像速度场仪(PIV)测试系统对模拟出的大气表面层风速廓线和湍流强度进行测量. PIV 技术是在被测区域的上游施放示踪粒子,利用光源产生片光以照亮流动区域,并通过照相机记录 2 个时刻粒子的位移. 用测量的位移与已知的时间间隔相除,得到了粒子的拉格朗日速度,当时间间隔趋近于 0,可近似认为等于欧拉速度. 图像采集使用分辨率为 $1\,600 \times 1\,200$ 像素的 CCD 相机. 激光器架设在风洞顶板上方的坐标架上,最大能量为 120 mJ ,通过同步器控制激光器内 2 束激光的工作. 示踪粒子用压力雾化发烟器均匀撒播.

2 实验结果及分析

在大气表面层中风速廓线满足对数率

$$U = \frac{U_*}{\kappa} \ln \frac{Z}{Z_0} \quad (1)$$

式中: U 为高度 Z 处的风速; U_* 为摩阻风速; κ 为

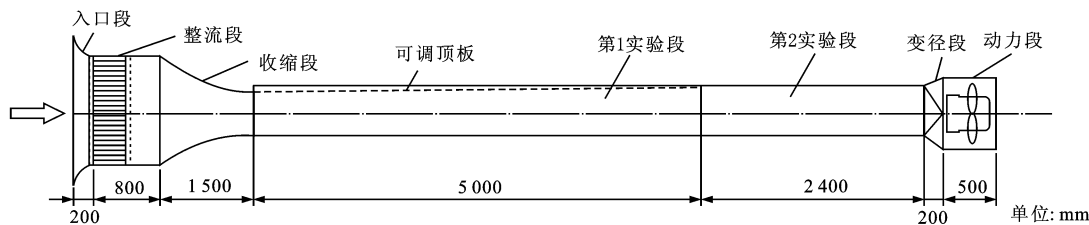


图1 环境风洞结构示意图

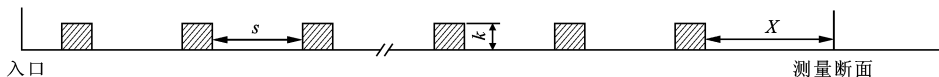


图2 粗糙元铺设参数示意图

卡曼常数($\kappa=0.4$); Z 为距离地面的高度; Z_0 是风速等于 0 的某一几何高度,称为空气动力学粗糙度,由下垫面的凸起程度决定^[11]. 摩阻风速 U_* 与风洞入口风速之间满足线性关系. 在实际应用中,只要 Z_0 与 U_* 已知,便可惟一地确定对数风速廓线. 实验中粗糙元的铺设(见图 3)长度约为第 1 实验段入口高度的 12 倍. 为模拟中性的大气表面层,选择实验段入口风速 U_{in} 约为 6 m/s ^[2]. 在测量区(粗糙元铺设区至少向后移动 $0\sim15k$ 的距离)得到时均风速廓线和湍流强度.

2.1 风速廓线

在 $X=6k$ 处,采用 $k=10\text{ mm}$ 的粗糙元在不同铺设密度($s=4k, 5k, 6k, 7k, 8k, 9k, 11k, 13k, 15k$)得到的一组对数风速廓线(见图 4). 可见,无论铺设密度如何变化,风速廓线的高度均可达到实验段高度的 60%.

图 5 为铺设密度 $s=16.5k$ 时,使用不同尺度粗糙元所得到的风速廓线,测量断面的位置 $X=4.5k$. 可见,铺设不同尺度的粗糙元所得风速廓线的高度亦可到达实验段高度的 60%以上. 将各风速廓线按式(1)拟合,对应的对数律公式分别为

$$U_{10} = \frac{0.82}{\kappa} \ln \frac{Z}{0.009}, \quad U_{20} = \frac{0.72}{\kappa} \ln \frac{Z}{0.012}$$
$$U_{30} = \frac{0.71}{\kappa} \ln \frac{Z}{0.015}, \quad U_{40} = \frac{0.69}{\kappa} \ln \frac{Z}{0.016}$$

在入口风速、铺设长度与密度相同的情况下,粗糙元越高, Z_0 越大,则 U_* 越小.

2.2 空气动力学粗糙度 Z_0

调整粗糙元的间距($s=4k, 6.5k, 9k, 11.5k,$

$14k, 16.5k$),将各种情况下测得的风速廓线按对数分布律进行拟合,得到 Z_0 随 X 的变化规律. 实验中发现,每种粗糙元组合所形成的回流区的长度 $X=3k$. 图 6 为不同尺度粗糙元在相同铺设密度下 Z_0 随 $X(3k<X<15k)$ 的变化.

将 Z_0 随 X 变化的最大值列于表 1 中. 对于二维正方形粗糙元,依靠自然形成法在环境风洞中模拟大气表面层的风速廓线时,模拟出的风速廓线 Z_0 最高可达 $0.4k\sim0.5k$. 随着粗糙元尺度由小变大, Z_0 随 X 的变化规律由先增大后减小转变为单调递减,将所有呈下降趋势 Z_0 的数据进行曲线拟合发现, Z_0 与 X 之间存在着指数变化关系,表 2 为 Z_0 随 X 的指数变化拟合公式. 由于速度松弛效应,当 $X>400\text{ mm}$ 时,使用不同尺度粗糙元组合模拟出风速廓线的 Z_0 值趋于一致,约为 1 mm 左右,此后的粗糙度 Z_0 将不再有明显变化. 若在具体实验中需要整个模型区保持相同的 Z_0 ,可通过进一步调整模型区的粗糙条件来达到.

在实际的实验研究中,若已知需要模拟的风速廓线 Z_0 值的范围,则可以对照表 1 中提供的数据选择粗糙元尺度和铺设密度的组合,在此基础上对照表 2 进一步确定模型区的位置.

2.3 湍流强度

图 7 为在 $X=120\text{ mm}$ 处不同尺度粗糙元在不同铺设密度下,湍流强度 I 随高度 Z 的变化. 在同一高度上湍流强度基本上随铺设间距的增大而减小. 在通常状况下,湍流强度的最大值出现在粗糙元高度附近. 随着测量点高度的增加,湍流强度变小,



图 3 粗糙元的一种铺设情况

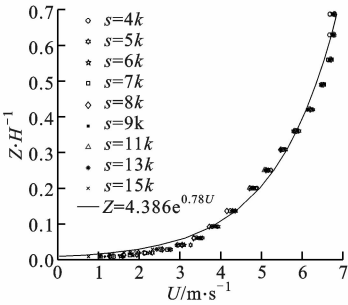


图 4 $k=10\text{ mm}$ 的一组风速廓线

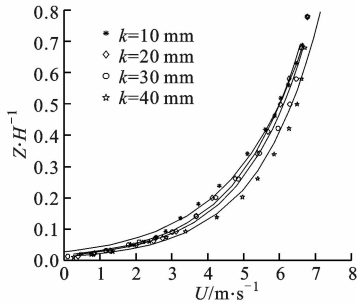


图 5 不同尺度粗糙元的风速廓线

表 1 Z_0 变化的最大值

k/mm	$Z_{0,\text{max}}/\text{mm}$					
	$s=4k$	$s=6.5k$	$s=9k$	$s=11.5k$	$s=14k$	$s=16.5k$
10	5.767 3	5.034 3	5.389 1	5.247 6	4.942 3	4.872 5
20	8.019 9	7.544 7	7.482 6	8.776 8	7.743 3	6.029 7
30	9.078 0	9.160 4	7.460 8	7.414 7	8.128 3	8.013 1
40	13.682 1	10.526 4	11.351 2	11.644 2	13.075 7	12.766 5

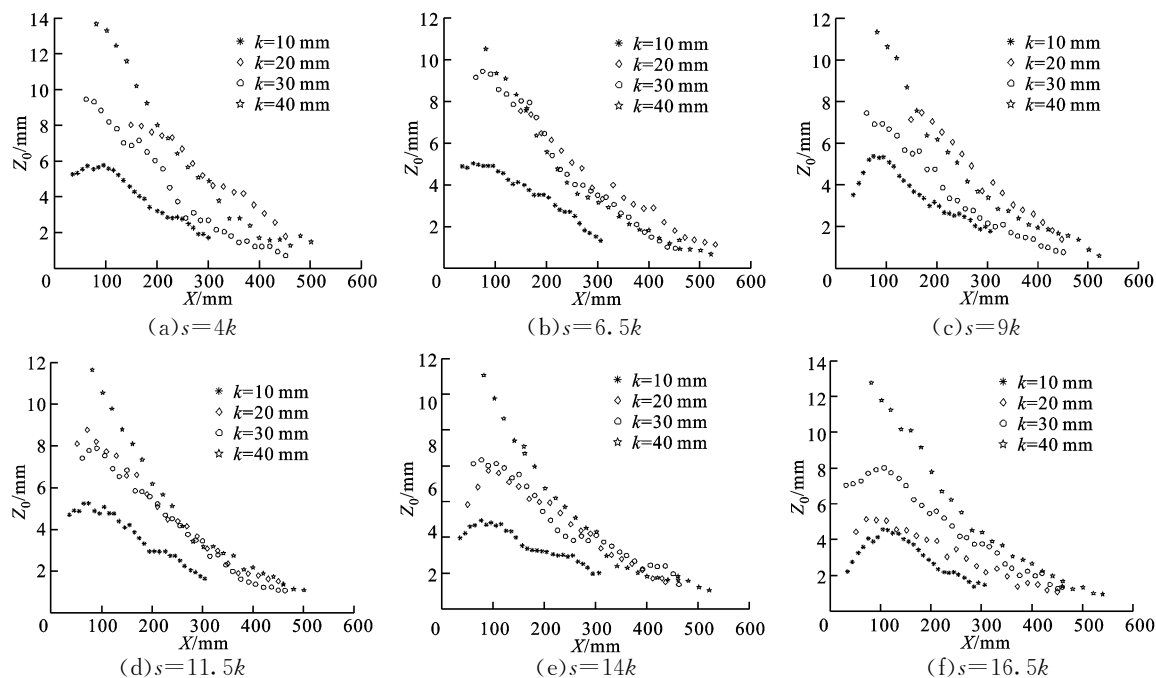


图 6 相同铺设密度下 Z_0 随 X 的变化

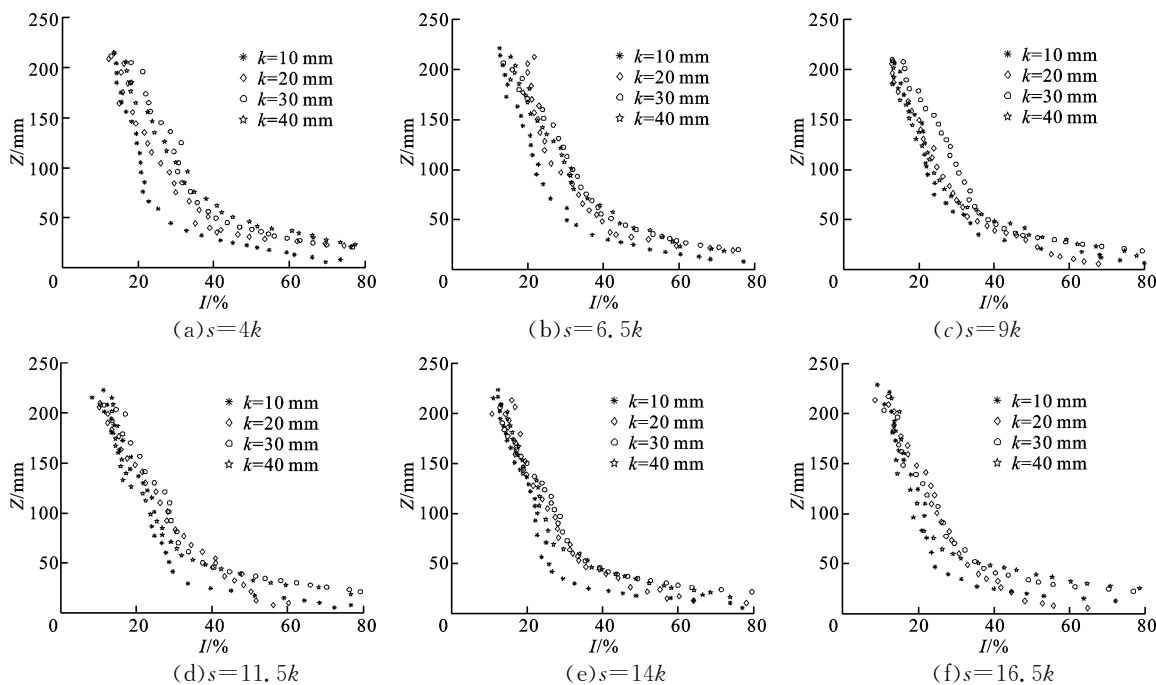


图 7 湍流强度 I 随高度 Z 的变化

表 2 Z_0 随 X 呈指数变化的拟合公式

s	Z_0/mm			
	$k=10\text{ mm}$	$k=20\text{ mm}$	$k=30\text{ mm}/$	$k=40\text{ mm}$
$4.0k$	$10.47\text{e}^{-0.005\ 8X}$	$18.65\text{e}^{-0.004\ 5X}$	$15.42\text{e}^{-0.006\ 2X}$	$21.12\text{e}^{-0.005\ 3X}$
$6.5k$	$8.12\text{e}^{-0.005\ 1X}$	$17.37\text{e}^{-0.004\ 9X}$	$14.96\text{e}^{-0.005\ 3X}$	$19.61\text{e}^{-0.006\ 3X}$
$9.0k$	$8.28\text{e}^{-0.005\ 1X}$	$19.56\text{e}^{-0.005\ 4X}$	$11.33\text{e}^{-0.005\ 5X}$	$19.92\text{e}^{-0.006\ 2X}$
$11.5k$	$8.73\text{e}^{-0.005\ 3X}$	$13.97\text{e}^{-0.004\ 5X}$	$12.85\text{e}^{-0.005\ 1X}$	$20.43\text{e}^{-0.006\ 0X}$
$14.0k$	$7.67\text{e}^{-0.004\ 5X}$	$14.34\text{e}^{-0.004\ 8X}$	$10.98\text{e}^{-0.003\ 7X}$	$21.02\text{e}^{-0.005\ 7X}$
$16.5k$	$9.09\text{e}^{-0.005\ 9X}$	$8.39\text{e}^{-0.003\ 6X}$	$11.74\text{e}^{-0.004\ 3X}$	$22.47\text{e}^{-0.005\ 7X}$

当测量高度达到 200 mm(即实验段高度的 40%)以上时,湍流强度不随粗糙元的大小及铺设密度的变化而变化,其大小为 12%~13%.

3 结 论

本文采用不同尺度($k=10,20,30,40\text{ mm}$)、不同铺设密度的二维正方形粗糙元,依据自然形成法在环境风洞中模拟了大气表面层.使用 PIV 速度测量技术对模拟出的大气表面层进行测量,得到对应的时间平均风速廓线、湍流强度.由此,得到以下结论.

(1)当粗糙元的铺设长度达到实验段入口高度的 12 倍以上时,空气动力学粗糙度 Z_0 随 X 呈指数变化.依据自然形成法所模拟的对数风速廓线高度,可达实验段高度的 60%,模拟出的对数风速廓线 Z_0 最高可达到 $0.4k\sim0.5k$.

(2)湍流强度随着粗糙元尺度的增加而增大,同一高度上湍流强度随铺设间距的增加而减小.当廓线高度达到实验段高度的 40%以上时,湍流强度几乎相等,为 12%~13%.

(3)在已知所需 Z_0 和 U_* 的情况下,可利用上述结论通过粗糙元尺度及密度的不同组合获得满足要求的大气表面层,并确定模型区的位置和实验段的入口风速.

参考文献:

[1] 莱赫特曼. 大气边界层物理学 [M]. 濮培民,译. 北京: 科学出版社,1982:122.
[2] HAUGEN D. 微气象学 [M]. 李兴生等,译. 北京: 科学出版社,1984:15,82.
[3] CERMAK J E. Use of wind tunnels in the study of atmospheric phenomenon [C] // Air Pollution Control

Association's Annual Meeting. Philadelphia, Pennsylvania, USA: APCA, 1958:58-32.
[4] 王元. 沙漠——绿洲过滤带流沙起动规律及防护模式模拟实验研究 [D]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院,1998.
[5] PERRY A E, SCHOFIELD W H. Rough wall turbulent boundary layers [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1969, 37(2):383-413.
[6] ANTONIA R A, LUXTON R E. The response of a turbulent boundary layer to a step change in surface roughness: smooth to rough [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1971,48(4): 721-761.
[7] LIU C K, KLINE S J. An experimental study of turbulent boundary layers on rough walls, Report MD-15 [R]. Stanford, California, USA: Stanford University. Department of Mechanical Engineering, 1966.
[8] LEE B E, SOLIMAN B F. An investigation of the forces on three dimensional bluff Bodies in rough wall turbulent boundary layers [J]. Journal of Fluids Engineering, 1977,99(9):503-510.
[9] FANG C, SILL B L. Aerodynamic roughness length: correlation with roughness elements [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 41(1):449-460.
[10] 王元,张鸿雁. 大气表面层与风沙现象相似参数的研究 [J]. 中国沙漠,1994,14(1):10-16.
WANG Yuan, ZHANG Hongyan. The study on similarity parameters of the atmospheric surface layer and phenomena of drift sand [J]. Journal of Desert Research, 1994, 14(1): 10-16.
[11] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学 [M]. 北京: 科学出版社,2003.

(编辑 王焕雪)

西安交通大学获得 2008 年度国家科学技术奖 5 项

2008 年度国家科学技术奖励大会于 1 月 9 日在北京召开,西安交通大学材料学院李长久、王卫泽、李京龙、李文亚、王豫跃等完成的“热喷涂涂层形成机制、结构与性能表征的应用理论”获国家自然科学基金二等奖,电气学院王建华、荣命哲、郑军、耿英三、宋政湘、王小华、张国钢、张杭、游一民、张永等完成的“智能电器理论、关键技术及系列产品开发”获国家科技进步二等奖.胡锦涛、温家宝等国家领导人出席大会,并为获奖人员颁奖.

2008 年度西安交通大学共有 5 个项目获奖(合作 3 项),居全国高校第 6 位,其中以第 1 完成单位获得 2 项,居全国高校第 8 位,这也是西安交通大学获得国家科学技术奖连续第 4 年居全国高校前 10 位.

(科研院 黄忠德)