

# 圆角化 3:1 二维矩形柱体风压分布的雷诺数效应

王新荣, 顾 明

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 在低紊流度的均匀场中, 研究了 4 种圆角率(0, 5%, 10% 和 15%) 的 3:1 二维矩形柱体模型的风压分布随雷诺数的变化规律. 从模型周围气流绕流的角度解释了圆角处理的矩形柱体模型的雷诺数效应的机理, 并分析了雷诺数对各模型的背风面中点的风压系数的影响. 试验雷诺数的变化范围为  $1.1 \times 10^5 \sim 6.8 \times 10^5$ . 结果表明, 四种圆角率模型的风压分布都受雷诺数的影响, 但圆角率为 0 和 5% 的模型受雷诺数影响较小, 圆角率为 10% 和 15% 的模型受雷诺数影响明显. 圆角处理措施对矩形柱体模型雷诺数效应的影响主要是通过影响分离剪切层在模型侧面前缘的形成及其在侧面后部区域的再附, 进而影响模型的气动特性, 使模型更易受雷诺数的影响.

**关键词:** 圆角; 矩形柱体; 平均风压分布; 脉动风压分布; 雷诺数效应

**中图分类号:** TU317.1

**文献标志码:** A

## Reynolds Number Effects on Wind Pressure Distributions of 3:1 Rectangular Prisms with Various Rounded Corners

WANG Xinrong, GU Ming

(State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Experiments were conducted of measuring wind pressures on the surface of 3:1 rectangular prisms with rounded corner ratio of 0, 5%, 10% and 15% in low-turbulence uniform flow for the testing Reynolds number ranging from  $1.1 \times 10^5$  to  $6.8 \times 10^5$ . The Reynolds number effects on wind pressure distributions were studied, and the mechanisms of Reynolds number effects were revealed by analyzing the variations of the flow around the model. The results show that wind pressure distributions of four models are all affected by the Reynolds number. Compared with the models with 0 and 5%, the wind pressure distributions of

models with 10% and 15% are more sensitive to the Reynolds number. The corner rounding modification influences the Reynolds number effects of 3:1 rectangular prisms by affecting the formation of the separated shear layer, which also affects the flow reattachment of the boundary layer as well as the aerodynamics of the body.

**Key words:** rounded corner; rectangular prism; mean pressure distribution; fluctuating pressure distribution; Reynolds number effects

随着结构体系、建筑材料、设计和施工技术的进步以及建筑观念的更新, 超高层建筑向着低阻尼、轻质高柔的方向发展, 导致超高层建筑对风荷载越来越敏感, 抗风设计在其结构设计中往往需要重点考虑. 气动措施是目前超高层建筑主要抗风措施之一<sup>[1]</sup>, 而切角、凹角和圆角处理措施又是高层建筑抗风气动措施中经常采用的方法<sup>[2-4]</sup>. Carassale 等<sup>[5]</sup>的研究表明, 圆角处理使气流更易再附于模型的两个侧面, 且大圆角率模型的气动特性随雷诺数的增大变化明显. 谢壮宁等<sup>[6]</sup>研究了切角处理措施对锥度化高层建筑的横风向效应的影响, 得出切角处理措施能够明显减小模型基底弯矩值的结论. Tamura 等<sup>[7]</sup>的研究表明, 切角和凹角气动措施能够影响方柱的尾流宽度, 导致模型的阻力明显减小. 此外, 圆角处理措施导致分离剪切层有可能再附于模型的两个侧面, 进而影响模型的气动特性. Tamura 等<sup>[8]</sup>还结合节段模型风洞试验结果和 CFD (Computational Fluid Dynamics) 数值模拟结果, 分析了切角和圆角处理措施对方柱气动特性的影响, 其研究表明, CFD 数值模型所得平均风压分布和脉动风压分布结果与风洞试验结果吻合较好. Wang 等<sup>[9]</sup>的试验研究表明切角处理措施能够显著减小矩形截面模型的顺风向

收稿日期: 2014-06-19

基金项目: 国家自然科学基金(90715040, 91215302)

第一作者: 王新荣(1989—), 男, 博士生, 主要研究方向为土木工程抗风. E-mail: xinrong0106@126.com

通讯作者: 顾 明(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为土木工程抗风. E-mail: minggu@tongji.edu.cn

气动力。

众所周知,圆角化建筑的风力受雷诺数影响。但目前很少有涉及圆角化超高层建筑的雷诺数效应的研究。Larose 等<sup>[10-11]</sup>的初步研究表明,在  $0.3 \times 10^6 \leq Re \leq 2.5 \times 10^6$  的范围内,切角处理对截面宽厚比  $B/D$  ( $B$  为模型的顺风向宽度,  $D$  为模型的迎风面厚度) 为 2:1 的棱柱的升力系数受雷诺数的影响很大,而其阻力系数受雷诺数的影响较小。这是因为切角处理会影响气流在模型侧面的分离和再附,导致模型升力系数的改变。Delany 等<sup>[12]</sup>研究了圆角处理对截面宽厚比为 2:1 的矩形柱的阻力系数雷诺数效应的影响。研究表明,不同圆角处理对模型的雷诺数效应影响程度不同;当圆角率为 4.2% 时,阻力系数在  $Re \leq 1.0 \times 10^6$  的范围内是不变的,随后阻力系数随着雷诺数的增大而减小,在  $Re = 1.5 \times 10^6$  时达到最小值,越过最小值点之后,阻力系数随着雷诺数的增加而增大;当截面圆角率为 16.7% 时,阻力系数随雷诺数呈现先减小后增大的变化规律,阻力系数在  $0.9 \times 10^6$  处开始减小,在  $Re = 1.5 \times 10^6$  处达到最小值,随后阻力系数随雷诺数的增大而增大。

圆角处理会影响气流在模型侧面前缘的分离,进而影响气流的再附,导致模型气动特性的改变。以往的研究并没有针对不同圆角处理的 3:1 二维矩形柱体的风压分布雷诺数效应的系统研究,相关研究更多针对特定圆角率、凹角率或切角率对方柱模型的风致效应的影响。作为对以往研究的补充,本文较系统地研究了四种圆角率(0, 5%, 10% 和 15%)的 3:1 二维矩形柱体的风压分布的雷诺数效应,并分析了其雷诺数效应的机理。

## 1 风洞试验概况

本试验在同济大学 TJ-2 风洞中进行。试验模型采用截面宽厚比为 3:1 的二维节段模型,模型的截面宽厚比指的是模型的顺风向宽度  $B$  与模型的迎风面厚度  $D$  之比。模型的圆角处理形式如图 1 所示,圆角率  $R/D$  指的是模型的圆角半径  $R$  与迎风面厚度  $D$  之比。所有模型迎风面厚度  $D$  为 0.2 m,顺风向宽度  $B$  为 0.6 m,长为 1.5 m,四种圆角率模型( $R/D=0$ , 5%, 10% 和 15%)的测点布置如图 2 所示。模型表面测点间距不超过 20 mm,在角部区域进行加密,以监测气流分离区的表面风压变化规律。试验风速的变化范围为  $8 \sim 50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,对应的雷诺数变化范围为  $1.1 \times 10^5 \sim 6.8 \times 10^5$ 。试验之前在空风洞的条件

下,标定了两端板之间的风场,结果表明,本试验采用的是低紊流度的均匀流风场<sup>[13]</sup>。试验中扫描阀的扫描频率设置为 312.5 Hz,采样时间为 28.8 s。模型由钢架支撑于风洞截面正中间,钢架具有足够的强度和刚度,在试验风速下不发生变形,也不出现明显的振动现象,以保证测压的精度。模型的安装方法以及二维流效应的模拟见文献[13]。



图1 圆角处理示意图

Fig.1 Modification of rounded corner

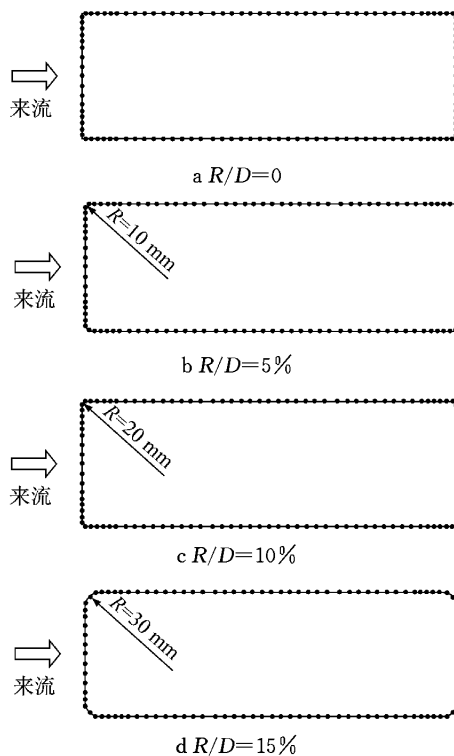


图2 模型表面测压点分布示意图

Fig.2 Arrangement of pressure taps

## 2 试验结果及分析

模型表面测点  $i$  的风压系数时程  $C_{pi}$  定义为

$$C_{pi} = \frac{p_i - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho v^2} \quad (1)$$

式中:  $p_i$  为测点  $i$  测得的风压时程;  $p_\infty$  为来流静压;  $\rho$  和  $v$  分别是空气密度和来流风速。

### 2.1 各模型风压分布的雷诺数效应

#### 2.1.1 圆角率为 0 的 3:1 二维矩形柱体模型风压分布的雷诺数效应

图 3 给出了圆角率为 0 的 3:1 二维矩形柱体模

型在5个雷诺数条件下的平均风压  $C_{p, \text{mean}}$  分布和脉动风压  $C_{p, \text{rms}}$  分布. 由图3a可知,模型的侧面出现了气流的再附现象. 迎风面的平均风压分布基本不受雷诺数的影响,而背风面负压绝对值随雷诺数的增大而略有增大. 模型侧面的风压分布随雷诺数的变化规律可以分为两个区,模型侧面前缘气流分离区的负压绝对值随雷诺数的增大而明显增大,但模型侧面后缘气流再附区的风压分布基本不随雷诺数而改变. 由图3b可知,雷诺数对模型迎风面和背风面的脉动风压分布基本没有影响,但模型侧面的脉动风压分布随雷诺数变化明显. 当雷诺数达到  $6.7 \times 10^5$  时,模型侧面的脉动风压分布出现了明显的突变,主要是模型侧面后缘再附区的脉动风压分布曲线的峰值明显减小. 上述分析表明,气流在模型前缘尖锐边角处分离之后,雷诺数会影响模型侧面前缘气流分离区漩涡的强度. 在高雷诺数条件下,脉动风压分布曲线的峰值明显降低说明雷诺数对其漩涡脱落有一定的影响.

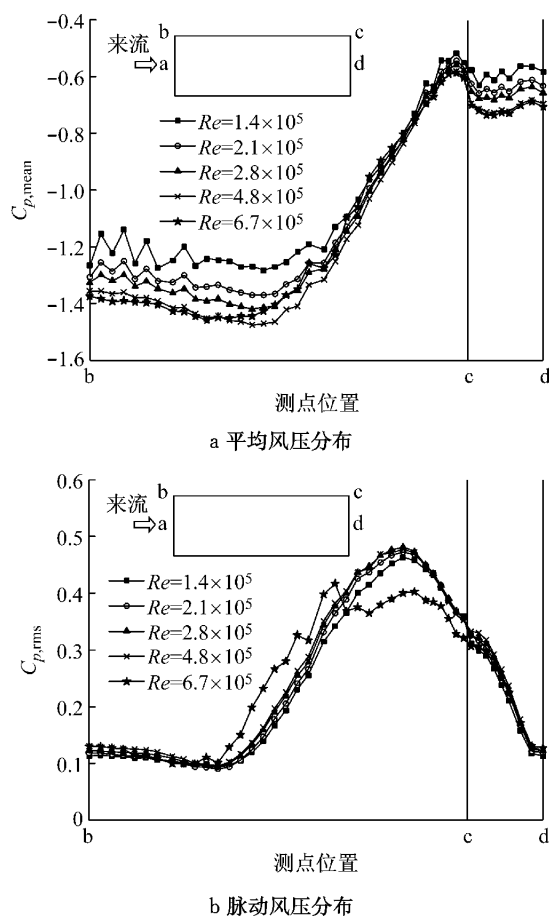


图3 雷诺数对圆角率为0的模型的风压分布的影响

Fig.3 Wind pressure distributions around  $R/D = 0$  rectangular prism at different Reynolds numbers

## 2.1.2 圆角率为5%的3:1二维矩形柱体模型风压分布的雷诺数效应

图4给出了圆角率为5%的3:1二维矩形柱体模型在5个雷诺数条件下的平均风压分布和脉动风压分布. 图4~6中测点位置b和c位于模型的圆角45°位置处,而测点位置d指的是模型背风面中点. 圆角率为5%的模型的平均风压分布随雷诺数的变化规律与圆角率为0的模型类似,但圆角率为5%的模型的背风面负压绝对值比圆角率为0的模型小,这说明小圆角处理使气流在模型前缘分离之后更靠近模型的两侧面,使尾流宽度变窄,导致背风面负压绝对值的改变. 由图4b可知,圆角率为5%的模型的迎风面和背风面脉动风压分布基本不随雷诺数而改变,且模型侧面气流分离区与再附区的脉动风压分布随雷诺数的变化也较小. 与圆角率为0的模型的脉动风压分布相比,圆角率为5%的模型的脉动风压分布在模型后缘圆角处出现了峰值,这说明再附区气流在模型后缘再次分离时形成小漩涡. 上述分析表明,5%的圆角率对3:1二维矩形柱体模型的雷诺

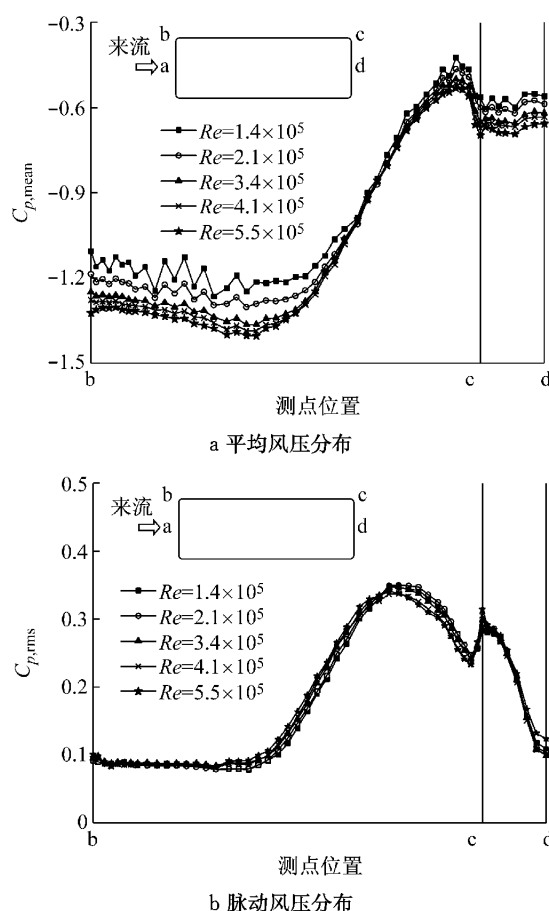


图4 雷诺数对圆角率为5%的模型的风压分布的影响

Fig.4 Wind pressure distributions around  $R/D = 5\%$  rectangular prism at different Reynolds numbers

数效应影响较小,其雷诺数效应与圆角率为0的3:1二维矩形柱体模型类似.

### 2.1.3 圆角率为10%的3:1二维矩形柱体模型风压分布的雷诺数效应

圆角率为10%的3:1二维矩形柱体模型在5个雷诺数条件下的平均风压分布和脉动风压分布如图5所示.与圆角率为0和5%的模型相比,圆角率为10%的模型的雷诺数效应更显著,其平均风压分布和脉动风压分布在高雷诺数区域呈现明显的突变.由图5a可知,在低雷诺数的条件下,圆角率为10%的模型的平均风压分布随雷诺数的变化规律与圆角率为0和5%的模型类似,略有区别的是圆角率为10%的模型的背风面负压绝对值基本不随雷诺数而变化;但当雷诺数达到 $Re=5.4 \times 10^5$ 时,其平均风压分布出现了明显的突变,模型侧面前缘的气流分离区的负压绝对值明显增大,模型侧面后缘的气流再附区的负压绝对值明显减小,而背风面负压绝对值也明显减小.由图5b可知,在低雷诺数区域,圆角率为10%的模型脉动风压分布随雷诺数的变化较

小,但脉动风压分布在雷诺数达到 $Re=5.4 \times 10^5$ 时出现了明显的突变,侧面前缘分离区的脉动风压突然变大,而侧面后缘的脉动风压突然变小;此外,在模型侧面后边缘的圆角处理位置,脉动风压分布的峰值一直存在,只是峰值随雷诺数的增大而减小.上述分析表明,雷诺数对圆角率为10%的模型的侧面气流分离区和再附区的气流绕流影响较大.在高雷诺数区,气流在模型侧面前缘分离区形成更强的漩涡,气流再附位置前移,气流的再附状态也受影响,导致尾流的流动状态以及漩涡脱落也发生了改变.

### 2.1.4 圆角率为15%的3:1二维矩形柱体模型风压分布的雷诺数效应

图6给出了圆角率为15%的3:1二维矩形柱体模型在5个雷诺数条件下的平均风压分布和脉动风压分布.模型的平均风压分布随雷诺数的变化规律与圆角率为10%的模型类似,在高雷诺数区域也出现了明显的突变,再附位置也明显前移.脉动风压分布的研究表明,与圆角率为10%的模型相比,圆角率为15%的模型的脉动风压分布在高雷诺数条件下也

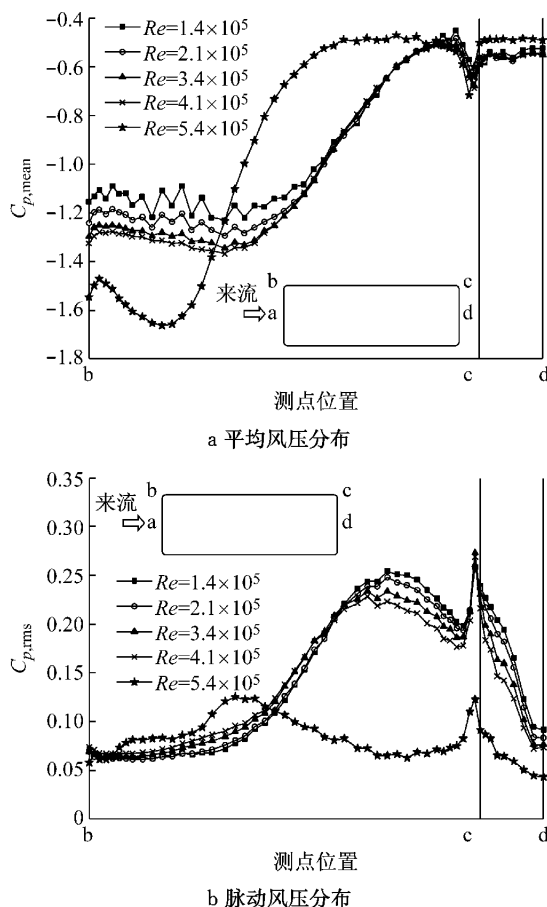


图5 雷诺数对圆角率为10%的模型的风压分布的影响  
Fig.5 Wind pressure distributions around  $R/D = 10\%$  rectangular prism at different Reynolds numbers

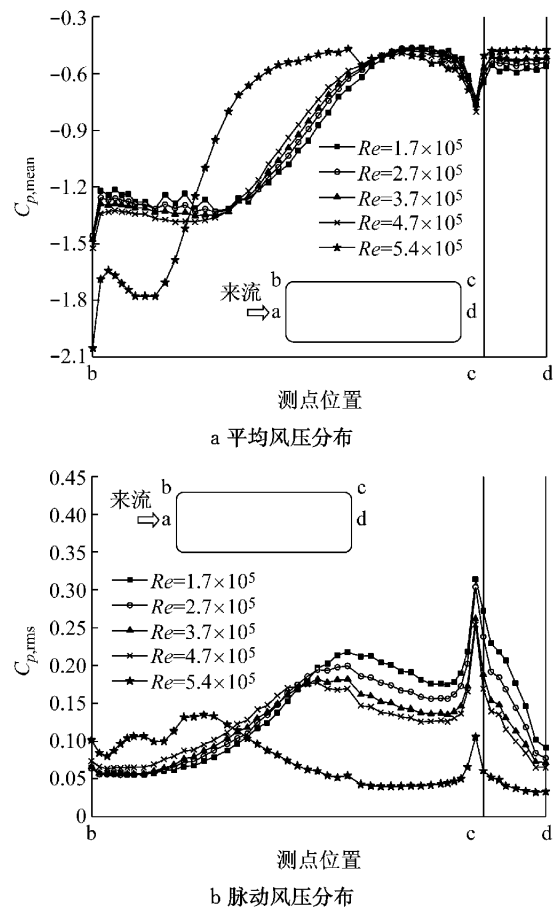


图6 雷诺数对圆角率为15%的模型的风压分布的影响  
Fig.6 Wind pressure distributions around the  $R/D = 15\%$  rectangular prism at different Reynolds numbers

出现了类似的突变,但其脉动风压分布在低雷诺数区域变化更明显,模型侧面后缘的气流再附区的脉动风压随雷诺数的增大缓慢减小。

以往的研究表明,3:1二维矩形断面模型的雷诺数效应的本质就是气流的再附效应,在模型前缘边角处形成的分离剪切层有可能再附于模型的侧面,其再附状态受雷诺数效应的影响<sup>[13]</sup>。而圆角处理使矩形断面由钝体断面向流线体断面过渡,这导致气流更易再附于模型的两侧面,其雷诺数效应也更显著。本文的研究表明,四种圆角率模型的风压分布都受雷诺数效应的影响。其中圆角率为0和5%的3:1二维矩形柱体模型的平均风压分布和脉动风压分布随雷诺数的变化规律类似,而圆角率为10%和15%的模型对雷诺数效应更敏感,其平均风压分布和脉动风压分布随雷诺数的变化规律也类似,在高雷诺数条件下都出现了明显的突变。此外,四种圆角率的3:1二维矩形柱体模型都存在明显的气流再附效应,圆角处理会影响气流在模型前缘的分离,使气流分离位置发生改变,这会影响气流在模型侧面形成的分离剪切层,进而影响其再附位置以及再附状态,导致模型侧面和背风面负压绝对值的改变。

## 2.2 背风面中点的风压系数

图7给出了4种圆角率的3:1二维矩形柱体模型背风面中点的风压系数 $C_{pb}$ 随雷诺数的变化规律。由图7可知,4种圆角率模型的背风面中点的风压系数随雷诺数的变化规律明显不同,对于圆角率为0和5%的模型,其背风面中点的风压系数随雷诺数的变化趋势基本一致,其值随着雷诺数的增大缓慢减小,而圆角率为10%和15%的模型的背风面中点的风压系数的雷诺数效应较复杂,其雷诺数效应曲线在高雷诺数区域出现了明显的跳跃。对于圆角率为10%的模型,当 $Re < 2.0 \times 10^5$ 时,其背风面中点的

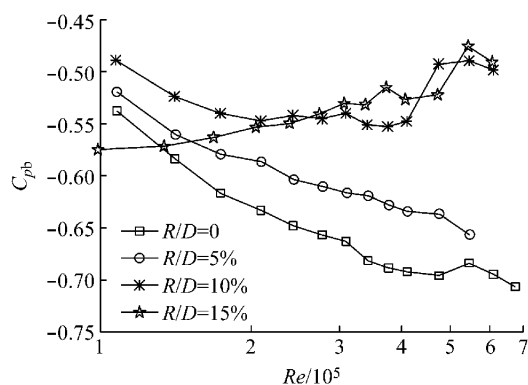


图7 4个模型的背风面中点风压系数随雷诺数的变化规律  
Fig.7 Variation of base pressure coefficients of four models with Reynolds number

风压系数随雷诺数的增大而减小,随后在 $2.0 \times 10^5 < Re < 4.1 \times 10^5$ 的范围内,其背风面中点的风压系数基本不随雷诺数而改变,随着雷诺数的继续增大,模型背风面中点的风压系数出现了明显的跳跃,在 $Re > 4.7 \times 10^5$ 的范围内,其背风面中点的风压系数也基本不发生改变。对于圆角率为15%的模型,当 $Re < 4.7 \times 10^5$ 时,其背风面中点的风压系数随雷诺数的增大而增大,随后当 $Re \approx 4.7 \times 10^5$ 时,其背风面中点的风压系数也出现了明显的跳跃。

## 3 结论

在低紊流度的均匀流场中,利用刚性模型测压试验的方法系统研究了不同圆角处理的3:1二维矩形柱体模型风压分布的雷诺数效应,得到了以下结论:

(1)4种圆角率的3:1二维矩形柱体模型的风压分布都受雷诺数的影响,但圆角率为0和5%的模型的风压分布受雷诺数影响较小,圆角率为10%和15%的模型的风压分布受雷诺数影响明显,在高雷诺数条件下出现了明显的突变。

(2)圆角处理措施对3:1二维矩形柱体模型风压分布的雷诺数效应的影响主要是通过影响气流在模型侧面前缘的分离以及分离剪切层在模型侧面后缘的再附,进而影响其尾流状态,导致模型侧面和背风面风压分布的改变。

(3)不同圆角处理的3:1二维矩形柱体模型的背风面中点的风压系数受雷诺数影响明显,圆角率为0和5%的模型的背风面中点的风压系数随雷诺数的增大缓慢减小,而圆角率为10%和15%的模型的背风面中点的风压系数在高雷诺数区出现了明显的跳跃。

## 参考文献:

- [1] 顾明,张正维,全涌.降低超高层建筑横风向响应的气动措施研究进展[J].同济大学学报:自然科学版,2013,41(3):317.  
GU Ming, ZHANG Zhengwei, QUAN Yong. Aerodynamic measures for mitigation of across-wind responses of super tall buildings: state of the art [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2013, 41(3):317.
- [2] Irwin P A. Bluff body aerodynamics in wind engineering[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(6): 701.

(下转第837页)