

# 雷诺数对不同圆角率 3 : 1 二维矩形柱体气动力的影响

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:** 在低紊流度的均匀流场中对 4 种圆角率( $R/D=0, 5\%, 10\%, 15\%$ )的 3 : 1 二维矩形柱体模型进行了刚性模型测压试验. 试验雷诺数的变化范围为  $1.1 \times 10^5 \sim 6.8 \times 10^5$ , 通过风压时程积分的方法获得了模型的气动力系数时程. 研究了 4 个模型的气动力系数及其功率谱随雷诺数的变化规律. 研究表明, 圆角率为  $R/D=0$  和 5% 的模型的平均阻力系数随雷诺数的增大而增大, 而圆角率为 10% 和 15% 的模型的平均阻力系数、均方根阻力系数和均方根升力系数随雷诺数地增大出现了明显地跳跃. 圆角率为  $R/D=0$  和 5% 的模型的气动力系数功率谱曲线随雷诺数的变化较小, 但圆角率为 10% 和 15% 的模型的气动力系数功率谱曲线呈现了明显的雷诺数效应. 此外, 3 : 1 二维矩形柱体模型的 Strouhal 数随着圆角率的增大而增大.

**关键词:** 雷诺数效应; 二维矩形柱体; 圆角; 气动力系数; 功率谱

**中图分类号:** TU317.1

**文献标志码:** A

## Reynolds Number Effects on Aerodynamic Force Coefficients 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 performed on 3 : 1 rectangular prisms with various rounded corners ( $R/D=0, 5\%, 10\%, 15\%$ ) in low-turbulence uniform flow to measure the surface pressures of four models for the testing Reynolds number ranging from  $1.1 \times 10^5$  to  $6.8 \times 10^5$ . The aerodynamic forces were obtained by integrating the wind pressures on the model surface. Reynolds number effects on the aerodynamic force coefficients and their power spectrums are presented. The results show that drag coefficients of rectangular prisms with  $R/D=0$  and 5% increase with the increasing Reynolds numbers, whereas sudden decreases of the drag coefficients

root mean square (RMS) drag coefficients and RMS lift coefficients are observed for the rectangular prisms with  $R/D=10\%$  and 15%. The power spectrums of drag and lift coefficients for rectangular prisms with  $R/D=0$  and 5% change slightly with the increasing Reynolds numbers, whereas significant influences of the Reynolds number on the power spectrums of aerodynamic force coefficients are found for the models with  $R/D=10\%$  and 15%. Besides, Strouhal numbers of the 3 : 1 rectangular prisms obviously increase with the increasing rounded corner ratio.

**Key words:** Reynolds number effects; 2D rectangular prisms; rounded corner; aerodynamic force coefficient; power spectrum

目前超高层建筑结构抗风措施主要有气动措施、结构措施和机械措施 3 种方法, 其中气动措施用于建筑的方案设计阶段, 它是基于风对结构的作用机理, 能从根源上减小结构的风荷载和风致效应<sup>[1]</sup>. 切角、凹角和圆角处理措施就是典型的高层建筑抗风气动措施<sup>[2-3]</sup>, 但角部处理措施对高层建筑结构雷诺数效应的影响一直没有引起足够的重视. Gu 等<sup>[3]</sup>研究了 6 : 1 : 1 的方形截面高层建筑模型在 5%, 10% 和 20% 的切角率与凹角率下的气动特性, 研究表明切角和凹角处理措施都能有效减小模型的横风向基底弯矩谱的峰值, 其中 10% 的切角率是最优的. Choi 等<sup>[4]</sup>对截面宽厚比( $B/D$ )为 1.0, 1.5 和 2.0 的矩形柱体模型进行了风洞试验研究, 给出了不同凹角率模型的 Strouhal 数以及涡激振动的峰值随攻角变化的拟合公式. Wang 等<sup>[5]</sup>对切角处理的矩形柱体模型的试验研究表明, 切角处理能够显著减小模型的顺风向气动力. Hayashida 等<sup>[6]</sup>通过高频天平测力试验对圆角处理的方形截面高层建筑模型的风荷载特性进行了研究, 研究表明圆角处理措施能够有效

收稿日期: 2014-04-24

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划(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研究. 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研究. E-mail: minggu@tongji.edu.cn

地减小高层建筑横风向气动力谱. Tamura 等<sup>[7]</sup>对特定切角率的方形截面高层建筑模型进行了风洞试验研究,分析了切角与凹角气动措施对建筑表面风压与流场空间分布特性的影响. Tamura 等<sup>[8]</sup>还结合模型风洞试验结果和 CFD (Computational fluid dynamic)数值模拟结果,研究了切角和圆角处理的方柱模型的气动特性,研究表明 CFD 数值模拟所得的平均风压分布和脉动风压分布与风洞试验结果吻合较好. Delany 等<sup>[9]</sup>对截面宽厚比  $B/D=2$  的矩形柱体模型的研究表明:当圆角率为 4.2% 时,模型的平均阻力系数在  $Re \leq 1.0 \times 10^6$  的范围内是不变的,随后平均阻力系数随着雷诺数的增加而减小,在  $Re=1.5 \times 10^6$  处达到最小值,越过最小值点之后,阻力系数随着雷诺数的增大而增大;当圆角率为 16.7% 时,平均阻力系数在  $Re \approx 0.9 \times 10^5$  处开始减小,在  $Re=1.5 \times 10^6$  处达到最小值,随后平均阻力系数开始增大. Larose 等<sup>[10-11]</sup>对不同切角率的矩形柱体模型的雷诺数效应的研究表明:在  $0.3 \times 10^6 \leq Re \leq 2.5 \times 10^6$  的范围内,切角率对截面宽厚比  $B/D=2$  的矩形柱体模型的升力系数雷诺数效应影响很大,而对阻力系数雷诺数效应影响却很小;存在切角的矩形柱体,气流将在切角的第二个边缘位置处分离,这会影响气流在模型两侧面的再附,进而影响结构的气动特性. 长期以来,矩形柱体模型气动力系数的雷诺数效应一直没有引起重视,人们认为矩形柱体模型的气流分离位置是固定的,其气动力系数的雷诺数效应可以忽略不计<sup>[12-13]</sup>. 但上述研究表明,角部处理措施改变了模型的截面形式,模型的气动特性也有可能受雷诺数的影响.

圆角处理会影响气流在模型侧面前缘的分离,也会影响气流在模型侧面的再附,进而影响结构的气动特性,使模型更易受雷诺数的影响. 以往的研究主要针对特定圆角率、凹角率或切角率对建筑模型的风致效应的影响,研究对象以方柱模型为主,并且相关的研究很少涉及角部处理措施对矩形柱体模型的脉动风力和脉动风压的雷诺数效应的影响. 本文系统研究了 4 种圆角率的 3:1 二维矩形柱体模型的气动力系数的雷诺数效应,分析了圆角率对模型气动力系数功率谱的雷诺数效应的影响,试验雷诺数变化范围为  $1.1 \times 10^5 \sim 6.8 \times 10^5$ ,如图 1 所示.

## 1 风洞试验概况

试验在同济大学 TJ-2 风洞中进行,风洞实验段尺寸为 3 m 宽、2.5 m 高、15 m 长,空风洞最高试验

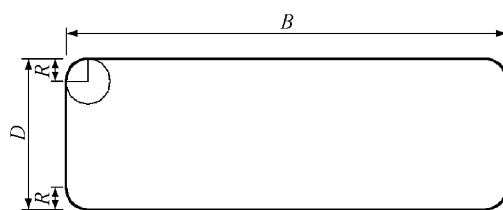


图 1 圆角处理示意图

Fig.1 Sketch of rounded corner modification

风速为  $68 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,流场性能良好. 试验采用低紊流度的均匀流风场,风场的详细标定结果见文献<sup>[14]</sup>. 3:1 二维矩形柱体模型指的是模型的截面宽厚比为 3:1,即模型的顺风向宽度  $B$  与模型的迎风面厚度  $D$  之比. 试验模型的圆角处理如图 1 所示. 圆角率定义为  $R/D$ ,其中  $D$  为模型的迎风面厚度, $R$  为圆角的半径. 试验采用 4 种圆角率的模型: $R/D=0$ 、5%、10%和 15%. 所有模型的迎风面厚度  $D$  为 0.2 m,顺风向宽度  $B$  为 0.6 m,长 1.5 m,4 个模型的测点布置如图 2 所示. 试验堵塞度小于 5%,满足堵塞度的要求. 所有模型均采用 7 mm 有机玻璃板制作,模型表面光滑平整. 模型表面测点间距不超过 20 mm,在角部区域加密,以监测气流分离区的风压变化规律. 试验中扫描阀扫描频率设置为 312.5 Hz,采样时间为 28.8 s. 以试验模型迎风面厚度  $D=0.2 \text{ m}$  为特征尺寸,当试验风速为  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,试验

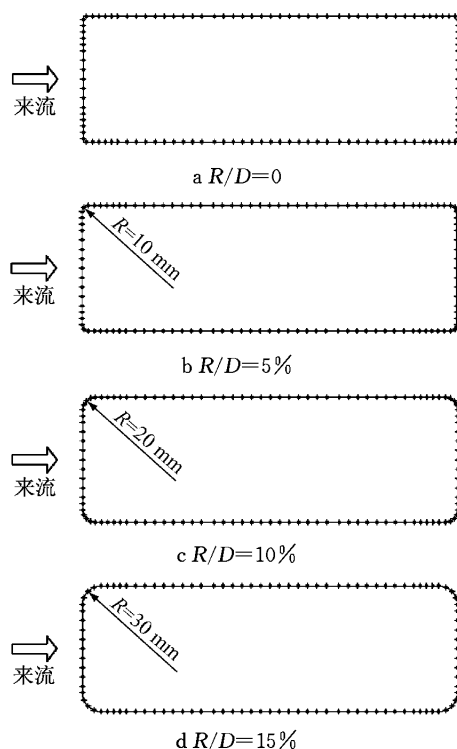


图 2 模型表面测点分布示意图

Fig.2 Sketch of arrangement of pressure taps

所能达到的雷诺数分别为  $1.1 \times 10^5$  和  $6.8 \times 10^5$ . 模型由钢架支撑,具有足够的强度和刚度,在试验风速下不发生变形,并且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[14].

## 2 试验数据处理方法

作用在模型上的气动力(阻力和升力)是通过对模型表面的压力积分所得,模型的阻力系数与升力系数计算公式如下:

$$C_D(t) = \frac{1}{D} \sum_i C_P(i, t) \cdot \Delta S_i \cdot \cos \theta_i \quad (2)$$

$$C_L(t) = \frac{1}{D} \sum_i C_P(i, t) \cdot \Delta S_i \cdot \sin \theta_i \quad (3)$$

式中:  $C_D(t)$  和  $C_L(t)$  分别为模型的阻力和升力系数时程;  $C_P(i, t)$  为测点  $i$  的风压系数时程;  $D$  为模型的迎风面厚度;  $\Delta S_i$  为测点  $i$  所代表的模型表面宽度;  $\theta_i$  为测点  $i$  所受风压方向与来流方向的夹角,取值如图3所示.

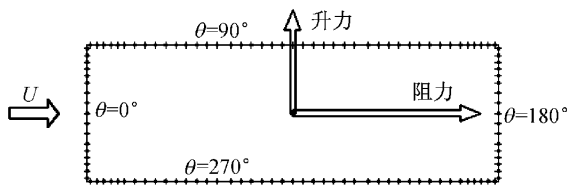


图3 模型阻力与升力示意图

Fig.3 Sketch of the drag and lift force

## 3 试验结果及分析

### 3.1 平均阻力系数的雷诺数效应

不同圆角率的3:1二维矩形柱体模型的平均阻力系数( $C_D$ )随雷诺数的变化规律如图4所示. 由图可知,四种圆角率模型的平均阻力系数随雷诺数的变化规律明显不同,圆角率  $R/D=0$  和5%的模型的平均阻力系数随雷诺数的增大而增大,而圆角率为10%和15%的模型的平均阻力系数随雷诺数的增大出现了明显的跳跃. 对于圆角率为10%的模型,当  $Re < 4.1 \times 10^5$  时,其平均阻力系数基本不随雷诺数而改变,取值约为0.99,随后其平均阻力系数出现跳跃,在  $Re > 4.7 \times 10^5$  的范围内,其平均阻力系数基本不随雷诺数而改变,取值约为0.88. 对于圆角率15%的模型,当  $Re < 4.7 \times 10^5$  时,其平均阻力系数随雷诺数的增大而减小,随后其平均阻力系数也出

现明显地跳跃,由0.84跳跃至0.68,在  $Re > 5.4 \times 10^5$  的范围内,其平均阻力系数随雷诺数的增大而略有增大. 分析4个模型的平均阻力系数随模型圆角率的变化规律可知:随着圆角率地增大,模型的平均阻力系数显著减小,且平均阻力系数的雷诺数效应曲线的斜率越来越小,由正值变为负值. 在试验雷诺数范围内,圆角率为0模型的平均阻力系数最大,取值区间为1.22~1.42;圆角率为5%的模型的平均阻力系数取值区间为1.07~1.23;圆角率为10%的模型的平均阻力系数取值区间为0.88~0.99;圆角率为15%的模型的平均阻力系数最小,取值在0.68~0.98之间.

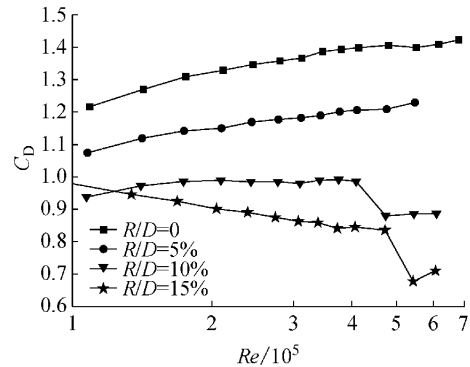


图4 模型的平均阻力系数随雷诺数的变化

Fig.4 Variation of mean drag coefficients with Reynolds number

由上述分析可知,圆角处理使二维矩形柱体模型由钝体向流线体过渡,而圆角率越大的模型越趋于流线体,其平均阻力系数的雷诺数效应也越显著. 此外,随着圆角率的增大,3:1二维矩形柱体模型的平均阻力系数减小,这说明圆角处理使分离剪切层更易再附于模型两侧面,气流的再附使尾流宽度变窄,导致平均阻力系数减小.

### 3.2 均方根阻力系数的雷诺数效应

图5给出了4种圆角率的3:1二维矩形柱体模型的均方根阻力系数( $C_{D,rms}$ )随雷诺数的变化规律. 由图可知,随着圆角率的增大,模型的均方根阻力系数的雷诺数效应越显著. 对于圆角率  $R/D=0$  的模型,其均方根阻力系数随雷诺数的增大呈现先减小后增大的变化规律,但其变化幅度较小,取值区间为0.085~0.100;对于圆角率为5%的模型,其均方根阻力系数基本不随雷诺数而改变,取值约为0.075;对于圆角率为10%和15%的模型,其均方根阻力系数随雷诺数地增大出现了明显地跳跃. 对于圆角率为10%的模型,当  $Re < 4.1 \times 10^5$  时,其均方根阻力系数随雷诺数的增大而略有减小,取值区间

为 0.060~0.070, 随后其均方根阻力系数出现跳跃, 由 0.060 跳跃至 0.036, 在  $Re > 4.1 \times 10^5$  的范围内, 其均方根阻力系数基本不随雷诺数而改变. 对于圆角率为 15% 的模型, 其均方根阻力系数的雷诺数效应更明显, 当  $Re < 4.7 \times 10^5$  时, 其均方根阻力系数随雷诺数的增大而显著减小, 随后其均方根阻力系数也出现跳跃, 由 0.042 跳跃至 0.029, 在  $Re > 5.4 \times 10^5$  的范围内, 其均方根升力系数略有增大. 由上述分析可知, 随着圆角率的增大, 模型的均方根阻力系数随雷诺数变化越明显, 且圆角率为 10% 和 15% 的模型的均方根阻力系数的雷诺数效应曲线出现了明显的跳跃.

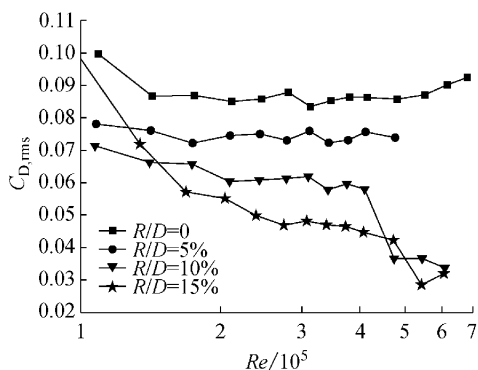


图 5 模型的均方根阻力系数随雷诺数的变化

Fig.5 Variation of the RMS of drag coefficients with Reynolds number

### 3.3 均方根升力系数的雷诺数效应

试验采用完全对称的 3:1 二维矩形柱体模型, 其平均升力系数的取值基本为零, 且基本不随雷诺数而改变, 故本文只分析 4 个模型的均方根升力系数的雷诺数效应. 图 6 给出了不同圆角率的 3:1 二维矩形柱体模型的均方根升力系数 ( $C_L, rms$ ) 随雷诺数的变化规律. 由图可知, 圆角率  $R/D=0$  的模型的均方根升力系数随雷诺数的增大呈现先缓慢增大然后急剧减小的变化规律, 取值区间为 0.75~0.90; 圆角率 5% 模型的均方根升力系数基本不随雷诺数而改变, 取值约为 0.65; 而圆角率为 10% 和 15% 的模型的均方根升力系数呈现明显的雷诺数效应, 随着雷诺数的增大, 其均方根升力系数都出现了明显的跳跃. 对于圆角率为 10% 的模型, 当  $Re < 4.1 \times 10^5$  时, 其均方根升力系数基本不随雷诺数而改变, 取值约为 0.45, 随后其均方根升力系数出现跳跃, 在  $Re > 4.7 \times 10^5$  的范围内, 其均方根升力系数随雷诺数的增大而减小. 对于圆角率为 15% 的模型, 当  $Re < 4.7 \times 10^5$  时, 其均方根升力系数随雷诺数的增大而略有减小, 随后其均方根升力系数也出现跳跃, 由

0.29 跳跃至 0.10, 在  $Re > 5.4 \times 10^5$  的范围内, 其均方根升力系数基本不随雷诺数而改变. 由上述分析可知, 不同圆角率模型的均方根升力系数对雷诺数的敏感程度不同, 圆角率为 10% 和 15% 的模型的均方根升力系数的雷诺数效应更明显, 其雷诺数效应曲线在高雷诺数区域都出现了明显的跳跃.

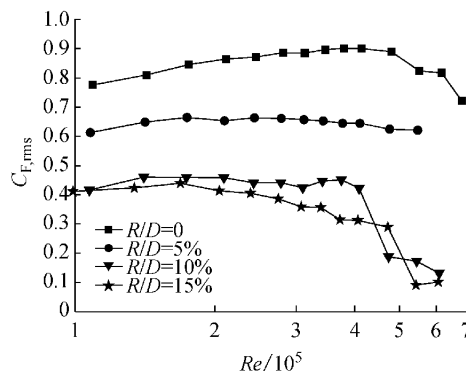


图 6 模型的均方根升力系数随雷诺数的变化

Fig.6 Variation of the RMS of lift coefficients with Reynolds number

### 3.4 脉动阻力系数的功率谱

4 种圆角率的 3:1 二维矩形柱体模型在不同雷诺数条件下的脉动阻力系数功率谱如图 7 所示. 其中,  $\sigma_D^2$  为气动力系数时程的方差;  $S_D(f)$  为气动力系数时程的功率谱;  $f$  为频率. 由图可知: 圆角率  $R/D=0$  和 5% 的模型的脉动阻力系数功率谱曲线出现了两个明显的窄带峰值, 能量在各频率段分布较均匀. 第一个峰值折算频率恰好是横风向脉动升力系数功率谱曲线的峰值折算频率 (即 Strouhal 数), 而第二个峰值折算频率恰好是 Strouhal 数的两倍, 这说明尾流的旋涡脱落对模型顺风向脉动风荷载有一定程度的贡献, 但顺风向脉动风荷载主要还是由顺风向脉动风速产生, 以往对矩形柱体模型的研究也发现了类似的规律<sup>[15]</sup>. 圆角率为 10% 和 15% 的模型的脉动阻力系数功率谱曲线随雷诺数变化明显, 其脉动阻力系数功率谱曲线在低雷诺数区仅出现了一个明显的窄带峰值, 但在高雷诺数区并未出现明显的峰值. 此外, 圆角率为 10% 和 15% 的模型的阻力系数功率谱在高频区的能量随雷诺数的增大而明显增多.

### 3.5 脉动升力系数功率谱

4 种圆角率的 3:1 二维矩形柱体模型在不同雷诺数条件下的脉动升力系数功率谱如图 8 所示, 脉动升力系数功率谱曲线的峰值所对应的折算频率是模型的 Strouhal 数, 可以用来表征漩涡脱落的卓越频率<sup>[16]</sup>. 如图所示,  $\sigma_F^2$  为升力系数时程的方差;

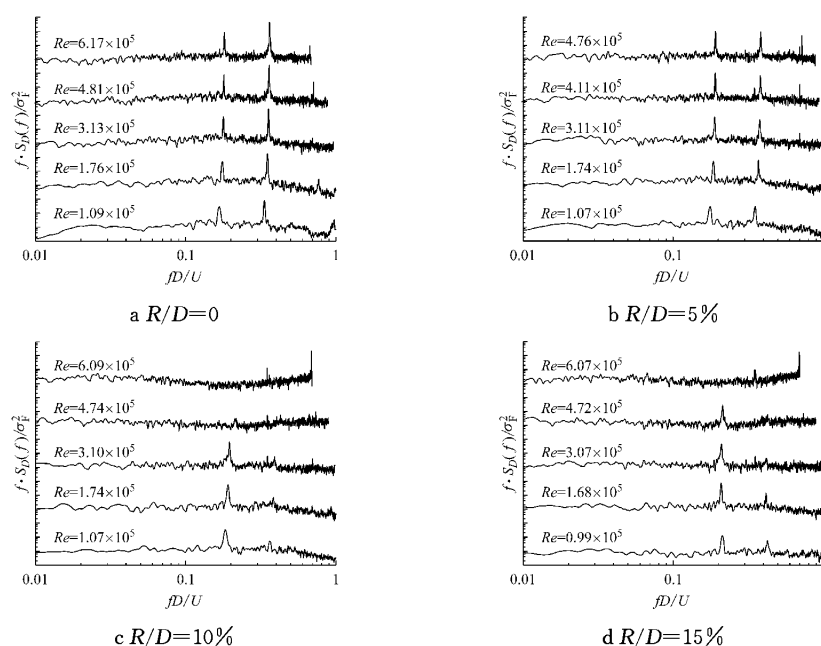


图7 模型的阻力系数功率谱随雷诺数的变化

Fig.7 Variation of the spectra of fluctuating drag coefficients with Reynolds number

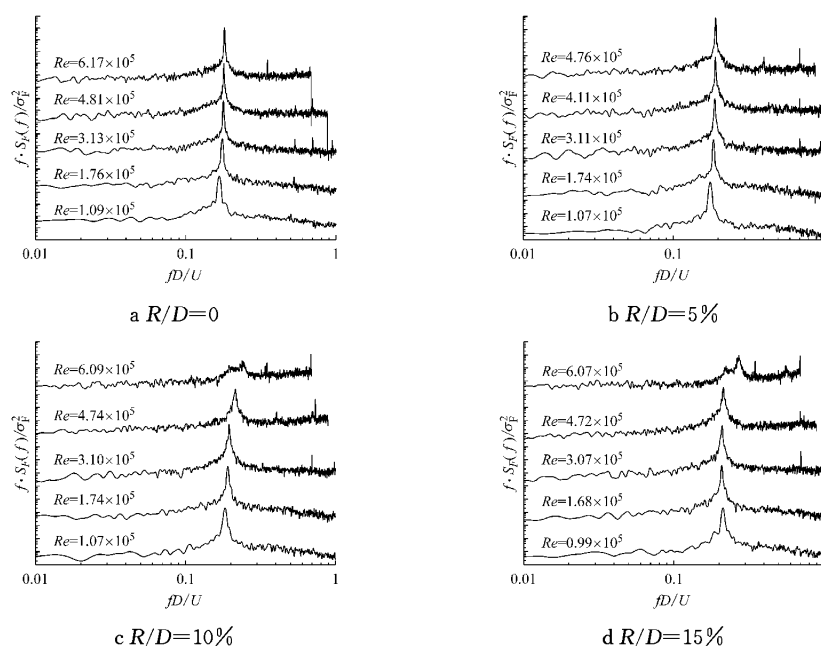


图8 模型的脉动升力系数功率谱随雷诺数的变化

Fig.8 Variation of the spectra of fluctuating lift coefficients with Reynolds number

$S_F(f)$ 为升力系数时程的功率谱; $f$ 为频率.各模型的脉动升力系数功率谱曲线出现明显的峰值,这说明模型的横风向升力主要来源于尾流的漩涡脱落.其中圆角率 $R/D=0$ 和5%的模型的脉动升力系数功率谱曲线随雷诺数的变化较小,但圆角率为10%和15%的模型的脉动升力系数功率谱随雷诺数变化明显.圆角率为10%的模型的脉动升力系数功率谱的峰值折算频率随雷诺数的增大而向高频区移动,

且功率谱曲线的峰值降低,与此同时,能量在高频段明显增大.当 $Re=6.07 \times 10^5$ 时,圆角率为15%的模型的脉动升力系数功率谱曲线呈现明显的变化,Strouhal数明显增大,能量在高频段明显增多.不同圆角率模型的Strouhal数在5个雷诺数条件下的取值范围如表1所示,圆角率对3:1二维矩形柱体模型的Strouhal数影响很大,模型的Strouhal数随着圆角率的增大而明显增大.

表1 不同圆角率模型的峰值折算频率取值范围

Tab.1 Peak frequencies of models with various rounded

corners	
$R/D/\%$	Strouhal 数
0	0.167~0.181
5	0.176~0.192
10	0.183~0.239
15	0.209~0.272

## 4 结论

在低紊流度的均匀流场中,系统研究了4种圆角率( $R/D=0,5\%,10\%,15\%$ )的3:1二维矩形柱体模型的雷诺数效应,雷诺数变化范围为 $1.1\times 10^5\sim 6.8\times 10^5$ ,得到了以下结论:

(1) 圆角处理对3:1二维矩形柱体模型的平均阻力系数的雷诺数效应有明显的影响.圆角率 $R/D=0$ 和5%的模型的平均阻力系数随雷诺数的增大而增大,而圆角率为10%和15%的模型的平均阻力系数随雷诺数的增大出现了明显的跳跃,这说明圆角率越大的模型越趋于流线体,其平均阻力系数的雷诺数效应也越明显.此外,3:1二维矩形柱体模型的平均阻力系数随圆角率的增大而减小.

(2) 不同圆角率的3:1二维矩形柱体模型的均方根气动系数对雷诺数的敏感程度不同,当圆角率为10%和15%时,模型的均方根气动系数的雷诺数效应曲线在高雷诺数区都出现了明显的跳跃.

(3) 圆角率 $R/D=0$ 和5%的模型的脉动阻力系数和脉动升力系数功率谱曲线随雷诺数的变化较小,但圆角率为10%和15%的模型的脉动阻力系数和脉动升力系数功率谱曲线随雷诺数变化明显.圆角率为10%和15%的模型的脉动升力系数功率谱曲线在高雷诺数区域呈现明显的变化,功率谱曲线的峰值降低,Strouhal数明显增大.此外,圆角处理对3:1二维矩形柱体模型的Strouhal数影响很大,模型的Strouhal数随着圆角率的增大而增大.

## 参考文献:

- [1] 顾明,张正维,全涌.降低超高层建筑横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.
- [3] Gu M, Quan Y. Across-wind loads of typical tall buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2004, 92(13): 1147.
- [4] Choi C K, Kwon D K. Effects of corner cuts and angles of attack on the Strouhal number of rectangular cylinders [J]. Wind and Structures, 2003, 6(2): 127.
- [5] Wang J M, Cheng C M, Tens P T. Design wind loads on tall buildings: a wind tunnel data based expert system approach [C]// Proceedings of 11th International Conference on Wind Engineering. Lubbock: International Association for Wind Engineering (IAWE), 2003:531-538.
- [6] Hayashida H, Iwasa Y. Aerodynamic shape effects of tall building for vortex induced vibration [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, 33(1): 237.
- [7] Tamura T, Miyagi T. The effect of turbulence on aerodynamic forces on a square cylinder with various corner shapes [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 83(1): 135.
- [8] Tamura T, Miyagi T, Kitagishi T. Numerical prediction of unsteady pressures on a square cylinder with various corner shapes [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74: 531.
- [9] Delany N K, Sorensen N E. Low-speed drag of cylinders of various shapes [R]. Washington D C: National Advisory Committee for Aeronautics, 1953.
- [10] Larose G L, D'Auteuil A. On the Reynolds number sensitivity of the aerodynamics of bluff bodies with sharp edges [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2006, 94(5): 365.
- [11] Larose G L, D'Auteuil A. Experiments on 2D rectangular prisms at high Reynolds numbers in a pressurised wind tunnel [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(6): 923.
- [12] Dalglish W A. Cladding pressure on commerce court tower [C]//Symposium on Full Scale Measurement of Wind Effects on Tall Building and Other Structure. Ottawa: University of Toronto Press, 1974:23-29.
- [13] Scanlan R H. Airfoil and bridge deck flutter derivatives [J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1971,97: 1717.
- [14] 王新荣,顾明,全涌.低紊流度下二维矩形柱体模型表面风压分布的雷诺数效应[J].建筑结构学报,2015,36(1):25.
- WANG Xinrong, GU Ming, QUAN Yong. Reynolds number effects on the wind pressure distributions of 2-D rectangular prisms in low turbulence flow [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(1): 25.
- [15] 顾明,项海帆.几种矩形二维柱体节段模型上脉动力的测量[J].空气动力学学报.1994,12(1):115.
- GU Ming, XIANG Haifan. Measurements of Fluctuating Force on 2-Dimensional Models of Rectangular Cylinders [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1994, 12(1):115.
- [16] Liang S G, Liu S C, Li Q S, et al. Mathematical model of acrosswind dynamic loads on rectangular tall buildings [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(12): 1757.