

车身非光滑表面凹坑排布对气动性能的影响*

谢非¹, 丁玉梅¹, 秦柳¹, 虞华春², 杨卫民¹

(1. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029;
2. 宁波格林美孚新材料科技有限公司, 浙江 宁波 315000)

摘要: 受仿生学非光滑旋成体减阻启发,以 SAE(美国机动车工程师协会)标准模型为研究对象,采用 CFD(计算流体力学)数值模拟方法,在 SAE 模型顶部布置不同排布形式和不同排布密度的凹坑单元,研究其对车身气动性能的影响.通过比较各模型的尾流、气流速度、压力场、湍流动能等流场性能指标,分析非光滑表面减阻机理以及造成各模型流场性质差异的原因.计算结果显示:当凹坑型非光滑单元以矩形排布时模型具有最小的气动阻力,且气动阻力随着凹坑密度的增加而减小,减阻率最高达到 4.1%.

关键词: 减阻; SAE 模型; CFD; 非光滑表面

中图分类号: O355; U461.1 **文献标志码:** A

doi: 10.3879/j.issn.1000-0887.2015.05.006

引言

汽车气动性能的优化对于改善汽车动力性和燃油经济性有着重要意义.目前优化汽车气动特性主要通过改变车身流线和局部细节来实现^[1].但随着车身设计理念的成熟和改进方法的完善,车身减阻空间越来越小.近年来,仿生学研究发现非光滑结构能够改变流场性质^[2]并已经成功应用到各种领域,凹坑型高尔夫球比光滑表面的高尔夫球飞行距离更远,鲨鱼皮沟槽型泳衣能够在水下使运动员承受更小的阻力^[3].以上成功应用案例为车身减阻提供了新的思路^[4].

文献[5]将不同类型的非光滑结构和不同的位置分布方案进行正交实验,减阻率最高能达到 5.45%.文献[6]指出将半球形凹坑组合放置在车身顶部、底部、尾部、行李舱盖有较好的效果,减阻率最大为 5.90%.文献[7]对发动机前罩采用沟槽式非光滑表面处理,减阻率达到 8.68%,以上研究证实了非光滑表面在车身减阻方面的可行性^[5-7].

为了更有效地利用仿生非光滑表面的减阻特性,本文对凹坑型非光滑表面的排布对减阻情况的影响进行研究,在阶背式 SAE 标准模型顶部采用不同排布形式,选出最优排布形式后采用不同排列密度再比较减阻率,研究排布形式、排布密度与减阻率的关系,为工程应用提供依据.

* 收稿日期: 2014-08-29; 修订日期: 2015-03-20

作者简介: 谢非(1990—),男,黑龙江人,硕士生(E-mail: xiefei19900702@163.com);
杨卫民(1965—),男,湖南人,教授,博士,博士生导师,长江学者(通讯作者).
E-mail: yangwm@mail.buct.edu.cn).

1 光滑表面模型数值模拟与实验验证

1.1 计算模型的建立

仿真模型采用阶背式 SAE 标准模型,根据文献[8]设定的尺寸参数,重要参数如下:总长 4 200 mm,总宽 1 600 mm,车高 1 200 mm,离地间隙 200 mm,轴距 2 450 mm,轮距 1 300 mm,胎宽 175 mm,横向倒角半径 200 mm,纵向倒角半径 250 mm^[8]。外形如图 1 所示。

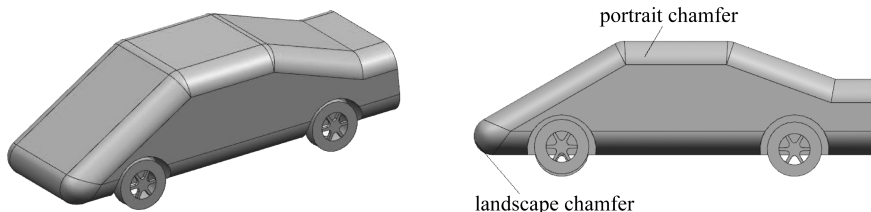


图 1 SAE 标准模型

Fig. 1 The SAE model

1.2 网格划分及求解

为提高计算精度,应使计算域足够大,确保外流场充分发展。所以设定长方体计算域,尺寸如下:车前部留 2 倍车长,车后部留 8 倍车长,上方留 5 倍车高,左右各留 4 倍车宽,离地间隙 200 mm,总长 46 m,总宽 12 m,总高 7 m。运用 GAMBIT 进行网格划分,根据文献[9-10]的划分方法,六面体规则网格虽然质量高,但是不适合应用在结构复杂的车身附近,所以本文采用结构网格和非结构网格相结合的方式。在车身周围向外依次采用适应性较强的三棱柱、四面体网格,对车身周围和尾涡区域进行适当加密,流体最外侧运用六面体网格,密度稍小^[9-10]。

边界条件设置为:采用 Fluent 进行计算,计算域入口设置为速度进口,速度为 40 m/s;计算域出口为压力出口;计算域上边界和侧边界设置为自由滑移壁面;车身及地面设置为固定无滑移壁面;设置车轮以相应角速度旋转。湍流方程选用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型。

1.3 实验验证

为确保数值模拟的可靠性,将数值模拟结果根据式(1)所得气动阻力系数与风洞实验结果进行对比,其中 F_x 表示行驶方向所受阻力, ρ 为空气密度, v 为气流速度, A 为车身正面投影面积。美国宾夕法尼亚州立大学利用亚声速风洞对上翘角 0° 、离地间隙 200 mm 的阶背式 SAE 标准模型进行风洞试验,气动阻力系数实验值为 0.269^[8],本文数值模拟结果为 0.275 3,误差为 2.3%,证明了本文所用的数值分析方法的合理性,保证了下文研究的可靠性。

$$C_d = \frac{F_x}{\rho v^2 A / 2} \quad (1)$$

2 凹坑排布形式对减阻性能的影响

2.1 非光滑单元体不同形式排布及尺寸

非光滑表面的布置位置应该选在能够对整车流场产生影响的位置。车身顶部是车身各部分中壁面空气流速最高的部分,所以本文在模型顶部布置凹坑型非光滑单元并比较不同排布方式和排列密度对减阻率造成的影响。

仿生非光滑减阻方法的原理,就是通过对边界层的控制来减少湍流猝发强度^[11],所以凹

坑型非光滑表面单元体的深度必须小于其布置位置的边界层厚度 δ ，由此需对 δ 进行估算以便设置凹坑深度，边界层厚度 δ 计算公式^[12]为

$$\delta = 0.035l/Re(l)^{1/7}, \tag{2}$$

式中， l 为平板长度，取 1 084 mm； $Re(l)$ 为 Reynolds 数，其公式为

$$Re(l) = Vl/\nu, \tag{3}$$

式中， V 是来流速度，取 40 m/s； ν 是运动粘度系数，取 0.072 2 m²/s。

因此得出车身顶部凹坑最大深度为 15.21 mm，为了保证凹坑特征显著且小于最大深度，本文取深度 14 mm。为研究排布形式对减阻性能的影响，本文采用矩形排列、菱形排列和等差排列 3 种排布形式对比，如图 2 所示。

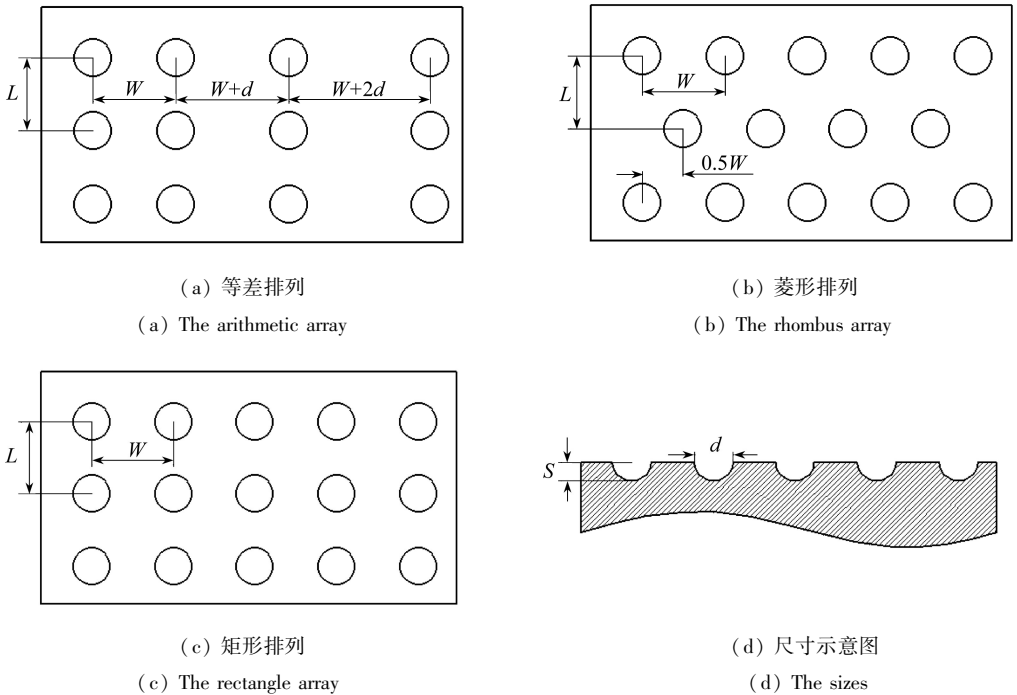


图 2 单元体尺寸及排列示意图

Fig. 2 Schematic of dimensions and arrangements of the dimple units

本文中取： $S = 14$ mm， $d = 28$ mm， $W = 130$ mm， $L = 100$ mm。

2.2 计算结果

为了减小网格差异对数值模拟结果的影响，对带有非光滑单元模型进行网格划分时，对凹坑表面部分进行细化，其它位置网格和光滑表面模型网格划分保持一致。对所有模型的收敛精度设为 10^{-6} ，其余边界条件与原始模型边界条件相同。经过 CFD 仿真，不同排布形式数值模拟结果 C_d (阻力系数) 以及减阻率 $\Delta C_d/C_d$ 如表 1 所示。其中减阻率是对减阻效果的判断指标，公式如下：

$$\frac{\Delta C_d}{C_d} = \frac{C_d - C_{d1}}{C_d}, \tag{4}$$

式中， C_d 为光滑表面模型阻力系数， C_{d1} 为非光滑表面模型阻力系数。在光滑模型顶部分别放置相同密度、相同尺寸、不同排布形式的凹坑，通过 CFD 数值模拟得出各模型的阻力系数并与

光滑模型进行比较.通过表 1 可知,矩形排布形式减阻率最明显,可达到 2.18%.

表 1 不同排布形式减阻率比较

Table 1 The drag reduction ratios of the non-smooth surface with different dimple array types

	array type			
	smooth surface model	arithmetic	rhombus	rectangle
C_d	0.275 3	0.273 4	0.272 2	0.269 3
drag reduction ratio $D / \%$		0.69	1.12	2.18

3 排列密度对减阻性能的影响

3.1 非光滑单元体不同密度排布及尺寸

根据上文结论,本小节在光滑模型顶部分别对凹坑采用 3 种不同密度矩形分布.非光滑模型 1 分布密度 $L \times W = 130 \times 100 \text{ mm}^2$,非光滑模型 2 分布密度 $L \times W = 100 \times 80 \text{ mm}^2$,非光滑模型 3 分布密度 $L \times W = 60 \times 40 \text{ mm}^2$,3 种模型凹坑深度为 14 mm,如图 3 所示.

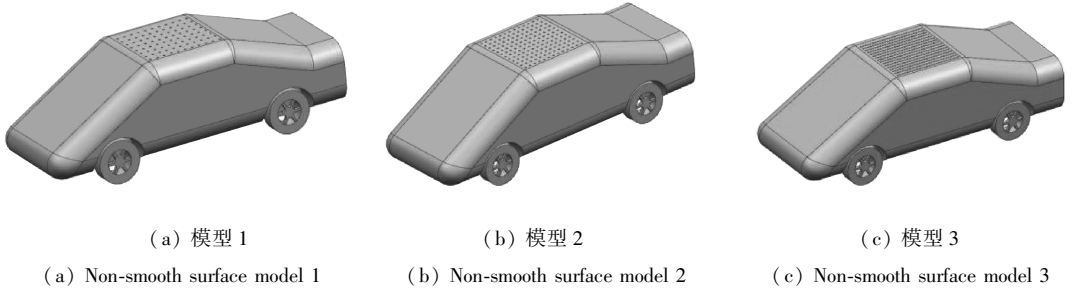


图 3 非光滑表面模型

Fig. 3 The non-smooth surface models

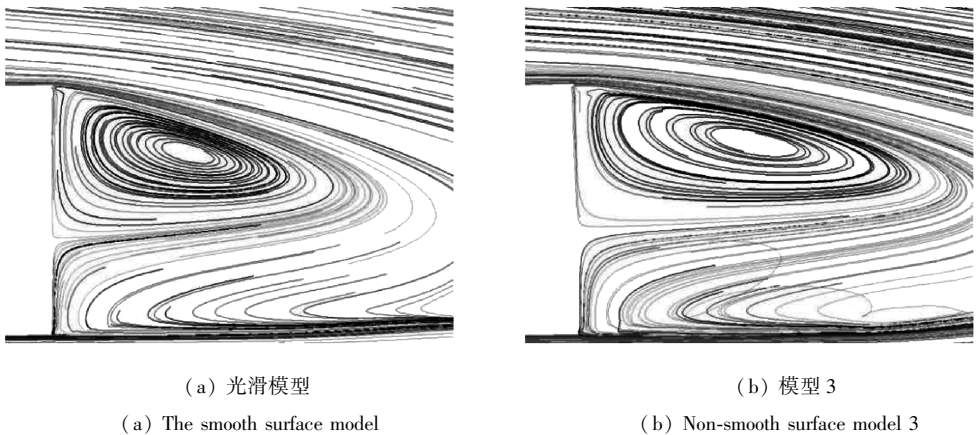


图 4 尾流迹线图

Fig. 4 Diagrams of path lines of the wake flow

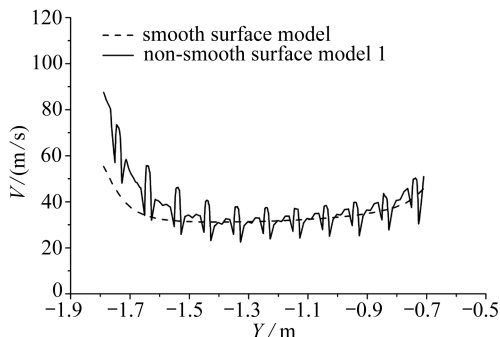
3.2 非光滑表面对尾流的影响

图 4 为光滑模型和非光滑模型 3 尾流对比图,由图可知非光滑模型 3 的尾流涡旋形状较为狭长,扩展范围并未改善,但是尾涡中心距离车尾较远,说明非光滑模型 3 车尾受到尾流涡旋中心低压区影响较小,压差阻力得到改善.非光滑模型 1,模型 2 尾涡性质和模型 3 相同,但是改善效果不如模型 3 明显.

3.3 非光滑表面对气流速度的影响

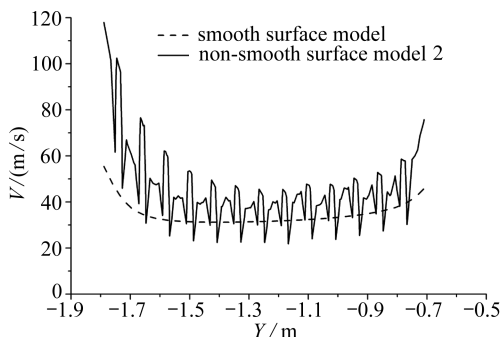
分别对光滑模型和非光滑模型在距离车身顶部 5 mm 处设置速度采集点,绘制速度曲线对比图,其中 V 为采集点速度大小, Y 为采集点在车身上沿气流方向的相对位置。

由图 5 可知,气流流过非光滑表面之后速度相对于光滑模型发生波动,气流速度总体上较光滑模型明显上升。每个非光滑单元在造成速度波动的同时提升气流速度,减小垂直于地面方向的速度梯度,总体上动量传递量减少,动量耗散减少,从而减小了气动阻力。随着凹坑密度的增加,气流速度整体呈上升趋势。



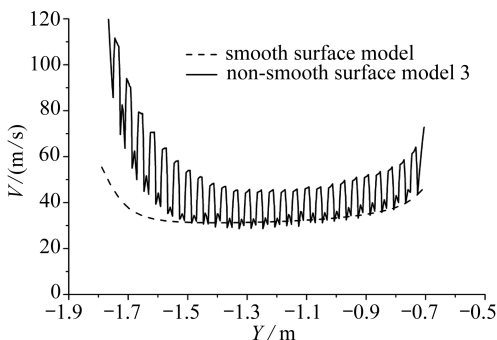
(a) 非光滑模型 1

(a) Non-smooth surface model 1



(b) 非光滑模型 2

(b) Non-smooth surface model 2



(c) 非光滑模型 3

(c) Non-smooth surface model 3

图 5 速度对比曲线

Fig. 5 Comparison of the airflow velocities

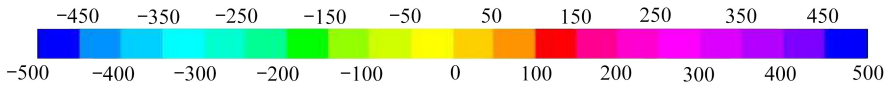
3.4 非光滑表面对压力场的影响

汽车行驶过程中气流和车头发生正面相遇,将形成流场中的正压区,几种模型前部结构不变,所以前部压力分布相同,压差阻力主要来源于车身尾部气流^[13]。图 6 为纵对称面上车尾负压区压力云图对比,由图可知,非光滑模型 3 尾部压力相对于光滑模型有所改善,负压区域减小,在车头承受正压不变的情况下,前后压差减小,导致气动阻力减小。非光滑模型 1 和 2 尾部负压区范围也有改善,但效果不明显。

3.5 湍流动能

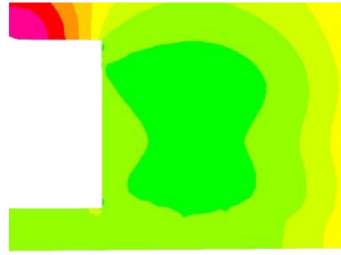
图 7 为距车尾 500 mm 处截面的湍流动能云图。3 个非光滑模型的湍流动能较光滑模型都有不同程度的减少,说明相对于流过光滑模型,气流流过非光滑模型时能量耗散较小,所以气

动阻力较光滑模型有所改善。



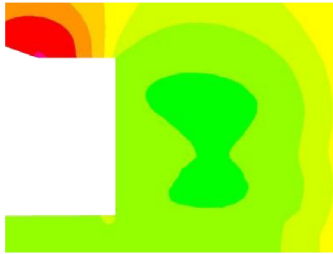
(a) 光滑模型

(a) The smooth surface model



(b) 非光滑模型 1

(b) Non-smooth surface model 1



(c) 非光滑模型 2

(c) Non-smooth surface model 2



(d) 非光滑模型 3

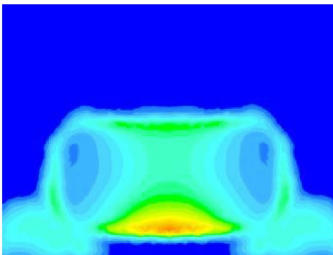
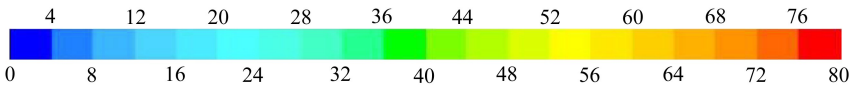
(d) Non-smooth surface model 3

图 6 尾部压力云图(单位: Pa)

Fig. 6 Pressure contours of the rear of models(unit: Pa)

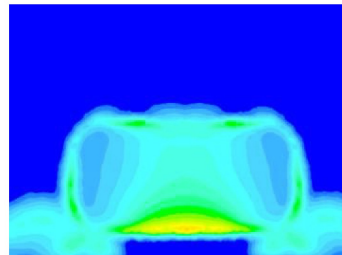
3.6 计算结果

采用上文所用网格划分方法对 3 种模型进行前处理,对非光滑表面进行网格细化,其它部分保持一致,边界条件设置和上文保持一致.经过 CFD 计算,由表 2 可知减阻率随着凹坑密度的提高而提高,模型 3 减阻率达到 4.10%.



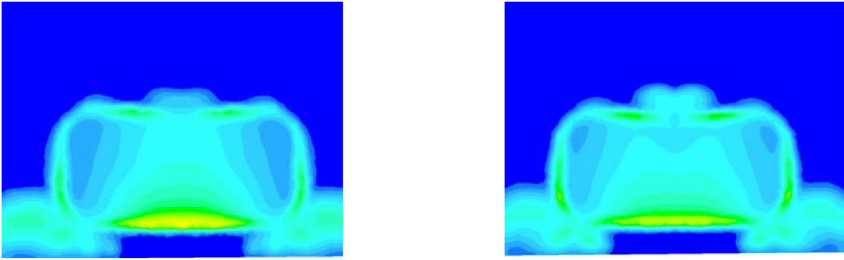
(a) 光滑模型

(a) The smooth surface model



(b) 非光滑模型 1

(b) Non-smooth surface model 1



(c) 非光滑模型 2

(d) 非光滑模型 3

(c) Non-smooth surface model 2

(d) Non-smooth surface model 3

图 7 湍流动能云图(单位: m^2/s^2)

Fig. 7 Contours of the turbulence energy(unit: m^2/s^2)

表 2 不同排布密度减阻率比较

Table 2 The drag reduction ratios of non-smooth surface models with different dimple array densities

	model number			
	smooth surface model	non-smooth surface model 1	non-smooth surface model 2	non-smooth surface model 3
C_d	0.275 3	0.269 3	0.266 7	0.264
drag reduction ratio $D/\%$		2.18	3.12	4.10

4 机理分析

汽车行驶过程中气动阻力主要由气流分离造成的压差阻力和空气与车身之间的摩擦阻力,其中压差阻力是气动阻力的最主要部分,非光滑车身减阻的原理就是通过非光滑单元对气流边界层进行控制,减小湍流的猝发程度。

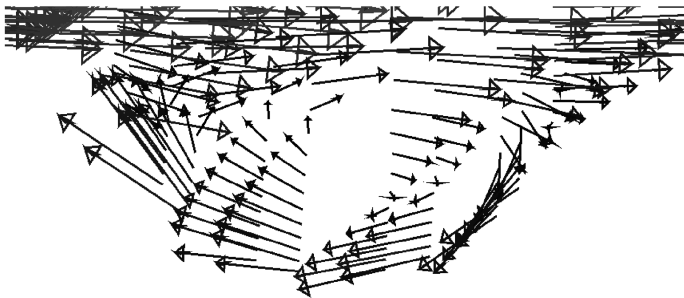


图 8 凹坑速度矢量图

Fig. 8 Velocity vectors within the dimple unit

图 8 为凹坑速度矢量图,由图可知气流流过凹坑时,在其内部形成一个小涡旋,相对于之前气流和车身之间的滑动摩擦,这种小型涡旋相当于滚珠,把滑动摩擦变为滚动摩擦,减小了气流和车身的摩擦阻力.图 9 为顶面凹坑处切应力对比云图,图中凹坑及其周围切应力较其它位置大大减小,验证了摩擦阻力的减小.由图 5、图 6 可知,相对于光滑表面车身,涡旋周围上方的气流免受滑动剪切阻力的影响,具有更高的速度,减少了垂直于地面方向上的速度梯度,减小了动量传递,气流分离延迟发生,改变了尾流的结构,使得压差阻力减小.从图 9 可以看出,凹坑可以减小它附近一定区域内的剪切应力,所以在一定数值范围内增加凹坑密度,涡旋

滚动摩擦阻力效果增加,气流速度增加,动量耗散减少,整体减阻效果增加明显.当凹坑之间的间距小到一定程度时,它们的作用区域会发生重叠,这将会减小它们整体的减阻效率.当密度到达一个值的时候减阻率增加会越来越缓慢直到基本保持不变,最后当密度无限大的时候再度形成光滑平面,减阻效应消失.

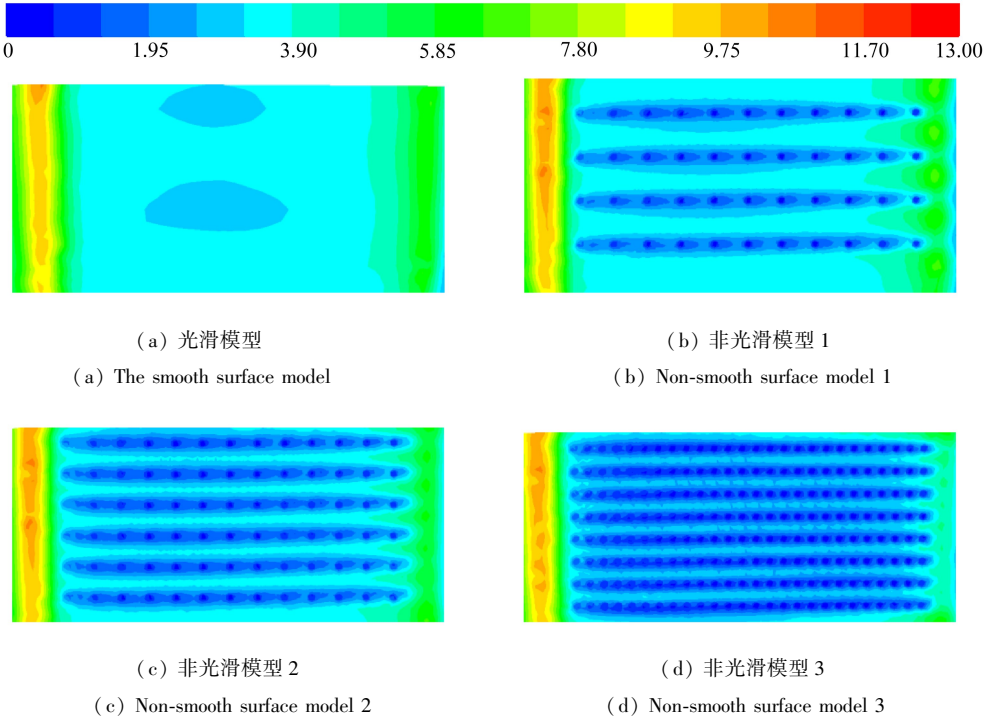


图9 顶面切应力对比图(单位:Pa)

Fig. 9 Comparison of wall shear stresses on the top surface(unit: Pa)

5 结 论

与其它文献在不同位置布置不同形式非光滑单元以获得最优减阻率不同,本文旨在探究布置方式对减阻率的影响,在同一位置上变换布置方式并比较减阻率变化规律,所以在减阻率数值上还有很大提升空间.根据本文所做计算工作,现得出3点结论如下:

- 1) 凹坑型非光滑单元通过合理的排布形式和排布密度放置在车身顶部可以一定程度减小气动阻力;
- 2) 凹坑型非光滑单元最优排布方式为矩形排布,在一定数值范围内凹坑排布密度的增加会使减阻效果增加,本文得到最佳减阻率为4.1%;
- 3) 凹坑型非光滑单元能够在其内部形成小型涡旋,从而减小摩擦阻力,减小压差阻力,减小湍流动能损失,进而达到减阻效果.

参考文献(References):

[1] 张英朝. 汽车空气动力学数值模拟技术[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011: 43-45. (ZHANG Ying-chao. *Numerical Simulation Technology of Automotive Aerodynamics*[M]. Beijing: Peking University Press, 2011: 43-45. (in Chinese))

- [2] Ren L Q, Han Z W, Tian L M, Li J Q. Characteristics of the non-smooth surface morphology of living creatures and its application in agricultural engineering[J]. *Design and Nature II*, 2004, **6**(1): 275-284.
- [3] ZHANG De-yuan, LI Yuan-yue, HAN Xin, LI Xiang, CHEN Hua-wei. High-precision bio-replication of synthetic drag reduction shark skin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(9): 938-944.
- [4] Lee S J, Jang Y G. Control of flow around a NACA 0012 airfoil with a micro-riblet film[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2005, **20**(5): 659-672.
- [5] 谌可, 王耘, 曹开元, 宋小文. 仿生非光滑汽车表面的减阻分析[J]. 中国机械工程, 2012, **23**(8): 1001-1006.(CHEN Ke, WANG Yun, CAO Kai-yuan, SONG Xiao-wen. Analysis of aerodynamic drag reduction on automobile by using bionic non-smooth surface[J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, **23**(8): 1001-1006.(in Chinese))
- [6] 杨易, 伍奕桦, 范光, 徐永康, 聂云. 车身非光滑表面组合布置对气动特性影响分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, **40**(11): 40-45.(YANG Yi, WU Yi-hua, FAN Guang, XU Yong-kang, NIE Yun. Analysis of the influence of non-smooth surface combination arrangement on aerodynamic characteristic [J]. *Journal of Hunan University (Nature Science)*, 2013, **40**(11): 40-45.(in Chinese))
- [7] 张国耕. 车身仿生非光滑表面气动减阻特性研究[D]. 硕士学位论文. 浙江: 浙江大学, 2010.(ZHANG Guo-geng. Mechanism research on aerodynamic drag reduction of vehicle body with bionic non-smooth surface[D]. Master Thesis. Zhejiang: Zhejiang University, 2010.(in Chinese))
- [8] 叶辉. 汽车尾部上翘角与离地间隙的 CFD 研究[D]. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学, 2006.(YE Hui. A parametric study on the diffuser and ground clearance of a simplified car model using CFD[D]. Master Thesis. Changchun: Jilin University, 2006.(in Chinese))
- [9] 董立伟, 谷正气, 刘水长, 王宁. 网格划分对汽车外流场数值计算影响的研究[J]. 汽车科技, 2012(1): 12-15.(DONG Li-wei, GU Zheng-qi, LIU Shui-chang, WANG Ning. Effect of meshing on numerical simulation of external flow field around vehicle[J]. *Auto Mobile Science & Technology*, 2012(1): 12-15.(in Chinese))
- [10] 涂尚荣, 张扬军, 谢今明, 杨胜, 郑孟伟. 汽车外部流场仿真的复杂网格系统生成[J]. 汽车工程, 2012, **24**(5): 408-411.(TU Shang-rong, ZHANG Yang-jun, XIE Jin-ming, YANG Sheng, ZHENG Meng-wei. Grid generation for CFD simulation of vehicle aerodynamics[J]. *Automotive Engineering*, 2012, **24**(5): 408-411.(in Chinese))
- [11] 赵继妮. 仿生非光滑表面旋成体减阻性能分析[D]. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学, 2005.(ZHAO Ji-ni. Analysis of drag reduction on revolution bodies with bionic non-smooth surface [D]. Master Thesis. Changchun: Jilin University, 2005.(in Chinese))
- [12] 赵军. 凹坑形仿生非光滑表面的减阻性能研究[D]. 硕士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2008.(ZHAO Jun. Study of drag reduction of the dimple bionic non-smooth surface [D]. Master Thesis. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.(in Chinese))
- [13] SONG Xiao-wen, ZHANG Guo-geng, WANG Yun, HU Shu-gen. Use of bionic inspired surfaces for aerodynamic drag reduction on motor vehicle body panels[J]. *Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering)*, 2011, **12**(7): 543-551.

Effects of Non-Smooth Surface Dimple Configuration on Vehicle Body Aerodynamic Characteristics

XIE Fei¹, DING Yu-mei¹, QIN Liu¹, YU Hua-chun², YANG Wei-min¹

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, P.R.China;*

2.Ningbo GMF New Material Technology Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315000, P.R.China)

Abstract: According to the idea of bionic non-smooth revolution bodies, the SAE (Society of Automobile Engineers) standard model was selected as the object of study, and the computational fluid dynamics (CFD) method was used to investigate the effects of different non-smooth surface dimple array forms and densities on the aerodynamic performance of vehicle bodies. Through comparison of such flow field performance indicators as wake flow, airflow velocity, pressure field and turbulence kinetic energy between various models, the drag reduction mechanism of the dimpled non-smooth surface and the reasons for the difference of flow field properties between those models were analyzed. The results show that the minimum aerodynamic drag occurs when the dimple units are arranged in a rectangular configuration, and the aerodynamic drag decreases along with the longitudinal dimple distribution density, attaining the highest drag reduction ratio up to 4.1%.

Key words: drag reduction; SAE model; CFD; non-smooth surface