

## 类车体尾迹区雷诺应力实验分析

朱 晖, 杨志刚

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

**摘要:** 对后倾角  $35^\circ$  类车体在模型风洞中进行实验, 运用 3 维热线风速仪在选定测点上对空间 3 个速度分量进行采样. 对采得的瞬时值进行统计分析, 并制成雷诺应力分量云图. 由图谱可知: 类车体尾迹区流动以一对拖曳涡为其主要特征, 地面效应影响至流动远场, 雷诺应力分量的分布特征随离车体的远近而变化.

**关键词:** 类车体; 雷诺应力; 风洞实验

**中图分类号:** O 355; U 461.1

**文献标识码:** A

### Experimental Analysis of Reynolds Stress in Wake of Ahmed Model

ZHU Hui, YANG Zhigang

(College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The Ahmed model with  $35^\circ$  slant angle was tested in the model wind tunnel. The components of velocity were captured by using 3D CTA. By statistically analysis with the transient value of velocity, the contour spectrums of Reynolds stress components were presented. According to the spectrums, the feature of the flow structure is showed with drag vortex pair and ground effect extending to far field. The distribution characteristic of the stress components varies with the distance from model body.

**Key words:** ahmed body; Reynolds stress; wind tunnel test

气流流经车体时, 主要在车体尾部形成分离区. 由于压差阻力占气动阻力的主要份额, 所以分离区中的流场结构一直是车辆空气动力学研究的核心问题之一<sup>[1]</sup>.

当类车体模型(Ahmed model)在 1984 年被引入后<sup>[2]</sup>, 由于其外流场具有 3 维、非稳态、近地面的特

点, 使其成为研究车辆空气动力学的重要模型之一. 通常, 在实验研究和数值计算中, 以压力和速度为研究对象, 揭示类车体尾迹区的流场结构<sup>[2-4]</sup>, 因此缺乏对尾迹区流场中雷诺应力分布特征的规律性认识.

湍流的主要流动特性就是湍流内部存在涡体结构的脉动运动, 涡体结构的脉动势必引起动量交换, 由此产生雷诺应力. 与速度和压力相比, 雷诺应力从动量的角度, 反映流场中各类漩涡的运动特征.

本文以模型风洞实验台为基础, 运用 3 维热线风速仪, 对后倾角  $35^\circ$  类车体的尾迹区内流场结构中的雷诺应力分布特征进行研究, 从脉动运动相关性的角度揭示尾迹区涡运动特性, 力图在进一步揭示汽车尾迹区流场结构的基础上, 为车辆外型设计以及数值计算提供可靠的依据.

### 1 实验台及主要仪器

本次实验台架为同济大学地面交通工具风洞中心空气动力学风洞 1:15 缩比模型, 如图 1 所示. 由风道、风机、拐角叶片、阻尼网、升降地板构成.

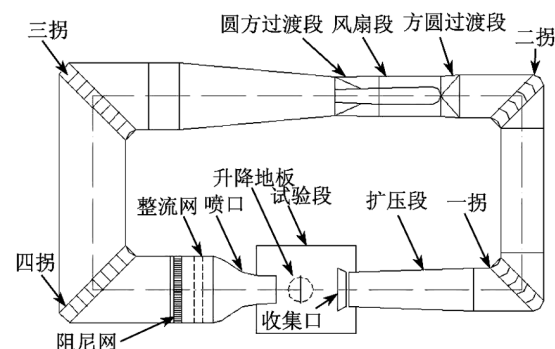


图 1 模型风洞平面图

Fig.1 Plan of model wind tunnel

收稿日期: 2010-07-19

基金项目: 国家“九三七”重点基础研究发展计划(2011CB711200)

第一作者: 朱 晖(1977—), 男, 工学博士, 主要研究方向为汽车空气动力学. E-mail: zhuhuisuccess@163.com

通讯作者: 杨志刚(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为空气动力学、湍流模型及流动稳定性等.

E-mail: zhigangyang@tongji.edu.cn

风道系统采用有机玻璃钢制作,驻室长、宽、高尺寸分别为  $L = 1\,517\text{ mm}$ ;  $W = 1\,185\text{ mm}$ ;  $H = 818\text{ mm}$ . 喷口出口尺寸为  $0.12\text{ m}^2$ ,射流长度为  $1\,160\text{ mm}$ ,最大风速为  $170\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ . 驻室与大气相通,收集口、通气口全关,收集口3块板开度皆为  $15^\circ$ ,如图2所示;模型头部距喷口内边缘  $120\text{ mm}$ ,并正对喷口. 实验风速为  $40\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,驻室的湍流强度为  $0.38\%$ .



图2 收集口开度  
Fig.2 Collector angle

实验采用的热线风速仪,由探头、支杆、电容放大器、信号调节器、数模转换器等组成,部分部件如图3所示. 在使用前,对其进行了标定. 标定实验台由气流喷口、支架、偏航罗盘、旋转罗盘等部件组成. 标定基本思想为通过标定速度来标定方向.

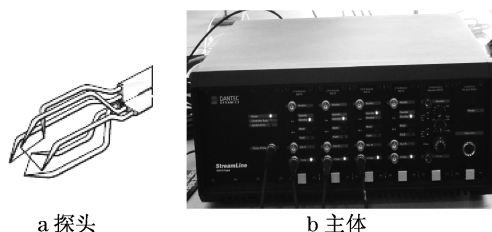


图3 热线风速仪  
Fig.3 CTA

## 2 实验对象及测点布置

实验采用尾部倾角为  $35^\circ$  的类车体,为标准类车体的  $1:4$  缩比模型. 长、宽、高分别为:  $L = 261\text{ mm}$ ,  $W = 97\text{ mm}$ ,  $H = 84\text{ mm}$ . 车模相对于喷口的阻塞比约为  $6.7\%$ ,考虑到喷口尺寸,车模离地面约为  $12.5\text{ mm}$ . 车模与驻室的相对位置如图4所示.

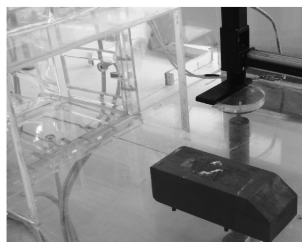


图4 车模位置  
Fig.4 Location of the Ahmed model

考虑到实验条件(对仪器的保护、支杆本身的收缩伸展范围等),尾迹区中测点的坐标为:  $x$  方向,  $0.39, 0.40, 0.42, 0.45, 0.50, 0.55\text{ m}$ ;  $y$  方向,  $\pm 0.048, \pm 0.036, \pm 0.024, \pm 0.012, 0\text{ m}$ ;  $z$  方向,  $0.030, 0.035, 0.040, 0.045, 0.050\text{ m}$ ,实验中总计布设  $270$  个测点. 坐标的正向及原点规定如下:  $x$  正向为气流从喷口流入驻室的方向,  $z$  正向为从驻室底部向上的方向,  $y$  正向按右手螺旋定则确定,坐标原点定于喷口内侧地面中轴线上. 如图5所示(为了表达清楚,省略了  $y = \pm 0.036\text{ m}$  和  $y = \pm 0.012\text{ m}$  处的测点).

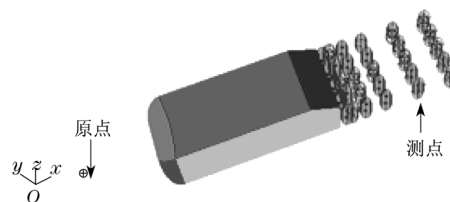


图5 测点布置  
Fig.5 Arrangement of test points

对于瞬时速度的测量,依据文献[5-6]中有关车辆风洞实验自模区的论述,将风速定为  $40\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,频率为  $20\text{ kHz}$ ,采样时间为  $3\text{ s}$ .

## 3 实验结果与分析

实验结果的处理,采用绘制  $x$  方向雷诺应力分量  $\overline{u'u'}$ ,  $\overline{u'v'}$ ,  $\overline{v'w'}$  云图的方法. 其优点在于整体感强,能直观体现尾迹区内的应力分布情况. 云图位置按  $x$  方向坐标截取,分为  $6$  截,分别为  $x = 0.39, 0.40, 0.42, 0.45, 0.50, 0.55\text{ m}$  处.  $y$  坐标范围  $-0.048 \sim +0.048\text{ m}$ ,  $z$  坐标范围  $0.030 \sim 0.050\text{ m}$ ,覆盖尾迹区的主要部分.

由图6a可知,在近壁面区,尾迹区内流场结构中,  $x$  方向的脉动显著,成左右对称分布,在接近车体底部的区域内,  $x$  方向的脉动强烈,约达到  $50\text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ . 图6b和图6c显示了  $x$  方向与  $y$  方向脉动的互相关以及  $y$  方向与  $z$  方向脉动的互相关,皆体现出左右对称的特点,但是符号相反. 其极大值的绝对值分别约为  $8$  和  $4\text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ .

由图7a可知,在  $x = 0.40\text{ m}$  截面处,尾迹区内流场结构中,  $x$  方向的脉动依然显著,虽然同样成左右对称分布. 在接近车体底部的区域内,以及在车体顶部的区域内,  $x$  方向的脉动依然强烈,约达到  $45\text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ . 图7b和图7c显示了  $x, y, z$  方向脉动的

互相关,皆体现出左右对称的特点,但是符号相反.其极大值的绝对值分别为  $\overline{u'v'} \approx 10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  和  $\overline{v'w'} \approx 6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ .

图 8a 所示,  $x$  方向的脉动固然强烈,但极大值区域仅在车体顶部出现,约达到  $45 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ . 相反,

车体底部  $x$  方向脉动减弱. 图 8b 和图 8c 显示了  $x, y, z$  方向脉动的互相关,皆体现出左右对称的特点,但是符号相反,且其整体分布表明尾迹区拖曳涡对的形态逐渐清晰. 其极大值的绝对值分别为  $\overline{u'v'} \approx 10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  和  $\overline{v'w'} \approx 6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ .

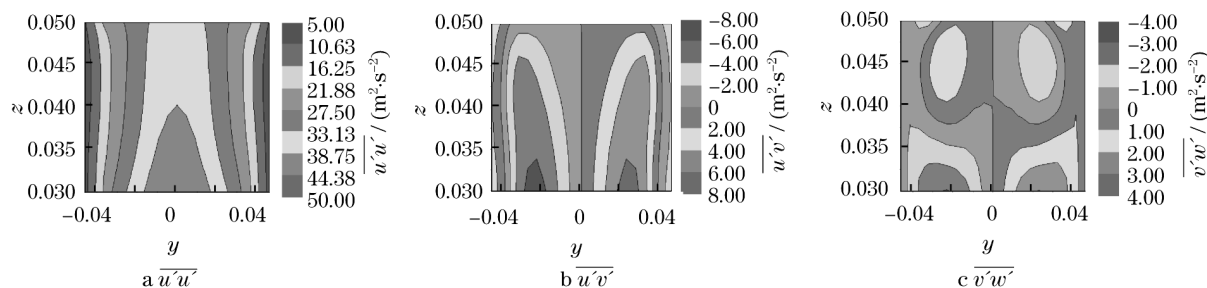


图 6  $x = 0.39 \text{ m}$  截面处雷诺应力云图

Fig. 6 Contour in  $x = 0.39 \text{ m}$  section

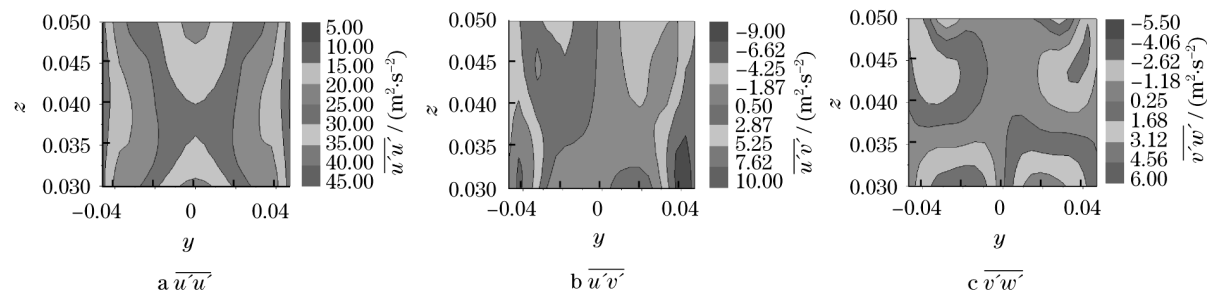


图 7  $x = 0.40 \text{ m}$  截面处雷诺应力云图

Fig. 7 Contour in  $x = 0.40 \text{ m}$  section

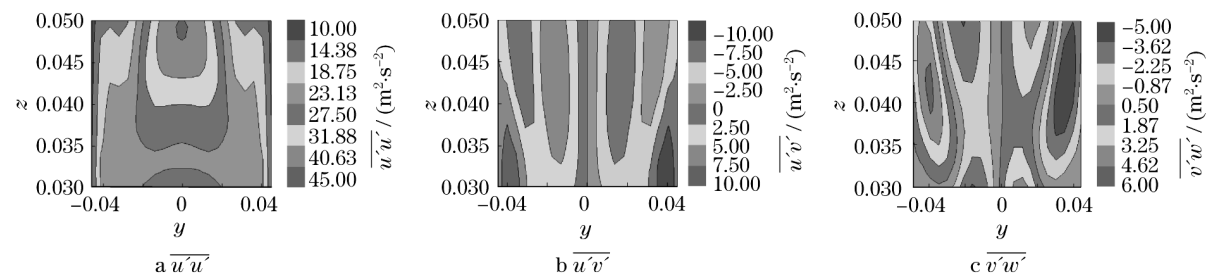


图 8  $x = 0.42 \text{ m}$  截面处雷诺应力云图

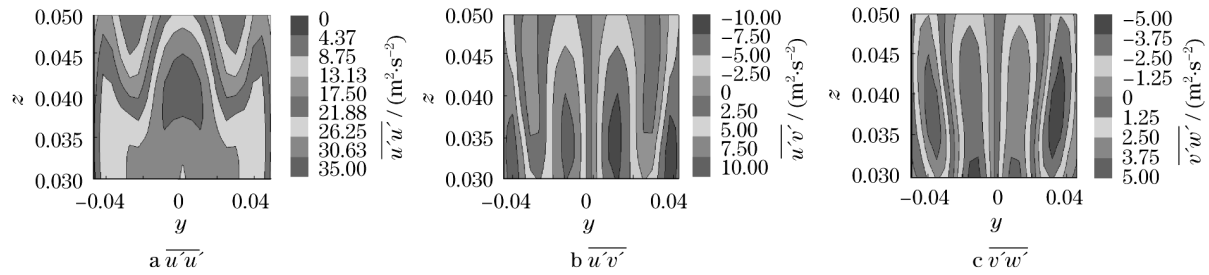
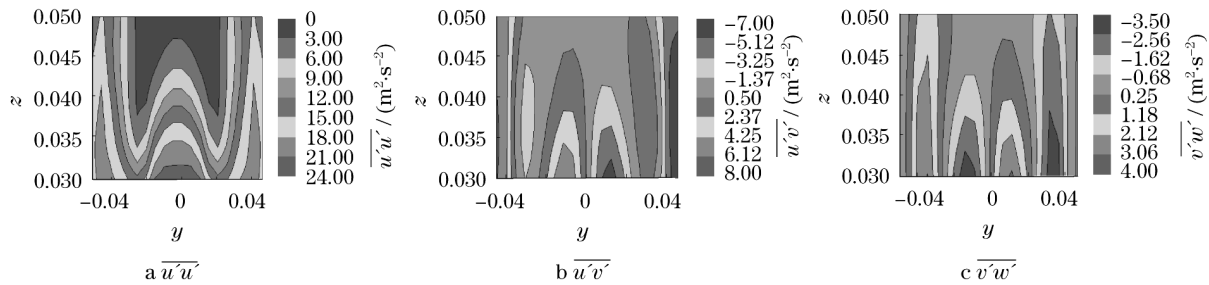
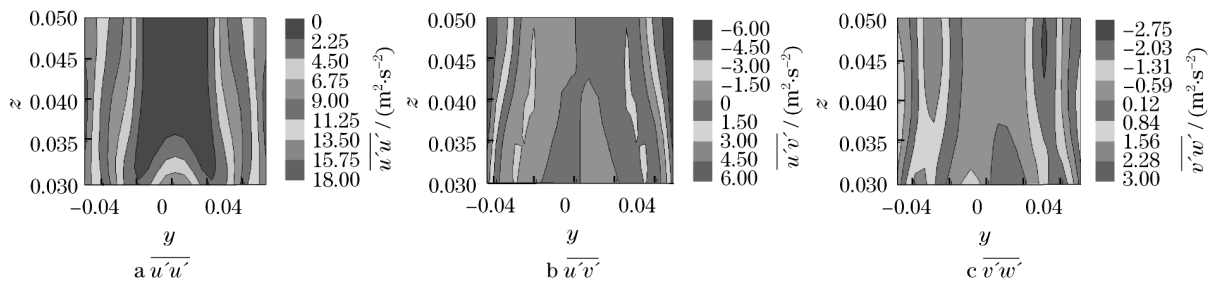
Fig. 8 Contour in  $x = 0.42 \text{ m}$  section

图 9a 所示的云图表明:整体上,  $x$  方向的脉动特征,在左右对称分布的基础上呈逐渐减弱的态势,极值约为  $35 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ . 图 9b 和图 9c 云图表明:在左右对称分布的基础上,尾迹区拖曳涡对的形态更加清晰,互相关的脉动特性不断增强. 其极大值的绝对值分别为  $\overline{u'v'} \approx 10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  和  $\overline{v'w'} \approx 5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ .

由图 10a 可知,随着测点逐步远离车体,  $x$  方向的脉动明显减弱,脉动特性的薄弱环节集中在尾迹区上部,由于地面效应的存在,在接近地面部分,脉动情况依然比较显著,极值约为  $24 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ . 图 10b 和图 10c 云图表明:在远离车体的尾迹区内,  $x, y, z$

方向脉动的互相关性,皆呈现减弱的趋势,但并不显著. 其极大值的绝对值分别为  $\overline{u'v'} \approx 8 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  和  $\overline{v'w'} \approx 4 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ .

图 11a 所示的云图表明:随着测点进一步远离车体,  $x$  方向脉动减弱的趋势逐步扩大,其薄弱环节向下延伸至接近地面附近. 相反,两侧依然有较明显的脉动特征. 图 11b 和图 11c 云图表明:与  $x$  方向脉动变化情况类似,  $x, y, z$  方向脉动的互相关性也进一步减弱,其薄弱环节也同样出现在流场中心区域,并延伸至地面附近. 其极大值的绝对值分别为  $\overline{u'v'} \approx 6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  和  $\overline{v'w'} \approx 3 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ .

图 9  $x=0.45$  m 截面处雷诺应力云图Fig.9 Contour in  $x=0.45$  m section图 10  $x=0.50$  m 截面处雷诺应力云图Fig.10 Contour in  $x=0.50$  m section图 11  $x=0.55$  m 截面处雷诺应力云图Fig.11 Contour in  $x=0.55$  m section

根据文献[7]的结论,涡核位置处雷诺应力 $\overline{u'u'}$ ,  $\overline{u'v'}$ 和 $\overline{v'w'}$ 分量绝对值的分布情况,如图 12 所示。

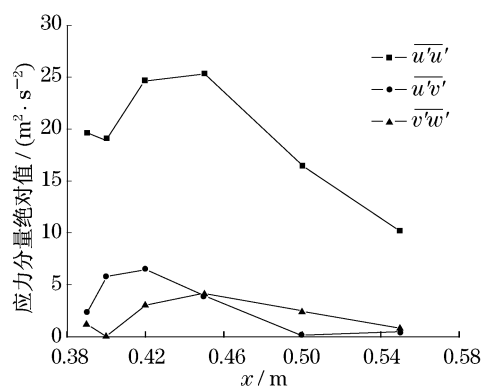


图 12 涡核位置雷诺应力分布

Fig.12 Distribution in vortex core location

通过对图 6—11 的云图分析,对雷诺应力分量 $\overline{u'u'}$ 而言,随着逐步远离车体,以及稳定拖曳涡对的

形成,其数值逐步减小,其极值区域的变化也反映了尾迹区流场形成的机制。

在拖曳涡对形成前,由于底部气流以及顶部下洗气流的作用,使得在车体附近尾迹区的上部和下部  $x$  方向脉动显著;在拖曳涡对形成后,由于地面效应的存在,在近地面区  $x$  方向脉动情况依然显著,又由于涡对的卷吸作用,使得即使在流动远场区,边缘区域的  $x$  方向脉动特征依然清晰。

对雷诺应力分量 $\overline{u'v'}$ ,  $\overline{v'w'}$ 而言,随着逐步远离车体,其数值减小幅度较小,即在整个尾迹区流场中,无论拖曳涡对形成与否,皆保持显著的脉动特性。这是因为,整个尾迹区流场都伴随着 3 个方向的气流掺混运动,即使在拖曳涡对形成后,依然有气流注入涡区,不可避免地产生显著的脉动现象。

地面边界不仅促使车体尾部产生横向涡,而且制约着拖曳涡对的发展和运动。正是地面效应的作用,使得接近地面测点处的雷诺应力分量 $\overline{u'u'}$ ,

$\overline{u'v'}$ ,  $\overline{v'w'}$  皆保持较高水平.

通过图 12 的分析,随着逐步远离车体,在拖曳涡对形成前后,由于气流整体流态趋于有序,涡核位置附近的雷诺应力分量  $\overline{u'u'}$ ,  $\overline{u'v'}$ ,  $\overline{v'w'}$  皆呈现先增加后减小的变化趋势.

从雷诺应力角度,对整体流场结构进行分析,至少有以下特征:① 在主要尾迹区内,存在一对大涡,此涡对延伸至流动远场;② 在平均应力场结构左右对称的基础上,涡核位置处 3 种雷诺应力分量变化趋势一致;③ 与  $y$  方向相关的雷诺应力皆出现左右数值绝对值相等,但符号相反的现象;④ 地面效应影响至流动尾迹区远场.

## 4 结论

(1) 由于脉动量的自相关和互相关在整个流场中皆保持较高的水平,进一步说明整个尾迹区流动具有明显的 3 维性.

(2) 从脉动量的自相关和互相关在整个流场中极值位置的变化可知,随着流场的逐步发展,3 维性的强弱分布随之变化.

(3) 脉动量的较高水平说明流场的非稳态特性显著,其中地面效应是流动非稳态特性的主要诱因之一,且其影响延伸至流动远场.

(4) 鉴于尾迹区流场的各向异性特征,在进行数值计算的过程中,有必要引入高阶湍流模型,采用非稳态算法,对尾迹区流动特征进行预测.

## 参考文献:

- [1] 傅立敏. 汽车空气动力学[M]. 北京:机械工业出版社,1998.  
FU Limin. Aerodynamics of road vehicles [M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
  - [2] Ahmed S R, Ramm R, Faltin G. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake [C]//SAE Technical Papers. Detroit: SAE World Congress & Exhibition, 1984:840300.
  - [3] Sherrie L, Krist R, Rumsey C L, et al. CFL3D user's manual [M]. Hampton: NASA Langley Research Center, 1998.
  - [4] Howard R J A, Pourquie M. Large eddy simulation of an ahmed reference model[J]. J Turbulence, 2002, 3(18):2.
  - [5] Al-Gami A M, Bernal L P, Khalighi B. Experimental investigation of the near wake of a pick-up truck [C]// SAE Technical Papers. Detroit: SAE World Congress & Exhibition, 2003:03010651.
  - [6] 杜广生. 厢式货车空气动力学特性的研究 [D]. 南京:中国船舶科学研究中心, 2002.  
DU Guangshen. Study on aerodynamic characteristics of van body truck: [D]. Nanjing: China Ship Scientific Research Center, 2002.
  - [7] 朱晖, 杨志刚. 类车体尾迹区流动的实验研究[J]. 实验流体力学, 2010, 24(2):24.  
ZHU Hui, YANG Zhigang. Experimental study on the flow field in the wake of ahmed model[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2010, 24(2):24.
- 
- (上接第 1530 页)
- [4] Shah V P, DeBella D C, Ries R J. Life cycle assessment of residential heating and cooling systems in four regions in the United States[J]. Energy and Buildings, 2008, 40(4):503.
  - [5] Carpenter A C, Gardner K H, Fopiano J, et al. Life cycle based risk assessment of recycled materials in roadway construction [J]. Waste Management, 2007, 27(10):1458.
  - [6] Guggemos A A, Horvath A. Comparison of environmental effects of steel-and concrete-construction buildings[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2005(6):93.
  - [7] Weir G, Muneer T. Energy and environmental impact analysis of double-glazed windows [J]. Energy Conversation and Management, 1998, 39(3):243.
  - [8] Ardente F, Beccali G, Cellura M. Life cycle assessment of a solar thermal collector: sensitivity analysis, energy and environmental balances [J]. Renewable Energy, 2005, 30(2):109.
  - [9] 石磊. 从物质循环论发展循环经济的必要性[J]. 环境科学动态, 2004(1):1.  
SHI Lei. The necessity of develop circulation economy [J]. Environmental Science Trends, 2004(1):1.
  - [10] 赵平, 同继锋, 马春荣. 建筑材料环境负荷指标及评价体系的研究 [J]. 中国建材科技, 2004, 13(6):1.  
ZHAO Ping, TONG Jifeng, MA Juanrong. The research on the system of the building material environment load index and evaluate [J]. China Building Materials Science & Technology, 2004, 13(6):1.
  - [11] 冯起. 扩大废钢回收增加电炉钢产量 [J]. 冶金经济与管理, 2005(2):44.  
FENG Qi. Extending reclamation of scrap steel to increase the output of electric furnace steel [J]. Metallurgical Economics and Management, 2005(2):44.
  - [12] Ryunosuke Kikuchi. Recycling of municipal solid waste for cement production: pilot-scale test for transforming incineration ash of solid waste into cement clinker [J]. Resources Conservation and Recycling, 2001, 31(2):13747.
  - [13] 中国混凝土与水泥制品网. 混凝土回收再利用的经济效益分析[EB/OL]. [2010-03-03]. [http://www.concrete365.com/news/2010/3-3/H14232705\\_2.htm](http://www.concrete365.com/news/2010/3-3/H14232705_2.htm)  
China Concrete and Cement Products Association Economical analysis of concrete reusing[EB/OL]. [2010-03-03]. [http://www.concrete365.com/news/2010/3-3/H14232705\\_2.htm](http://www.concrete365.com/news/2010/3-3/H14232705_2.htm)