

# 25° Ahmed 模型射流主动控制气动减阻策略

张英朝, 杜冠茂, 朱会, 田思

(吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 采用剪切应力输送(SST)  $\kappa\omega$ (湍动能-比耗散率)湍流模型对标准 25° Ahmed 模型进行基于计算流体力学(CFD)数值模拟的稳态射流减阻研究. 在模型尾部设置射流孔, 分别探究各位置处射流孔的孔径、到边线的距离、形状、射流速度和角度的最佳值, 分析不同射流状态对流场结构、总阻力系数及局部阻力系数的影响. 仿真的基本工况与风洞实验数据一致性很好, 验证所采用数值方法的准确性和可靠性. 研究结果表明, 与未设置射流孔的模型相比, 设置射流方案的模型尾流结构得以改善, 纵向涡得以抑制, 同时其阻力系数明显降低. 单独位置布置射流孔方案中在斜面上方进行射流时, 阻力系数最低, 为 0.252 2, 减阻率为 11.3%. 通过正交试验获得最佳组合方案得到阻力系数 0.246 7, 减阻率达 13.23%.

**关键词:** 外流场; 主动控制; 尾流结构; 射流; 气动减阻

**中图分类号:** U270.1; O357.5<sup>+</sup>2 **文献标志码:** A

## Strategy of Active Flow Control to Reduce Aerodynamic Drag with Steady Jet for 25° Ahmed Model

ZHANG Yingchao, DU Guanmao, ZHU Hui, TIAN Si

(Jilin University, State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Based on computational fluid dynamics (CFD) numerical simulation method, aerodynamic drag reduction of 25° Ahmed model with active flow control of steady jet are researched using shear stress transport(SST)  $\kappa\omega$  turbulent model. Jet holes are located at the model tail to study the optimum parameters of hole diameter, distance to the nearest side edge, shape, jet velocity and jet angle, and to analyze the influence of different jet state to the flow structure, total drag coefficient and local drag coefficient. In addition, the numerical simulation results are in good agreement with the date from wind tunnel experiment, which verifies the accuracy and reliability of present numerical method. The

numerical results indicate that the wake structure with flow control is significantly improved and the longitudinal vortex is effectively suppressed, compared to the one without control. Simultaneously, the drag coefficient significantly decreases. In the scheme of placing jet hold on the single location, the one placing jet at the top of slant get the lowest drag coefficient 0.252 2 (with 11.3% drag reduction). The drag coefficient of the optimal combining scheme obtained by orthogonal experiment method is 0.246 7 (with 13.23% drag reduction).

**Key words:** external flow field; active control; wake structure; jet flow; aerodynamic drag reduction

如今汽车减阻<sup>[1]</sup>越来越成为人们关注的焦点, 本文采用主动流动控制的方法来控制汽车尾部流场, 以此实现减阻的目的. 文中研究对象为 Ahmed 模型<sup>[2]</sup>, 为了有效控制流场, 那就必须先详细了解其尾流结构和状态. Ahmed<sup>[2]</sup>和 Hucho<sup>[3]</sup>等均发现高达 85% 到 90% 的气动阻力由压差阻力贡献, Beaudoin 和 Aider<sup>[4]</sup>发现阻力大小与尾流结构密切相关, 因此为了降低阻力、控制流场, 首先要了解汽车的尾流状态. 对于 Ahmed 模型, 总阻力系数可划分为以下几部分:  $C_d$  为整体风阻系数, 包括摩擦阻力系数和压差阻力系数,  $C_f$  为总的摩擦阻力系数,  $C_k$  为前端的压差阻力系数,  $C_b$  为尾部垂直面的压差阻力系数,  $C_s$  为尾部斜面压差阻力系数.

图 1 为 Ahmed 模型尺寸, 图中定义了尾部斜面倾角  $\alpha$  和坐标系. Ahmed 模型在不同的尾部倾角下存在着不同的阻力系数和流动状态且随着倾角增大阻力系数上升. 本文选取经典 25° 尾部倾角的 Ahmed 模型<sup>[5]</sup>作为研究对象, 针对此 Ahmed 模型, 气流会在斜面两侧产生一对反向旋转的纵向涡结构-C 柱涡<sup>[2,6-8]</sup>, 这是一种拖拽涡, 对阻力贡献极大,

收稿日期: 2017-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(11702109、11772140)

第一作者: 张英朝(1978—), 男, 工学博士, 教授, 主要研究方向为汽车空气动力学. E-mail: yingchao@jlu.edu.cn

此时的尾流结构中纵向涡占据主导地位. 在此模型的基础上, Vино<sup>[9]</sup> 和 Beaudoin<sup>[4]</sup> 对其尾部流场进行了研究, 并提出 25° Ahmed 尾部流场主要包括三部分: 斜面上的回流气泡、来源于 C 柱的纵向涡和尾部背面的分离涡. Krajinovic 和 Davidson<sup>[10]</sup> 通过数值模拟研究提出在 Ahmed 模型尾部侧下角处存在另一对能量较弱且旋向相反的纵向涡并被王小文<sup>[11]</sup> 通过实验证实.

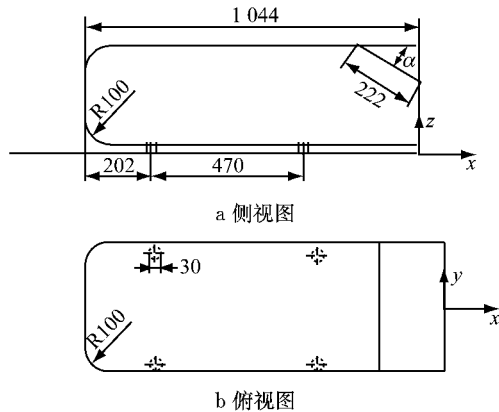


图 1 Ahmed 模型的基本尺寸(单位:mm)

Fig.1 Basic dimensions of the Ahmed model(unit:mm)

控制尾流场的实质是降低压差阻力, 要关注的重点是控制分离现象和相互作用的尾流结构, 从而实现减阻目标. Brunn 等<sup>[12]</sup> 对尾部倾角为 25° Ahmed 模型进行了射流主动控制减阻研究, 研究了射流对尾部分离区涡流结构的影响. Krentel 等<sup>[13]</sup> 采用闭环脉冲射流的方式对 25° Ahmed 模型做了减阻研究, 发现减阻率可达 5.1%.

以上所述研究是针对单一因素或少量因素下的射流减阻研究, 而实际减阻效果可能受多种因素交互影响, 本文采用定常射流的方法, 针对射流孔的孔径、位置、形状和射流的速度和角度等因素, 对 25° Ahmed 模型进行减阻控制研究, 在模型尾部各个面的交界处布置射流控制, 通过仿真分析, 更加深入地了解尾流结构和空气阻力<sup>[14]</sup> 之间的关系.

### 1 模型描述

基本 Ahmed 模型如图 1 所示. 图中, A、B、C、D、E、F、G 表示位置. 它的大小相当于实车的四分之一, 属于类车体比例模型, 它分别由钝性前端、中间部分、尾部斜面、尾部垂直面及支撑模型的 4 个圆柱体组成, Ahmed 模型的前端呈倒圆状, 这样可以避免气流的分离, 中间部分是等截面的矩形, 长度较长, 这样可以减小前端气流对尾部气流流动的影响,

方便单独对尾部区做研究. 如图 2 所示, 射流孔的位置设置在尾部区域<sup>[15]</sup>, 分布在各个边界线处. 由于孔径和孔轴线距边线的距离均影响减阻效果, 故在后文中将详细讨论孔的尺寸和位置.

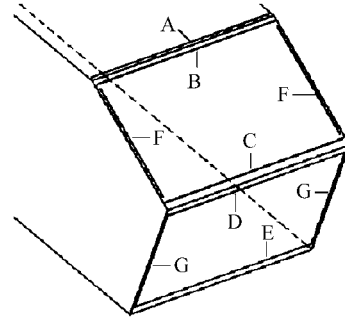


图 2 射流孔布置位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the location of the jet hole

为提高计算精度, 计算域<sup>[16]</sup> 采用矩形数字风洞, 为保证与风洞试验<sup>[2]</sup> 的布置一致, 计算域尺寸 9 m×3 m×3 m, 模型头部距离计算域入口的距离为 4 倍的模型长度, 模型尾部距离计算域出口的距离为 5 倍的模型长度, 计算域的宽度为 8 倍的模型宽度, 计算域的高度为 9 倍的模型高度, 保证了阻塞比在 1% 左右, 并且使汽车尾部及附近的空气流动充分发展.

### 2 仿真方案设置

#### 2.1 计算参数设置

计算域主体采用四面体网格, 并设置了 6 层棱柱网格作为边界层网格, 使模型表面  $Y^+$  值控制在 20~80 之间 ( $Y^+$  值为第一层网格质点到壁面的量纲一距离), 尽可能准确地模拟边界层的流动, 如图 3 展示了网格分布, 为保证仿真精度逐层增加了三个加密区域, 并在尾流区进行着重加密, 此次仿真网格总数量是 600 万. 图 4 是模型表面边界层网格示意图.

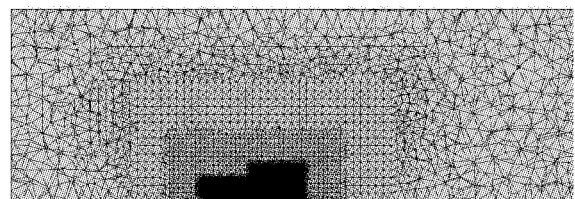


图 3 计算模型与网格特征空间整体布置图

Fig.3 Calculate the overall layout of the model and grid feature space

仿真边界条件设置: 模拟风洞入口设为速度入口, 流动速度为  $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 压力  $P$  为 0; 风洞出口设为压力出口,  $P$  为 0; 壁面为滑移壁面; 地面与真实风

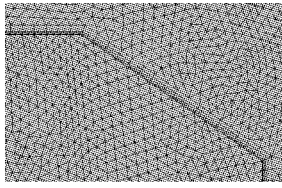


图 4 边界层网格示意图

Fig.4 Schematic diagram of the boundary layer mesh

洞试验一致, 设为固定地面; 空气密度  $1.18415 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 标准大气压, 而雷诺数  $Re$  为  $4.29 \times 10^6$  (特征长度为车长), 湍流强度小于  $0.5\%$ , 采用分离求解器, 使空间离散格式能够达到二阶精度, 松弛因子适中, 采用剪切应力输送 (SST)  $\kappa-\omega$  (湍动能-比耗散率) 湍流模型。

### 2.2 仿真精确度研究

文献[2]中 Ahmed 等通过风洞实验获得  $25^\circ$  Ahmed 模型的空气阻力系数为  $0.2856$ , 本文通过仿真获得阻力系数为  $0.2843$ , 误差在  $1\%$  内, 满足了工程应用要求. 为了进一步说明仿真精确度, 在  $25^\circ$  Ahmed 模型尾部斜面上选取 4 条直线  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ , 如图 5 所示, 通过仿真得到直线上若干点的速度值, 与已有的试验数据[4]进行对比分析, 如图 6 所示. 仿真得到的速度值与试验数据基本吻合, 能够满足研究的需要。

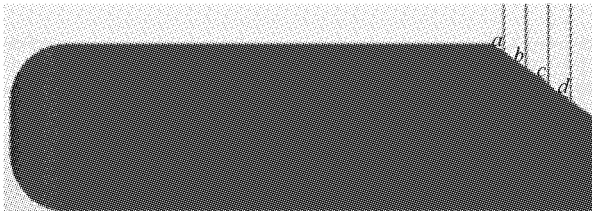


图 5 选定的数据采取位置

Fig.5 Shows the location of the selected data

## 3 $25^\circ$ Ahmed 模型减阻方案讨论分析

### 3.1 单独位置仿真策略

影响射流效果的主要因素有射流孔的孔径  $D$ 、孔轴线到边线距离  $d$ 、射流的速度  $V$ 、形状和角度  $\beta$ , 由于参数较多, 且都为不确定性的影响因素, 需要规划一个合理的流程去做仿真。

在研究开始首先对射流孔形状进行了分析, 分别采用连续型、非连续型、翼型射流孔, 如图 7、8 所示. 在其他参数相同的情况下, 由仿真结果分析得出, 连续型射流孔的减阻效果优于其他两种, 故在下面的仿真分析中均采用连续型射流孔 (射流孔形状

不是本文研究的重点, 故在这里不再赘述). 射流孔位置布置如图 2 所示, 以 A 位置为例, 定义连续型射流孔的参数如图 8 所示, 并且在网格划分时单独对射流孔做了处理, 其最小相对尺寸设置为  $0.0005 \text{ m}$ , 相对目标尺寸设置为  $0.002 \text{ m}$ .

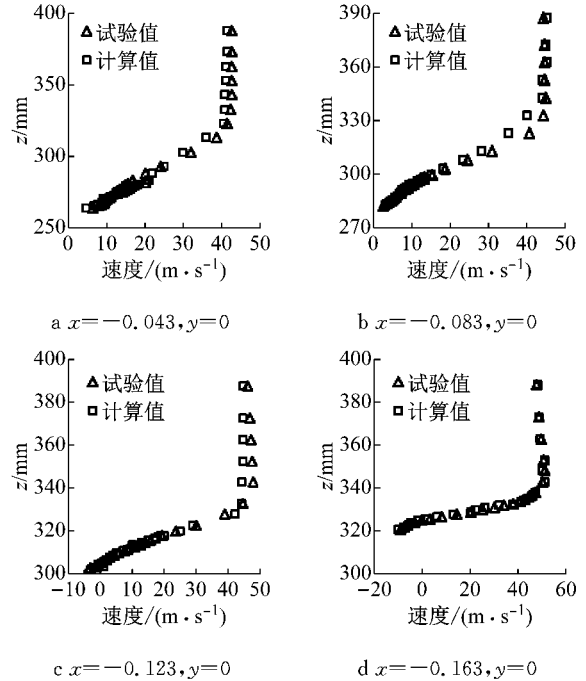


图 6  $25^\circ$  Ahmed 模型尾部斜面上方气流纵向速度变化对比  
Fig.6 Comparison of longitudinal velocity variation of airflow over  $25^\circ$  Ahmed model tail

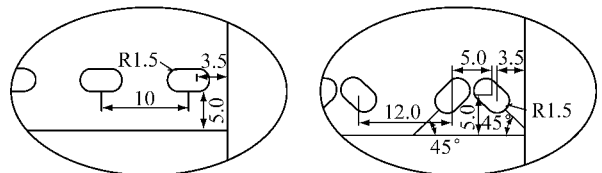


图 7 非连续型和翼型射流孔示意图 (单位: mm)

Fig.7 Schematic diagram of non-continuous and airfoil jet holes (unit: mm)

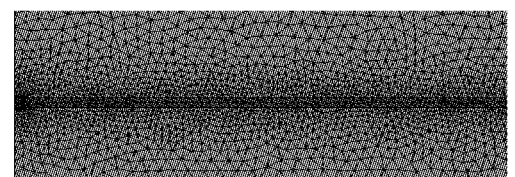
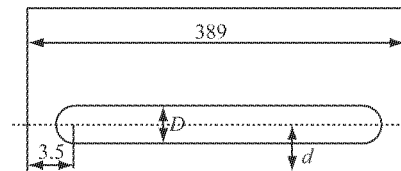


图 8 连续型射流孔参数及网格划分 (单位: mm)

Fig.8 Continuous Jet hole parameters and mesh division (unit: mm)

### 3.1.1 25°Ahmed模型A位置减阻特性研究

首先研究射流孔径的影响,采用孔径为1、2、3、4、5 mm五个射流孔,射流速度均采用 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,射流方向垂直于模型表面,经过仿真计算结果如图9a所示,选用孔径为3 mm的射流槽较为有效。

再继续研究射流速度对阻力的影响,选用速度间隔为 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,范围为 $5\sim 60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,结果如图9b所示。从表中可以看出阻力系数 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 附近减阻效果最好,为寻求最佳射流速度,在 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 附近, $5\sim 15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内取 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为间隔继续仿真,结果如图9c所示,最终获得最佳射流速度为 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,阻力系数0.266 4,减阻率为6.3%。

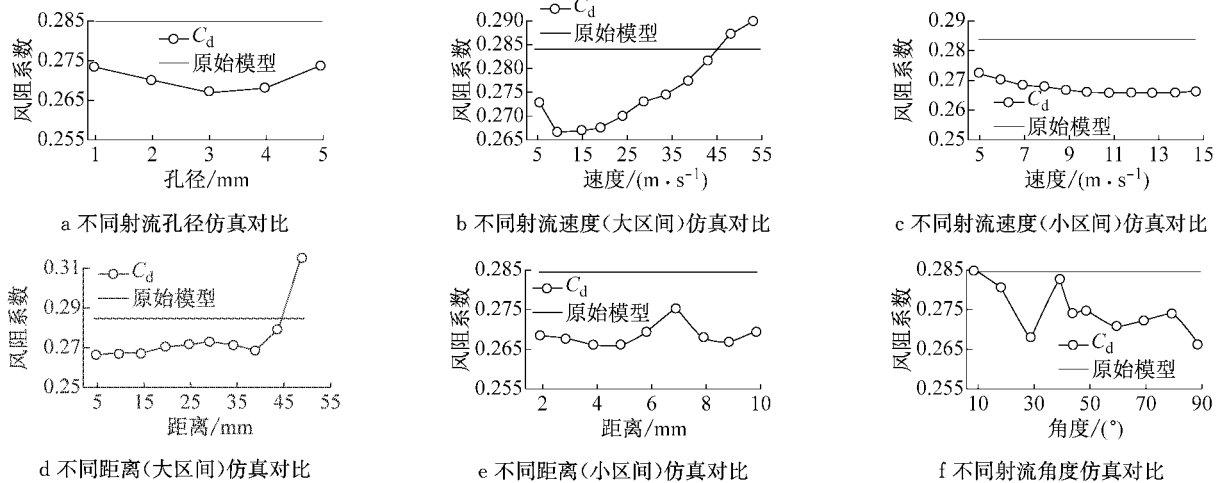


图9 A位置不同因素对风阻系数 $C_d$ 值的影响

Fig.9 A position of different factors on the drag coefficient  $C_d$  value

射流角度研究是在以上阻力系数最优工况的基础上进行的,即选取射流孔径3 mm,射流孔轴线距边线距离5 mm,射流速度 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,取射流角度变化范围为 $0^\circ\sim 90^\circ$ ,间隔为 $10^\circ$ ,由于 $45^\circ$ 比较特殊,因此 $45^\circ$ 工况也作为研究对象予以考虑,仿真结果如图9f所示。可以看出,射流的角度对结果影响很大, $90^\circ$ 角时的阻力系数最低,角度改变后射流会产生竖直分量和水平分量,竖直分量把流过模型表面的气流向上顶去,使尾部产生一个真空区,水平分量射向真空区,对尾流结构没有太大的影响,这就产生了能量浪费。

综上所述,A位置进行射流的最佳减阻工况为,孔径3 mm,射流孔轴线距边线距离5 mm,射流速度 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,射流角度为 $90^\circ$ 。此时阻力系数为0.266 1,减阻率为6.4%。

### 3.1.2 25°Ahmed模型B~G位置减阻特性研究

对B~G位置的研究与前面类似,这里不再赘述,以下为各个位置的最优工况:

如图9a~9c所示研究是在射流孔轴线距最近边线的距离均为4 mm的工况下进行的,接下来研究距离变化对射流结果的影响,此时速度是次要因素,选用之前减阻效果最好的速度即 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为射流速度。先选用大区间,间隔为5 mm,距离范围为 $5\sim 50\text{ mm}$ ,结果如图9d所示。从表中可以看出阻力系数在5 mm位置处较小,为了寻找减阻效果最好的工况,在距离边线5 mm附近选择 $1\sim 10\text{ mm}$ 的距离区间做减阻研究,间隔为1 mm,结果如图9e所示仍为5 mm距离处减阻效果最佳,最小阻力系数为0.266 1,此时的减阻率为6.4%。

B位置的最小阻力系数为0.252 2,减阻率为11.3%,减阻效果比较明显,此时射流孔轴线距离斜面上边缘的距离为19 mm,射流速度为 $27\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,垂直表面射流。

C位置的最小阻力系数为0.269 5,减阻率为5.2%,减阻效果比较明显,此时射流孔对称轴线距离斜面下边缘的距离为25 mm,射流速度 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,垂直表面射流。

D位置的最小阻力系数为0.271 2,减阻率为4.6%,减阻效果比较明显,此时射流孔对称轴线距离背面上边缘距离为4 mm,射流速度为 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,垂直表面射流。

E位置的最小阻力系数为0.265 4,减阻率为6.6%,减阻效果比较明显,此时射流孔对称轴线距离背面上边缘距离为26 mm,射流速度为 $43\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,垂直表面射流。

F、G的位置比较特殊,射流槽纵向布置,在两侧开槽,通过仿真计算,发现F位置不但没有减阻效

果,反而增大了阻力系数,这不是想要的结果,而对于位置 G,减阻效果也不很明显,因此,F、G 这两个位置将不予考虑.

### 3.2 分析对比各有效位置减阻机理

以下用方案 I、II、III、IV、V 分别对应表示 A、B、C、D、E 位置的最佳工况,原始模型表示未加减阻装置时的情况.模型各部位阻力系数  $C_d$ 、 $C_r$ 、 $C_k$ 、 $C_b$ 、 $C_s$  的表示方法已在前言说明,另外, $C_p$  代表总的压差阻力系数.第 3.1 节所得到的各个位置最优工况的阻力系数及各分量系数可以用图 10 表示.可以看出,各个工况下模型的摩擦阻力系数和头部的压差阻力系数基本不变,且所占比例很小,尾部斜面和背面的压差阻力系数变化幅度较大,并且它们的变化最终决定总阻力系数的变化趋势.下面将通过速度矢量图、压力云图等对模型外流场的变化去做具体的定性定量分析,寻找减阻机理.

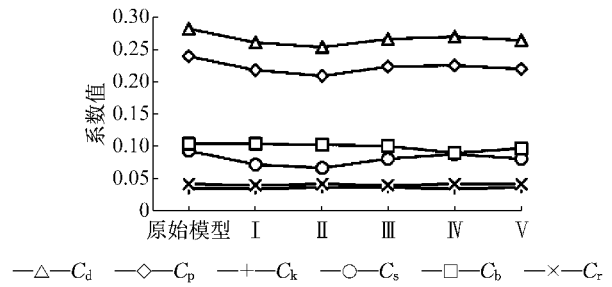


图 10 各个位置最优工况阻力系数及各分量系数对比  
Fig. 10 Comparison of the optimal operating resistance coefficient longitudinal symmetry surface

#### (1)速度矢量图

图 11 分别为原始模型与 I、II、III、IV、V 五个方案纵向对称面上的速度矢量图,模型表面压力分布主要受其周围气流流速的影响.气流在模型尾部会产生漩涡,主要包括分离涡和纵向涡,而纵向涡是一对拖拽涡,对阻力贡献远远大于分离涡.

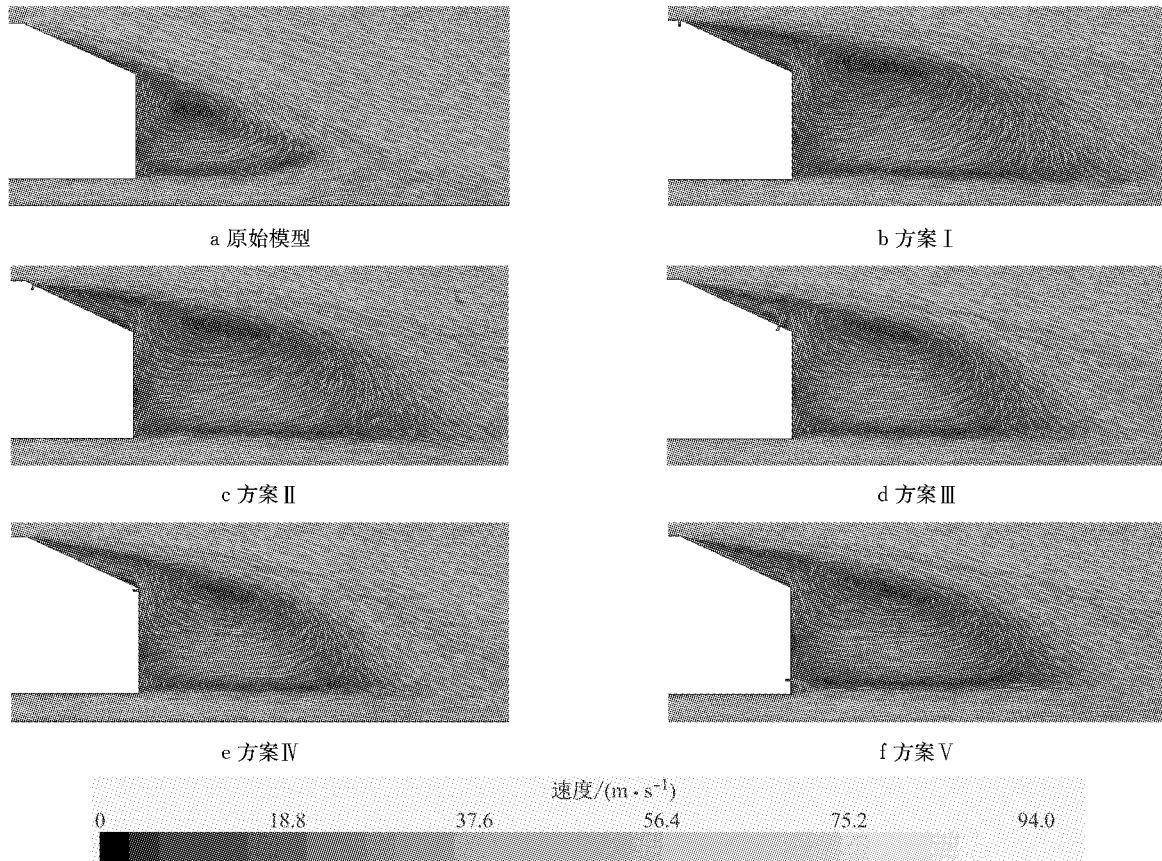


图 11 选定工况纵向对称面上的速度矢量图对比

Fig. 11 Comparison of velocity vector images on coefficient and the component coefficients for each position

I、II、III、IV、V 五个方案均使得气流在斜面上迅速分离,并且分离程度相比原始模型更加剧烈,按照常理这一现象会使阻力系数增加,但实际中阻力减小,这是由于斜面上的分离涡与 C 柱形成的纵向涡之间存在相互抑制作用,纵向涡在向后发展的过

程中会向内卷曲,在车身内侧纵向涡速度朝下,此向下分力会抑制分离涡产生,在原始模型中,此纵向涡占据主导地位并能有效抑制分离涡的发展,故其阻力较高.而 I、II、III、IV、V 五个方案均使得气流在斜面上分离加剧,这反过来将抑制纵向涡向内卷曲

的趋势,即纵向涡或者 C 柱涡减弱,从而影响到斜背面上的压力分布,阻力系数降低.并且从图 12 中尾部纵向对称面压力图也可以看出,相比于原始模型面,其余 5 种减阻方案中,尾部的压力值明显增大,且负压值大的区域明显减小,减小了前后的压差阻力,达到了减阻效果.因此,分离区增大的结果是拖

拽涡强度减弱,从而导致后部压力增加即图 11 的  $C_x$  增加,这样整体的气动阻力系数增加.从流动结构看,这时的流动结构已经趋向于超过 30° 的模型的流动结构特征了,因此阻力系数降低,这在后面流动显示的分析中也有论述.

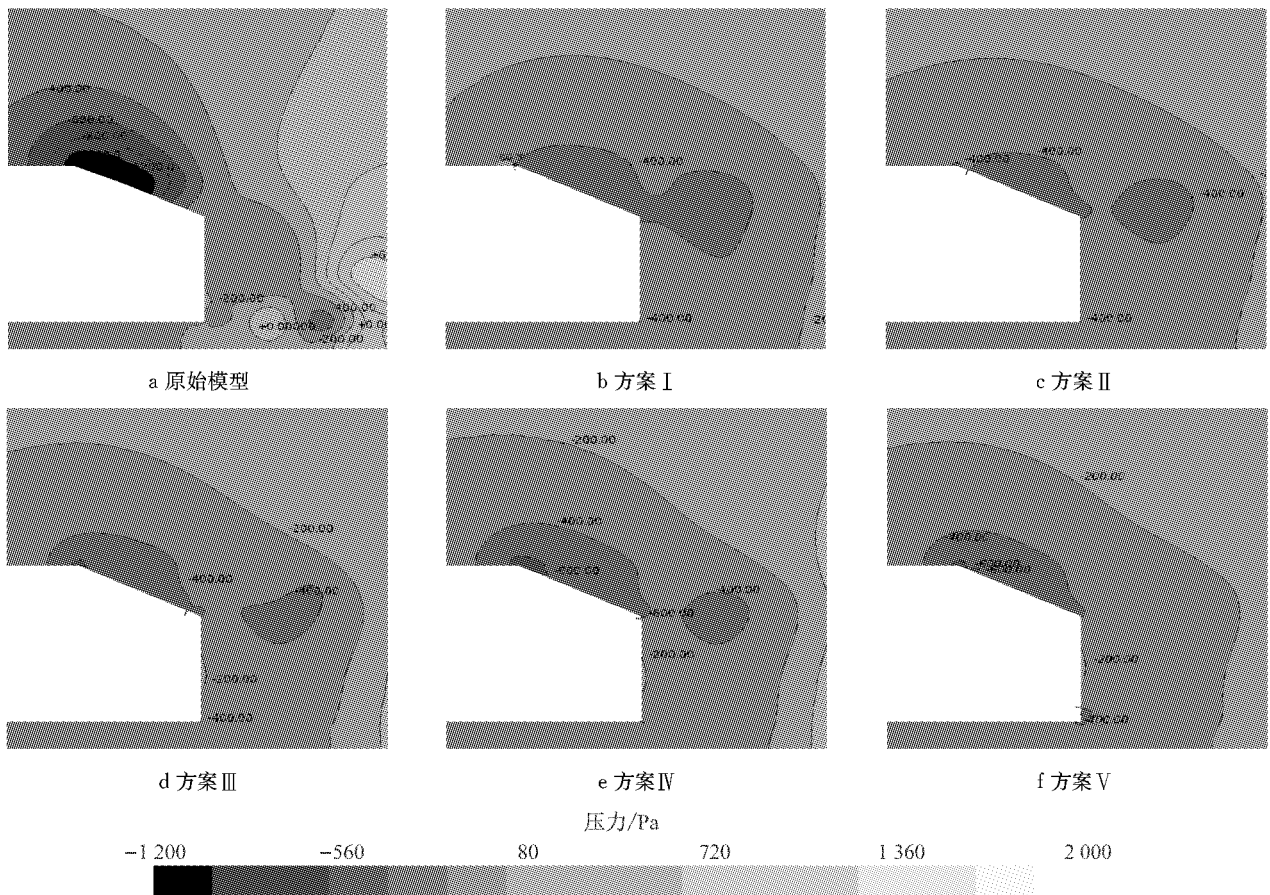


图 12 尾部纵向对称面压力等值线图

Fig.12 Trailing longitudinal symmetry plane pressure contour

5 个减阻方案中随着斜面上分离现象加强,上分离涡与尾部竖直面后面的分离涡有融合的迹象,上分离涡的涡核高度有所上升,且远离模型尾部,尾部涡流区的范围扩大了许多,这样的尾流结构与 35° Ahmed 模型的尾流结构很相似,即分离加剧但纵向涡减弱.图 10 看出,方案 I 和 II 总阻力系数较小,主要是由于斜面上压差阻力系数大幅降低,方案 I 中射流孔布置在车尾部,使气流提前分离,尾部斜面的阻力系数减小了 0.021,背面的阻力系数基本不变,因此在 A 位置设置射流孔,改变的主要是尾部斜面的阻力系数.在尾部斜面上端 B 位置设置射流孔的作用与 A 位置作用类似,也是将来流向上方顶起,由于斜面上的回流在 B 位置正好有向上分速度,故射流和回流相互促进使分离更加剧烈,因此纵向涡

被抑制地更小,详见尾部速度云图(图 13),方案 II 尾部斜面的阻力系数减小了 0.029,背面减小了约 0.003,可见在 B 位置设置射流孔不仅能有效降低模型尾部斜面的阻力系数,还对背面的阻力系数有微小的影响.

#### (2) 尾部速度云图

图 13 分别为原始模型与 I、II、III、IV、V 五个方案距离尾部 10 mm 处横截面上的速度云图.从中可以看出这几种减阻方案的 C 柱涡都有一定程度减弱,且位置均有所抬高,这与前面提到的模型尾部斜面上的 C 柱涡印迹变淡的说法是一致的.

#### (3) 尾部斜面压力云图

图 14 分别为原始模型与 I、II、III、IV、V 五个方案的尾部斜面压力云图.从尾部斜面的压力云图



能够看出,这 5 种减阻工况的尾部斜面的负压比标准模型的负压值要小很多,从而减小了模型的压差阻力,从方案 I、方案 II 两工况的尾部斜面云图可以看到 C 柱涡的印迹比标准模型的印迹淡很多,说明

C 柱涡得到很好地抑制. 方案 III、方案 IV 和方案 V 是在斜面尾部和尾部垂直面上布置射流孔,此处纵向涡已经基本形成,故仍存在 C 柱涡的印迹,只是较标准模型印迹较弱.

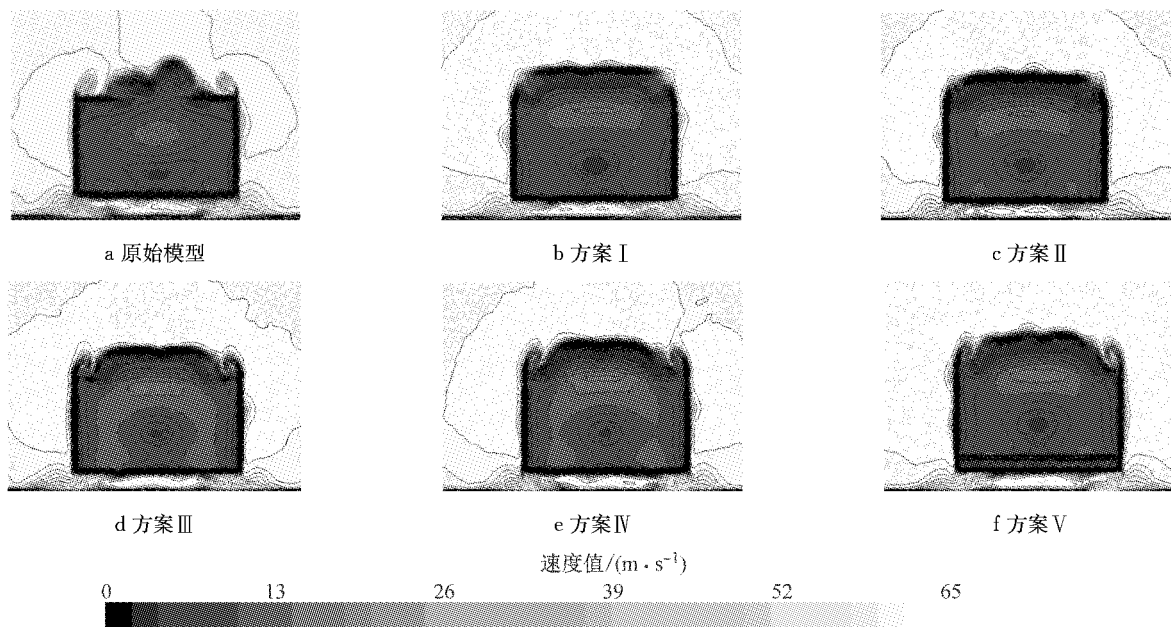


图 13 选定工况距离尾部 10 mm 处横截面上速度云图

Fig. 13 The velocity profile at the cross section of the tail at a distance of 10 mm

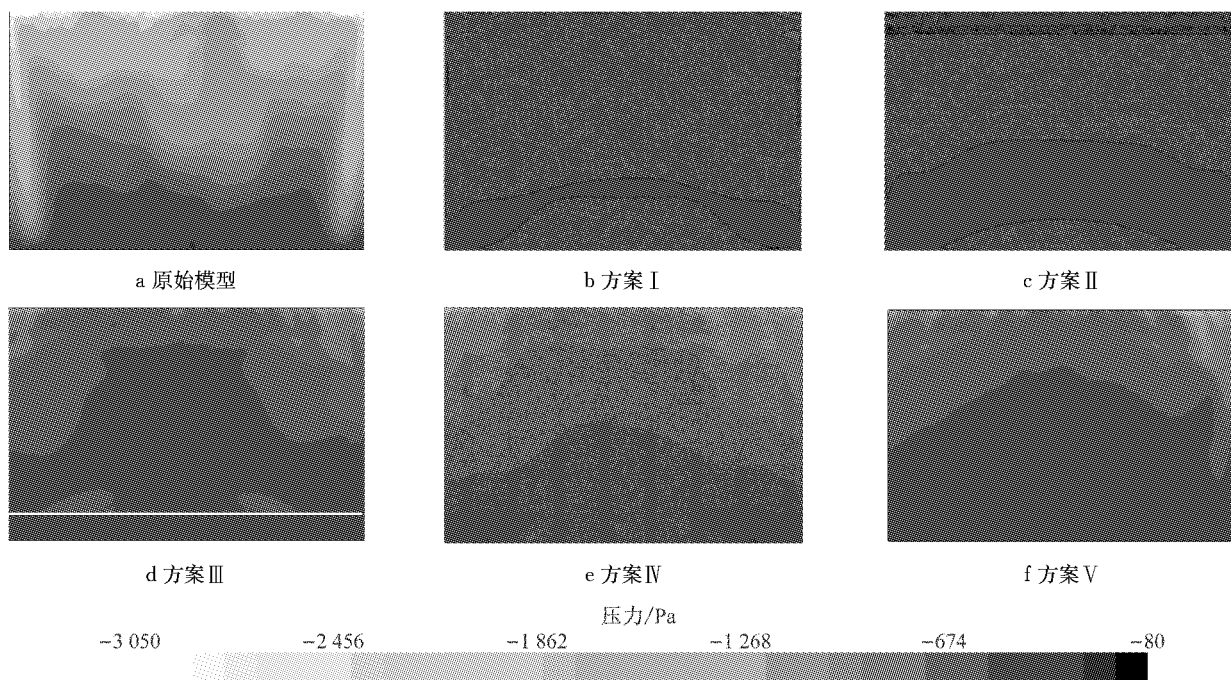


图 14 选定工况尾部斜面上压力云图

Fig. 14 Pressure cloud on the tail slope of the selected working condition

### 3.3 组合工况的研究

#### 3.3.1 正交试验研究

为了实现更好的减阻效果,需研究多因素影响

下的射流减阻效果,此次研究为了减少分析量,采用五水平五因素的正交试验,五因素即 A、B、C、D、E 五个位置.

通过第 3.1 节的研究,已经确定采用射流孔径为 3 mm 宽的连续型射流孔和垂直射流角度,孔轴线距边线的距离相对于速度来说更是想要研究的目标,因此将这 5 个位置的射流速度固定,分别取各位置之前所得的最优值,距离值以所求的最优值为基准,分别向两边扩展两个数,得到每个位置处对应的 5 个距离作为水平值,表 1 即为因素水平表。

表 1 因素水平表

Tab.1 Factor level table

水平	因素 1	因素 2	因素 3	因素 4	因素 5
1	3(A)	17(B)	23(C)	2(D)	24(E)
2	4(A)	18(B)	24(C)	3(D)	25(E)
3	5(A)	19(B)	25(C)	4(D)	26(E)
4	6(A)	20(B)	26(C)	5(D)	27(E)
5	7(A)	21(B)	27(C)	6(D)	28(E)

### 3.3.2 优水平分析

本研究利用极差分析法处理正交表,确定因素的主次和最优组合。研究发现,因素 A 的优水平为 A4(A 位置距离为 6 mm),因素 B 的优水平为 B4(B 位置距离为 20 mm),因素 C 的优水平为 C4(C 位置距离为 26 mm),因素 D 的优水平为 D5(D 位置距离为 6 mm),因素 E 的优水平为 E1(A 位置距离为 24 mm)。极差反映的是某一因素水平变动时,实验指标的变动幅度。极差越大,则该因素对实验指标的影响越大,该因素也就越重要,因此,通过极差值可以判定各个因素的主次。本次实验各因素的极差值分别为 0.002 2,0.001 4,0.000 8,0.001 5,0.000 7,因此,因素 A 对实验指标的影响最大,其次为 D, B, C, E。

通过对优水平的分析,本次实验的最优组合为 A4B4C4D5E1,通过仿真获得其阻力系数为 0.246 7,减阻率达 13.23%,这是目前对 25°Ahmed 模型减阻效果最好的方案。

## 4 结论

(1)25°Ahmed 模型产生的阻力主要与其尾部涡结构有关,而尾涡结构中的分离涡和纵向涡之间存在相互抑制作用,采用一定的流动控制方法可以促进分离涡的形成,从而抑制对阻力贡献量更大的纵向涡,实现较大程度的减阻。

(2)本次研究采用定常射流方式,对假定的减阻位置分别做了研究,确定了各有效减阻策略,包括各位置处最佳射流孔径、孔轴线距最近边线距离、射流孔形状、射流的速度和角度。并且对各单一有效位置

进行组合研究,通过正交试验设计的方法找到最佳减阻工况,发现组合比单一工况有更好的减阻效果。

(3)单一位置最佳减阻效果在 B 位置,采用孔径为 3 mm,射流孔轴线距离斜面上边缘的距离为 19 mm,射流速度为  $27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,垂直表面射流的连续型射流孔。最小阻力系数为 0.252 2,减阻率为 11.3%。

(4)通过优水平分析,组合工况的最佳减阻方案为 A4B4C4D5E1,即在各单独位置已经获得的最佳射流速度下,采用 3 mm 孔径,垂直表面射流的连续型孔,ABCDE 各位置处距离最近边线距离分别为 6、20、26、6、24 mm 时,获得阻力系数 0.246 7,减阻率达 13.23%。

### 参考文献:

- [1] HUCHO W H. Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering[M]. [S.l.]:Elsevier, 2013.
- [2] AHMED S R, Ramm G, Faltin G. Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake [C]//SAE International Congress and Exposition. [S.l.]: SAE, 1984, 840300:2.473-2.503.
- [3] HUCHO W H, Sovran G. Aerodynamics of road vehicles[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1993, 25(1): 485.
- [4] BEAUDOIN J F, AIDER J L. Drag and lift reduction of a 3D bluff body using flaps[J]. Experiments in Fluids, 2008, 44(4):491.
- [5] 崔文诗, 杨志刚, 朱晖, 等. [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(6):937.  
CUI Wenshi, YANG Zhigang, ZHU Hui, et al. Effect of synthetic jet on flow control of vehicle body [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(6): 937.
- [6] LIENHART H, BECKER S. Flow and turbulence structure in the wake of a simplified car model[J]. Communication Law & Policy, 2003, 8(1):25.
- [7] DROUIN V, André G, GILLIERON P. Topology and characterisation of the vortical near-wake flow over a simplified car model[J]. Economic Record, 1982, 58(160):92.
- [8] STRACHAN R K, KNOWLES K, LAWSON N J. The vortex structure behind an Ahmed reference model in the presence of a moving ground plane[J]. Experiments in Fluids, 2007, 42(5):659.
- [9] VINO G, WATKINS S, MOUSLEY P, et al. Flow structures in the near-wake of the Ahmed model[J]. Journal of Fluids & Structures, 2005, 20(5):673.
- [10] KRAJNOVIC S, DAVIDSON L. Flow around a simplified car, part 2: understanding the flow [J]. Journal of Fluids Engineering Transactions of the Asme, 2005, 127(5):919.
- [11] WANG X W, ZHOU Y, PIN Y F, et al. Turbulent near wake of an Ahmed vehicle model[J]. Experiments in Fluids, 2013, 54(4):1.
- [12] BRUNN A, WASSEN E, SPERBER D, et al. Active drag control for a generic car model[M]//Active Flow Control.



- Berlin: Springer Heidelberg, 2007:247-259.
- [13] KRENTEL D, NITSCHKE W, KING R. Influence of periodic-blowing actuators on the wake and the total drag of generic 3D car models [J]. *Journal of Flow Control Measurement & Visualization*, 2012, 4(3/4):97.
- [14] ZHANG Y C, DING W, ZHANG Z, *et al.* Comparison research on aerodynamic drags and pressure coefficients of reference car models in automotive wind tunnel [J]. *Advanced Materials Research*, 2014(989/994):2834.
- [15] JOSEPH P, AMANDOLÈSE X, AIDER J L. Drag reduction on the 25° slant angle Ahmed reference body using pulsed jets[J]. *Experiments in Fluids*, 2012, 52(5):1169.
- [16] 张英朝, 张喆, 李杰, 等. 基于计算流体力学的虚拟风洞试验 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2010, 40(增刊):90.  
ZHANG Yingchao, ZHANG Zhe, LI Jie, *et al.* Virtual wind tunnel test based on computational fluid dynamics [J]. *Journal of Jilin University(Engineering Science)*, 2010, 40(S):90.

~~~~~

(上接第73页)

- [36] NEVIN K P, WOODARD T L, FRANKS A E, *et al.* Microbial electrosynthesis: feeding microbes electricity to convert carbon dioxide and water to multicarbon extracellular organic compounds[J]. *Mbio*. 2010, 2(1): 542.
- [37] NEVIN K P, HENSLEY S A, FRANKS A E, *et al.* Electrosynthesis of organic compounds from carbon dioxide is catalyzed by a diversity of acetogenic microorganisms [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2011, 77(9): 2882.
- [38] MARSHALL C W, ROSS D E, FICHOT E B, *et al.* Electrosynthesis of commodity chemicals by an autotrophic microbial community [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2012, 78(23): 8412.
- [39] MARSHALL C W, ROSS D E, FICHOT E B, *et al.* Long-term operation of microbial electrosynthesis systems improves acetate production by autotrophic microbiomes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(11): 6023.
- [40] 蒋永, 苏敏, 张尧. 生物电化学系统还原二氧化碳同时合成甲烷和乙酸[J]. *应用与环境生物学报*. 2013, 5: 833.  
JIANG Yong, SU Min, ZHANG Yao. Simultaneous production of methane and acetate from carbon dioxide with bioelectrochemical systems[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2013, 19(5): 833.
- [41] 张尧, 张闻杰, 蒋永, 等. 生物电化学系统固定二氧化碳同时产生乙酸和丁酸[J]. *应用与环境生物学报*, 2014(2): 174.  
ZHANG Yao, ZHANG Wenjie, JIANG Yong, *et al.* Simultaneous microbial electrosynthesis of acetate and butyrate from carbon dioxide in bioelectrochemical systems [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2014(2): 174.
- [42] Modestra J A, Navaneeth B, Mohan S V. Bio-electrocatalytic reduction of CO<sub>2</sub>: Enrichment of homoacetogens and pH optimization towards enhancement of carboxylic acids biosynthesis[J]. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 2015, 10: 78.
- [43] HUANG S, LINDAHL P A, WANG C, *et al.* 2, 4, 6-Trinitrotoluene Reduction by Carbon Monoxide Dehydrogenase from *Clostridium thermoaceticum* [J]. *Applied And Environmental Microbiology*, 2000, 66(4):1474.
- [44] ADRIAN N R, ARNETT C M. Anaerobic Biodegradation of Hexahydro-1, 3, 5-trinitro-1, 3, 5-triazine (RDX) by *Acetobacterium malicum* Strain HAAP-1 Isolated from a Methanogenic mixed culture[J]. *Current Microbiology*, 2004, 48(5):332.
- [45] SHERBURNE L A, SHROUT J D, ALVAREZ P J J. Hexahydro-1,3, 5-trinitro-1, 3, 5-triazine (RDX) degradation by *Acetobacterium paludosum* [J]. *Biodegradation*, 2005, 16(6):539.
- [46] DRZYZGA O, REVELLES O, DURANTE-RODRIGUEZ G, *et al.* New challenges for syngas fermentation: towards production of biopolymers[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2015, 90(10): 1735.