

文章编号:1000-8055(2011)09-1935-06

波瓣喷射器强化混合的数值研究

单 勇, 张靖周, 朱华萍

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 利用 FLUENT CFD(computational fluid dynamics)数值计算软件,对波瓣喷射器中无化学反应异类气体的混合过程进行了数值研究,二氧化碳气体作为主流从波瓣状狭缝中喷出,与同向空气流在混合管内进行混合.获得了两股气流相互混合过程中的速度分布、流向涡分布、组分分布等相关信息,分析了波瓣喷射器结构参数对流向涡环流强度的影响.波瓣喷射器诱导的流向涡强化了同向流动气体之间的混合效率,组分分布较为均匀.

关 键 词: 波瓣喷射器; 流向涡; 混合特性; 数值计算; 强化混合

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Numerical study on mixing enhancement of lobed injector

SHAN Yong, ZHANG Jing-zhou, ZHU Hua-ping

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The mixing characteristics of two different kinds of fluids with non-reaction in the lobed injector were numerically studied by using FLUENT CFD(computational fluid dynamics) software. The primary flow (CO_2) was injected from the lobed slot between two corrugated plates, and then mixed with the coflowing secondary flow (air) in the mixing duct. The velocity fields, streamwise vortice structures and species distribution were obtained to analyze the effects of lobed injector parameters on the circulation intensity of streamwise vortices. The streamwise vortices induced by the lobed injector are helpful to improve the mixing efficiency of the two coflowing fluids, and make the species distribution more uniform.

Key words: lobed injector; streamwise vortice; mixing characteristics; numerical calculation; mixing enhancement

波瓣混合器具有高效的强化掺混能力,能使主、次流在较短的轴向距离内得到较为充分的混合.国内外众多研究者对波瓣混合结构进行了大量的研究工作,揭示出波瓣尾缘诱导的具有无黏特征的流向涡是强化混合的支配因素^[1-7].

在各类热动力装置燃烧室中,燃料与空气的混合均匀性对燃烧污染物的排放及燃烧效率具有很大影响^[8-10]. Mitchell, Majamark 等^[11-12]研究人员借鉴波瓣混合器强化同轴射流混合的机理,提出了一种新颖的波瓣喷射器结构,即将燃料从波瓣状狭缝中喷射,与流经波瓣结构的空气混合.已有研究表明,使用狭缝形波瓣喷射器,能够实现燃

料和空气流在能量损失与压降均很小的情况下发生充分的混合;同时,把燃料喷射到一个快速变化的流场中,使燃料与氧化剂有充分的接触,足以延迟点火,使得两股气流在混合更加均匀的情况下发生反应,提高燃烧效率,有效抑制燃烧过程中氮氧化物 NO_x 的生成.

本文对利用波瓣喷射器强化异类气体的同向流动混合过程进行数值研究.用二氧化碳从波瓣形的狭缝中喷出,与流过波瓣外壁面两侧边的空气流在混合段进行混合.通过数值研究,分析波瓣喷射器结构参数对混合特性的影响,进一步揭示波瓣喷射器诱导的流向涡对同向异类气体混合性

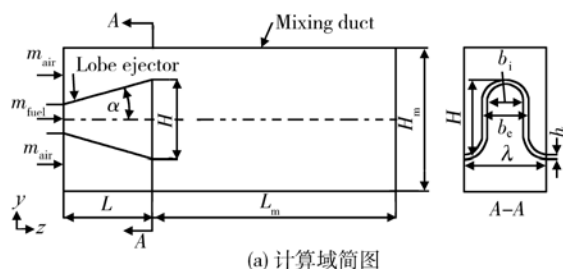
收稿日期:2010-08-30; 修订日期:2010-12-18

作者简介:单勇(1978—),男,江苏扬州人,副教授,博士,主要从事流体强化混合和控制研究.

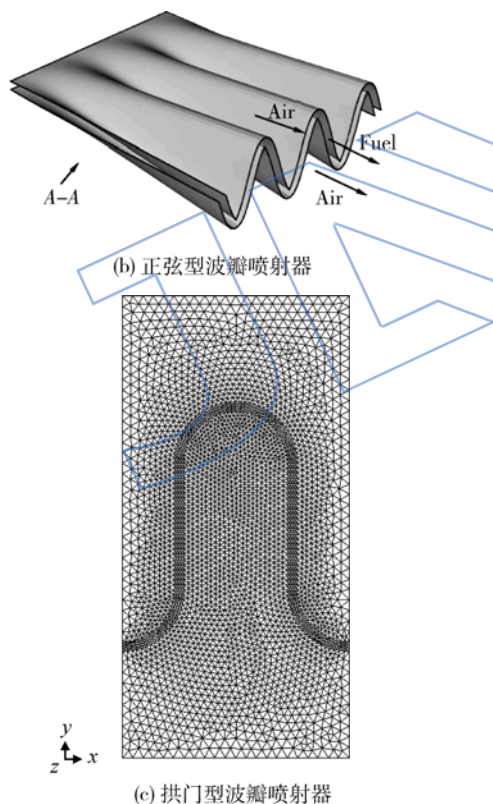
能的作用机制。

1 计算模型及边界条件

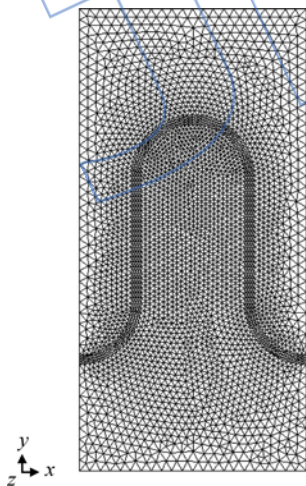
图1为计算域简图,本文在建立波瓣喷射器计算模型时,考虑到只对无化学反应的两股异类气流的混合过程进行研究,主流入口燃气用二氧化碳代替,从两块卷曲的波瓣状型板之间的狭缝中喷出;次流入口气体为空气,假设其成分为氮气与氧气,体积百分比分别为0.79和0.21,流经波瓣型面两侧边与二氧化碳在混合段进行混合。



(a) 计算域简图



(b) 正弦型波瓣喷射器



(c) 拱门型波瓣喷射器

图1 计算模型

Fig. 1 Computational model

波瓣型面为拱门型和正弦型两种,波瓣喷射器主要结构参数包括:波瓣高度 H ,波瓣长度 L ,波瓣扩张角 α ,波瓣波长 λ ,狭缝宽 h 。

所采用的边界条件为

1) 进口条件:进口给定质量流量,两侧边空气进口取温度为300 K,压力为101325 Pa,狭缝进

口二氧化碳温度取600 K。

2) 出口条件:喷射器出口为内部面,和下游流场相连,整个流场出口为压力出口,给定压力为101325 Pa。

3) 壁面条件:计算时忽略喷射器壁厚,流体流动按理想可压流处理。湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 两方程湍流模型,在近壁区采用标准壁面函数法进行处理。压力-速度耦合采用SIMPLE(semi-implicit method for pressure linked equations)算法,各物理量的离散采用二阶迎风格式。收敛的标准是判断各物理量的相对残差小于 10^{-5} 。

考虑到所建模型有对称性和周期性,故取一个波长波瓣区域进行计算, z 方向为气体混合流向。计算采用FLUENT计算软件,考虑到波瓣的复杂型面,计算中采用非结构化网格,整个计算区域的网格数达到近120万。

2 波瓣喷射器强化掺混作用

为了揭示波瓣喷射器掺混的效果和作用机制,选择一个特定几何结构的拱门型波瓣喷射器作为研究对象。波瓣波长 $\lambda=31.8$ mm,波瓣长度 $L=63$ mm,波瓣高度 $H=35$ mm,内瓣宽 $b_i=14.5$ mm,外瓣宽 $b_e=17.3$ mm,狭缝宽 $h=1.4$ mm,波瓣扩张角 $\alpha=30^\circ$,矩形混合管长度 $L_m=250$ mm,宽 $W_m=31.8$ mm,高 $H_m=65$ mm。二氧化碳和空气流的质量流量分别为0.01 kg/s和0.5 kg/s,相应的速度比约为1.17。

2.1 沿程二氧化碳质量组分分布

图2给出了拱门型波瓣喷射器在混合管内不同横截面上二氧化碳质量分数等值线分布图,从图上可看出从波瓣喷射器狭缝喷出的二氧化碳气体在喷注入同向空气流中的混合过程。在波瓣喷射器出口处,二氧化碳主要集中在波瓣形的缝隙处,对应的质量分数为1,其余区域的二氧化碳质量分数则为0;在离开喷射器出口 $z/\lambda=1$ 的混合段截面上,具有相对较高二氧化碳质量分数的区域出现在波瓣型面两侧壁附近,等值线发生一定程度的扭曲;在 $z/\lambda=3$ 的混合段截面上,波瓣瓣峰和瓣谷处的二氧化碳质量分数有较明显的增加,波瓣中央区域的二氧化碳质量分数分布已较为均匀;在 $z/\lambda=6$ 的混合段截面上,整个截面上的二氧化碳质量分数分布梯度明显衰减。

从波瓣喷射器狭缝喷出的二氧化碳气体在喷注入同向空气流中的混合,显然不是依赖于两股气流质量分数差形成的简单剪切型混合,而是具

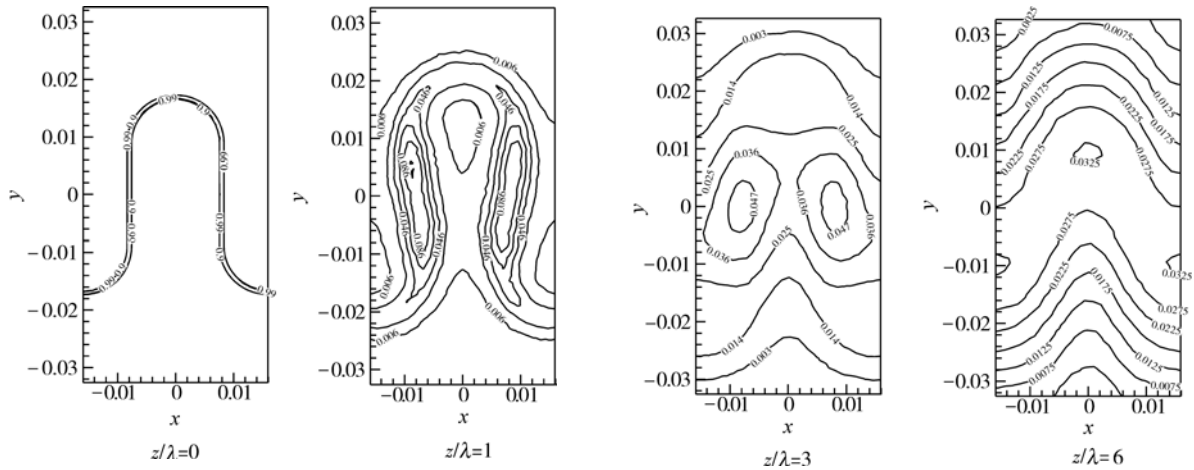


图2 二氧化碳质量分数等值线分布图

Fig. 2 CO₂ mass fraction distribution contours

有对流-扩散的混合特征。

2.2 横截面速度矢量分布

图3是波瓣喷射器混合段横截面速度矢量图,可以清楚地看出,由于波瓣的波峰和波谷分别存在一定的径向向外和向内的扩张角,使得流经波瓣型面的空气流在流动过程中产生互为相反的径向分速度,从而在波瓣喷射器出口处一个波瓣

波长内形成一对方向互为反向的流向涡。流向涡定义为

$$\Omega_s = \Omega_z = \partial u / \partial y - \partial v / \partial x \quad (1)$$

其中 u, v 分别是 x 和 y 向的速度分量。将其作无量纲化处理为 $\Omega_s = \Omega \lambda / u_s$, λ 是波瓣喷射器的波瓣波长, u_s 是空气流的入口速度。图4为波瓣喷

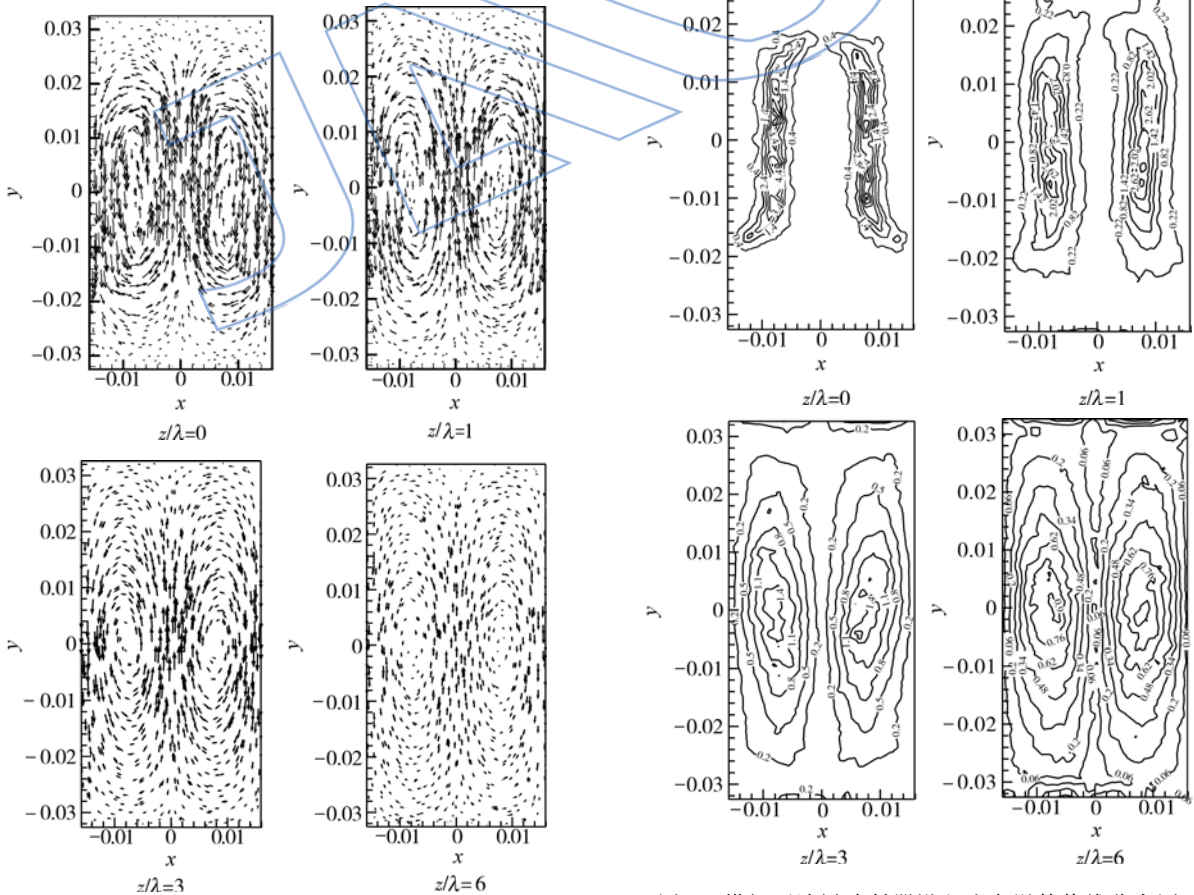


图3 横截面速度矢量

Fig. 3 Velocity vector at streamwise section

图4 拱门型波瓣喷射器沿程流向涡等值线分布图

Fig. 4 Streamwise vortex contours distribution at streamwise section for arch lobed injector

射器混合段沿程流向涡等值线分布图。

从流向涡的分布图上可看出,流向涡在波瓣出口处产生,其尺度基本与波瓣高度相当,并且流向涡强度相对较大。在下游截面上,流向涡开始向周围扩散,并且强度逐渐减弱。

将二氧化碳气体从波瓣喷射器狭缝喷注入存在阵列流向涡的同向空气流中,在流向涡的环流作用下,二氧化碳气体和空气流之间形成大尺度的对流型混合,并且波瓣喷射器的褶皱边界增大了喷射器尾缘下游主流和次流的接触边界周长,使两股气流之间的剪切作用也有所加强。因此,具有对流-扩散混合特征的波瓣喷射器有利于强化燃料与空气流的混合。

3 波瓣喷射器结构参数的影响

通过改变波瓣喷射器主要结构参数,研究其对于流向涡速度环量的影响。在计算中,波瓣的结

构参数按以下两个系列改变:

1) 保持波瓣高度 $H=35\text{ mm}$ 不变,波瓣长度 L 从 46 mm 变化至 96 mm ;

2) 保持波瓣长度 $L=63\text{ mm}$ 不变,波瓣高度 H 从 24 mm 变化至 47 mm 。

3.1 波瓣型面的影响

图5为正弦型波瓣喷射器诱导的流向涡沿程分布。波瓣几何参数为:波长 $\lambda=31.8\text{ mm}$,波瓣长度 $L=63\text{ mm}$,波瓣高度为 $H=35\text{ mm}$,波瓣扩张角 $\alpha=30^\circ$ 。

在相同的空气流速和波瓣长度、波瓣高度的条件下,与拱门型波瓣喷射器相比,正弦型波瓣喷射器诱导的流向涡强度相对较弱(在波瓣喷射器出口截面上,拱门型的最大 Ω_s^* 约为 4.4 ,正弦型的最大 Ω_s^* 约为 3.2),表明空气流流过正弦型波瓣型面时所形成的流动变形要小于拱门型的波瓣型面。图6给出了正弦型波瓣喷射器在混合管

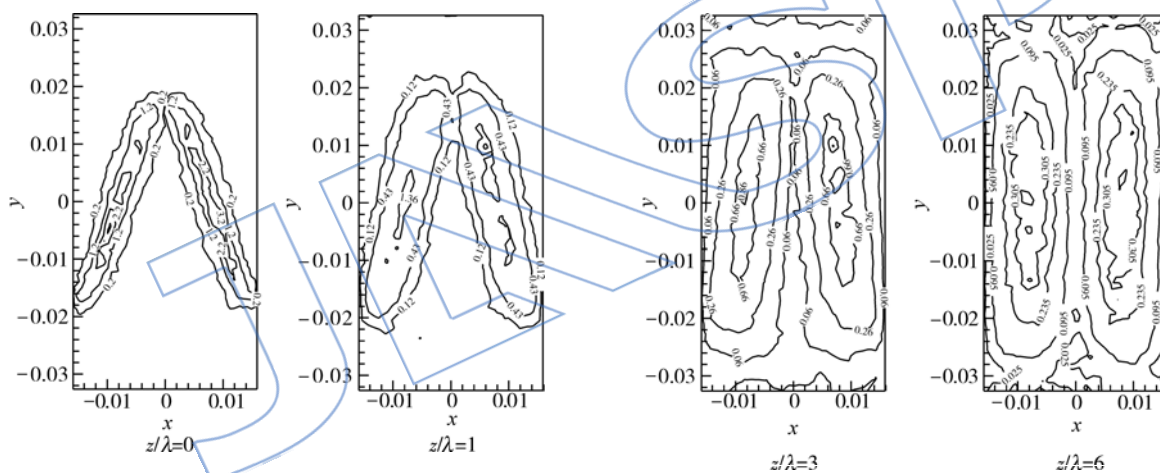


图5 正弦型波瓣喷射器沿程流向涡等值线分布图

Fig. 5 Streamwise vortex contours distribution at streamwise section for sinusoidal lobed injector

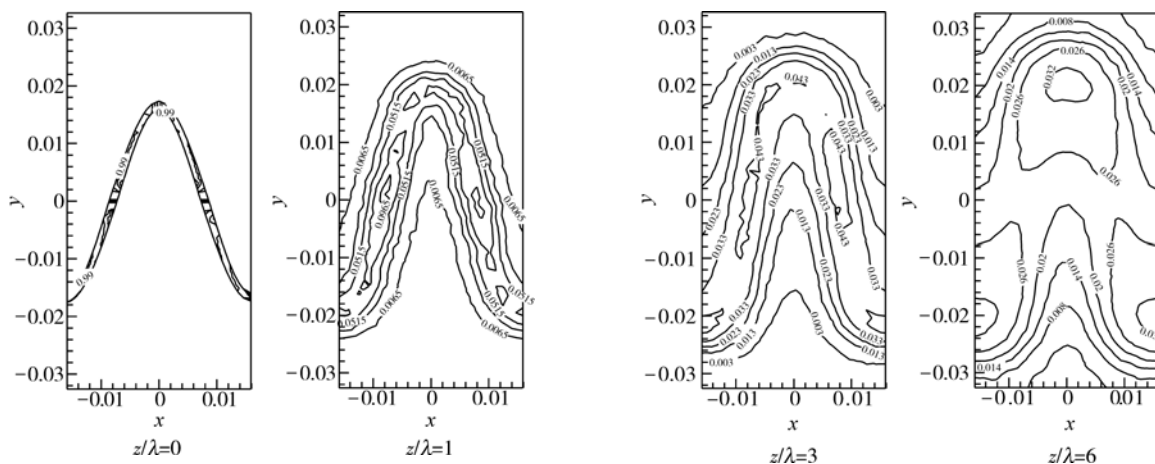


图6 正弦型波瓣喷射器混合管内二氧化碳质量分数沿程等值线分布图

Fig. 6 CO_2 mass fraction distribution contours at streamwise section for sinusoidal lobed injector

内不同横截面上二氧化碳质量分数等值线分布图,与拱门型波瓣喷射器相比,二氧化碳在空气流中的对流-扩散效果有所降低。

3.2 波瓣长度和波瓣高度的影响

由波瓣喷射器产生的流向涡的强度亦可用速度环量表示为

$$\Gamma = \oint_c \mathbf{V} ds \quad (2)$$

式中 c 是计算区域的封闭曲线, $\mathbf{V}$ 是与曲线相切的速度向量。根据 Stokes 定理,这个环量等于计算区域面积 A 之内旋涡流向分量的面积分,于是

$$\Gamma = \oint_c \mathbf{V} ds = \int_A \Omega_s dA \quad (3)$$

图 7(a)和 7(b)分别为拱门型和正弦型波瓣喷射器诱导的流向涡速度环量沿程变化曲线。可以看出,拱门型波瓣喷射器相对于正弦型波瓣喷射器可以诱导更大的流向涡强度。同时,在本文研究的波瓣扩张角范围内,无论是通过增加波瓣的高度(在波瓣长度一定时),还是通过减小波瓣的长度(在波瓣高度一定时),波瓣扩张角的增加均

可以提高流向涡的速度环量,说明波瓣扩张角的增加导致空气流流经波瓣型面时形成更强烈的流动变形。还有一个值得关注的现象是,通过改变波瓣的高度,流向涡速度环量随波瓣扩张角增加的提高幅度更为显著。假设在流动不发生分离,且边界层堵塞率极低的条件下,运用一维无黏近似分析方法获得

$$\Gamma \propto UH \tan(\alpha/2) \quad (4)$$

即波瓣诱导的大尺度流向涡的环量 Γ 正比于来流的特征速度 U 、波瓣高度 H 和波瓣出口扩张半角的正切值 $\tan(\alpha/2)$ 。

由于本文是以波瓣长度 $L=63\text{ mm}$ 、波瓣高度 $H=35\text{ mm}$ 为基准改变波瓣扩张角,当波瓣长度一定时,若扩张角小于 30° ,扩张角减小意味着波瓣高度降低,因此,在相同的波瓣扩张角下,改变波瓣高度的速度环量值要小于改变波瓣长度的速度环量值;反之,若扩张角大于 30° 时,则在相同的波瓣扩张角下,改变波瓣高度的速度环量值要大于改变波瓣长度的速度环量值。

4 结论

1) 波瓣喷射器特有的几何型面使空气流在波瓣出口处形成流向涡结构,其尺度基本与波瓣高度相当,将二氧化碳气体从波瓣喷射器狭缝喷注入存在阵列流向涡的同向空气流中,在流向涡的环流作用下,二氧化碳气体和空气流之间形成对流-扩散型混合。

2) 在相同的空气流速度和波瓣长度、波瓣高度的条件下,与拱门型波瓣喷射器相比,正弦型波瓣喷射器诱导的流向涡强度相对较弱,表明空气流流过正弦型波瓣型面时所形成的流动变形要小于拱门型的波瓣型面,二氧化碳在空气流中的对流-扩散效果有所降低。

3) 波瓣扩张角的增加导致空气流流经波瓣型面时形成更强烈的流动变形,通过改变波瓣高度,流向涡速度环量随波瓣扩张角增加的提高幅度更为显著。

参考文献:

- [1] 单勇,张靖周. 波瓣喷管引射-混合器的数值研究与验证[J]. 推进技术,2004,25(4):320-324.
SHAN Yong, ZHANG Jingzhou. Numerical computation and examination of a lobed mixer-ejector[J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(4): 320-324. (in Chinese)
- [2] 张靖周,谢志荣,李立国. 三维强迫混合波瓣结构流场的数值研究[J]. 推进技术,2001,22(3):205-208.

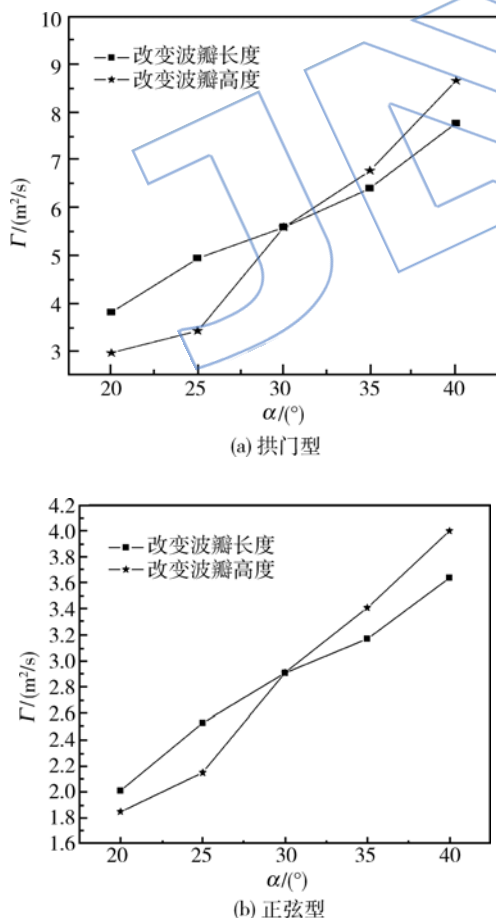


图7 波瓣结构参数对速度环量的影响

Fig. 7 Effects of lobe parameters on the circulation

- ZHANG Jingzhou, XIE Zhirong, LI Liguu. Numerical investigation of three dimensional flow fields for forced mixer lobe configuration[J]. Journal of Propulsion Technology, 2001, 22(3): 205-208. (in Chinese)
- [3] McCormick D C, Bennett J C. Vortical and turbulent structure of a lobed mixer free shear layer[J]. AIAA Journal, 1994, 32(9): 1852-1859.
- [4] Eckerle W A, Sheibani H, Awad J. Experimental measurement of the vortex development downstream of a lobed forced mixer[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1992, 114(1): 63-71.
- [5] Presz W M, Gousy R G, Morin B L. Forced mixer lobes in ejector designs[R]. AIAA Paper 86-1614, 1986.
- [6] Tsui Y Y, Wu P W. Investigation of the mixing flow structure in multilobe mixers[J]. AIAA Journal, 1996, 34(7): 1386-1391.
- [7] Hu H, Saga T, Kobayashi T, et al. Investigation of the vortex structures downstream of a lobed nozzle by mean of dual-plane stereoscopic PIV[R]. Göttingen, Germany: 4th International Symposium on Particle Image Velocimetry, PIV'01 Paper 1020, 2001.
- [8] Gore J P, Zhan N J. NO_x emission and major species concentrations in partially premixed laminar methane/air co-flow jet flames[J]. Combustion and Flame, 1996, 105(3): 414-427.
- [9] Smith L L, Majamaki A J, Lam I T, et al. Mixing enhancement in a lobed injector[J]. Physics of Fluids, 1997, 9(3): 667-678.
- [10] Strickland J H, Selerland T, Karagozian A R. Numerical simulations of a lobed fuel injector[J]. Physics of Fluids, 1998, 10(11): 2950-2956.
- [11] Mitchell M G, Smith O I, Karagozian A R. Effects of passive fuel-air mixing and emissions control via lobed injectors[J]. AIAA Journal, 2004, 42(1): 61-69.
- [12] Majamark A J, Smith O I, Karagozian A R. Passive mixing control via lobed injectors in high-speed flow[J]. AIAA Journal, 2003, 41(4): 623-632.