

化学氧碘激光器光腔边界层的被动控制方法实验*

徐大川^{1,2}, 顾蕴松¹, 任泽斌², 陈志强², 王海锋²

(1. 南京航空航天大学航空学院, 江苏南京 210016;

2. 中国空气动力研究与发展中心设备设计及测试技术研究所, 四川绵阳 621000)

摘要:针对化学氧碘激光器(COIL)光腔内边界层的被动控制方法,设计了三种实验件。光腔的上下壁板是可拆卸的,可以更换不同的实验件,以此比较边界层的控制效果。实验结果表明:开槽板、主流引射缝和开孔板在对光腔边界层的控制上都取得了一定的效果,改善了光腔特别是光腔后半部分的压力分布。在一定范围内,增加边界层的抽气量,可以进一步减小边界层厚度,降低光腔压力,同时提高 COIL 出光功率,但是当抽气量过大时,反而会降低出光功率。三种实验件中,主流引射的方式对抽气量最敏感,当抽气量增加至 5% 时,COIL 出光功率已经明显下降;开孔板对抽气量不太敏感,抽气量从 1% 增加至 7%,对 COIL 出光功率的影响并不明显。

关键词:化学氧碘激光器;光腔;边界层;控制方法

中图分类号:TN248.5 文献标志码:A 文章编号:1001-2486(2022)01-085-07

Experimental study on the passive boundary layer control methods of chemical oxygen-iodine laser cavity

XU Dachuan^{1,2}, GU Yunsong¹, REN Zebin², CHEN Zhiqiang², WANG Haifeng²

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Facility Design and Instrumentation Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: Aiming at the passive boundary layer control methods of COIL (chemical oxygen-iodine laser) cavity, three types of experiment rigs were designed. The upper and bottom walls of laser cavity are removable, so the boundary layer control effect with different experiment rigs can be compared. The experiment results indicate that the thickness of boundary layer in laser cavity can be reduced by both slotted wall, mainstream ejected slot and perforated wall. The pressure distribution in cavity, especially in the latter of cavity, is improved. The boundary layer thickness can be reduced further by increasing the sucking rate in a proper range, meanwhile the cavity pressure can be dropped and the COIL power can be increased. But the COIL power also can be dropped with the overlarge sucking rate. Among the three experiment rigs, the mainstream ejected slot is the most sensitive to sucking rate, that when the sucking rate improved to 5%, the COIL power drops obviously. The perforated wall is the most insensitive to sucking rate, and the COIL power has little change while the sucking rate improved from 1% to 7%.

Keywords: chemical oxygen-iodine laser; laser cavity; boundary layer; control method

世界上第一台化学氧碘激光器(COIL)是美国空军武器实验室的 McDermott 首次演示成功的电子跃迁高能激光器^[1],它的基础是光解碘激光器^[2]。其基本理论是 1972 年英国科学家 Thush 首先提出的,他认为激发态氧和碘原子近共振传能可产生激发态碘原子,可以实现激射过程。

COIL 光腔的宽高比很大,来流压力低,雷诺数比一般流动低几个数量级,同时存在放热反应,边界层也比较厚^[3]。光腔内产生的较厚边界层对 COIL 的运行来说是很不利的:一方面,较厚的

边界层会减小有效气流通道的面积,使来流可能产生堵塞现象;另一方面,由于 COIL 来流为超声速气流,较厚的边界层会产生复杂的激波-边界层干扰,使流动产生严重的分离,从而破坏光腔内的流场结构,影响 COIL 的工作状态。因此对 COIL 光腔的边界层进行控制,减小其厚度,改善光腔内流场结构,是提高 COIL 运行效率的有效手段之一。

针对边界层控制的问题,国内外学者开展了大量的研究。常见的边界层控制技术有边界层吹除控制、旋涡发生器控制、流向狭槽控制和微射流控制等^[4-9]。Debiasi 等^[10]研究了某型 S 弯进气

* 收稿日期:2020-07-14

作者简介:徐大川(1985—),男,安徽界首人,博士研究生,E-mail:xudachuan@nuaa.edu.cn;

王海锋(通信作者),男,高级工程师,硕士,E-mail:wanghf1982@163.com

道吹吸组合流动控制,发现组合流动控制有效控制了进气道内部流动分离,提高了出口气流流场品质。Peacock^[11]利用低速叶栅风洞,针对两种压气机叶型,利用边界层吸气的方式控制角区失速,发现在叶片吸力面大约 50% 轴向弦长处布置抽吸孔,可以有效抽吸大部分低能量流动,当抽吸气量达到进气量的 0.6% 时,能较好地阻止流动分离。Schulte 等^[12]对开槽放气状态下的平面激波-边界层干扰问题进行了研究,探讨了放气位置和放气角度的影响,并进行了风洞验证实验。苏伟仪等^[13]采用数值模拟的方法,分别对压缩拐角和激波入射平板两种典型流动的边界层分离进行了无源被动控制研究,结果表明新型无源被动控制方法可以消除 20° 压缩拐角流动所产生的分离泡;对激波入射平板所诱导的边界层分离,可以将分离区长度减小 42%。刘雷等^[14-15]在单独对进气道进行抽吸控制数值研究并优选出最佳方案之后,将最佳方案应用到进气道加风扇级的全流道,进而开展全流道数值模拟,结果表明,吸气后风扇级整体性能有较大幅度提升,堵塞流量及最大效率分别增加约 0.63% 和 0.57%。孙润鹏等^[16]以二维平板/楔结构为基础,研究了斜激波冲击平板诱导边界层分离现象,分析了吹除位置和总压对分离区及流场的影响,研究结果表明加入吹除控制后,流场参数得到有效改善,吹除喷嘴靠近分离区,吹除效果更好。刘光远等^[17]研制了一种适用于 2.4 m 跨声速风洞半模型试验段侧壁的梯形涡流发生器,并进行了实验验证,结果表明,加装涡流发生器效果明显,亚声速范围内能使边界层厚度降低 20%~30%,对主气流均匀性影响可忽略。

利用抽吸的方式进行边界层控制,其优点包括能有效阻止激波-边界层相互作用,使下游边界层更薄,减少流动畸变;其缺点是损失了部分质量流量。COIL 光腔内的流动为低雷诺数、含化学反应的超声速流动,其流动状态与超声速风洞、超声速进气道等内的流动相比有特殊性,表现在两个方面:一是雷诺数较低,边界层发展更加快速;二是光腔内进行着放热化学反应,使气流的静压升高、马赫数降低。这两种因素相互影响,使光腔内的流动很容易发生堵塞现象。因此控制光腔内的边界层发展,是提高 COIL 工作性能的有效方法之一。

目前关于 COIL 流动的研究主要集中在光腔的几何构型、流动与化学反应的耦合机理等方面,尚未发现关于 COIL 光腔边界层控制研究的公开报道。针对 COIL 光腔内的流动特点,本文采用被动

抽吸的方法对光腔边界层控制开展了实验研究。

1 COIL 工作原理及光腔流动特点

1.1 COIL 工作原理

COIL 主要包括单重态氧发生器、光学谐振腔(光腔)、碘蒸汽发生器、氧碘混合超声速阵列喷管等,如图 1 所示。

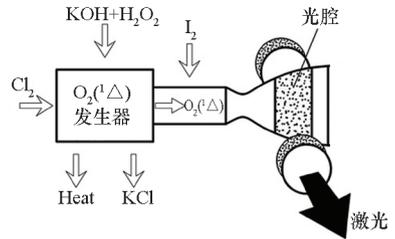


图 1 COIL 装置示意

Fig. 1 Diagram of COIL

在单重态氧发生器中,碱性过氧化氢溶液以 8~10 m/s 的流速射流喷出,与 Cl₂ 反应生成单重态氧。根据单重态氧发生器结构和器件水平,所产生的单重态氧的体积分数一般在 40%~60%。在氧碘混合喷管亚声速段加入碘蒸汽。在单重态氧与碘发生器混合过程中,碘分子被离解为碘原子,碘原子和激发态氧近共振传能,并被泵浦到激发态。在超声速喷管中,气流被加速至马赫数 2.0 左右,气流静温下降至 150~170 K,从而使小信号增益系数 g 约为 $1 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$,最后在光腔内受激辐射,产生激光^[3]。

1.2 光腔流动特点

光腔内的增益介质是工作在负压条件下的超声速流动气体。当正常运行时,光腔内压力一般要求维持在 1 000 Pa 以内,并且要求尾气快速及时排出。

与一般的流动不同,光腔内的流动具有以下一些特点:

1) COIL 光腔截面形状的宽度和高度的比值一般很大。这种形状通道内的气流流动状态与常见形状通道内的流动有很大不同。气流在通道角落里会受到很强的三维效应,并可能产生分离。

2) 光腔内流动的特征雷诺数一般比风洞中的雷诺数至少低一个数量级。因此其边界层的厚度更厚,增长速度也更快,具有更加显著的黏性效应。

3) 光腔内流动中存在化学反应放热以及激发态氧的放热。气流的流动状态受 COIL 运行状态的影响较大,当 COIL 不出光或者出光不正常时,化学反应产生的能量不能正常转化为激光能量,将加剧流动内部放热现象。

Malkov 等^[18]的研究表明,当初始压力很低时,超声速流动充满整个流道,光腔内也将建立起完全符合预期的超声速流场。随着初始压力的不断升高,激波串结构将会逐渐向光腔入口方向移动,光腔内的压力也逐渐升高。这种现象说明尽管通道内的流动是超声速的,但是边界层厚度较厚,且其内流动是亚声速的,扩压器下游或者出口位置产生的扰动仍然可以通过边界层向上游传播,从而影响光腔内的流场结构。

2 实验装置介绍

在边界层控制方法的实验研究中,利用真空系统和主流引射,采用边界层抽吸的方法对光腔边界层进行控制。

2.1 COIL 平台

实验研究是在某型 COIL 平台上开展的,其光腔上下壁板设计为可拆卸的,以便更换实验件,比较不同的实验件对边界层的控制效果。图 2 给出了光腔的示意图。

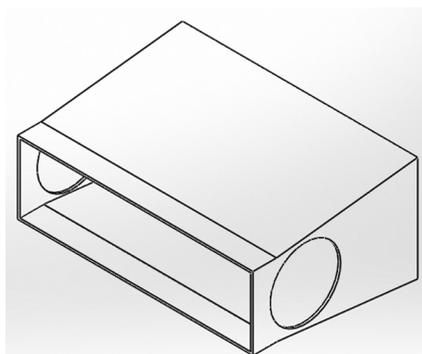


图 2 光腔结构示意图

Fig. 2 Diagram of laser cavity

2.2 边界层控制实验件

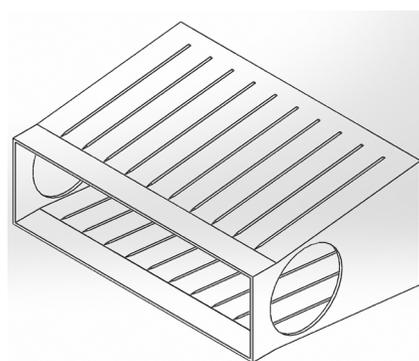
利用抽吸进行边界层控制的一个关键参数是抽气量,当抽气量较小时,不能有效控制边界层;当抽气量较大时,又会影响主流气流的流场参数。本文首先根据平板可压缩流动边界层厚度发展公式,估算出光腔上下壁面的边界层厚度,进而估算出抽气量。抽气量的控制是通过安装在真空管道内的节流孔板进行的,不同开孔率的节流孔板对应不同的抽气量。再根据抽气量、节流面积等参数确定开孔或开槽的面积。

从流动来说,通气壁(开孔壁、开槽壁)附近的流动是很复杂的。当超声速流动产生的激波达到壁面后,在开孔或开槽处,气流几乎没有压力落差就进入驻室,当地压力下降,激波以膨胀波的形式反射。而在实壁处,激波反射仍为激波。反射

的激波和膨胀波需要通过一段混合区才能相互抵消。因此,不仅需要通气面积合适,还要求开孔或开槽尽可能紧密排列,即在一定的开闭比条件下,孔径或槽宽尽量小^[19]。

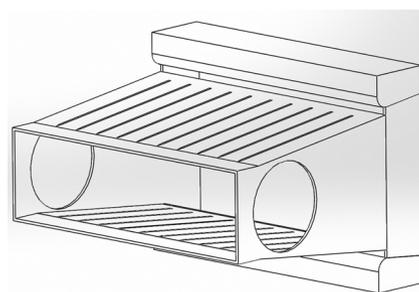
在实验研究中,共设计了 3 种不同的边界层控制实验件,也就是 3 种不同形式的光腔上下壁板。如图 3 所示,3 种实验件分别为开槽板、主流引射缝和开孔板。

开槽板实验件如图 3(a)所示。开槽板与光腔扩开角相等。上下开槽板各开等间距布置的若干条槽。主流引射缝实验件如图 3(b)所示,在开槽板的后缘增加一道主流引射缝。开孔板实验件如图 3(c)所示,任意相邻两个孔的孔距均是相等的。



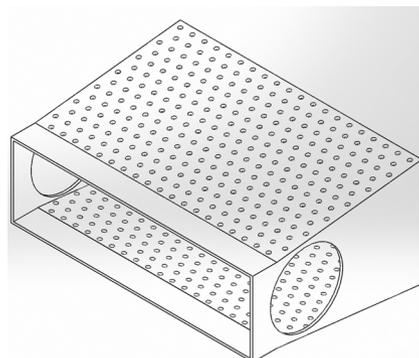
(a) 开槽板

(a) Slotted wall



(b) 主流引射缝

(b) Mainstream ejected slot



(c) 开孔板

(c) Perforated wall

图 3 实验件示意

Fig. 3 Diagram of experiment rig

整个实验研究装置如图 4 所示。在光腔上下壁板外各设计有驻室,实验件安装在驻室内。驻室通过管道与真空系统连接,管道上安装有节流孔板,可根据实验要求更换不同的节流孔板,控制抽气流量。

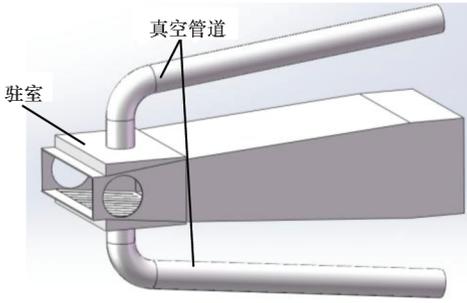


图 4 实验装置示意

Fig. 4 Diagram of experimental facility

在实验过程中,通过观察光腔内的压力变化来考察边界层控制方法的效果。压力测点布置在光腔上壁面,如图 5 所示。测点从左至右依次编号为 1,2,3,...

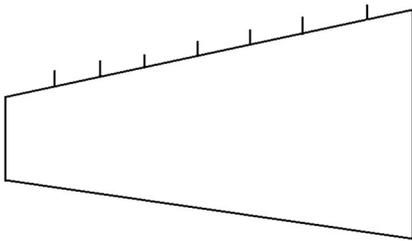


图 5 实壁状态下光腔压力测点沿程分布

Fig. 5 Distribution of measuring points of cavity pressure along channel with solid wall

3 实验结果与分析

3.1 基准实验

在对各组实验件进行实验研究之前,先进行基准实验,即在光腔壁板为原有实壁板的情况下,COIL 运行工作,观察光腔内的压力变化。

图 6 给出了实壁状态下光腔压力在 COIL 运行过程中随时间的变化曲线。由图 6 可以看出,在出光过程中,光腔内压力随着时间的增长而逐渐升高。图中 P_c 为特征压力,初始背压约为 $1.5P_c$;当 COIL 在运行初期时,光腔压力约为 $0.6P_c \sim 0.7P_c$,内部建立起了符合预期的超声速流场。随着实验的进行,一方面背压逐渐升高,将 COIL 气流通道内的激波结构推向上游;另一方面化学反应释放的热量在通道内积累,使气流温度升高。这两方面原因都会使光腔内的气流速度降

低,压力升高,破坏光腔内的超声速流场,影响 COIL 运行状态。

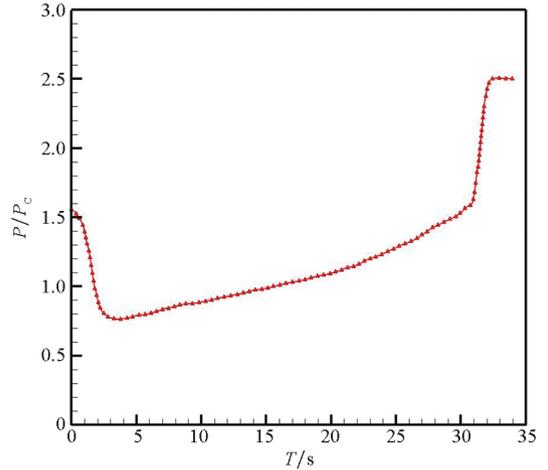


图 6 实壁状态下光腔压力随时间变化曲线

Fig. 6 Variation of cavity pressure with time and solid wall

图 7 给出了光腔内沿程压力测点的测量结果。图 7 中结果表明,光腔压力在光腔内沿着流动方向逐渐升高,说明气流边界层在变厚,使有效气流通道面积减小,导致超声速气流在减速。另外随着时间的增长,压力分布曲线在抬升,这说明边界层厚度随时间在增长,使光腔内流场结构逐渐恶化。

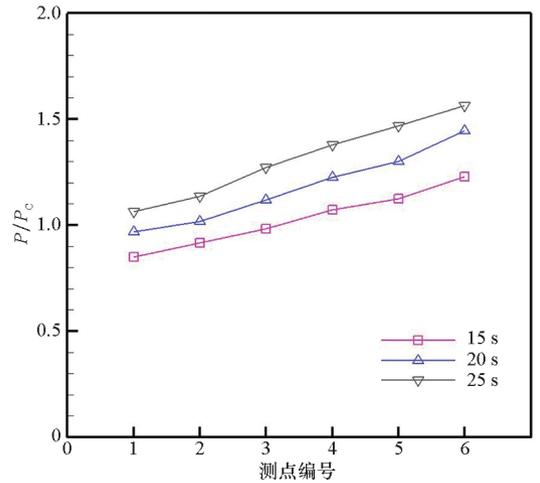


图 7 实壁状态下光腔压力沿程分布

Fig. 7 Distribution of cavity pressure along channel with solid wall

3.2 开槽板实验结果

将光腔上下壁板更换为开槽板,COIL 正常运行,不同抽气量时的光腔沿程压力分布如图 8 所示。图 8 中结果表明,在采用开槽板和边界层抽吸之后,光腔压力分布与实壁状态下的分布有明显不同。在流向上,光腔压力分布先增大后减小。这说明光腔后半部分的边界层厚度

明显减小,有效通道面积增大,气流在光腔后半部分在膨胀加速。在光腔前半部分,压力分布是逐渐增大的,这可能是化学反应的放热导致的。不同抽气量的压力分布中最高压力点均出现在第 3 点,随着抽气量的增加,压力分布整体下降。由此可以说明开槽板可以有效控制光腔内边界层发展。

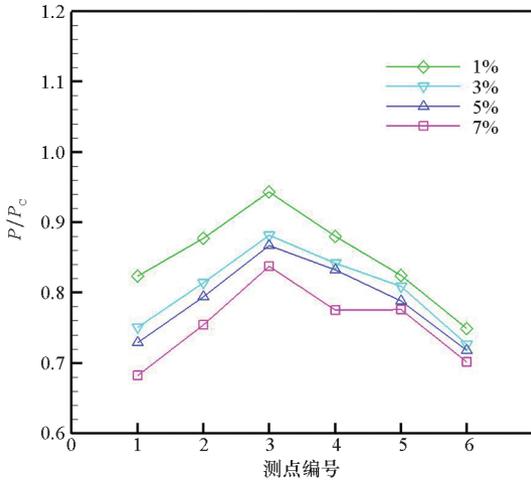


图 8 开槽板不同抽气量时光腔压力沿程分布

Fig. 8 Distribution of cavity pressure along channel at different sucking rate with slotted wall

表 1 给出了不同抽气量时的 COIL 出光功率,其中 N_D 为设计功率。可以看出,在 1% ~ 5% 单位内,增大抽气量,出光功率有所增加。继续增大抽气量至 7%,出光功率开始减小。这说明在小范围内适当增加抽气量,边界层控制效果更加明显,但如果抽气量超过一定程度,有效气流流量的降低会影响到 COIL 的出光功率。

表 1 开槽板不同抽气量时的出光功率

Tab.1 Laser power at different sucking rate with slotted wall

抽气量	N/N_D
1%	0.692
3%	0.696
5%	0.702
7%	0.676

3.3 主流引射缝实验结果

图 9 给出了不同的主流引射缝和抽气量组合下的光腔沿程压力分布。压力分布曲线与开槽板实验结果类似,都呈现在光腔前半部分压力升高、后半部分压力下降的趋势。光腔压力在主流引射

缝和边界层抽气组合方式下更低,并且随着抽气量的增加,压力进一步下降。由此可以说明主流引射或者主流引射和抽气组合的方式可以有效控制边界层。

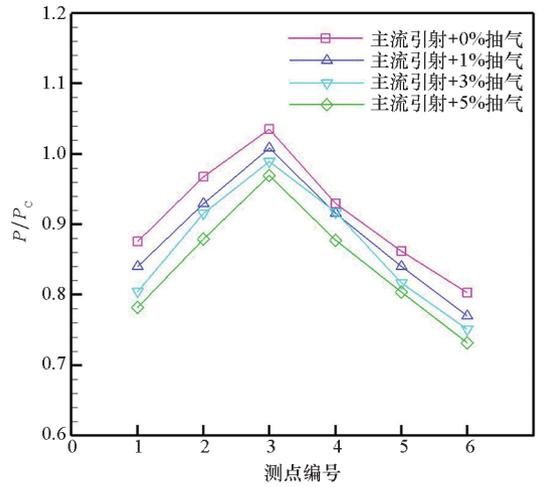


图 9 不同主流引射缝状态下光腔压力沿程分布

Fig. 9 Distribution of cavity pressure along channel at different status of mainstream ejected slot

表 2 给出了不同的主流引射缝和抽气量组合状态下的 COIL 出光功率。可以看出,当采用主流引射和抽气组合时,抽气量增加至 5% 就会导致 COIL 出光功率的明显下降。

表 2 主流引射缝不同状态时的出光功率

Tab.2 Laser power at different status of mainstream ejected slot

状态	N/N_D
主流引射 + 0% 抽气	0.688
主流引射 + 1% 抽气	0.704
主流引射 + 3% 抽气	0.698
主流引射 + 5% 抽气	0.618

3.4 开孔板实验结果

图 10 给出了开孔板状态下不同抽气量时的光腔沿程压力分布。由于开孔的原因,沿程压力测点只保留了中间 4 个测点。压力分布曲线与之前的结果类似,都呈现出在光腔前半部分压力升高、后半部分压力下降的趋势。随着抽气量的增加,压力分布整体进一步下降。由此可以说明开孔板对于控制边界层增长来说,也是有效的。

表 3 给出了开孔板在不同抽气量时 COIL 的出光功率。从中可以看出,当 COIL 上下壁板采

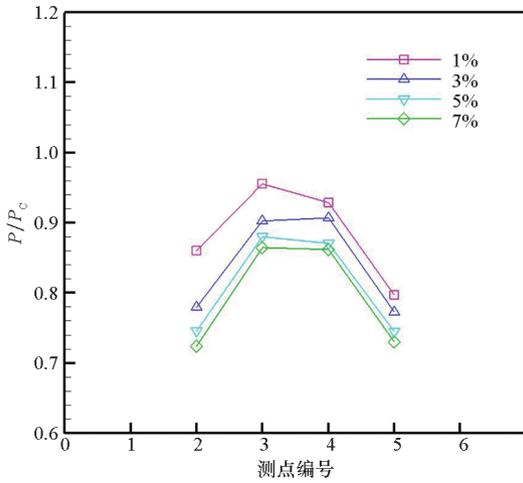


图 10 开孔板不同抽气量时光腔压力沿程分布

Fig. 10 Distribution of cavity pressure along channel at different sucking rate with perforated wall

用开孔板时,抽气量从 1% 增加至 7%,对 COIL 出光功率的影响并不明显。

表 3 开孔板不同抽气量时的出光功率

Tab. 3 Laser power at different sucking rate with perforated wall

抽气量	N/N_D
1%	0.648
3%	0.644
5%	0.650
7%	0.644

4 结论

利用边界层抽吸的方法,通过开槽板、主流引射缝、开孔板三种实验件对 COIL 光腔内的边界控制开展了实验研究,可以得到以下结论:

1) 三种实验件在对光腔边界层控制上都取得了一定的效果,改善了光腔,特别是光腔后半部分的压力分布。

2) 在一定范围内,增加边界层的抽气量,可以进一步减小边界层厚度,降低光腔压力,同时提高 COIL 出光功率,但是当抽气量过大时,反而会降低出光功率。

3) 三种实验件中,主流引射的方式对抽气量最敏感,当抽气量增加至 5% 时,COIL 出光功率已经明显下降;开孔板对抽气量不太敏感,抽气量从 1% 增加至 7%,对 COIL 出光功率的影响并不明显。

参考文献 (References)

- [1] MCDERMOTT W E. An electronic transition chemical laser[J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(8): 469-470.
- [2] KASPER J V V, PIMENTEL G C. Atomic iodine photo dissociation laser [J]. Applied Physics Letters, 1964, 5(11): 231-233.
- [3] 桑凤亭, 金玉奇, 房本杰. 氧碘化学激光[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
SANG F T, JIN Y Q, FANG B J. Chemical oxygen-iodine lasers[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [4] BUR R, BENAY R, CORBEL B, et al. Physical study of shock-wave/boundary-layer interaction control in transonic flow[C]// Proceedings of the 38th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2000.
- [5] LIN Y L, RIMLINGER M, SHIH T, et al. Control of shock-wave/boundary-layer interactions with passive blowing and bleeding[C]// Proceedings of the 33rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1997.
- [6] HEALY M, O'ROURKE M, RAGHUNATHAN S. Further investigations of passive vortex control jets for shock boundary layer interactions[C]// Proceedings of the 1st AIAA Flow Control Conference, 2002.
- [7] HAFENRICHTER E, LEE Y, MCILWAIN S, et al. Experimental investigation of normal shock/boundary layer interaction control using aeroelastic mesoflaps [C]// Proceedings of the 39th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2001.
- [8] HOLDEN H, BABINSKY H. Shock/boundary layer interaction control using 3D devices[C]// Proceedings of the 41st AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2003.
- [9] SRINIVASAN K, DUTTON C, LOTH E. Aerodynamics of recirculating flow control devices for normal shock/boundary layer interactions [C]// Proceedings of the 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2004.
- [10] DEBIASI M, HERBERG M, ZENG Y, et al. Control of flow separation in S-ducts via flow injection and suction [C]// Proceedings of the 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2008.
- [11] PEACOCK R E. Boundary layer suction to eliminate corner separation in cascades of airfoils[R]. London: Her Majesty's Stationery Office, 1956.
- [12] SCHULTE D, HENCKELS A, WEPLER U. Reduction of shock induced boundary layer separation in hypersonic inlets using bleed[J]. Aerospace Science and Technology, 1998, 2(4): 231-239.
- [13] 苏伟仪, 张堃元, 金志光. 一种抑制激波-边界层相互作用的新型无源被动控制[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(6): 738-743.
SU W Y, ZHANG K Y, JIN Z G. Investigation of a new-type passive control method on shock-wave/boundary layer interactions[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29(6): 738-743. (in Chinese)

- [14] 刘雷, 陈浮, 宋彦萍, 等. 大量附面层吸入 S 弯进气道内吹气控制 [J]. 航空动力学报, 2015, 30(10): 2498 - 2507.
LIU L, CHEN F, SONG Y P, et al. Blowing control in S-shaped inlet with significant boundary layer ingestion [J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(10): 2498 - 2507. (in Chinese)
- [15] 刘雷, 陈浮, 宋彦萍, 等. S 弯进气道内附面层抽吸控制对风扇级性能的影响 [J]. 航空动力学报, 2016, 31(7): 1676 - 1685.
LIU L, CHEN F, SONG Y P, et al. Suction control of boundary layer in S-shaped air intake and its influence on fan-stage performance [J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(7): 1676 - 1685. (in Chinese)
- [16] 孙润鹏, 朱卫兵, 黄舜, 等. 吹除法对斜激波/边界层干扰控制数值模拟 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(2): 166 - 173.
SUN R P, ZHU W B, HUANG S, et al. Numerical simulation of the blowing method for controlling oblique shock/boundary layer interactions [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(2): 166 - 173. (in Chinese)
- [17] 刘光远, 王瑞波, 邓吉龙, 等. 基于涡流发生器的风洞侧壁附面层控制 [J]. 航空动力学报, 2016, 31(9): 2140 - 2145.
LIU G Y, WANG R B, DENG J L, et al. Wind tunnel side wall boundary layer control based on vortex generator [J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(9): 2140 - 2145. (in Chinese)
- [18] MALKOV V M, KISELEV I A, ORLOV A E, et al. A pressure recovery system for chemical oxygen-iodine laser based on an active diffuser [J]. Thermophysics and Aeromechanics, 2011, 18(3): 381 - 395.
- [19] 伍荣林, 王振羽. 风洞设计原理 [M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1985.
WU R L, WANG Z Y. Principle of wind tunnel design [M]. Beijing: Beihang University Press, 1985. (in Chinese)