

周期性温度激励对MGDL 混合性能及小信号增益系数的影响

翟小飞¹, 周进², 赖林²

- (1. 中国空气动力研究与发展中心 高超声速冲压发动机技术重点实验室, 四川 绵阳 621000;
2. 国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 将基于周期性温度激励的主动控制技术引入“混合型气动 CO₂ 激光器(MGDL)”研究, 通过数值计算深入研究了周期性温度激励对 MGDL 主/副气流混合特性及小信号增益系数的影响。研究表明: 与未施加周期性温度激励的情形相比, 在 MGDL 副喷管出口位置施加特定幅值及特定频率的周期性温度激励后, 可以显著增强主/副气流的混合效果并大幅提高混合喷管中的小信号增益系数。激励幅值和激励频率对主/副气流混合特性及小信号增益系数有重要影响: 随着激励幅值的增加, 小信号增益系数先增大后减小; 在混合喷管下游区域, 文中所选的六种激励频率条件下获得的小信号增益系数均高于未施加周期性温度激励时的情形; 随着激励频率的增加, 主/副气流的混合效果越来越好, 但当激励频率增加到一定值后, 主/副气流的混合效果不再发生变化。

关键词: 混合型气动 CO₂ 激光器; 周期性温度激励; 混合增强; 小信号增益系数

中图分类号: TN248.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0606003

Influence of periodic temperature excitation on mixing performance and small signal gain coefficient of mixing gasdynamic CO₂ laser

Zhai Xiaofei¹, Zhou Jin², Lai Lin²

- (1. Science and Technology on Scramjet Laboratory, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China; 2. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Initiative control technology based on periodic temperature excitation was used for mixing gasdynamic CO₂ laser (MGDL). Through numerical simulation, influences of periodic temperature excitation on mixing characteristic of donor and assistant flows and small signal gain coefficient of mixing gasdynamic CO₂ laser were studied. Investigation results indicate that compared with the case that has no periodic temperature excitation, mixing efficiency of donor and assistant flows can be enhanced and small signal gain coefficient in mixing nozzle can be improved when periodic temperature excitation with certain excitation amplitude and excitation frequency is imposed at the outlet of assistant nozzle. Excitation amplitude and excitation frequency have important effects on mixing efficiency of donor and

收稿日期: 2019-01-09; 修订日期: 2019-02-18

作者简介: 翟小飞(1982-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事气动 CO₂ 激光器技术方面的研究。Email: zhaixiaofei0@126.com

assistant flows and small signal gain coefficient. As the excitation amplitude increases, the small signal gain coefficient first increases and then decreases. In downstream area of mixing nozzle, small signal gain coefficients under the condition of the six excitation frequencies selected by this paper are all higher than the state without periodic temperature excitation. With the increase of excitation frequency, mixing efficiency of donor and assistant flows becomes better and better; but when the excitation frequency increases up to a certain value, mixing efficiency of donor and assistant flows will not change any more.

Key words: mixing gasdynamic CO₂ laser; periodic temperature excitation; mixing enhancement; small signal gain coefficient

0 引言

主/副气流的混合增强技术是混合型气动 CO₂ 激光器中的一个关键技术。目前混合型气动 CO₂ 激光器采用的主/副气流混合增强方式,均是通过喷管结构的变化被动实现的^[1-4],这使得激光器在高增益、低总压损失、主/副气流快速均匀混合以及良好的结构工艺性上不能达到较理想的统一,因此,寻找最佳的混合增强方式有待新技术的引入。

McLaughlin 等人^[5]的实验研究结果表明:在超声速混合层入口引入电火花激励是增强混合的一个有效途径。研究发现一定频率的扰动(火花放电产生的温度扰动)能够激发出混合层中的大尺度结构。Adelgren 等人^[6]采用脉冲激光对轴对称射流剪切层进行激励,发现脉冲激光在喷管出口壁上激发的脉冲高温有效地诱导了剪切层中大尺度结构的产生。孙明波等人^[7]采用大涡模拟方法,对入流边界层内引入周期性温度激励的二维超声速混合层的演化进行了详细的研究,考虑了激励幅值、激励频率、对流马赫数、雷诺数以及施加激励位置等几个参数的影响。以上研究表明,在超声速混合层入口引入周期性温度激励是增强混合的切实可行而简便的手段。

混合型气动 CO₂ 激光器主/副喷管出口均为超声速气流,因此,是不是可以在混合型气动 CO₂ 激光器主/副喷管出口位置(即混合区域入口位置)施加周期性的温度激励?施加周期性温度激励后,会对混合型气动 CO₂ 激光器主/副气流混合特性、小信号增益系数等产生什么样的影响?鉴于此,文中将基于周期性温度激励的主动控制技术引入混合型气动 CO₂ 激

光器研究,对比研究了未施加周期性温度激励与施加周期性温度激励的区别,并研究了激励幅值和激励频率对主/副气流混合特性及小信号增益系数的影响规律。

1 数值模拟方案

文中的研究对象是国防科技大学赖林提出的一种新型混合型气动 CO₂ 激光器喷管方案^[8],如图 1 所示。该喷管方案由主喷管、副喷管及混合喷管组成,主喷管中的气流为纯氮气,副喷管中的气流为 CO₂ 与 H₂O 的混合物,CO₂ 与 H₂O 的摩尔比例为 30:1。主/副喷管的出口气流均为平行气流。N₂ 与 CO₂ 和 H₂O 的混合物在主/副喷管的出口处开始混合,然后一边混合,一边沿着混合喷管膨胀加速至更高的马赫数。文中在研究周期性温度激励对 MGDL 混合性能及小信号增益系数的影响时,将周期性温度激励施加在副喷管出口位置。计算时选取的喷管结构参数及计算区域如图 2 所示。主喷管出口高度 $D=2\text{mm}$,副喷管出口高度 $d=1\text{mm}$,计算区域为图 2 中虚线围成的区域。

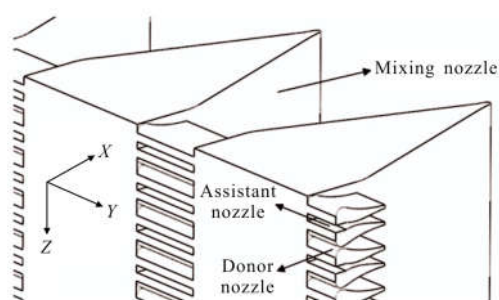


图 1 赖林提出的 MGDL 喷管方案

Fig.1 Nozzle scheme of MGDL presented by Lai Lin

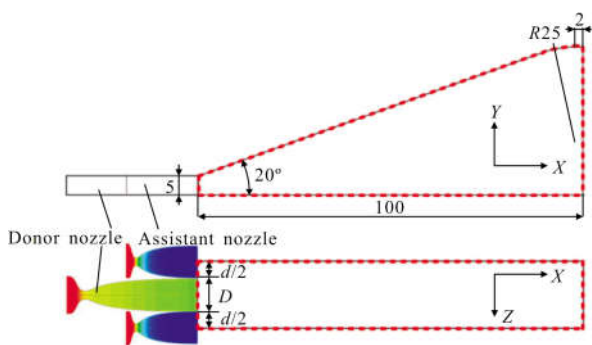


图 2 喷管结构参数及计算区域

Fig.2 Nozzle configuration parameters and calculation region

未施加周期性温度激励时,主喷管出口马赫数为 2.85、出口静压为 70 kPa、出口总温为 2 000 K,副喷管出口马赫数为 2.92、出口静压为 24 kPa、出口总温为 300 K。施加周期性温度激励时,周期性温度激励施加在副喷管出口位置,此时,副喷管出口的总温值呈周期性矩形波分布,如图 3 所示,图中 T 表示周期,矩形波的波谷值为未施加周期性温度激励时副喷管出口的总温值(300 K),矩形波的波峰值为选定的温度激励幅值。施加周期性温度激励时,主/副喷管的其他工作参数与未施加周期性温度激励时相同。

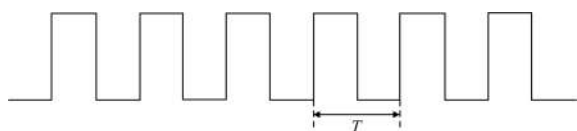


图 3 周期性温度激励示意图

Fig.3 Sketch map of periodic temperature excitation

实现主/副气流的快速均匀混合是提高混合型气动 CO_2 激光器性能的内生要求。主/副气流的快速混合是实现 $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-H}_2\text{O}$ 激光体系各个能级能量转移的前提,影响着各个能级的能量转移过程,此外,主/副气流混合得越充分,激光器光腔的流场均匀性就越好,激光器出光的光束质量就越高。文中采用“相对未混合度”^[9]这一参数来衡量主/副气流的混合效果。“相对未混合度”值越小,表示混合效果越好。“相对未混合度”的定义为:

$$\chi = \frac{\sqrt{\frac{1}{A_{\text{tot}}} \sum [A_i (f_i - f_{\text{avg}})^2] / f_{\text{avg}}}}{\sqrt{(1 - f_{\text{avg}}) f_{\text{avg}}}} \quad (1)$$

式中: χ 表示“相对未混合度”; A_{tot} 表示横截面流通面积; A_i 表示网格 i 的流通面积; f_i 表示网格 i 上的

N_2 质量分数; f_{avg} 表示 N_2 流量与主/副气流总流量的比值,即主/副气流完全混合后 N_2 的平均质量分数。

小信号增益系数是描述激光器增益介质极其重要的一个参数,其计算公式为^[10]:

$$G_0 = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 \tau_{21} \Delta\nu_H} (N_{001} - N_{100}) \frac{45.6}{T} e^{-234/T} \quad (2)$$

式中: λ 为激光波长; τ_{21} 为自发辐射寿命; $\Delta\nu_H$ 为谱线的碰撞加宽; N_{001} 、 N_{100} 分别为 $\text{CO}_2(001)$ 和 $\text{CO}_2(100)$ 振动能级的粒子数密度; T 为静温(即体系的平动温度)。

$\Delta\nu_H$ 、 N_{001} 及 N_{100} 的计算公式如下:

$$\Delta\nu_H = 5.72p \left(\frac{300}{T} \right)^{0.5} (C_{\text{CO}_2} + 0.71C_{\text{N}_2} + 0.36C_{\text{H}_2\text{O}}) 10^5 \quad (3)$$

$$N_{001} = N_{\text{CO}_2} e^{-\frac{\theta_3}{T_{\text{vib3}}}} \left(1 - e^{-\frac{\theta_1}{T_{\text{vib1}}}} \right) \left(1 - e^{-\frac{\theta_2}{T_{\text{vib2}}}} \right)^2 \left(1 - e^{-\frac{\theta_3}{T_{\text{vib3}}}} \right) \quad (4)$$

$$N_{100} = N_{\text{CO}_2} e^{-\frac{\theta_1}{T_{\text{vib1}}}} \left(1 - e^{-\frac{\theta_1}{T_{\text{vib1}}}} \right) \left(1 - e^{-\frac{\theta_2}{T_{\text{vib2}}}} \right)^2 \left(1 - e^{-\frac{\theta_3}{T_{\text{vib3}}}} \right) \quad (5)$$

式中: p 为静压; C_{CO_2} 、 C_{N_2} 、 $C_{\text{H}_2\text{O}}$ 分别为 CO_2 、 N_2 、 H_2O 分子在体系中所占的摩尔百分比; C_{CO_2} 为 CO_2 分子在混合气体中的粒子数密度; θ_1 、 θ_2 、 θ_3 分别为 CO_2 分子 v_1 、 v_2 及 v_3 振型的特征振动温度,其值分别为 1 999、960 及 3 383; T_{vib1} 、 T_{vib2} 、 T_{vib3} 分别为 CO_2 分子 v_1 、 v_2 及 v_3 振型的实际振动温度。

文中采用的混合型气动 CO_2 激光器增益场计算程序以 FLUENT 计算流体力学软件为基础,将弛豫方程以 UDS(自定义标量)方程的形式加入 FLUENT 软件。 $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-H}_2\text{O}$ 激光体系的弛豫模型选择三振型四振动温度模型,采用严海星整理的弛豫速率数据^[11]。湍流模型采用标准 $k\text{-}\epsilon$ 模型。计算程序的详细信息及程序的有效性验证参见参考文献[12]。计算网格采用结构网格,网格总数为 40.2 万,网格划分如图 4 所示。

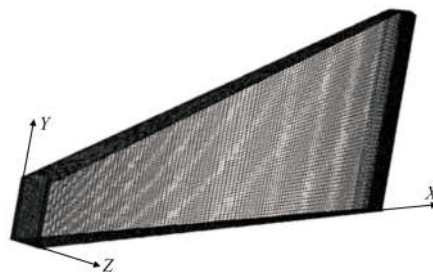


图 4 计算网格示意图

Fig.4 Sketch map of calculation grid

2 计算结果及分析

2.1 激励幅值对 MGDL 混合性能及小信号增益系数的影响

在研究激励幅值(激励幅值指的是图 3 中矩形波的波峰值)对 MGDL 混合性能及小信号增益系数的影响时,矩形波的波谷值选为 300 K,激励频率(即图 3 中周期性矩形波的频率)选为 100 000 Hz,激励幅值分别选择 500、700、1 000、1 250、1 500 K。

图 5 为不同激励幅值时混合喷管不同截面上的“相对未混合度”分布。图中每个数据点均为该截面上“相对未混合度”的质量加权平均值, $X=0$ 的位置表示主/副喷管出口平面位置。可以看出,在混合喷管下游区域($X=60\sim 100$ mm 范围内),五种激励幅值条件下的“相对未混合度”均小于未施加周期性温度激励的情形,即五种激励幅值条件下,主/副气流的混合效果均好于未施加周期性温度激励的情形。可见,与未施加周期性温度激励的情形相比,在副喷管出口位置施加特定幅值及特定频率的周期性温度激励,可以显著增强主/副气流的混合效果。此外,值得注意的是,当激励幅值为 1 500 K 时,在整个混合喷管内,“相对未混合度”均明显小于未施加周期性温度激励的情形,即在整体混合喷管内主/副气流的混合效果好于未施加周期性温度激励的情形。

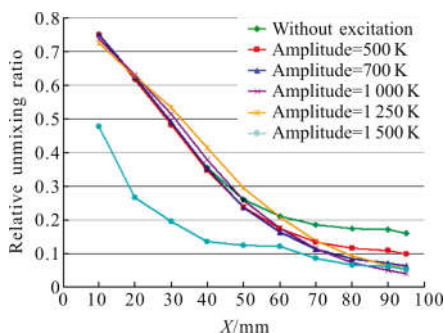


图 5 激励幅值对“相对未混合度”的影响

Fig.5 Influence of excitation amplitude on "relative unmixing ratio"

图 6 为不同激励幅值条件下混合喷管 $X=95$ mm 截面上(此截面已经靠近混合喷管出口截面)的“相对未混合度”,其中蓝色线条表示未施加周期性温度激励时的“相对未混合度”,由此也可以清晰地看出,在靠近混合喷管出口的截面上,五种激励幅值条件下主/副气流的混合效果均明显好于未施加周期性

温度激励的情形。

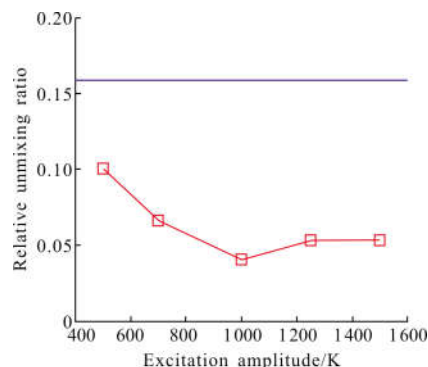


图 6 $X=95$ mm 截面上的“相对未混合度”

Fig.6 "Relative unmixing ratio" on the plane of $X=95$ mm

图 7 为不同激励幅值时混合喷管不同截面上的小信号增益系数分布(图中每个数据点均为该截面上小信号增益系数的质量加权平均值)。可以看出:在混合喷管下游区域($X=40\sim 100$ mm 范围内),激励幅值为 500、700、1 000、1 250 K 四种工况下激光器的小信号增益系数明显高于未施加周期性温度激励的情形。可见,与未施加周期性温度激励的情形相比,在混合型气动 CO_2 激光器副喷管出口位置施加特定频率和特定幅值的周期性温度激励后,可以显著提高混合喷管中的小信号增益系数。此外,由图 7 还可以看出:在文中选定的五种激励幅值条件下,当激励幅值为 1 000 K 时,混合喷管中获得的小信号增益系数峰值最高。

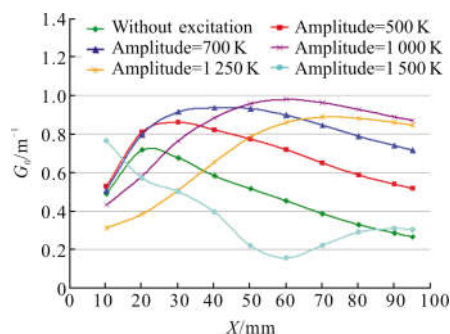


图 7 激励幅值对小信号增益系数的影响

Fig.7 Influence of excitation amplitude on small signal gain coefficient

图 8 为不同激励幅值条件下混合喷管 $X=95$ mm 截面上的小信号增益系数,其中蓝色线条表示未施加周期性温度激励时的小信号增益系数。可以清晰地看出:在靠近混合喷管出口的截面上,五种激励幅值条件下获得的小信号增益系数均高于未施加周期

性温度激励的情形。此外,随着激励幅值的增加,小信号增益系数先增大后减小。可见,当其他条件不变时,为了在混合喷管出口截面获得最大小信号增益系数,周期性温度激励的幅值存在一个最佳值。

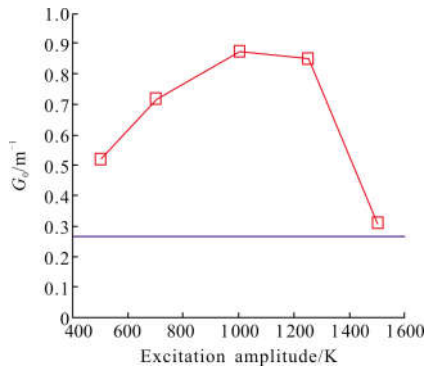


图 8 X=95 mm 截面上的小信号增益系数

Fig.8 Small signal gain coefficient on the plane of X=95 mm

在文中所选的五种激励幅值条件下,激励幅值为 1 000 K 时获得的小信号增益系数峰值最大,这是由以下参数决定的。图 9~图 12 为不同激励幅值下静温 T 及振动温度 T_{vib1} 、 T_{vib3} 及 T_{vibV} (T_{vibV} 表示 N_2 分子 v_N 振型的振动温度)在混合喷管中的分布,图中各个数据点的值均为该参数在所处截面的质量加权平均值。可以看出:(1) 激励幅值为 1 000 K 时混合喷管下游的静温 T 和振动温度 T_{vib1} 均比较低(如图 9 和图 10 所示)。由小信号增益系数理论^[10]可知,静温 T 和振动温度 T_{vib1} 越低,小信号增益系数越高。(2) 激励幅值为 1 000 K 时混合喷管下游的振动温度 T_{vib3} 和 T_{vibV} 均比较高(如图 11 和图 12 所示),由小信号增益系数理论^[10]可知,振动温度 T_{vib3} 和 T_{vibV} 越高,小信号增益系数就越高。上述因素的共同作用,使得当激励幅值为 1 000 K 时,混合喷管中获得的小信号增益系数峰值最大。

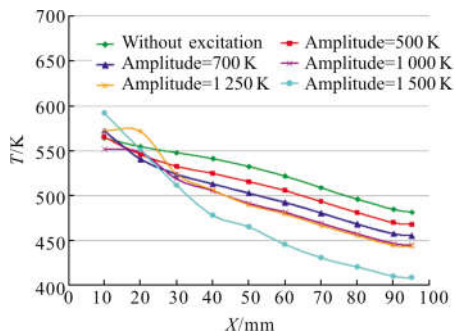


图 9 激励幅值对静温的影响

Fig.9 Influence of excitation amplitude on static temperature

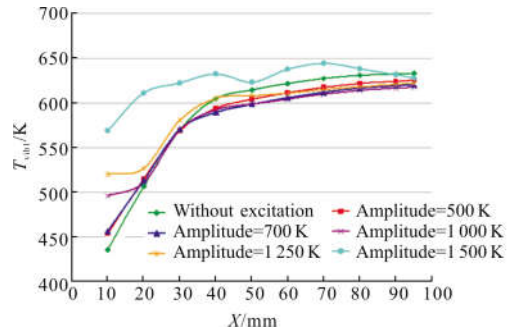


图 10 激励幅值对 T_{vib1} 的影响

Fig.10 Influence of excitation amplitude on T_{vib1}

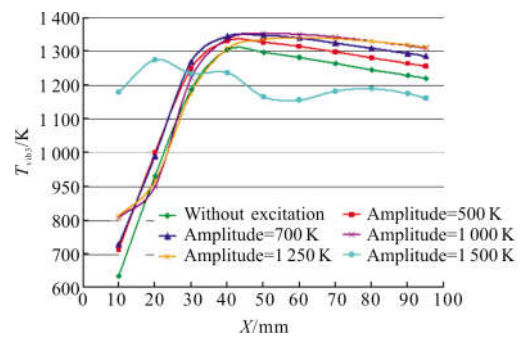


图 11 激励幅值对 T_{vib3} 的影响

Fig.11 Influence of excitation amplitude on T_{vib3}

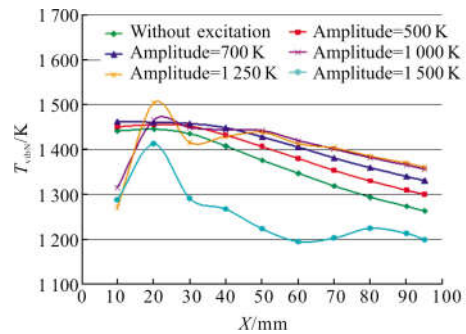


图 12 激励幅值对 T_{vibV} 的影响

Fig.12 Influence of excitation amplitude on T_{vibV}

由图 5 可以看出:激励幅值为 1 500 K 时,主/副气流的混合效果很好。然而,由图 7 可知,激励幅值为 1 500 K 时获得的小信号增益系数却很低。可见,主/副气流混合越充分并不见得就可以获得更高的小信号增益系数。这是因为:虽然激励幅值为 1 500 K 时主/副气流的混合效果很好,但是却有其他导致小信号增益系数降低的因素。这些因素包括:(1) 激励幅值为 1 500 K 时,混合喷管中的振动温度 T_{vib1} 较高(如图 10 所示);由小信号增益系数理论^[10]可知: T_{vib1} 越高,小信号增益系数就越低。(2) 激励幅值为

1 500 K 时, 混合喷管中的振动温度 T_{vib3} 和 T_{vibV} 均比较低, 如图 11 和图 12 所示; 由小信号增益系数理论^[10]可知: T_{vib3} 和 T_{vibV} 越低, 小信号增益系数就越低。上述因素的共同作用, 使得当激励幅值为 1 500 K 时, 混合喷管中获得的小信号增益系数很低。

2.2 激励频率对 MGD L 混合性能及小信号增益系数的影响

在研究时, 激励幅值选为 1 000 K(根据 2.1 节的计算结果选择), 激励频率分别选为 10 000、20 000、50 000、100 000、200 000 及 500 000 Hz。

图 13 为激励频率对“相对未混合度”的影响。可以看出: 在混合喷管下游区域($X=60\sim 100\text{mm}$ 范围内), 激励频率为 50 000、100 000、200 000 及 500 000 Hz 时的“相对未混合度”值均低于未施加周期性温度激励的情形, 即在这四个工况下, 主/副气流在混合喷管下游区域的混合效果更好。而对于激励频率为 10 000 Hz 的工况而言, 主/副气流的混合效果比未施加周期性温度激励时要差。可见, 当其他条件不变时, 为了增强主/副气流的混合效果, 必须选择合适的激励频率才行。此外, 由图 13 还可以看出: 在混合喷管下

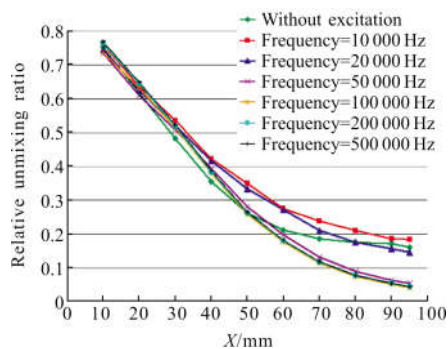


图 13 激励频率对“相对未混合度”的影响

Fig.13 Influence of excitation frequency on "relative unmixing ratio"

游区域, 当激励频率从 10 000 Hz 增加到 100 000 Hz 时(对应 10 000、20 000、50 000、100 000 Hz 四种工况), “相对未混合度”越来越小, 即主/副气流的混合效果越来越好; 当激励频率从 100 000 Hz 增加到 500 000 Hz 时(对应 100 000、200 000、500 000 Hz 三种工况), “相对未混合度”的曲线基本重合, 即主/副气流的混合效果几乎不再发生变化。由此可以看出: 在一定的激励频率范围内, 当激励频率增加时, 主/副气流的混合效果越来越好, 而当激励频率增加到一定值后, 主/副气流的混合效果基本不再发生变化(这一规律

通过图 14 中 $X=95\text{mm}$ 截面上的“相对未混合度”随激励频率的变化趋势可以更加清晰地体现)。

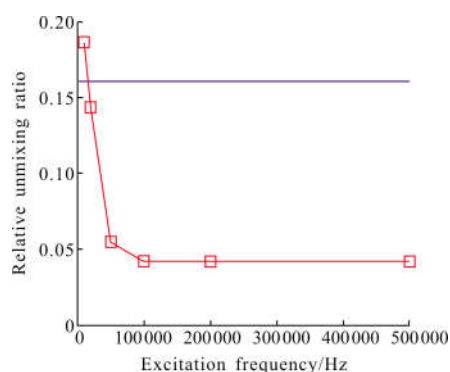


图 14 $X=95\text{mm}$ 截面上的“相对未混合度”

Fig.14 "Relative unmixing ratio" on the plane of $X=95\text{mm}$

图 15 为激励频率对小信号增益系数的影响。可以看出: 在选择六种激励频率条件下, 混合喷管下游的小信号增益系数均高于未施加周期性温度激励的情形。图 16 为不同激励频率下混合喷管 $X=95\text{mm}$ 截面上的小信号增益系数, 可以看出: 对于文中选择

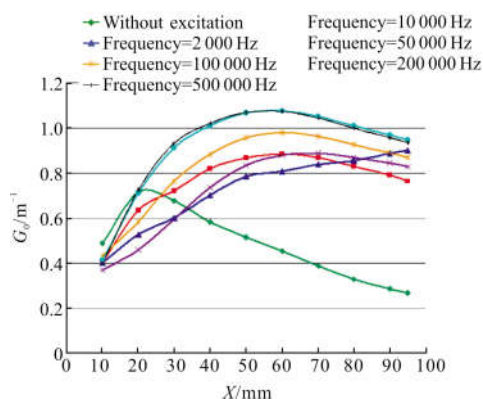


图 15 激励频率对小信号增益系数的影响

Fig.15 Influence of excitation frequency on small signal gain coefficient

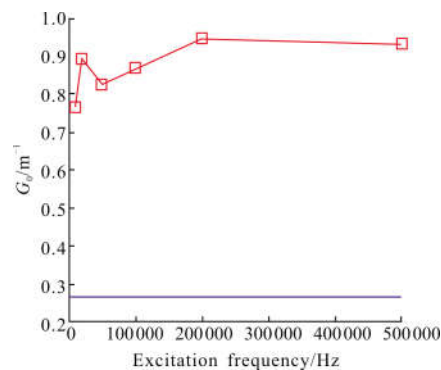


图 16 $X=95\text{mm}$ 截面上的小信号增益系数

Fig.16 Small signal gain coefficient on the plane of $X=95\text{mm}$

的六种激励频率,当激励频率为 200 000 Hz 时, $X=95$ mm 截面上获得的小信号增益系数最大。然而,图 16 反映的小信号增益系数随激励频率的变化没有呈现如图 8 所示的先增大后减小的规律性。

与上一节分析类似,图 15 所示的小信号增益系数分布是受静温 T 及振动温度 T_{vib1} 、 T_{vib3} 及 T_{vibV} 等诸多因素共同影响的,在此不再赘述。

3 结 论

文中将周期性温度激励技术引入混合型气动 CO_2 激光器研究,研究了在混合型气动 CO_2 激光器副喷管出口位置施加周期性温度激励时主/副气流的混合特性及小信号增益系数特性。研究表明:与未施加周期性温度激励的情形相比,在混合型气动 CO_2 激光器副喷管出口位置施加特定幅值和特定频率的周期性温度激励,可以显著增强主/副气流的混合效果并大幅提高混合喷管中的小信号增益系数。

在混合喷管下游区域,当激励频率固定为 100 000 Hz 时,所选的五种激励幅值(500、700、1 000、1 250、1 500 K)条件下主/副气流的混合效果均好于未施加周期性温度激励的情形;当激励幅值固定为 1 000 K 时,激励频率为 50 000、100 000、200 000、500 000 Hz 时主/副气流的混合效果好于未施加周期性温度激励的情形。在一定的激励频率范围内,随着激励频率的增加,主/副气流的混合效果越来越好,但当激励频率增加到一定值后,主/副气流的混合效果基本不再发生变化。

随着激励幅值的增加,混合喷管中的小信号增益系数先增大后减小,也就是说,当其他条件不变时,为了在混合喷管中获得最大小信号增益系数,激励幅值存在一个最佳值。此外,在混合喷管下游区域,所选的六种激励频率条件下获得的小信号增益系数均高于未施加周期性温度激励时的情形。

参考文献:

- [1] Chakravarty P, Reddy N M, Reddy K P J. Evaluation of downstream mixing scheme for $9.4 \mu\text{m}$ CO_2 gasdynamic laser[J]. *Journal of Physics*, 1990, 34(4): 333-345.
- [2] Taran J P E, Charpenel M, Borghi R. Investigation of a mixing CO_2 GDL [C]//6th Fluid and Plasma Dynamics Conference, 1973.
- [3] Cassady P E, Newton J F, Rose P H. A new mixing gasdynamic laser [C]//9th Fluid and Plasma Dynamics Conference, 1976.
- [4] Cassady P E. Survey of advanced gasdynamic laser concepts [J]. *J Energy*, 1980, 4(4): 145-161.
- [5] McLaughlin D K, Martens S, Kinzie K W. An experimental investigation of large scale instabilities in a low Reynolds Number two-stream supersonic shear layer[C]//9th Fluid and Plasma Dynamics Conference, 1976.
- [6] Adelgren R G, EUiott G S, Crawford J B. Axisymmetric jet shear-layer excitation by laser energy and electric arc discharges[J]. *AIAA Journal*, 2005, 43(4): 776-791.
- [7] Sun Mingbo, Wang Zhenguo, Liang Jianhan. Mixing enhancement of a 2D supersonic mixing layer induced by inflow periodic temperature excitation [J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(2): 444-448. (in Chinese)
孙明波,王振国,梁剑寒. 入流周期性温度激励下的二维超声速混合层混合增强 [J]. 宇航学报, 2008, 29(2): 444-448.
- [8] Lai Lin. Design and small signal gain field investigation of the new concept nozzles of pre-mixing/mixing gasdynamic CO_2 laser [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013: 121-122. (in Chinese)
赖林. 预混/混合型气动 CO_2 激光器新型喷管设计及增益场数值仿真研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2013: 121-122.
- [9] Wang Weidong. CFD mixing analysis of vortex generator jets injected into confined crossflow in rectangular duct [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1998, 19(2): 58-62. (in Chinese)
王卫东. 垂直射流混合的三维湍流数值模拟 [J]. 推进技术, 1998, 19(2): 58-62.
- [10] Anderson J D. Gasdynamic Lasers: An Introduction[M]. New York, San Francisco, London: Academic Press, 1976: 35-37.
- [11] Yan Haixing. Data of vibrational relaxation processes rate in $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-H}_2\text{O}$ laser system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1981, 8(6): 1-8. (in Chinese)
严海星. $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-H}_2\text{O}$ 激光体系的振动弛豫过程速率数据 [J]. 中国激光, 1981, 8(6): 1-8.
- [12] Zhai Xiaofei. Study on flow field characteristic of nozzle and laser cavity and small signal gain characteristic of mixing gasdynamic CO_2 laser [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015: 38-45. (in Chinese)
翟小飞. 混合型气动 CO_2 激光器喷管/光腔流场特性及小信号增益特性研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2015: 38-45.