

主稀释剂 He 预热对燃烧驱动 DF 激光器输出性能的影响分析*

房晓婷,袁圣付,华卫红
(国防科技大学 前沿交叉学科学院,湖南 长沙 410073)

摘要:针对燃烧驱动连续波 DF 激光器,对仅预热主稀释剂 He 的情况下激光器的输出性能进行了理论分析和仿真研究,并与燃料常温条件的结果进行了对比分析。对于燃料体系为 $(\text{H}_2 + \text{NF}_3 + \text{He}) + \text{D}_2$ 和 $(\text{C}_2\text{H}_4 + \text{NF}_3 + \text{He}) + \text{D}_2$ 的 DF 激光器,在燃烧室产生的 F 原子流量不变的条件下,当主 He 预热至 $(1100\text{ K}, 1300\text{ K})$ 时,激光器比功率较常温条件下分别约提高了 $(21\%, 24\%)$ 和 $(46\%, 56\%)$,同时燃烧室所需的燃料消耗分别约减少了 $(25.5\%, 29\%)$ 和 $(32\%, 36\%)$ 。在工程应用方面,主 He 可成功预热至 $800\text{ }^\circ\text{C}$ (1100 K) 。因此,主 He 预热是有效且可行的燃料预热方案,有利于改善激光器的输出性能,为激光器的高效率和紧凑化发展进程提供新的技术路线。

关键词:燃烧驱动 DF 激光器;主稀释剂预热;燃料预热;紧凑化
中图分类号:TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2018)06-171-06

Effect of preheating primary dilution He on the output performance of a combustion-driven DF laser

FANG Xiaoting, YUAN Shengfu, HUA Weihong
(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: A theoretical and simulated calculation of the processes proceeding in a gain generator of a combustion-driven cw DF chemical laser with preheated primary dilution He was reported. Investigation results demonstrate that for DF lasers with fuel systems of $(\text{H}_2 + \text{NF}_3 + \text{He}) + \text{D}_2$ and $(\text{C}_2\text{H}_4 + \text{NF}_3 + \text{He}) + \text{D}_2$, when the primary dilution He is preheated to $(1100\text{ K}, 1300\text{ K})$, the available specific output power is improved by $(21\%, 24\%)$ and $(46\%, 56\%)$ respectively; and at the same time, the fuel consumption in the combustor is reduced by $(25.5\%, 29\%)$ and $(32\%, 36\%)$ respectively. In practical application, the primary dilution He can be heated to 800°C (1100 K) successfully. Therefore, preheating the primary dilution He is a feasible and effective method to improve the laser output characteristics, which can facilitate the development of more compact chemical lasers with higher efficiency.

Key words: combustion-driven DF chemical laser; preheating of primary dilution; fuels preheating; compactness

燃烧驱动 DF 化学激光器从 1969 年发明至中红外先进 DF 化学激光器 (Mid-Infrared Advanced Chemical Laser, MIRACL) 实现 2 MW 功率输出,仅用 10 年左右的时间^[1-2]。其采用全气态燃料,能量自给运行,具有激射尾气可恢复压力高,激射波长处于大气窗口,可远距离传输,远场光斑大小适合特定性能的跟瞄系统等特性,因此,随着各种新型技术的进步和应用,化学激光器的发展和研究仍在继续^[3-4],且发展目标更多地转向小型化、集约化和高机动性方向^[5]。但是在高能激光实用化的道路上仍然存在障碍,其中一个很大的问题便是激光器体积庞大。

燃烧驱动连续波 HF/DF 化学激光器体积庞

大的主要原因,即激光器压力恢复系统和燃料储备系统体积庞大。压力恢复系统的体积可通过增大光腔内的恢复压力来减小^[6-7],即增大燃烧室总压,高恢复压力有利于激射废气排放。而燃料储备系统的紧凑化一直没有得到很好的解决。

早在 1975 年,美国空军武器实验室通过实验探究了燃料预热对燃烧驱动 HF 化学激光器输出性能的影响^[8]。对于燃料系统为 $(\text{D}_2 + \text{F}_2 + \text{He}) + \text{H}_2$ 的 HF 激光器,主稀释剂 He 被电加热至 810 K 后通入燃烧室。为保持燃烧室内的 F 原子解离率以及光腔内的 F 原子流量与未预热条件下相同,实验中适量减少了燃烧室内的 D_2 和 F_2 流量。实验结果显示,由于光腔内强去激活 DF 分子减

* 收稿日期:2017-09-27
基金项目:国家 863 计划资助项目(2015AA806037)
作者简介:房晓婷(1989—),女,山东青岛人,博士研究生,E-mail:fangxiaotingmao@163.com;
袁圣付(通信作者),男,研究员,博士,硕士生导师,E-mail:shengfuyuan_bb@163.com

少了 22%, 激光器的峰值输出功率较未加热条件下提高了约 15%。这就意味着燃料预热能够在减少激光器燃料消耗的同时, 提高激光器的输出功率。

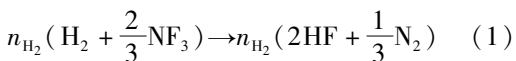
但对于 DF 激光器, 目前通用的燃料体系为 $(\text{H}_2 + \text{NF}_3 + \text{He}) + \text{D}_2$ 和 $(\text{C}_2\text{H}_4 + \text{NF}_3 + \text{He}) + \text{D}_2$ 。关于这两种燃料体系, 在燃料预热方面至今没有相关研究报道。针对上述两种燃料体系, 在文献[7]和文献[9]中, 解析和仿真分析了燃烧室各燃料均预热 ($\text{C}_2\text{H}_4/\text{H}_2$: 1300 K, NF_3 : 550 K, He : 1300 K) 对激光器性能的影响。但在工程应用上, 仅对主稀释剂 He (简称主 He) 进行预热更加切实可行, 原因有如下两个方面: 其一, H_2 和 C_2H_4 属于易燃气体, 爆炸极限低, 加热危险性高, 且 C_2H_4 在 900 °C 以上的高温环境中会裂解碳化; 而 NF_3 在 500 K 以上的高温环境下易分解, 只有 He 加热性能稳定。其二, He 在燃烧室的燃料配比中占据的摩尔流量百分比最大, 对于上述两种燃料体系, 假设将 $\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ 、 NF_3 和 He 分别预热至 1100 K、550 K 和 1100 K, 则按照常温条件下的燃料配比计算可得, $(\text{H}_2 + \text{NF}_3 + \text{He})$ 和 $(\text{C}_2\text{H}_4 + \text{NF}_3 + \text{He})$ 带入燃烧室的热量分别为 $(20.68 \text{ kJ} + 15.86 \text{ kJ} + 94.74 \text{ kJ})$ 和 $(25.83 \text{ kJ} + 36.75 \text{ kJ} + 208.34 \text{ kJ})$, 其中, He 带入的热量占总热量的百分比分别约为 72.1% 和 76.9%。从安全性和工程实际应用的角度考虑, 仅加热主 He 既能够满足燃料预热的热量需求, 安全性又好, 是实际可行的预热方案。

因此, 本文选取燃料体系为 $(\text{H}_2 + \text{NF}_3 + \text{He}) + \text{D}_2$ 和 $(\text{C}_2\text{H}_4 + \text{NF}_3 + \text{He}) + \text{D}_2$ 的 DF 激光器为研究对象, 首先对主 He 预热进行解析分析, 然后借助增益发生器的二维数值仿真程序^[10], 针对主 He 预热对激光器性能的影响进行仿真, 并对仿真结果进行分析, 为燃烧驱动化学激光器朝着更加高效、紧凑的方向发展提供新的技术路线。

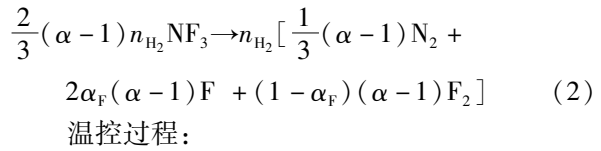
1 燃料预热解析分析

燃料预热解析模型的建立过程详见文献[7]和文献[9]。设燃料未预热时, 进入燃烧室的 H_2 、 NF_3 和 He 的流量分别为 n_{H_2} 、 n_{NF_3} 和 n_{He} (单位为 mol/s), 燃烧室内发生的化学反应如式(1)~(3)所示, 其中 α_{F} 为 NF_3 解离率, α 为 NF_3 过量系数, Ψ_{p} 为主稀释比。

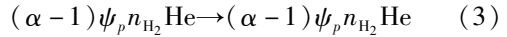
放热反应:



解离反应:



温控过程:



按照文献[9]的解析模型, 只预热主 He 的情况下, 燃料预热带入燃烧室的热量可表示为式(4), 其中 $(H^\circ_{t_0} - H^\circ_{298.15})_{\text{He}}$ 为 1 mol He 由 298.15 K 升温至 t_0 的焓变。

$$Q'_0 = n_{\text{He}} (H^\circ_{t_0} - H^\circ_{298.15})_{\text{He}} \quad (4)$$

设燃料预热带入的能量全部用来解离 NF_3 , 即保持进入燃烧室的 n_{H_2} 和 n_{He} 不变, 适量增加 n_{NF_3} 。由反应方程式(2)可知, 1 mol NF_3 解离放出的热量如式(5)所示, 1 mol NF_3 解离产物升温至燃烧室总温 T_0 所吸收的热量如式(6)所示, 其中, $\Delta_f H^\circ (\text{N}_2) = \Delta_f H^\circ (\text{F}_2) = 0$, $\Delta_f H^\circ (\text{NF}_3) = -132.09$, $\Delta_f H^\circ (\text{F}) = 79.39$, 单位均为 kJ/mol。

$$\begin{aligned} Q'_{\text{dis}} &= 3\alpha_{\text{F}} \Delta_f H^\circ (\text{F}) + \frac{3}{2} (1 - \alpha_{\text{F}}) \Delta_f H^\circ (\text{F}_2) + \\ &\frac{1}{2} \Delta_f H^\circ (\text{N}_2) - \Delta_f H^\circ (\text{NF}_3) \\ &= 238.17\alpha_{\text{F}} + 132.09 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Q'_{\text{temp_up}} &= \frac{1}{2} (H^\circ_{T_0} - H^\circ_{298.15})_{\text{N}_2} + \\ &3\alpha_{\text{F}} (H^\circ_{T_0} - H^\circ_{298.15})_{\text{F}} + \\ &\frac{3}{2} (1 - \alpha_{\text{F}}) (H^\circ_{T_0} - H^\circ_{298.15})_{\text{F}_2} \end{aligned} \quad (6)$$

设主 He 预热后, 燃料配比中 NF_3 相应的增量为 $\Delta n_{\text{NF}_3}^\uparrow$, 则根据燃烧室内的能量守恒关系式^[9], $\Delta n_{\text{NF}_3}^\uparrow$ 可由式(7)计算得到。此时, 燃烧室内的新燃料配比为 $n_{\text{H}_2} : (n_{\text{NF}_3} + \Delta n_{\text{NF}_3}^\uparrow) : n_{\text{He}}$ 。

$$Q'_0 = \Delta n_{\text{NF}_3}^\uparrow (Q'_{\text{dis}} + Q'_{\text{temp_up}}) \quad (7)$$

为使燃烧室在燃料预热与否的情况下产生相同的 F 原子流量, 根据文献[9]中的计算方法, 由于主 He 预热带入了更多参与解离反应的 NF_3 , 即燃烧室会产生更多的 F 原子, 因此可以在新燃料配比的基础上, 按比例减小各燃料的供给流量, 即适当减小燃烧室总压, 进而得到新的燃烧室总压。根据文献[7]的解析模型和文献[9]的二维仿真模型, 在主 He 预热至不同温度时, 结合新的燃料配比和新的总压, 首先计算得到燃烧室的平衡输出参数, 然后借助增益发生器的二维数值仿真程序, 得到不同主 He 预热温度条件下激光器输出性能的变化, 具体的仿真结果见第 2 节。

2 仿真结果

对于燃料体系为 $(\text{H}_2 + \text{NF}_3 + \text{He}) + \text{D}_2$ 的 DF

激光器,设主稀释剂 He 的预热温度为 300 ~ 1300 K, NF_3 和 H_2 温度为 300 K。根据第 1 节的燃料预热解析,可得到不同预热温度条件下燃烧室内的主要参数,结果如图 1 和图 2 所示。

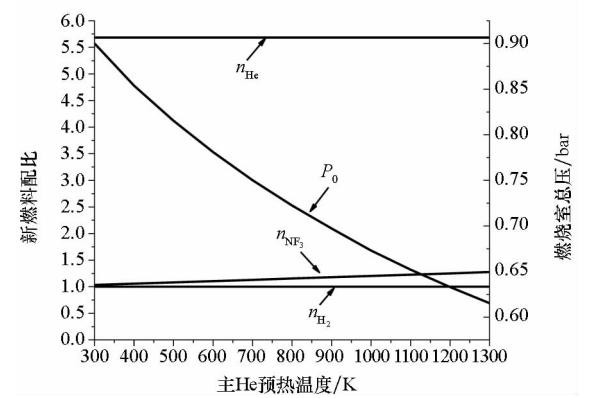


图 1 不同主 He 预热温度时新燃料配比和燃烧室总压
Fig. 1 New fuel composition and total pressure in the combustor at different preheating temperatures of He

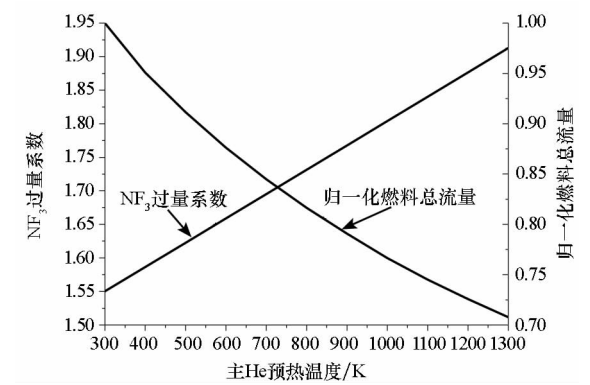


图 2 不同主 He 预热温度时 NF_3 过量系数和燃料总流量
Fig. 2 Normalized total mass flow rate and NF_3 excess coefficient in the combustor at different preheating temperatures of He

由图 1 可以看出,随着主 He 预热温度的逐渐升高,进入燃烧室 NF_3 流量逐渐增加,而 He 和 H_2 的流量保持不变;同时,为使燃烧室产生的 F 原子流量与燃料常温注入时相同,燃烧室的总压随着主 He 预热温度的升高而逐渐降低。解析计算中选取 300 K,燃烧室总压为 0.9 bar,是为了与后续二维仿真中的燃烧室总压一致。由于增益发生器的二维仿真模型中采用了 2-slot 楔形喷管,混合效率低,高燃烧室总压不利于主副气流充分混合,因此二维仿真中选取燃烧室总压为 0.9 bar。但是燃烧室总压的大小并不影响解析和仿真中得到的计算规律。

由图 2 可以看出,随着主 He 预热温度逐渐由 300 K 上升至 1300 K,由于燃料配比中 NF_3 比

重的增加, NF_3 过量系数 α 逐渐由 1.55 增大至 1.91;同时产生相同 F 原子流量所需的燃烧室总燃料逐渐减少,与图 1 中燃烧室总压的变化规律一致。当主 He 预热至 1100 K 和 1300 K 时,燃烧室所需总燃料流量较常温条件下分别约减少 25.5% 和 29%,这对于提高激光器比功率极为有利。

图 3 ~ 8 为主 He 预热的二维数值仿真结果。仿真模型中光腔的长度设为 100 cm,全返镜和输出镜的反射系数和吸收系数分别设为 ($a_1 = 0$, $r_1 = 1$) 和 ($a_2 = 0.02$, $r_2 = 0.85$)。

图 3 表示随着主 He 预热温度的升高,光腔内总辐射强度沿气流方向的变化,其中纵坐标光腔内总辐射强度的含义为:沿光轴方向,光腔内各谱线辐射强度在增益区长度内的积分和;横坐标为沿气流方向距喷管出口平面的距离。可以看出,随着主 He 预热温度的升高,光腔内的总辐射强度不断增大。主 He 预热至 1100 K 和 1300 K 时,光腔内的总辐射强度较常温条件下分别约提高了 48% 和 57%,光腔内有效激射区长度基本保持不变。

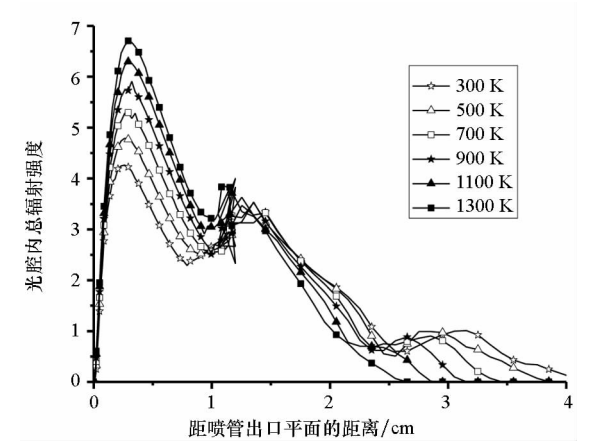


图 3 不同主 He 预热温度时光腔内总辐射强度变化
Fig. 3 Total intensity in the optical cavity at different preheating temperatures of He

图 4 和图 5 分别为激光输出功率和激光器比功率随主 He 预热温度升高的变化,其中纵坐标输出功率和比功率的含义为:沿气流方向,输出功率和比功率在增益区长度内的积分。可以看出随着主 He 预热温度的升高,激光输出功率和比功率不断提高。主 He 预热至 1100 K 和 1300 K 时,激光输出功率较常温条件下分别约提高了 3.3% 和 3%,激光器比功率较常温条件下分别约提高了 21% 和 24%,与图 2 中燃烧室燃料减少的规律基本一致。这就意味着产生相同的激光输出所需的激光器燃料大幅减少,对于激光器紧凑化具有

很大意义。

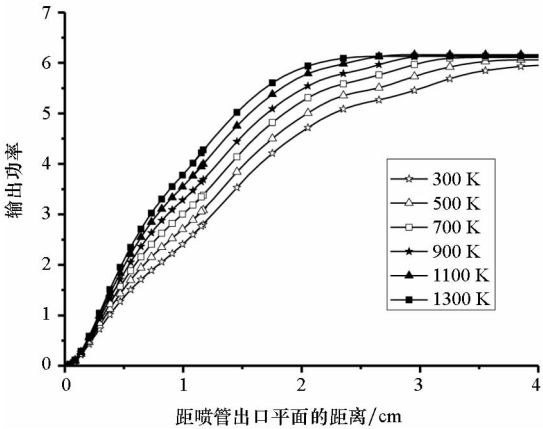


图 4 不同主 He 预热温度时激光输出功率变化
Fig. 4 Laser output power at different preheating temperatures of He

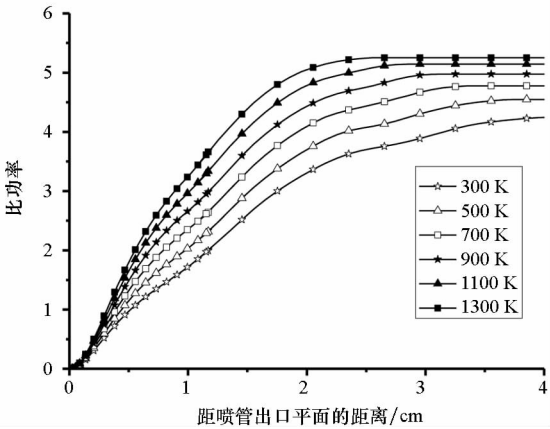
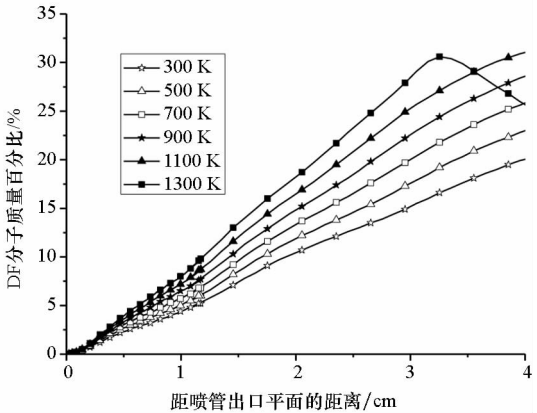


图 5 不同主 He 预热温度时激光器比功率变化
Fig. 5 Laser specific output power at different preheating temperatures of He

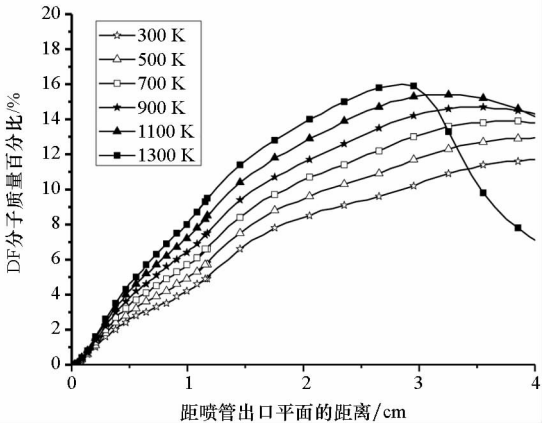
本文仿真中不同主 He 预热温度条件下激光输出参数的变化是以燃烧室产生相同的 F 原子流量为前提的,因此导致激光输出功率和比功率提高的原因可从以下几个方面分析。

首先,光腔内激发态 $DF(v)$ 分子的质量百分比随主 He 预热温度的提高而逐渐增大,仿真结果见图 6。由图 6 可以看出,当主 He 的预热温度达到 (1100 K, 1300 K) 时,激发态 $DF(v=1)$ 、 $DF(v=2)$ 和 $DF(v=3)$ 分子的质量百分比峰值较常温条件下分别约提高 (55%, 54%)、(32%, 37%) 和 (32%, 43%),这有利于提高反转比,进而提高激光输出功率。

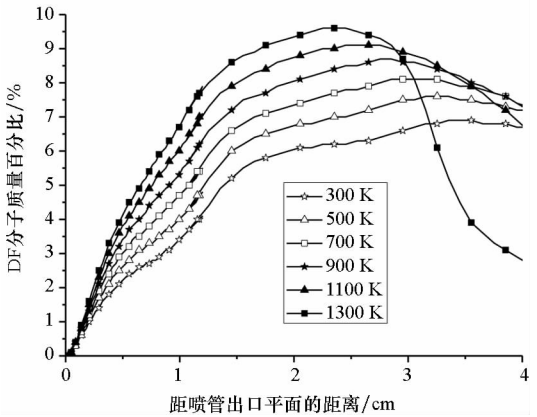
其次,光腔内的小信号增益系数 (Small Signal Gain, SSG) 随主 He 预热温度的升高而逐渐增大,具体仿真结果见图 7,图中 $SSG(i-j)$ 表示激发态 DF 分子由 $v=i$ 跃迁至 $v=j$ 所产生的小信号



(a) $DF(v=1)$



(b) $DF(v=2)$



(c) $DF(v=3)$

图 6 不同主 He 预热温度时激发态 $DF(v=1,2,3)$ 分子质量百分比

Fig. 6 Mass fraction of $DF(v=1,2,3)$ at different preheating temperatures of He

增益系数。由图 7 可以看出,当主 He 的预热温度达到 (1100 K, 1300 K) 时,小信号增益系数 $SSG(1-0)$ 、 $SSG(2-1)$ 和 $SSG(3-2)$ 的峰值较常温条件下分别约提高了 (24%, 28%)、(24%, 28%) 和 (23%, 27%),小信号增益系数的增大有利于提高激光输出功率。

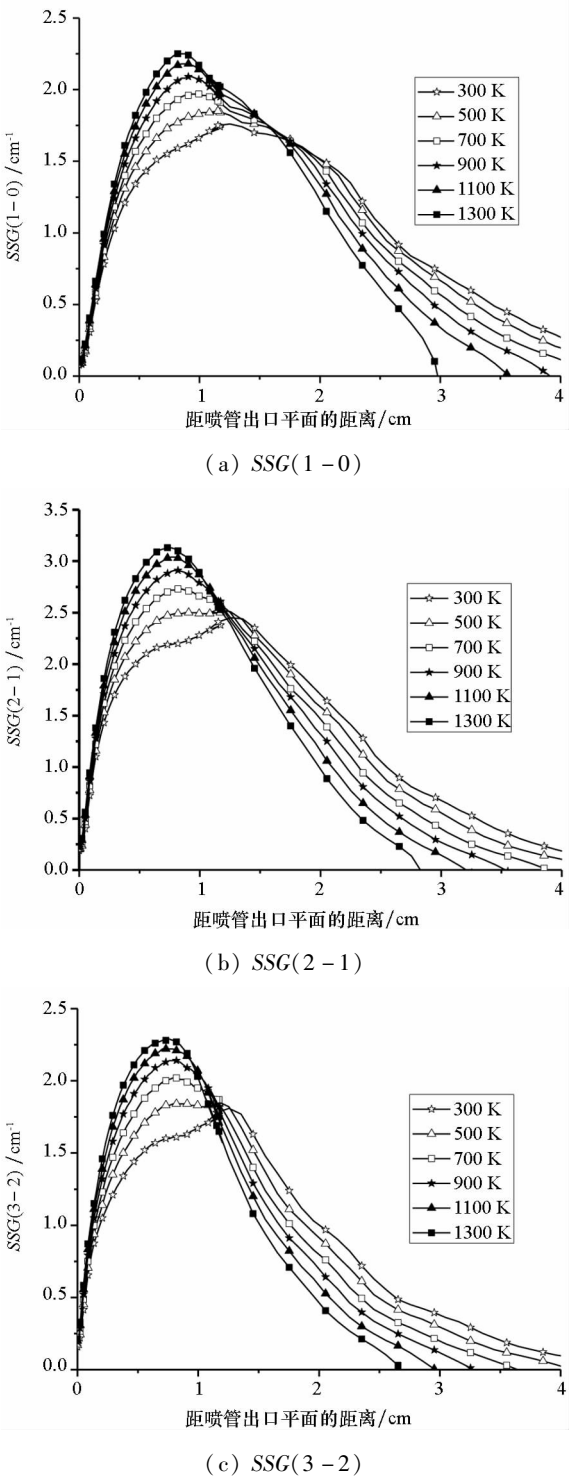


图7 不同主 He 预热温度时光腔内小信号增益系数变化
Fig. 7 Small signal gain in the optical cavity at different preheating temperatures of He

再次,光腔内的强去激活 HF 分子的摩尔分数随着主 He 预热温度的提高而大幅度减小,仿真结果见图 8。由图 8 可以看出,光腔内 HF 分子的摩尔分数由 300 K 时的 0.073 8 减小至(1100 K,1300 K)时的(0.055 5,0.052 6),约减小(0.248,0.287)。HF 分子是光腔内激发态 DF(*v*)分子的主要去激活源,HF 分子的减少意

味着其对光腔内激发态 DF(*v*)分子的去激活作用减弱,更有利于激发态 DF(*v*)分子产生激光输出。

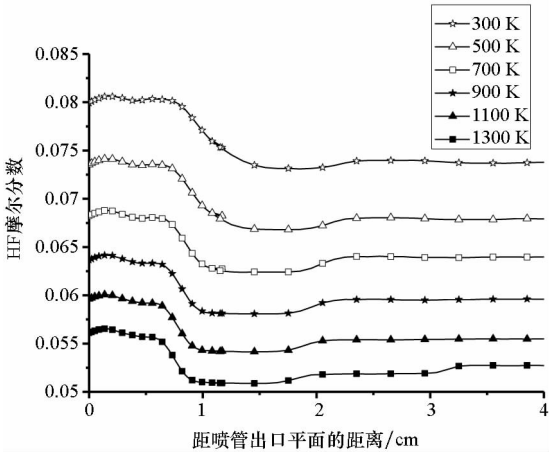


图8 不同主 He 预热温度时 HF 摩尔分数变化
Fig. 8 HF mole fraction at different preheating temperatures of He

3 讨论与分析

由第 2 节的计算分析可知,对于燃料体系为 (H₂ + NF₃ + He) + D₂ 的 DF 激光器,当主 He 预热至 1100 K 和 1300 K 时,燃烧室的燃料消耗较常温条件下分别约减小 25.5% 和 29%,激光器比功率分别约提高 21% 和 24%。由于燃料体系为 (C₂H₄ + NF₃ + He) 的燃烧室产物中有 CF₄,而本文目前缺少仿真中所需的 CF₄ 反应动力学参数,因此本文没有针对此燃料体系进行增益发生器的二维仿真,仅进行了相关的解析计算。参照第 2 节的计算方法,对于燃料体系为 (C₂H₄ + NF₃ + He) + D₂ 的 DF 激光器,设燃料常温进入燃烧室时,燃烧室的燃料配比为 n_{C₂H₄}: n_{NF₃}: n_{He} = 1 : 5.4 : 29.2,可得到当主 He 预热至 1100 K 和 1300 K 时,燃烧室所需燃料较常温条件下分别约减少 32% 和 36%,激光器比功率较常温条件下分别提高 46% 和 56%,如图 9 所示。

具体的燃料预热实施方案在文献[9]中已有详细的讨论,主稀释剂 He 升温所使用的能源为(蓄)电能或可直排大气的高温燃气,因此,相对于主稀释剂预热带来的燃料消耗减少以及尾气排放系统体积和重量的减少而言,其所需的燃料预热设备的体积、重量都很小。有关燃料预热的实验正在进行中,初步的燃料预热实验表明,采用加热电缆和 310 s 不锈钢管加工的简易燃料预热系统能够加热至 800 ℃ (1100 K) 左右,相关实验结果将在后续进一步讨论。

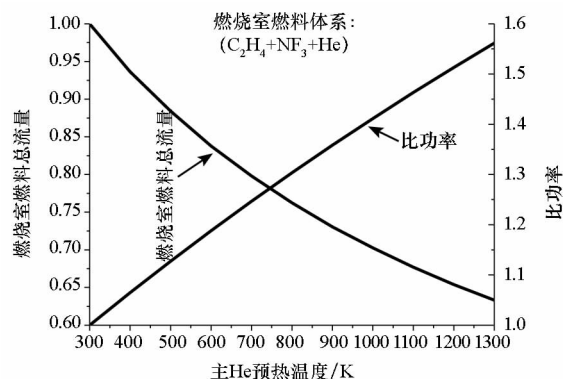


图 9 不同主 He 预热温度时激光器性能变化

Fig. 9 Laser output characteristics at different preheating temperatures of He

4 结论

DF 激光器燃料预热的理论分析和仿真结果表明,加热主稀释剂 He 能够有效改善燃烧驱动 DF 激光器的输出性能。对于燃料体系为 $(\text{H}_2 + \text{NF}_3 + \text{He}) + \text{D}_2$ 的 DF 激光器,主 He 预热至 1100 K 和 1300 K 时,燃烧室所需的燃料较常温条件下分别约减小 25.5% 和 29%,同时激光器比功率分别约提高了 21% 和 24%;对于燃料体系为 $(\text{C}_2\text{H}_4 + \text{NF}_3 + \text{He}) + \text{D}_2$ 的 DF 激光器,主 He 预热至 1100 K 和 1300 K 时,燃烧室所需的燃料较常温条件下分别约减小 32% 和 36%,同时激光器比功率分别约提高了 46% 和 56%。在实际工程应用中,主 He 可成功加热至 800 °C (1100 K),且操作安全,可实施性强,对于提高激光器的效率、促进激光器的紧凑化发展有很大的促进作用。

参考文献 (References)

[1] 格罗斯 R W F, 博特 J F. 化学激光手册[M]. 尹厚明, 谢行滨, 罗静远, 译. 北京: 科学出版社, 1987.
Gross R W F, Bott J F. Handbook of chemical laser[M]. Translated by YIN Houming, XIE Xingbin, LUO Jingyuan. Beijing: Science Press, 1987. (in Chinese)

[2] 袁圣付, 赵伊君, 华卫红, 等. CW DF/HF 化学激光器性能与流场参数的相互关系[J]. 中国激光, 2001, 28 (5): 402 - 406.
YUAN Shengfu, ZHAO Yijun, HUA Weihong, et al. Dependence of CW DF/HF chemical laser performance on the flow field parameters[J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28 (5): 402 - 406. (in Chinese)

[3] 邵艳, 周进, 林志勇, 等. 基于敏感性分析的 DF 化学动力学模型的简化[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33 (4): 12 - 18.
SHAO Yan, ZHOU Jin, LIN Zhiyong, et al. Simplification of a DF chemical laser kinetic model based on the sensitivity analysis[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(4): 12 - 18. (in Chinese)

[4] 袁圣付, 刘文广, 华卫红, 等. HYLTE 与 TRIP 喷管在大功率氟化氘激光器中的应用对比分析[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(6): 100 - 106.
YUAN Shengfu, LIU Wenguang, HUA Weihong, et al. Analysis and comparative study of employing HYLTE and TRIP nozzles in high power DF laser[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2010, 32(6): 100 - 106. (in Chinese)

[5] Horkovich A J. Directed energy weapons: promise & reality[C]// Proceedings of 37th AIAA Plasma Dynamics and Lasers Conference, 2006.

[6] Bashkin A S, Gurov L V, Kurdyukov M V. Possibilities of improving the performance of an autonomous CW chemical DF laser by replacing the slot nozzles by the ramp ones in the nozzle array[J]. Quantum Electronics, 2011, 41(8): 697 - 702.

[7] Fang X T, Yuan S F, Hua W H. Analysis of the possibility of fabricating compact combustion-driven DF lasers due to fuel preheating[J]. Quantum Electronics, 2016, 46 (9): 790 - 794.

[8] Hyde J C, Hurlock S C. Advanced chemical laser nozzle concept[R]. USA: Rockwell International Corporation, 1975.

[9] Fang X T, Yuan S F, Hua W H. Numerical simulation of a high efficiency combustion-driven HF laser with preheated fuels[J]. Quantum Electronics, 2017, 47(3): 275 - 279.

[10] 华卫红. 高功率连续波 DF/HF 化学激光器数值模拟研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 1997.
HUA Weihong. Numerical simulation of high energy continue wave DF/HF chemical laser[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 1997. (in Chinese)