

燃烧驱动 CW DF/HF 化学激光器总压损失的一维气体动力学理论分析

唐力铁, 李艳娜, 赵乐至

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 压力恢复系统是目前高能化学激光器的关键部件, 它的总压损失会影响到整个激光器系统的出光能力和全系统的体积重量等关键技术指标。为了研究燃烧驱动 CW DF/HF 化学激光器总压损失, 从一维气体动力学进行了理论分析。分析在激光器增益发生器内引起总压损失的主要因素, 是研究高压力恢复激光器增益发生器的基础。主要讨论了引起总压损失的两个主要原因: 第一, 由于粘性摩擦引起的总压损失; 第二, 由于光学谐振腔中化学反应放热升温引起的总压损失。计算结果表明, 燃烧升温对系统的压力恢复能力有较大的影响。

关键词: 化学激光器; 气体动力学; 喷管; 压力恢复

中图分类号: TN24 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0705001

Theoretical analysis of one dimensional gas dynamics of total pressure losses for combustion-driven continuous wave DF/HF chemical lasers

Tang Litie, Li Yanna, Zhao Lezhi

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: The pressure recovery system is one of the key techniques for the high energy chemical lasers. Total pressure losses affect the key specification of lasers, such as the output ability, the size and weight of laser systems. The total pressure losses for combustion-driven continuous wave DF/HF chemical lasers were proposed according to the theory analysis of one dimensional gas exhausting. The analysis of the main factors of total pressure losses in the gain generator of the laser is the foundation of the research of recovering the gain generator with high pressure. Two major factors of total pressure losses caused by viscous friction and the temperature rise caused by chemical reaction in optical cavity were discussed in this paper. The result shows that temperature rise caused by burning has obvious influence on system's performance of pressure recovery.

Key words: chemical laser; gas dynamics; nozzle; pressure recovery

收稿日期: 2015-11-05; 修订日期: 2015-12-03

作者简介: 唐力铁(1974-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事激光器理论方面研究。Email: tlt_laser@sina.com

0 引言

DF/HF 化学激光器是一种用途广泛的中红外激光系统^[1-4]。其中,燃烧驱动 CW DF/HF 化学激光器的结构模型如图 1 所示^[1]。激光器总压损失的大小将直接影响其后部压力恢复系统的效能^[2,5],从而影响系统体积。文中根据压力恢复系统的结构和原理,分析讨论了激光器的总压损失情况,并对整个激光器系统(包括 PRS)进行了建模估算。这样就能从整体上分析出减小总压损失,减轻 PRS 的工作负担的主要途径。

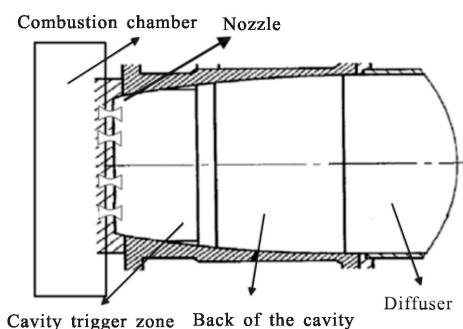


图 1 燃烧驱动 CW DF/HF 化学激光器的结构模型
Fig.1 Structure model of combustion-driven continuous wave DF/HF chemical lasers

分析在激光器增益发生器内的总压损失的主要因素,是研究高压恢复激光器增益发生器的基础。引起总压损失的原因主要包括:第一,由于粘性摩擦引起的总压损失;第二,由于光学谐振腔中化学反应放热升温引起的总压损失;第三,由于激波引起的总压损失;第四,由于流场中出现的漩涡引起的总压损失。文中主要讨论前两种原因引起的总压损失。

由于在激光器中是采用拟正激波来进行扩压的,因此文中讨论的总压损失是燃烧室中的总压与拟正激波扩压器出口的总压相比较而得到的总压损失。因为只有这样比较,才会对工程设计有指导意义。也正是由于这个原因,在分析总压损失的效果时,一定要结合正激波来讨论。

1 粘性摩擦与扩压器的激波共同作用引起的总压损失

在增益发生器当中,由于选用的超音速喷管喉

部直径都比较小,雷诺数比较低,因此存在着比较大的总压损失,具体的损失情况在参考文献[2]中使用 CFD 技术来研究它。这里,为了反映喷管的总压损失情况,引入一个叫做总压保持系数比的量 η ,它表示喷管出口与喷管入口的总压比,即:

$$\eta = \frac{P_{0 \text{ 出口}}}{P_{0 \text{ 入口}}} \quad (1)$$

式中: $P_{0 \text{ 入口}}$ 为燃烧室的喷管入口的总压; $P_{0 \text{ 出口}}$ 为燃烧室的喷管出口的总压。从 η 的定义就可以看出,它越接近于 1,那么说明这种喷管的总压损失越小;反之, η 越小就说明喷管的总压损失越大。

又引入总压损失比 ξ ,即:

$$\xi = 1 - \eta \quad (2)$$

若喷管出口光腔内的静压为 P_1 ,喷管的出口马赫数为 M_1 ,比热比 γ ,那么它们的关系为:

$$\frac{P_{0 \text{ 入口}}}{P_1} = \frac{1}{\mu} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (3)$$

如果不考虑光腔中的其它过程,则这些气体经过正激波后的恢复总压 $P_{0 \text{ 波后}}$ 为:

$$P_{0 \text{ 波后}} = \eta P_{0 \text{ 入口}} \frac{\left[\frac{\gamma+1}{2} M_1^2 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}}{\left[1 + \frac{\gamma-1}{2} M_1^2 \right]^{\frac{1}{\gamma-1}}} \frac{1}{\left[\frac{2\gamma}{\gamma+1} M_1^2 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1} \right]^{\frac{1}{\gamma-1}}} \quad (4)$$

为了便于比较,引入在没有喷管的总压损失的情况下正激波扩压器后的总压 $P_{00 \text{ 波后}}$,把它与考虑喷管的总压损失的情况下扩压器后的总压 $P_{0 \text{ 波后}}$ 相比较,定义恢复总压损失比 α 为:

$$\alpha = 1 - \frac{P_{0 \text{ 波后}}}{P_{00 \text{ 波后}}} \quad (5)$$

图 2 显示了不同的 $P_{0 \text{ 入口}}/P_1$ 的值的条件下,纵

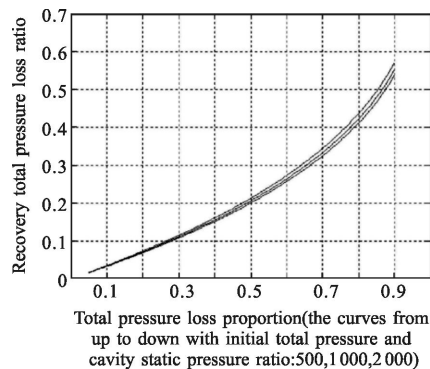


图 2 α 与 ξ 的关系

Fig 2 Relation between α and ξ

坐标恢复总压损失比 α 与横坐标喷管总压损失比 ξ 的关系。由图 2 可以看出, 在同样的总压比的情况下, $P_{0入口}/P_1$ 的比值越大, 恢复总压损失比就越小。这就说明, 在喷管出口处, 光腔的压力一定的情况下, 增大燃烧室的总压(这需要增加喷管的出口马赫数)有利于提高系统的恢复压力。

2 光腔内反应升温 and 扩压器激波共同作用引起的总压损失

在光学谐振腔内部存在着放热的化学反应:



$$\Delta H = -31 \text{ kcal/mole}$$

该化学反应将导致气流温度的升高。随着温度的升高, 喷管后部高马赫数的气体马赫数将会降低, 同时静压力将会增高, 总压会有所损失。为了描述这一过程, 文中引入一个量“ k_r ”——反应升温比。反应升温比是指, 在考虑化学反应放热后, 混合气体的静温度与不考虑反应放热时的混合气体的静温度之比。也就是, 设不考虑反应放热时, 混合气体的温度为 T , 考虑反应放热后的温度为 $T_{反}$ 则:

$$T_{反} = k_r \cdot T$$

用 k_r 来描述化学反应的放热作用。

在下面的分析中, 只认为化学反应对流动的影响是温度升高, 而流体的其他物理性质 (如比热比等) 不发生变化。

设升温前气体的马赫数为 M_1 , 则升温后, 气体的马赫数 M_2 由下面方程确定:

$$k_r = \frac{M_2^2 (1 + \gamma M_1^2)^2}{M_1^2 (1 + \gamma M_2^2)^2} \quad (6)$$

设升温前气体的静压力为 P_1 , 则升温后, 气体的静压力 P_2 由下面方程确定:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{1 + \gamma M_1^2}{1 + \gamma M_2^2} \quad (7)$$

根据 M_2 和 P_2 能够求出反应后的气体总压力。这里定义由升温引起的总压损失系数 (设升温前的总压为 P_{01} , 升温后的总压为 $P_{0反}$):

$$\xi = 1 - \frac{P_{0反}}{P_{01}} \quad (8)$$

从图 3 和图 4 中可以发现, 随着升温比的增加, 光腔中的马赫数会有所下降, 而静压力却有所增加。

那么它们共同决定的总压力是上升还是下降呢? 由图 5 可以看出, 反应放热升温使总压出现了巨大的损失, 且在相同升温比的情况下随着喷管出口马赫数的增加, 总压损失是减小的。这就说明, 增大喷管的出口马赫数有利于减少因为反应放热导致的总压损失。

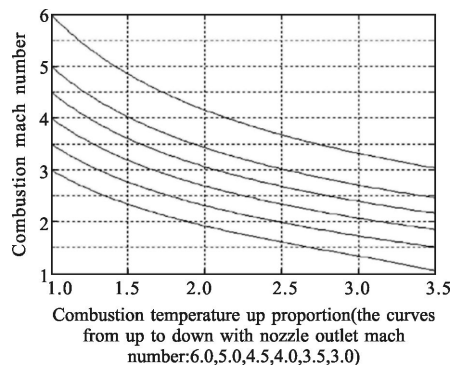


图 3 由于反应升温导致的马赫数的下降

Fig.3 Decrease of mach number caused by reacting temperature rise

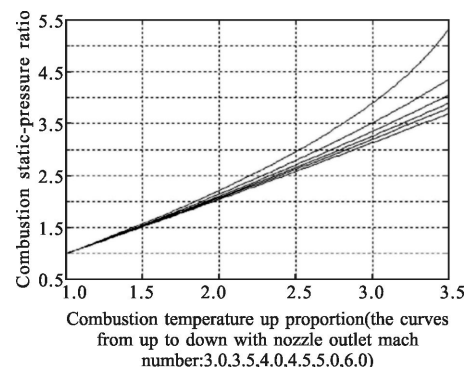


图 4 升温后静压力的升高(纵坐标是升温后与升温前气流的静压力比)

Fig.4 Static pressure increased with temperature rise (The vertical axis shows the ratio of static pressure before and after temperature rise)

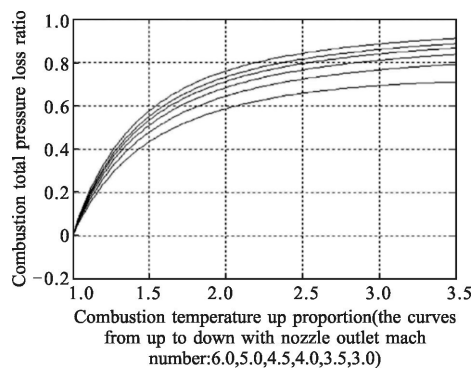


图 5 升温引起的总压损失比 ξ

Fig.5 Total pressure losses ratio ξ caused by temperature rise

下面分析反应升温后的气体在经过扩压器的激波后的总压损失情况。假设经过扩压器后混合气体的恢复总压是 $P_{0\text{波后}}$ ，它可以由下面方程确定：

$$P_{0\text{波后}} = P_2 \left(\frac{2\gamma}{\gamma+1} M_2^2 - \frac{\gamma-1}{\gamma-2} \right)^* \left[1 + \frac{\gamma-1}{2} \left(\frac{M_2^2 + \frac{2}{\gamma-1}}{\frac{2\gamma}{\gamma-1} M_2^2 - 1} \right) \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (9)$$

为了便于比较，分别计算了考虑升温燃烧后的总压 $P_{0\text{波后}}$ 和不考虑燃烧升温作用的情况下的扩压器后的总压 $P_{00\text{波后}}$ ，把它们相比较，引入升温总压减小比 β ：

$$\beta = 1 - \frac{P_{0\text{波后}}}{P_{00\text{波后}}} \quad (10)$$

由图 6 可以看出，燃烧升温对扩压器出口的恢复总压力的影响并不显著。主要原因是：燃烧升温的作用大大减少了光学谐振腔当中的混合气体马赫数，也就是扩压器入口的气体马赫数。这样，扩压器中激波的总压损失就大大降低了。因此，燃烧虽然导致光学谐振腔中的总压损失增大，但是它却减小了扩压器中的激波的总压损失，于是就出现了图 6 所示的情况。

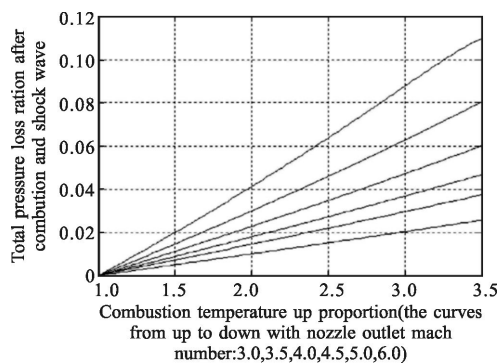


图 6 升温总压减小比 β

Fig.6 Total pressure decrease ratio β caused by temperature rise

下面，分析燃烧升温对系统的压力恢复性能的影响情况。计算了扩压器后恢复的静压力的损失情况。同样为了便于比较，分别计算了考虑升温燃烧后的静压力 $P_{\text{波后}}$ 和不考虑燃烧升温作用的静压力 $P_0\text{波后}$ ，把它们相比较，引入燃烧静压力损失比 δ ：

$$\delta = 1 - \frac{P_{\text{波后}}}{P_0\text{波后}} \quad (11)$$

由图 7 可以看出，由于燃烧升温的作用，静压力的损失要比总压的损失严重的多。这是因为，升温减少了扩压器入口马赫数，也就降低了扩压器利用拟正激波升压的能力。因为，引射系统的提高压力的效果，不但与被引射气流的总压有关，而且还与被引射气流的静压力有关。所以，燃烧升温对系统的压力恢复能力还是有比较大的影响的。

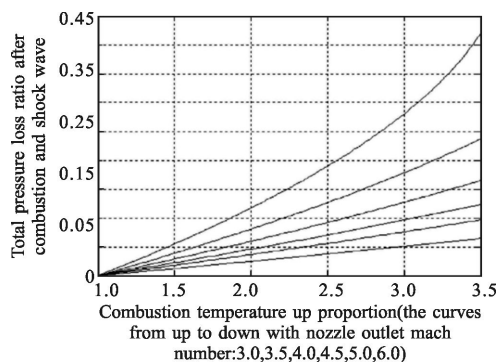


图 7 燃烧静压力损失比 δ

Fig.7 Static pressure losses ratio δ caused by combustion

3 结论

通过理论分析与计算，表明在喷管出口处，光腔的压力一定的情况下，增大燃烧室的总压(这需要增加喷管的出口马赫数)有利于提高系统的恢复压力。燃烧升温的作用大大减少了光学谐振腔当中的混合气体马赫数，也就是扩压器入口的气体马赫数。这样，扩压器中激波的总压损失就大大降低了。因此，燃烧虽然导致光学谐振腔中的总压损失增大，但是它却减小了扩压器中的激波的总压损失。所以得出结论：燃烧升温对系统的压力恢复能力的影响较大。

参考文献：

[1] Gross R W F, Bott J F. Handbook of Chemical Lasers[M]. Beijing: Science Press, 1987: 267-276. (in Chinese)

[2] Tang Litie, Yu Zhichuang, Zhao Lezhi, et al. The study on total pressure losing of nozzles flow in DF/HF chemical laser by numerical simulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(5): 1194-1197. (in Chinese)

唐力铁, 于志闯, 赵乐至, 等. DF/HF 化学激光器喷管总压损失的数值模拟研究 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(5): 1194-1197.

[3] Ning Yongqiang, Zhang Xing, Qin Li, et al. High-power

- high beam quality vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3219–3225. (in Chinese)
- 宁永强, 张星, 秦莉, 等. 高光束质量大功率垂直腔面发射激光[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3219–3225.
- [4] Li Qiang, Zeng Xuewen, Zhao Yijun, et al. Power of a smallscale CW discharge DF/HF chemical laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(4): 343–345. (in Chinese)
- 李强, 曾学文, 赵伊君, 等. 小功率连续波放电 DF/HF 化学激光器的功率[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(4): 343–345.
- [5] Yu Zhen, LiShouxian, Chen Dongquan. Integrative design of nozzle, cavity and pressure recovery system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(4): 533–537. (in Chinese)
- 余真, 李守先, 陈栋泉. 喷管、光腔及压力恢复系统一体化设计[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(4): 533–537.