

H₂/NF₃燃烧火焰荧光光谱分析及温度分布测量

李留成*, 王元虎, 唐书凯, 王增强, 多丽萍, 李刚, 金玉奇

中国科学院大连化学物理研究所化学激光重点实验室, 辽宁 大连 116023

摘要 为了研究燃烧驱动 DF/HF 化学激光器燃烧室内 H₂/NF₃(或 D₂/NF₃)的混合燃烧特性,搭建了小型燃烧室平台。采用火焰荧光光谱法对燃烧室内 H₂/NF₃燃烧火焰的形状和温度分布进行了测量和分析,光谱测量结果表明:在紫外可见光谱区域,H₂/NF₃燃烧火焰的自发光主要由 N₂(B)、NF(b)、NH(A)等电子激发态分子的辐射跃迁产生,其中 N₂(B)和 NH(A)是燃烧过程中的关键物质成分,其发光强度可以很好地表征火焰燃烧的剧烈程度,可以用于定量测定燃烧火焰的长度;在近红外光谱区域,H₂/NF₃燃烧火焰自发光的光谱主要由 HF(*v*)振动激发态分子的第一泛频振动转动跃迁谱带组成。利用 HF(*v*=2→*v*=0)谱带的转动结构强度分布,结合电动平移台,给出了火焰温度沿气流方向的分布情况。考察了气体配比系数(NF₃与 H₂的流量之比)对燃烧火焰温度分布的影响,结果显示:当气体配比系数较小时,燃烧室内气体温度沿气流方向下降得较为平缓;随着气体配比系数逐渐增大,气体温度沿气流方向下降得越来越快。燃烧火焰长度和火焰温度分布测量结果表明,燃烧室内的化学反应可能分为两个过程:一个是 H₂/NF₃剧烈快速燃烧过程,此过程非常快,几乎一混合便立刻燃烧;另一个是过量 NF₃在高温下的热解离过程,此过程相对较慢,并且温度越低 NF₃的热解离越慢。因此,当 NF₃的占比较大时,需要较长的燃烧室滞留时间才能使过量的 NF₃充分解离为氟原子。

关键词 光谱学; 荧光光谱; 化学激光; 燃烧室; 温度分布; 燃烧火焰

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221030

1 引言

在燃烧驱动 DF/HF 化学激光器领域,氟原子发生器通常也被称为燃烧室,它是 DF/HF 激光器的基础关键部件之一^[1]。燃烧室内 H₂/NF₃(或 D₂/NF₃)剧烈燃烧并放出大量的热,过量的 NF₃在高温下热解离产生氟原子,氟原子是燃烧驱动 DF/HF/HBr 等化学激光器的能量来源^[2]。尽管 DF/HF 激光器的化学效率取决于很多参数,但最基础的关键参数是氟原子的产生效率,可以说氟原子产生效率直接决定了该类激光器化学效率的上限,也限制了其放大规模、体积效率和重量效率等特征参数。考虑到 DF/HF 化学激光器燃烧室内氟原子产生效率的重要性,笔者认为对燃烧驱动 DF/HF 化学激光器燃烧室内的气体燃烧过程进行广泛而深入的研究是非常有必要的。

针对 H₂/NF₃(或 D₂/NF₃、C₂H₄/NF₃等)燃烧室效率的理论或实验研究,目前国内外已经有了一些文献报道。在理论研究方面最常使用的研究方法是微小自由能法。美国国家航空航天局(NASA)开发的热力学平衡计算软件 CEA 采用的就是这种方法,该软件利用微小自由能法可以计算得到给定热力学状态下气体混合

物的热力学平衡态组分^[3-4]。此外,还有将元素扩散方程与化学平衡热力学相结合的计算方法^[5]、控制体模型法^[6-8]以及基于 Navier-Stokes 控制方程组的三维数值模拟法^[9]。在实验研究方面,目前主要采用两区混合法^[10-13]将主稀释剂氦气分为前后两股气流分别注入燃烧室内,以大幅度提高激光的输出功率。然而,目前的这些实验工作均以激光输出功率作为研究对象,间接地考察燃烧室的工作性能,并没有专门针对燃烧室内 H₂/NF₃混合物的燃烧过程进行直接观测的研究报道。

很显然,在热力学平衡条件下,NF₃的解离程度实际上取决于燃烧室内的气体温度,因此,了解燃烧室内的气体温度对于评估氟原子的产生效率非常重要。由于 H₂/NF₃燃烧火焰具有极高的温度,且燃烧产物中的氟原子、F₂等具有强烈的腐蚀性,导致观察窗的保护较为困难,因此目前燃烧室内高温高压气体的温度主要通过绝热等压模型进行理论估算获得,仅在早期有少量的实验工作^[14]。尽管直接测量燃烧室内气体温度的文献不多,但人们在利用光学技术测量气体温度方面已经开展了不少研究工作,比如采用荧光光谱、可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)、激光光谱等方法进行温度测量^[15-21]。此外,在对燃烧驱动 DF/HF 化学激光

收稿日期: 2022-07-06; 修回日期: 2022-08-18; 录用日期: 2022-10-19; 网络首发日期: 2022-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(21590803)、中国科学院化学激光重点实验室创新基金(KLCL-2020S06, KLCL-2021S02)

通信作者: *liliucheng@dicp.ac.cn

器进行表征时,光谱分析方法可以提供有关光学谐振腔增益介质的有用信息,如介质成分、介质温度、增益分布等^[22-26],因此可以通过光谱测量方法对 HF 化学激光器的运转状态进行诊断。这对于利用火焰荧光光谱进行 HF/DF 化学激光器燃烧室工作特性的诊断分析也具有一定的借鉴意义。

为了更好地对燃烧驱动 DF/HF 化学激光器燃烧室中的氟原子产生效率进行优化,本课题组搭建了小型燃烧室平台,采用火焰荧光光谱法对 H₂/NF₃ 燃烧火焰的紫外可见光谱和近红外光谱进行直接观测,分析

了燃烧室内 H₂/NF₃ 混合物的燃烧过程;然后利用 HF ($v=2 \rightarrow v=0$) 谱带的转动结构强度分布测量了燃烧室内的气体温度,并结合电动平移台给出了火焰温度沿气流方向的分布情况,同时还考察了不同 H₂/NF₃ 配比对火焰气体温度分布的影响。

2 实验装置

本课题组搭建了小型燃烧室装置,用于研究 H₂/NF₃ 燃烧火焰的荧光光谱以及气体温度分布情况。实验装置如图 1 所示。

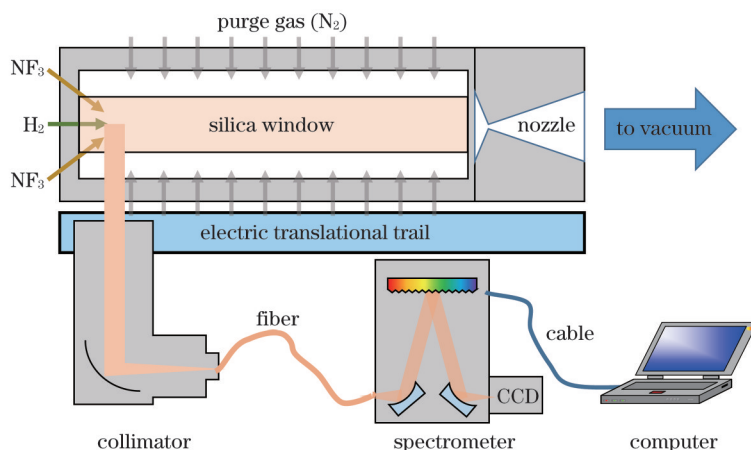


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Diagram of experimental setup

整个燃烧室腔体采用耐腐蚀的不锈钢材质。喷注器面板采用三股互击式射流布局,中间是一排 H₂ 燃料喷注孔(5个,直径为 0.4 mm),沿着水平方向喷注;上下各有一排 NF₃ 氧化剂喷注孔(5个,直径为 0.6 mm),喷注方向与水平方向呈 55° 夹角;H₂ 气流和 NF₃ 气流撞击点位于喷注器面板下游 2.5 mm 处。H₂ 和 NF₃ 喷注孔上游腔内的气体初始温度为室温,初始压强约为燃烧室内气体压强的 1.2 倍(绝对压强)。

燃烧室内气流通道的尺寸为 24 mm × 20 mm × 100 mm,两侧设有石英观察窗口,可以观察燃烧室内的火焰。由于 H₂/NF₃ 燃烧火焰具有极高的温度,且燃烧产物中的氟原子、F₂ 等具有强烈的腐蚀性,因此在两侧注入了大量 N₂ 气帘,用于保护石英观察窗口。燃烧室通道上方设有监测燃烧室压强的测压孔和用于点燃 H₂/NF₃ 混合物的电火花装置,电火花装置位于喷注器面板下游 35 mm 处。

利用一个镀银膜的反射型光纤准直器(RC12FC-P01 型)收集从石英观察窗口透射出的燃烧火焰自发光,然后通过一根芯径为 0.6 mm 的多模光纤将其送到光栅光谱仪狭缝入口处。光纤准直器固定在一个可以匀速移动的电动平移台上,平移台的运动速度为 40 mm/s,用于测量燃烧火焰荧光光谱沿着气流方向的分布情况。

光栅光谱仪(Spectra2300i)采用 300 line/mm 的光

栅,探测器采用电制冷的面阵型 CCD(PIXIS400)或液氮制冷的线阵型 CCD(OMAV)。其中:PIXIS400 光谱仪可以探测紫外可见区光谱,波长范围为 250~1000 nm,分辨率为 0.2 nm;OMAV 光谱仪可以探测近红外区光谱,波长范围为 900~1700 nm,分辨率为 0.1 nm。用笔式低压汞灯对光谱仪进行波长校准,波长校准误差小于 0.2 nm。

各路气体的流量均采用质量流量控制器(D07-19B 型)进行控制和计量,气体流量单位均为 SLM(标准状态下 L/min)。

3 实验结果与讨论

3.1 H₂/NF₃ 燃烧火焰的化学荧光光谱

在观察 H₂/NF₃ 非预混燃烧火焰和测量火焰荧光光谱时,典型的气体流量条件为:H₂, 5.0 SLM;NF₃, 5.0 SLM;N₂, 10 SLM。当燃烧平稳时,燃烧室内的气体压强约为 32 kPa(绝对压强)。

H₂/NF₃ 非预混燃烧火焰的典型照片如图 2 所示,燃烧室内的气流方向为从左到右。从图 2 可以看到:当火焰稳定燃烧时,受 H₂ 和 NF₃ 混合效应的影响,最开始有大约 3~5 mm 的暗区出现(H₂ 气流和 NF₃ 气流撞击点位于喷注器面板下游 2.5 mm 处);随着 H₂ 气流和 NF₃ 气流逐渐混合均匀,强烈的橘黄色火焰出现在距离喷注面板下游 5~22 mm 处,接着较暗的橘红色

火焰出现在下游 22~28 mm 处,最后火焰逐渐熄灭。

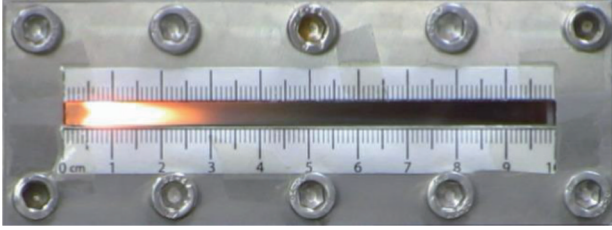


图 2 典型 H_2/NF_3 非预混燃烧火焰的照片

Fig. 2 Typical photo of non-premixed combustion flame of hydrogen and nitrogen trifluoride

H_2/NF_3 燃烧火焰在紫外可见区的典型荧光光谱如图 3 所示。在紫外可见光谱区域, H_2/NF_3 燃烧火焰的自发光主要包括 $N_2(B)$ 、 $NF(b)$ 、 $NH(A)$ 等电子激发态分子的辐射跃迁。其中: $N_2(B \rightarrow A)$ 电子态跃迁产生橙黄色荧光, 波长范围覆盖 500~780 nm; $NF(b \rightarrow X)$ 电子态跃迁产生翠绿色荧光, 特征谱线位于 529 nm; 最强的特征谱线是 $NH(A \rightarrow X)$ 电子态跃迁, 其波长位置为 336 nm。 $N_2(B)$ 和 $NH(A)$ 是 H_2/NF_3 燃烧过程中的关键激发态粒子, 它们的自发辐射寿命很短, 约为微秒量级, 它们的发光强度可以很好地表征火焰燃烧的剧烈程度, 可用于准确定量测定燃烧火焰的长度。

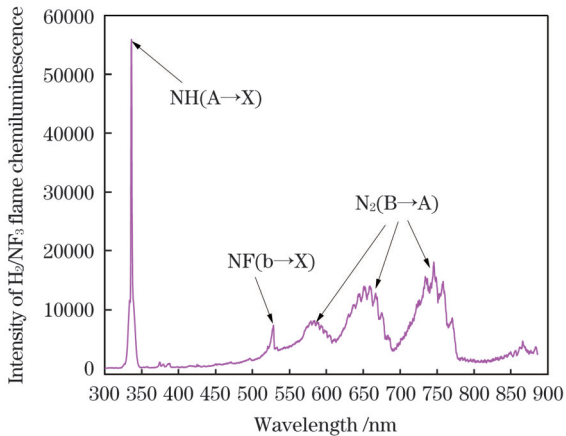
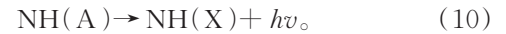
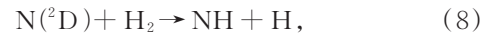
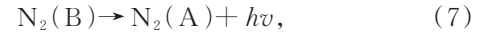
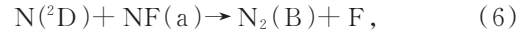
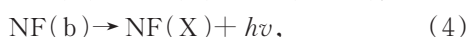
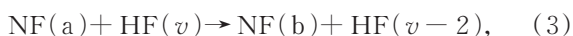
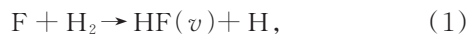


图 3 H_2/NF_3 燃烧火焰的典型紫外可见荧光光谱

Fig. 3 A typical UV-visible chemiluminescence spectrum of H_2/NF_3 combustion flame

在燃烧室中, 过量 NF_3 热解会产生氟原子和 NF_2 分子, 氟原子与 H_2 反应会产生基态氢原子 H 和激发态氟化氢分子 $HF(v)$, 接着产生 $N_2(B)$ 、 $NF(b)$ 、 $NH(A)$ 等燃烧火焰激发态分子。考虑到激发态分子能量和化学反应放热的大小, 上述激发态粒子由以下基元反应过程产生:



H_2/NF_3 燃烧火焰在近红外区的典型荧光光谱如图 4 所示。在近红外光谱区域, H_2/NF_3 燃烧火焰自发光的光谱比较纯净, 主要由 $HF(v)$ 振动激发态分子的第一泛频振动转动跃迁谱带 ($\Delta v=2$) 组成。另外, 仔细观察 $HF(v=2 \rightarrow v=0)$ 振动转动跃迁谱带的 R 支转动谱线 (1250~1300 nm) 可以发现, 其转动强度分布与传统低温条件下 HF 化学激光器光腔内荧光的转动强度分布显著不同, 在燃烧室内的极高温条件下, 高 J (J 为转动量子数) 处的谱线重叠严重, 呈现出表现非玻尔兹曼平衡现象。

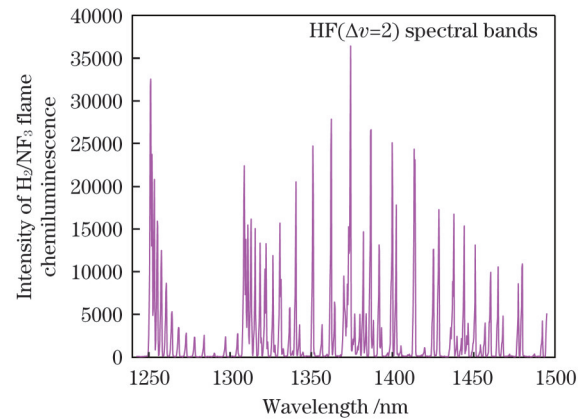


图 4 H_2/NF_3 燃烧火焰的典型近红外荧光光谱

Fig. 4 A typical near-infrared chemiluminescence spectrum of H_2/NF_3 combustion flame

$NH(A)$ 、 $N_2(B)$ 和 $NF(b)$ 等电子激发态粒子以及 $HF(v)$ 振动激发态粒子发光强度沿气流方向的变化趋势如图 5 和图 6 所示。 $NH(A)$ 、 $N_2(B)$ 和 $NF(b)$ 等电子激发态粒子发光强度的变化趋势基本与图 1 中的燃烧室火焰形状吻合, 当火焰熄灭后 (下游 30 mm) 这些电子跃迁辐射也随之迅速减小到零。 $HF(v)$ 振动激发态粒子发光强度的变化趋势有所不同, 尽管开始阶段与燃烧室火焰变化趋势相同, 并在 20 mm 处达到了极大值, 但当火焰熄灭后 $HF(v=2 \rightarrow v=0)$ 辐射仍然存在, 并一直延续到燃烧室出口处。这是由 $HF(v=2)$ 激发态粒子的寿命较长 (约为毫秒量级) 造成的。这一现象表明 H_2/NF_3 燃烧火焰的可见光辐射可以用于表征火焰长度, 而近红外区辐射则不适合用于表征火焰长度。

3.2 气体配比对 H_2/NF_3 燃烧火焰长度的影响

在 DF/HF 化学激光器领域, 通常使用气体配比系数 α 来表示氧化剂 NF_3 和燃料 H_2 的气体流量之比。 α 定义为 $\alpha = 1.5 \cdot \dot{n}_{NF_3} / \dot{n}_{H_2}$, 其中 \dot{n}_{NF_3} 为 NF_3 流量, \dot{n}_{H_2} 为 H_2 流量。如前所述, $N_2(B)$ 自发辐射寿命很短 (约为微

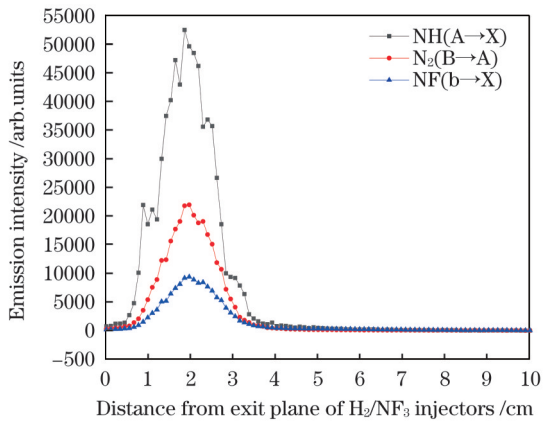


图 5 NH(A→X)、N₂(B→A)和NF(b→X)等电子激发态粒子的发光强度沿燃烧室内气流方向的变化趋势

Fig. 5 Variation of NH(A→X), N₂(B→A) and NF(b→X) emission intensities along gas flow direction in combustion chamber

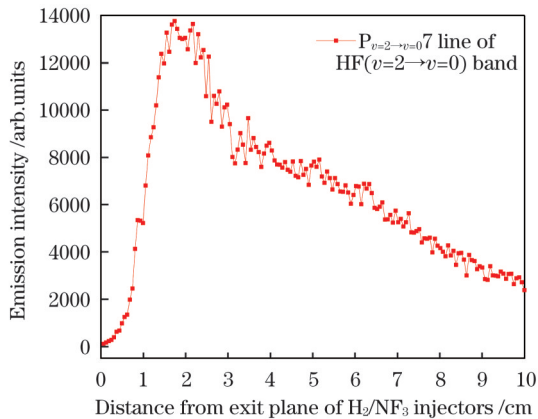


图 6 HF(*v*) 振动激发态粒子的发光强度沿燃烧室内气流方向的变化趋势

Fig. 6 Variation of HF(*v*) emission intensity along gas flow direction in combustion chamber

秒量级),因此其发光强度能够很好地表征火焰燃烧的剧烈程度,可以用于分析 H₂/NF₃ 燃烧火焰的燃烧过程。利用 N₂(B→A) 电子跃迁辐射发光的强度分布,结合电动平移台,可以给出火焰发光强度沿气流方向的分布情况,从而可以定量地表征燃烧火焰的长度。

在不同的 α 系数下, H₂/NF₃ 燃烧火焰中 N₂(B→A) 电子跃迁谱带沿气流方向的发光强度随距离的变化趋势如图 7 所示。在实验过程中, H₂ 流量为 5.0 SLM, 通过调节 NF₃ 气体流量即可改变 α (三次实验的 α 值分别为 1.27、1.68 和 2.10)。

从图 7 中可以看到,随着 α 从 1.27 增大到 2.10 (氧化剂 NF₃ 气流流量增加),火焰的起始位置和结束位置向上游移动了约 3 mm。另外,整体火焰长度变化不大,明亮内焰的长度基本保持在 20~25 mm。笔者认为造成这种现象的一种可能原因是气流混合效应的影响,即:在三股互击式射流布局实验条件下,当增加 NF₃ 流量而保持 H₂ 流量不变时(即增大 α),会导致燃料 H₂ 被

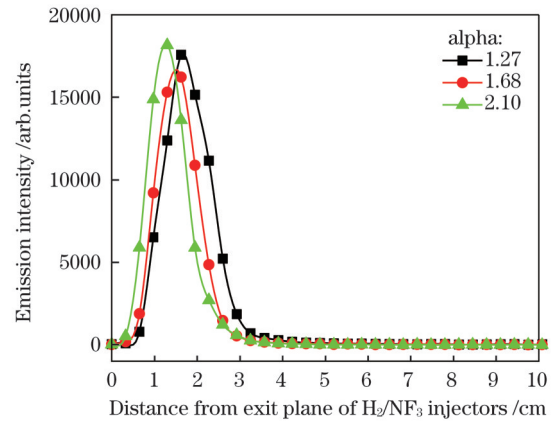


图 7 不同的 α 条件下, H₂/NF₃ 燃烧火焰中 N₂(B→A) 谱带发光强度沿气流方向的变化趋势

Fig. 7 Variation of emission intensity of N₂(B→A) in H₂/NF₃ combustion flame along gas flow direction for different alpha values

遏阻在上游,因此氧化剂 NF₃ 流量越大火焰越向上游移动,火焰长度变短;相反,当减小 NF₃ 流量(即减小 α)时,由于 NF₃ 气体的遏阻作用减小,火焰长度增大。另一种可能的原因则是气体配比系数 α 的变化改变了 H₂/NF₃ 混合气体的燃烧特性,即:当增加 NF₃ 流量而保持 H₂ 流量不变时,火焰传播速度很可能变快了,从而导致着火点提前,火焰长度变短;相反,当减小 NF₃ 流量时,火焰传播速度变慢,导致着火点后移,火焰变长。

3.3 气体配比对 H₂/NF₃ 燃烧火焰温度分布的影响

相对于 HF/DF 化学激光器内较低的气体压强(约 0.13 kPa)而言,燃烧室内的气体处于高温高压状态,分子之间的碰撞频率很大,可以预计振动激发态分子 HF(*v*) 在各个转动能级上的粒子数分布呈热力学平衡状态,且其转动温度等于气体宏观温度。因此,利用 OMAV 光谱仪测得 HF(*v*=2→*v*=0) 谱带的转动结构强度分布,再结合电动平移台的匀速移动,就可以得到火焰温度沿气流方向的分布情况。利用 HF(*v*=2→*v*=0) 谱带的转动谱线强度分布推导气体温度的详细过程可以参考文献[13]和文献[14],此处限于篇幅不再赘述。

在不同的气体配比系数 α 下, H₂/NF₃ 燃烧火焰温度沿气流方向的变化趋势如图 8 所示。实验过程中, H₂ 流量为 5.0 SLM, 通过调节 NF₃ 气体的流量来改变 α (6 次实验中的 α 分别为 1.18、1.38、1.60、2.01、2.40 和 2.77)。可以看到,燃烧室内的气体温度呈现出在开始阶段急速上升,到达温度最高点后缓慢线性下降的现象。温度最高点一般在喷注孔面板下游 15~20 mm 处,此处恰好是火焰亮度最高、燃烧反应放热最剧烈的位置。比较不同气体配比系数 α 对温度分布曲线的影响可以发现:当 α 较小时,燃烧室内的气体温度下降得较为平缓;随着 α 增大,燃烧室内气体温度下降得越来越快;当 α 为 2.77 时,最高点温度升高到了 2300 K。

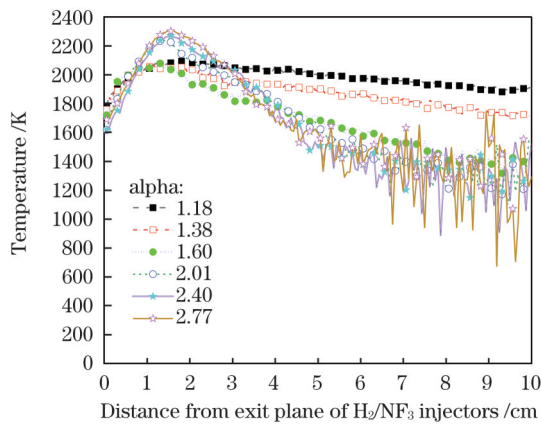


图 8 在不同 α 下 H_2/NF_3 燃烧火焰温度沿气流方向的变化趋势
Fig. 8 Variation of H_2/NF_3 combustion flame temperature along gas flow direction for different α values

如果假设 H_2/NF_3 燃烧过程和 NF_3 热解离过程都很快,那么当燃烧完成后 (20~40 mm),下游已经不再有剧烈的放热反应,也不再了解离吸热过程,近似于绝热体系,此时沿气流方向的燃烧室内的气体温度应该保持不变。而由图 8 可知气体温度在不断下降,并且气体配比系数 α 越大,气体温度下降得越快。这说明气体温度下降很可能是由残余的过量 NF_3 的热解离过程吸热造成的。

根据图 8 所示的温度变化趋势,笔者认为燃烧室内的化学反应可以分为两个过程:一个是 H_2/NF_3 剧烈快速燃烧过程,此过程非常快速,几乎是 H_2/NF_3 一混合就立刻燃烧了;另一个是过量的 NF_3 在高温下的热解离过程,热解离过程相对于燃烧过程比较慢,并且温度越低 NF_3 的热解离越慢。据此可以推断,对于 DF/HF 化学激光器而言,在不同氧化剂/燃料气体配比工况下,所需要的最佳燃烧室长度很可能是不同的,特别是当 NF_3 占比较大时,需要较长的燃烧室滞留时间才能使过量的 NF_3 充分解离为氟原子,从而有效地提高氟原子的产生效率。

4 结 论

对 H_2/NF_3 混合物燃烧火焰自发光进行了荧光光谱分析和温度分布测量实验,结果表明:在紫外可见光谱区,荧光光谱主要由 $\text{N}_2(\text{B})$ 、 $\text{NF}(\text{b})$ 、 $\text{NH}(\text{A})$ 等电子激发态分子的辐射跃迁产生;在近红外光谱区,荧光光谱主要由 $\text{HF}(\nu)$ 振动激发态分子的第一泛频振动转动跃迁谱带组成。 $\text{N}_2(\text{B})$ 和 $\text{NH}(\text{A})$ 是 H_2/NF_3 燃烧过程中的关键激发态粒子,它们的自发辐射寿命很短,它们的发光强度可以很好地表征火焰燃烧的剧烈程度,可用于燃烧火焰长度的测量。

考察了氧化剂 NF_3 与燃料 H_2 的流量比(气体配比系数)对 H_2/NF_3 燃烧火焰长度的影响,实验结果表明:在三股互击式射流布局实验条件下,随着气体配比系数增大,火焰长度减小;随着气体配比系数减小,火焰

长度增大。本文还考察了气体配比系数对燃烧火焰温度分布的影响,结果显示:当气体配比系数较小时,燃烧室内的气体温度沿气流方向下降得较为平缓;随着气体配比系数逐渐增大,气体温度沿气流方向下降得越来越快。

参 考 文 献

- [1] 格罗斯,博特. 化学激光手册[M]. 尹厚明,译. 北京: 科学出版社, 1987.
Gross R W F, Bott J F. Handbook of chemical lasers[M]. Yin H M, Transl. Beijing: Science Press, 1987.
- [2] 王增强,周冬建,李留成,等. 燃烧驱动的 HF-HBr 双波段激光器[J]. 中国激光, 2022, 49(17): 1716002.
Wang Z Q, Zhou D J, Li L C, et al. Combustion driven HF HBr dual band laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(17): 1716002.
- [3] 华卫红,姜宗福,赵伊君. DF 化学激光器燃烧室中化学配比的数值研究[J]. 燃烧科学与技术, 1998, 4(1): 91-98.
Hua W H, Jiang Z F, Zhao Y J. Numerical study of compositions match in combustor of DF chemical laser[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 1998, 4(1): 91-98.
- [4] 靳冬欢,刘文广,陈星,等. HF 化学激光器燃烧室中燃料配比的数值分析[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(2): 38-43.
Jin D H, Liu W G, Chen X, et al. Numerical study of compositions proportioning in combustor of HF chemical laser[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(2): 38-43.
- [5] 唐力铁,卓海涛,陆启生. DF 激光器燃烧室反应流场的一种新的计算求解方法[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(11): 1625-1629.
Tang L T, Zhuo H T, Lu Q S. Numerical solution to multi-component chemical equilibrium flows in DF chemical laser combustion chamber[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2005, 17(11): 1625-1629.
- [6] Kwok M, Amimoto S. Modeling HF gain generator F-atom flows [C]//31st Plasmadynamics and Lasers Conference, June 19-22, 2000, Denver, CO. Virginia: AIAA Press, 2000: 2497.
- [7] Kwok M. A model predictor for chemical laser combustors[C]//32nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, June 11-14, 2001, Anaheim, CA. Virginia: AIAA Press, 2001: 2868.
- [8] Kwok M. HF chemical laser flows modeled by HYFLAME[C]//33rd Plasmadynamics and Lasers Conference, May 20-23, 2002, Maui, Hawaii. Virginia: AIAA Press, 2002: 2218.
- [9] 靳冬欢,刘文广,陈星,等. 三股互击式喷注器及燃烧室流场的数值模拟[J]. 物理学报, 2012, 61(6): 064206.
Jin D H, Liu W G, Chen X, et al. Numerical study of flow field characteristics for triplet impingement injector and combustor[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(6): 064206.
- [10] Rebore V K, Fedorov I A, Maksimov Y P, et al. Characteristics of a cw chemical HF laser operating by using a new oxidising-gas production technique[J]. Quantum Electronics, 2004, 34(9): 795-800.
- [11] Rebore V K, Fedorov I A, Maksimov Y P, et al. Optimisation of characteristics of a chemical HF laser operating by using a new method for oxidising-gas production[J]. Quantum Electronics, 2006, 36(12): 1155-1160.
- [12] Rebore V K, Fedorov I A, Maksimov Y P, et al. Optimisation of characteristics of a cw chemical HF laser with a new method for oxidising gas production[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7131: 71310Q.
- [13] 靳冬欢,刘文广,陈星,等. 化学激光器燃烧室两步反应法的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(8): 2026-2028.
Jin D H, Liu W G, Chen X, et al. Experimental study on two-step reaction in combustor of chemical laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(8): 2026-2028.

- [14] Varwig R L, Kwok M A. Temperature measurement in a CW HF chemical laser plenum[J]. AIAA Journal, 1975, 13(9): 1224-1227.
- [15] Tang S K, Li L C, Duo L P, et al. Optical cavity temperature measurement based on the first overtones spontaneous emission spectra for HF chemical laser[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9255: 92552C.
- [16] 李留成, 多丽萍, 周冬建, 等. 基于 TDLAS 测量 HBr 化学激光器气体温度[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(8): 0805011.
Li L C, Duo L P, Zhou D J, et al. Measurements of gas temperature in HBr chemical lasers by TDLAS technique[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(8): 0805011.
- [17] 罗威, 袁圣付, 邹前进, 等. 基于发射光谱的 DF 激光器光腔温度与粒子数分布[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(6): 1668-1670.
Luo W, Yuan S F, Zou Q J, et al. Calculation of temperature and population distribution in DF laser cavity based on emission spectrum[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(6): 1668-1670.
- [18] 罗威, 袁圣付, 陆启生, 等. 一种可用于 HF/DF 化学激光器流场温度测量的方法[J]. 中国激光, 2010, 37(3): 636-639.
Luo W, Yuan S F, Lu Q S, et al. A method of measuring flow field temperature for HF/DF chemical laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(3): 636-639.
- [19] 曹章, 高欣, 陆方峰, 等. 激光吸收光谱层析成像及复杂燃烧场动态监测[J]. 中国激光, 2022, 49(19): 1904002
Cao Z, Gao X, Lu F H, et al. Laser absorption spectral tomography for dynamical combustion monitoring[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(19): 1904002.
- [20] 阮家森, 段利红, 全伟. 基于光谱吸收的碱金属气室温度梯度测量方法[J]. 中国激光, 2022, 49(19): 1904005.
- [21] 黄建伟, 刘婷. 光纤荧光温度传感探针的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(15): 1516023.
Huang J W, Liu T. Review of research on optical fiber fluorescence temperature probes[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(15): 1516023.
- [22] Rawlins W T, Davis S J, Oakes D B, et al. Studies of HF(v, J) spatial profiles with a hyperspectral imager[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5334: 137-144.
- [23] Davis S J, Rawlins W T, Oakes D B, et al. Dynamics of HF(v, J) chemiluminescence and lasing observed by infrared hyperspectral imaging[C]//34th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, June 23-26, 2003, Orlando, Florida, Virginia: AIAA Press, 2003: 3756.
- [24] 罗威, 袁圣付, 陆启生, 等. 电激励 DF 化学激光器光腔流场荧光光谱测量与分析[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(2): 371-374.
Luo W, Yuan S F, Lu Q S, et al. Chemiluminescence spectrum in optical cavity of discharge driven DF chemical laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(2): 371-374.
- [25] Luo W, Yuan S F, Yan B Z, et al. Kinetics analysis of chemiluminescence in discharge-driven HF chemical lasers[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(8): 081403.
- [26] 邹前进, 袁圣付, 罗威, 等. 光谱测量在化学激光器运转状态诊断中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(9): 091401.
Zou Q J, Yuan S F, Luo W, et al. Application of spectrum measurements in working status diagnosis of chemical lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(9): 091401.

Fluorescence Spectra Analysis and Temperature Profile Measurement of H_2/NF_3 Combustion Flames

Li Liucheng*, Wang Yuanhu, Tang Shukai, Wang Zengqiang, Duo Liping, Li Gang, Jin Yuqi
Key Laboratory of Chemical Lasers, Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, Liaoning, China

Abstract

Objective For combustion-driven deuterium fluoride/hydrogen fluoride (DF/HF) chemical lasers, fluorine atoms produced in the combustion chamber are the source of the laser energy. The production efficiency of fluorine atoms in the combustion chamber directly determines the upper limit of the chemical efficiency of combustion-driven DF/HF chemical lasers. The atomic fluorine production efficiency limits several characteristic parameters of combustion-driven DF/HF chemical lasers, such as the amplification scale, volume efficiency, and weight efficiency. Therefore, it is necessary to investigate the combustion process of combustion-driven DF/HF chemical lasers thoroughly. In the past, most studies on HF/DF laser combustors were conducted theoretically using thermodynamic equilibrium methods rather than experimentally because of the extremely high temperature of the combustion production gases and the strong corrosivity of the combustion products F, F_2 , etc. To date, only a few indirect experimental studies have been conducted on HF/DF laser combustors. These experimental studies considered the laser output power as the research object to investigate the working performance of the combustion chamber indirectly without direct observation of the combustion process. In this study, a small combustion chamber platform was built. The ultraviolet - visible and near-infrared spectra of the H_2/NF_3 combustion flame were directly observed by flame fluorescence spectroscopy. The combustion process of the H_2/NF_3 mixture in the combustion chamber was analyzed using spontaneous emission spectroscopy. The gas temperature in the combustion chamber was measured using the rotational structure strength distribution of the HF ($v=2 \rightarrow v=0$) band. The flame temperature distribution along the gas flow direction is provided in combination with an electric translation platform. The influence of flow ratio of oxidant NF_3 to fuel H_2 on the flame gas temperature distribution was examined.

Methods In this study, a small combustion chamber test platform was built (Fig. 1). The flame shape and temperature distribution of the gas products of H_2/NF_3 combustion in the combustion chamber were measured and analyzed by fluorescence spectroscopy. The entire combustion chamber is composed of corrosion-resistant stainless steel. The injector panel adopts a three-gas-jet layout, with a row of H_2 fuel injection holes in the middle and injection along the horizontal direction. There are two rows of NF_3 oxidizer injection

holes, one at the top and one at the bottom, and the injection direction is 55° from the horizontal direction. Quartz observation windows are set on both sides of the gas flow passage in the combustion chamber to observe the combustion flame, and a large amount of N_2 curtain gas is injected on both sides to protect the quartz observation window. A pressure tap to monitor the pressure of the combustion chamber and an electric spark device for igniting the H_2/NF_3 mixture are set on the upper side of the combustion chamber. The electric spark device is located 35 mm downstream from the injector panel. A reflective optical fiber collimator coated with a silver film is used to collect the luminescence of the combustion flame transmitted from the quartz viewing window. The optical fiber collimator is fixed on an electric translation platform that can move at a uniform speed to measure the distribution of the fluorescence spectrum of the combustion flame along the gas flow direction. The ultraviolet-visible and near-infrared spectra of the combustion flame are measured using a grating spectrometer, and the wavelength of the spectrometer is calibrated using a pen-shaped low-pressure mercury argon lamp. A mass-flow controller is used to control and measure the flow rate of each gas.

Results and Discussion In the ultraviolet - visible spectral region, the luminescence of the H_2/NF_3 combustion flame mainly includes the radiative transitions of electronically excited molecules, such as $N_2(B)$, $NF(b)$, and $NH(A)$ (Fig. 3). In the near-infrared spectral region, the spectrum of the H_2/NF_3 combustion flame is relatively pure and simple and is mainly composed of the first overtone vibrational rotational transition band ($\Delta v=2$) of $HF(v)$ vibrationally excited molecules (Fig. 4). At extremely high temperatures in the combustion chamber, the spectral lines at the high rotation quantum (J) overlap significantly, showing an apparent non-Boltzmann equilibrium. With the increase in the flow rate of oxidant NF_3 , the start and end positions of the flame move upstream, but the overall flame length changes little (Fig. 7). The gas temperature in the combustion chamber rises rapidly at the beginning upstream, immediately reaches the highest temperature point, and then decreases slowly and linearly (Fig. 8). The highest temperature point is where the flame brightness is the highest and the combustion reaction is the most intense. When the flow ratio of NF_3 to H_2 gas is small, the gas temperature in the combustion chamber decreases more gently. When the flow ratio of NF_3 to H_2 gas increases, the gas temperature in the combustion chamber decreases more sharply.

Conclusions A fluorescence spectrum analysis and temperature distribution measurements of the combustion flame of H_2/NF_3 mixture were performed. The results show that the fluorescence spectrum in the ultraviolet-visible spectral region is mainly produced by the radiative transitions of electronically excited molecules, such as $N_2(B)$, $NF(b)$, and $NH(A)$. The fluorescence spectrum in the near-infrared spectral region is mainly composed of the first overtone vibrational rotational transition band of $HF(v)$ vibrationally excited molecules. The effect of flow ratio of oxidant NF_3 to fuel H_2 on the H_2/NF_3 flame length was investigated. The experimental results show that, under the experimental conditions of the three gas jets, the flame length decreases when the flow ratio of oxidant NF_3 to fuel H_2 increases and increases when the flow ratio of oxidant NF_3 to fuel H_2 decreases. The effect of flow ratio of oxidant NF_3 to fuel H_2 on the combustion flame temperature distribution was also investigated. When the flow ratio of oxidant NF_3 to fuel H_2 is small, the gas temperature in the combustion chamber decreases gently along the flow direction. When the flow ratio of oxidant NF_3 to fuel H_2 gradually increases, the gas temperature decreases sharply along the flow direction.

Key words spectroscopy; fluoresce spectra; chemical lasers; combustion chamber; temperature profile; combustion flame