

燃气

应用理论与实践

● 金志刚 著

RANQI
YINGYONG LILUN YU SHIJIAN

中国建筑工业出版社

燃气应用理论与实践

金志刚 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

燃气应用理论与实践/金志刚著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2011. 4
ISBN 978-7-112-13055-9

I. ①燃… II. ①金… III. ①气体燃料-基本知识 IV. ①TQ517.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 043578 号

本书共分七篇, 包括的主要内容有: 燃气燃烧特性和分类、燃气灶具和热水器、燃气采暖、燃气燃烧器的设计、燃气性质与测试、燃气输配、燃气论坛。

本书可供从事城镇燃气设计、科研、管理部门参考或作为燃气专业技术人员培训教材; 也可作为大专院校有关专业学生、研究生的辅助教材; 同时也为生产燃具厂家提供开发新型燃具的途径。

* * *

责任编辑: 胡明安 姚荣华

责任设计: 李志立

责任校对: 陈晶晶 赵 颖

燃气应用理论与实践

金志刚 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京市安泰印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 28¼ 字数: 700 千字

2011 年 8 月第一版 2011 年 8 月第一次印刷

定价: 70.00 元

ISBN 978-7-112-13055-9
(20442)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

序 言

自从从事燃气事业以来，已经 50 余年，通过不断的学习和实践，我个人也是逐步地深入认识燃气学科。例如我曾经强调燃具的“支架效应”，只考虑烟气中 CO 增加的现象，忽略了 NO_x 降低的现实；再有过去对教材中过剩空气系数（或称空气系数）的认识也不全面。这些在有关章节中已予以改正。

本世纪初天然气快速发展，扩充了燃气的应用范围。无论在理论上，工程建设和燃气设备开发等方面都有很大的进步。燃气事业由于过去种种原因，走了不少弯路。经验和教训要求我们必须认真学习国外先进经验。书中某些章节是对国外资料的理解，同时根据个人的体会，对某些资料提出自己的观点，请读者慎重取舍。

燃气事业中有气源、输配和应用三个部分；而主要依靠燃气应用设备的效率高、污染少来完成节能减排以及降低污染的任务，因此燃气应用技术是燃气事业中的最关键部分。但是没有气源和输配技术的配合，燃气应用就成了“无米之炊”，可见气源、输配和应用是相辅相成的。要实现燃气应用技术必须掌握当地的气源成分、输配压力的变化规律；进行气源和输配设计时，要了解供应区各类燃具的特性和适应范围。本书中有关输配和气源的论述也是为燃气应用服务的，尤其在燃气互换性和燃具适应性以及执行燃气分类标准等方面的论述都体现三者紧密联系的关系，在此提醒读者注意。

燃气应用是一门实用科学。在理论和实践诸方面的各个环节必须通过试验来验证。高等院校、研究机构和生产单位必须重视实验室工作。国外学者利用先进的光电仪表“拉曼—瑞利散射器”揭示了预混空气燃烧方法产生 CO 和 NO_x 的机理，为设计大气式燃烧器提供了有力的理论基础，推动了燃气燃烧设备的进步。由于缺乏资料，书中 A103 没能深入介绍这种仪表系统，只是给读者一个线索。书中介绍的纹影仪光学系统（E203），可以显示烟气流动状态。此系统简单，容易实现，我国家用燃气灶标准中的烟气取样器，就是根据此系统研发定型的，可见此系统有利于改进燃具结构。此外自从有了激光测速仪，各种燃气的燃烧速度有了定值。天津大学在 20 世纪 80 年代就完成了用激光测速仪测燃气燃烧速度的系统。现在激光测速仪不仅可以测出三维速度场，并且国外已经有了激光测速仪的系列商品。希望燃气界从事研究和开发的有识之士，关注燃气理论方面的课题，联合有关专业共同开发先进仪表和设备，深入研究燃气学科各方面的课题，推动燃气事业的发展。

本书共分七篇。内容涉及燃气燃烧、爆炸、爆震波的机理和各种燃烧方法的基本理论，各类燃气用具设计特点和试验方法。此外还论述了应用、输配和气源三者互相关联的机理，燃气互换性和燃具适应性的理论以及燃气输配管网的调度等内容。可供城镇燃气设计、科研、管理部门参考或作为技术人员培训教材，也可作为高校有关专业学生、研究生辅助教材，同时也为生产燃具厂家提供开发新型燃具的途径。

本书中内容包括了在教学、科研以及学术交流中的成果，与作者合作与交流的同志对

我有很大的帮助，在此向他们表示感谢。

在出版过程中得到国家燃气用具质量监督检验中心王启、项友谦的大力协助，天津市城建学院玉建军、魏璠、李军等老师提供了电子插图、核对了一些原始数据和图表，在此衷心地感谢。书中一些章节是在不同时期完成的，虽经整理合并，但交叉的地方难免有少量重复。另外受当时背景影响，符号和量纲不够规范，更因为水平有限，难免有错误和不当之处，恳请燃气界同仁指正。

金志刚于天津大学

2011.01.08

目 录

第一篇(A) 燃气燃烧特性和分类

第一章 燃气燃烧特性	1
A101 预混空气燃烧的火焰结构	1
A102 火焰的稳定性	6
A103 NO _x 及 CO 的生成条件	13
A104 预混空气燃烧的不稳定火焰	21
A105 环缝形火孔火焰稳定性	26
A106 燃气热力着火	31
A107 爆震波	37
第二章 燃气互换性和燃气分类	44
A201 燃气互换性发展沿革与燃烧势的物理背景	44
A202 论燃烧势的量化	50
A203 合理配气, 保证城市供应质量	55
A204 早期判别燃气互换性方法及其应用	60
A205 燃气互换性、燃具适应性与燃气分类	68
A206 天然气分类标准中的试验气	77

第二篇(B) 燃气灶具和热水器

第一章 燃气灶具	83
B101 全预混空气金属纤维燃气燃烧器	83
B102 金属纤维天然气燃烧器的结构与应用	87
B103 全预混空气燃烧方法的技术条件	93
B104 红外线辐射燃烧器性能及其在炊事上的应用	95
B105 组合式新型高效燃气家用灶	102
第二章 热水器	104
B201 燃气热水器的热负荷	104
B202 燃气热水器与建筑	112
B203 快速热水器历史沿革与发展趋势	119
B204 热水、采暖两用热水器	129
B205 燃气插片式换热器传热过程及应用	133

B206	容积式热水器的构造特点与控制	140
B207	热水器的储热功能与热水供应	145

第三篇(C) 燃气采暖

C001	用数理统计方法确定燃气采暖负荷	149
C002	天然气采暖的技术方案、负荷与建筑	154
C003	单户燃气采暖及其在公寓楼中的分户应用	158
C004	燃气热风采暖	162
C005	燃气空调、热泵与冷热电联产	168
C006	燃气热水器的热平衡及热效率计算	177

第四篇(D) 燃气燃烧器的设计

第一章	AGA 大气式燃气燃烧器设计方法	186
D101	AGA 大气式燃烧器设计	186
D102	引射型民用燃烧器一次空气系数的计算与分析	217
第二章	引射器设计与计算	227
D201	常压吸入中、低压引射器计算与分析	227
D202	负压变温吸入的中、低压引射器计算与应用	237
D203	高压引射器计算原理与最佳参数	244
D204	高压引射器的结构与特性曲线	256
第三章	燃气空气比例调节器	269
D301	燃气空气比例调节器的能量分析	269
D302	燃气空气比例调节器工况分析	275

第五篇(E) 燃气性质与测试

第一章	燃气热值及密度	281
E101	天然气热值与密度的计算	281
E102	用燃气热量计直接测得高位热值的湿平衡条件	293
E103	城市燃气真实气体的密度	298
E104	干、湿燃气理想气体的相对密度	302
第二章	燃烧产物成分分析	306
E201	城市燃气的燃烧产物成分计算与分析	306
E202	城市燃气燃烧产物成分分析及单板机数据处理装置研究	321

E203	燃气用具烟气中 CO 含量的分析	328
E204	空气中 CO 含量对民用灶具烟气检测的影响	333
E205	空气系数的计算方法	335
第三章	燃气燃烧速度的测量	343
E301	用激光多普勒流速仪测量燃烧速度的研究	343
E302	激光测速压力在燃气事业中的应用	353
E303	燃气燃烧速度教学静实验	357

第六篇(F) 燃气输配

F001	城市煤气负荷	362
F002	燃气管网电算原理	373
F003	压气机供气管网平差方法	380
F004	燃气管网运行的宏观模型	382
F005	燃气管网压气机供气优化调度	386
F006	提高高压储气罐储气能力的途径	390
F007	调压器通用流量计算公式	398
F008	欧共体调压器标准中的形状系数和临界点	405
F009	通用流量公式的英制和公制关系	408
F010	液化石油气灌瓶生产线灌装工位识别技术	411

第七篇(G) 燃气论坛

G001	试论我国天然气发展道路及方向	414
G002	给 5 升热水器出路	418
G003	不要轻易否定普通烟道式热水器	420
G004	燃气热水器要走出误区	424
G005	燃气燃烧技术发展及合理利用	427
G006	试论燃具的热能利用率与节能	432
G007	家用燃气灶的热负荷	437
G008	燃气发展史和应用事业的展望	438

第一篇(A) 燃气燃烧特性和分类

第一章 燃气燃烧特性

A101 预混空气燃烧的火焰结构

摘要：本文是预混空气燃烧方法特征的第一部分。文章分三个不同区域描述火焰的结构。通过绝热区火焰的结构，深入浅出地阐明层流火焰法向传播速度（燃烧速度）的物理概念。在中心区与边界区阐明外界热量、质量和能量传递因素对火焰稳定的影响，为火焰稳定性的理论打下基础。

引言

在 1855 年德国工程师本生发明预混空气燃烧器（本生灯）以前，燃气是靠扩散混合空气的燃烧方法进行燃烧的。当时市场上主要的燃气用具是“燃气灯”，利用扩散燃烧的光焰来照明。当燃气灯被电灯取代后，燃气用具向加热的功能发展，尤其是在天然气成为主要气源的条件下，扩散燃烧不能满足要求。于是预混部分空气燃烧方法被广泛地用于燃气用具。由于其方法简单、结构简易、工作稳定、调节方便等优点，到目前为止大部分的燃气用具仍以预混部分空气燃烧方法（大气式燃烧方法）为主。物理界与工程界都很重视预混空气燃烧机理的研究，并且理论结合实际，探讨热效率高、污染低、工作稳定的燃烧方法。如今在国内外市场出现的“全一次空气预混、低氮燃烧器”就是多年来理论结合实际的成果之一。

一、预混空气燃烧过程

在层流扩散燃烧中，由于层流扩散的速度慢，混合不完善，因此在燃烧含碳氢化合物的燃气时，会在扩散火焰中，使碳氢化合物在无氧加热的条件下分解，产生碳微粒，结果造成光焰和不完全燃烧。如果在燃烧以前预先在燃气中混入空气，结果出现内焰与外焰（图 A101-1），使燃烧情况大大改善。

当燃气中混有空气时，燃气中的碳氢化合物在有氧的条件下被内焰加热，会被氧化成 CH_2O ，根据混入空气的多少可产生如下反应：

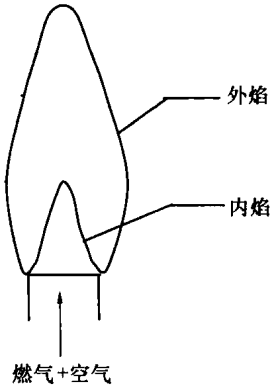
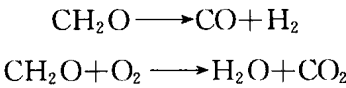


图 A101-1 部分预混空气火焰

这些反应有助于完全燃烧。因此预混空气燃烧方法明显改善了层流扩散燃烧。另外，预先混入空气的多少对燃烧有很大的影响。

预混空气燃烧方法有两种：

一种为预混部分空气燃烧方法：当预先混入的空气量低于燃烧需要的空气量时，称为预混部分空气燃烧。我国习惯用一次空气系数（混入空气量与燃烧需要空气量的比值）表示；此外还可以用燃料当量比（燃气量与预混空气燃烧需要燃气量的比值）表示。在预混空气燃烧情况下，一次空气系数小于 1，而燃料当量比大于 1。

另一种是全一次空气预混燃烧方法：当一次空气系数等于或大于 1 时，即预混的空气量等于或大于燃气燃烧需要的空气量。这时扩散火焰不再出现，只有预混火焰。在此条件下，一次空气系数等于或大于 1，燃料当量比等于或小于 1。

二、预混空气燃烧的内焰与外焰

预混部分空气燃烧时具有两个火焰，其中内焰是预混空气燃烧的火焰；外焰是靠扩散与空气混合的火焰，也就是扩散火焰。

图 A101-1 中的内焰是燃气与预先混入燃气中的空气燃烧所形成的燃烧带。因为开始混入的空气只是部分燃烧需要的空气（一次空气），所以在内焰中不可能把全部燃气燃尽，在内焰的下游还有部分燃气没有燃烧。这部分燃气与周围空气（二次空气）扩散混合，当燃气与空气的混合比达到完全燃烧需要的当量比时，就会产生扩散式的燃烧带，即为外焰。内焰中不仅有燃气与一次空气，还有由内焰扩散过来的燃烧产物。在内、外焰之间除了来自内外焰的燃烧产物以外，还有在内焰中没有得到氧气的未燃尽的燃气。此部分燃气向外扩散，周围的空气向中间扩散，在燃气与空气的混合比例达到燃烧要求的地方，就形成外焰。也就是说，在外焰的地方燃气与空气的混合比例必然等于完全燃烧反应需要的当量比。因为如果某地外焰中燃气量过大，则没有燃烧的燃气必然向外扩散，同时挡住周围空气向内扩散，使内部燃气进一步加大，直到燃气向外扩散与空气的混合比达到完全燃烧需要比例的地方才形成外焰，这等于将外焰向外推。同理当外焰中空气量过大时，没有参加反应的空气会向内扩散，结果将外焰向里推，一直达到完全燃烧需要的比例为止。可见外焰实为扩散火焰，内焰为预混空气燃烧火焰。

预混空气燃烧火焰结构与火焰传播速度有密切关系，由于在层流及绝热条件下燃气火焰传播速度（燃烧速度）是一个稳定值，另外实际的燃烧工况大多数是在低流速、低干扰下工作的。所以首先研究层流的条件下火焰的稳定性。图 A101-2 是一个层流预混空气火焰照片。从图上看到清楚的内焰是预混空气火焰。由于一次空气系数比较大，外焰的轮廓不明显。

从照片上可以看出，整个火焰类似一个锥体，其根部（锥体底）坐落在燃烧火孔上，并且其直径稍大于燃烧火孔直径。整个层流预混空气火焰可分三个区域：中间为绝热区；周边为边界区；中间中心区。

图 A101-3 是分区的示意图。绝热区与外界没有热交换，燃烧产热全部加热燃烧产物。边界区受燃烧火孔的管壁吸热影响，燃烧产生的热量没有全部加热燃烧产物。中心区是热量集中的地方，并且气流向周围扩散。根据不同情况，分别叙述如下。



图 A101-2 预混空气火焰照片

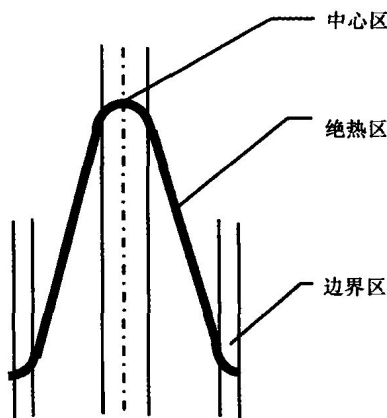


图 A101-3 火焰分区示意图

三、绝热区的火焰

为了叙述方便，在这一区内，取一流束。根据层流火焰传播理论，火焰是由预热带和燃烧带两部分组成（见图 A101-4 左）。在预热带内，温度由气流的初温 T_0 升至着火温度 T_B 。在燃烧带，温度由着火温度 T_B 升至燃烧温度 T_f 。预热带燃烧反应可忽略不计，因此在预热带燃气浓度几乎不变。当气流的温度达到着火温度时，迅速产生激烈的燃烧反应，燃气浓度很快降低并产生大量热量，产生的热量完全用于加热燃烧产物，使其温度上升，最后达到燃烧温度 T_f （见图 A101-4）。由于流体是在层流状态下，其热量的传递完全是靠导热方式传递，着火温度 T_B 是温度曲线的转折点。在预热带， $\frac{\partial^2 T}{\partial h^2}$ 为正，表示此处单位质量接受来自燃烧带的热量大于传至尚未燃烧的气体的热量。在燃烧带， $\frac{\partial^2 T}{\partial h^2}$ 为负，表示接受的热量小于传出的热量。但是，此时的温度还是上升，这是因为燃烧反应产生大量热量的缘故。

由图 A101-4 可见，在此流体的流束中，气流以 W 的速度向上流动（垂直于火焰面）；火焰以 S_u 的速度向可燃气体方向移动。当 $W = S_u$ 时，火焰位置稳定。由于火焰是处在绝热层流的条件下，并且传热是仅以导热的方式传递的，符合绝热、层流火焰法向传播的条件。因此 S_u 即为层流火焰法向传播速度，其量纲与气流速度一样，是 m/s ，也可以表示为 $m^3/(m^2 \cdot s)$ 。

S_u 的物理背景是单位时间、单位面积所能燃烧的可燃物的体积。可见当 W 大于 S_u 时， S_u 来不及燃烧流过来的可燃气体，燃烧带只得后退伸展，向气流的下游移动。如果 W 小于 S_u 时，气流供给的可燃物不够 S_u 燃烧，火焰必然向前，向气流的上游移动。只有当 $S_u = W$ 时，气流供给的可燃物正好等于 S_u 可以燃尽的可燃物，这时火焰稳定在此位置上，不再移动。

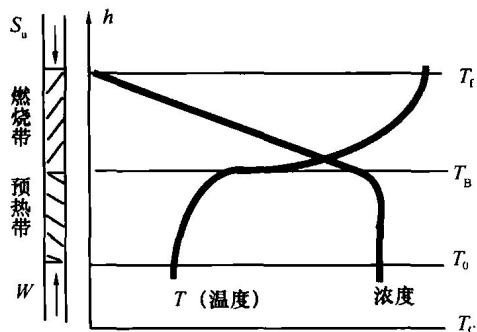


图 A101-4 火焰热量、浓度传递示意图

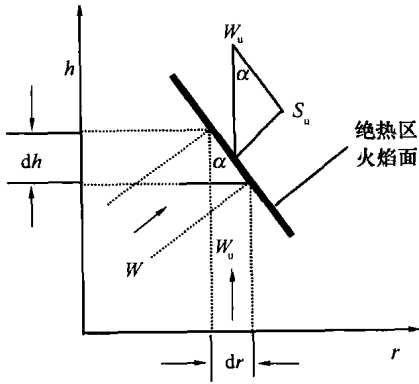


图 A101-5 火焰平衡图

绝热区的火焰轮廓线：

可燃气体（燃气+空气）经过一个燃烧火孔流出后，火孔边的气流速度因摩擦阻力必然小于中间的气流速度。根据燃烧火孔出口的速度场的不同，火焰的轮廓线也不同。一般有两种情况：一为层流抛物线速度场；一为直线速度场。

层流速度场的轮廓线：

当气流在一个足够长的燃烧管中流动，雷诺数小于 2200 时，能达到层流速度场，并可用下式表示，

$$W_u = n(R^2 - r^2) \quad (\text{A101-1})$$

式中 W_u 为任意流线的流速， R 为燃烧管出口半径， r 为管中心至任意流线的距离， n 为系数。由图 A101-5 可见，

$$\text{tg} \alpha = \frac{dh}{dr} \quad (\text{A101-2})$$

达到稳定的条件是，

$$W = S_u = W_u \cos \alpha \quad (\text{A101-3})$$

$$\text{tg} \alpha = \frac{\sqrt{W_u^2 - S_u^2}}{S_u}$$

所以

$$\frac{dh}{dr} = \frac{\sqrt{W_u^2 - S_u^2}}{S_u} \quad (\text{A101-4})$$

将公式 (A101-1) 代入， $\frac{dh}{dr} = \frac{\sqrt{n^2(R^2 - r^2) - S_u}}{S_u}$ 利用分离变量法及分部积分法可得火焰高度 h_0 ，

$$h_0 - h = \pm \frac{M}{3} \left[\sin \varphi \cos \varphi \Delta \varphi + \left(1 - \frac{1}{k^2}\right) F(k, \varphi) + \left(1 + \frac{1}{k^2}\right) E(k, \varphi) \right] \quad (\text{A101-5})$$

$$\text{式中 } M^2 = \frac{(nR^2 - S_u)^2}{nS_u^2} [nR^2 + S_u];$$

$$k^2 = \frac{nR^2 - S_u}{nR^2 + S_u};$$

$$\sin^2 \varphi = \frac{nr^2}{nR^2 - S_u};$$

$$\Delta \varphi = \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi};$$

$$E(k, \varphi) = \int_0^\varphi (\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}) d\varphi;$$

$$F(k, \varphi) = \int_0^\varphi \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}}$$

式 (A101-5) 给出了火焰面的轮廓曲线，因为沿 r 的方向是 $\frac{dh}{dr}$ 在变化，所以火焰面

的轮廓线不是直线。当 $\frac{dh}{dr}$ 变化不大时，火焰轮廓近似高度为 h_0 的圆锥体。公式中的正负号代表锥体可能有两个方向。负号时火焰向下，属不稳定状态 [1]。

恒速速度场的火焰轮廓线：

当在管出口处加一个“缩口”，可使出口速度场变成等速速度场（参见本书 E301），这时 $\frac{dh}{dr} = \text{const}$ ，这等于在火焰的绝热区各处的 α 角都一样。火焰轮廓线是一条直线。这样就简化了火焰轮廓，为测量火焰传播速度提供方便条件。因为在绝热区层流火焰传播速度 S_u 是一个只与燃气性质有关的常数。所以，只要测得角度 α 和气流速度 W_u ，就能通过 $S_u = W_u \cos \alpha$ 求得 S_u 。具体可用激光多普勒测速法测 W_u ，用照相机测 α ，就可以很简单地得到 S_u （参见本书 E301）。

四、边界区的火焰

边界区是指在燃烧管出口处的区域。在此区域内因为有燃烧火孔的管壁的冷却影响，燃烧产生的热量不仅加热燃烧产物，还有部分热量被管壁吸走。因此在此区内火焰面上燃烧带的燃烧温度 T'_f 要低于绝热区的 T_f ，即 $T'_f < T_f$ 。而着火温度因有吸热，在此区内火焰面上燃烧带的着火温度 T'_B 要高于绝热区的 T_B 即 $T'_B > T_B$ 。结果使燃烧温度与着火温度汇集在一起。

图 A101-6 是边界区火焰示意图。在虚线的左边是边界区，右边为绝热区。 T_0 、 T_B 、 T_f 分别是在绝热区的气流开始温度、着火温度、燃烧温度的等温线。在绝热区火焰内表面基本在 T_B 等温线上。到了边界区后，因散热作用，着火温度提高，火焰内表面开始上翘，脱离了 T_B 等温线，使其火焰内表面温度上升至 T'_B ，大于绝热区的着火温度 T_B 。由于管壁吸热，燃烧温度降低，火焰外表面脱离了 T_f 等温线，使其火焰外壁的温度下降至 T'_f ，低于绝热区的燃烧温度 T_f 。

因为管壁温度低于着火温度，所以在火焰内表面与燃烧火孔（管壁）之间有一个很小的距离，用肉眼可以看到一个黑环，称其为死区。当预混的空气量小于燃烧需要的空气量时，在死区处开始卷入周围空气，开始扩散燃烧。

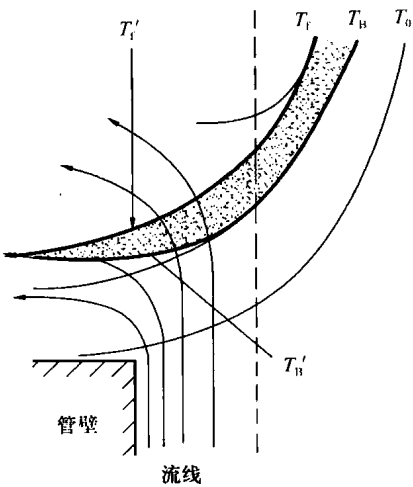


图 A101-6 边界区的火焰示意图

五、中心区的火焰

在一般的情况下，火焰中心是圆形的火焰尖。从图 A101-7 可见，气流由火焰内向外流动，而热量是由火焰面向里传递。热量基本是用来加热燃烧产物，使其温度由 T_0 升到 T_f 。这样热量由四周传向中央，中间的流束接受较多热量，较快地达到着火温度及燃烧温度。使火焰向下移动，形成圆角。另一方面，由于气流被加热，开始膨胀，通过火焰会拉开距离。实际上是在 T_B 表面就开始膨胀了，因此气流速度会有所降低，这样也会使火

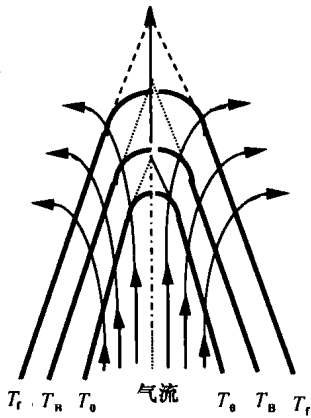


图 A101-7 中心区火焰示意

焰下移形成圆角。当火焰尖的圆角过于弯曲时，中间参加燃烧的比较活跃的分子浓度太低而熄火时，就会发生火焰尖开口的现象（参见本书 A104）。此时火焰中间燃烧中断，颜色变黑。早在 40 年前 Lewis 就提出火焰开口问题，此后国内外燃烧界的学者用热和物质扩散速度的差异来分析此开口现象，并给出了该现象的数学解。

在火焰的边界与中间区都有火焰弯曲及火焰拉伸的问题。有些学者以此现象来解释火焰的稳定性。

结语

(1) 将预混空气燃烧火焰分成三个区域来分析，可以更清楚地了解预混空气燃烧火焰的特征。很明显通过绝热区的分析，能进一步理解层流燃烧速度（层流火焰法向传播速度）的物理意义，以及现代测量燃烧速度的方法（参见本书 E301）。

(2) 中心区与边界区不是绝热区，其火焰受到外界热量、质量和能量传递的影响。例如边界区的着火温度 T'_B 要高于绝热区的着火温度 T_B ，边界区的燃烧温度 T'_f 低于绝热区的燃烧温度 T_f 。只有温度、浓度与速度都达到平衡要求时，才是达到火焰稳定的基本条件。如果在边界区得不到稳定条件，即将发生离焰、脱火和回火现象。中间区由于分子的扩散，也会发生火焰尖开口的不稳定状态（参见本书 A104）。

(3) 要提高火焰的稳定性，重要的是注意火焰根部的条件：首先要保证稳定的热工条件，避免过多的散热，只有燃烧产生的热量等于散发的热量，才有稳定的火焰；其次是促使气流速度等于燃烧速度，要避免周围气体的卷入，影响可燃气流中浓度的变化。这些概念将进一步解释预混空气火焰的回火及离焰的现象，以及全一次预混空气火焰的热回火的原因。此外，还可启发设计者开发工作范围大的新型燃烧器的思路。

参考文献

[1] Bernard Lewis & Guenther von Elbe. Combustion, Flame & Explosions of Gases. Explosives and Physical Science Division, U. S. Bureau of Mines, Pittsburgh, Pa., 1961

A102 火焰的稳定性

摘要：本文介绍 Lewis 的著作中有关单火孔的回火与离焰的理论；进一步解释离焰极限流量与燃气浓度的关系，还阐明扩散火焰离焰的机理；同时介绍了周边速度梯度和火焰拉伸理论。在火焰结构与离焰机理的基础上，分别解释红外线燃烧器、全一次空气预混火孔式燃烧器及金属纤维燃烧器稳定燃烧的机理。

引言

在实际工作中，需要连续不断持续燃烧，这也就是说要求稳定的火焰，同时此火焰还应该能经受一定程度的干扰，具有比较大的稳定范围。过去讨论的多是预混部分空气火焰

的稳定性。目前在新型燃烧设备中采用全一次空气预混燃烧方法的越来越多，因此对这种燃烧方法的稳定性应给予足够的重视。本文简要地介绍预混火焰在单火孔上的稳定情况，在此基础上结合国外资料和本人的认识论述了红外线燃烧器、金属纤维燃烧器等燃烧器及其稳定机理，为设计、开发新燃具提供参考。

一、单火孔预混空气火焰的稳定性

(一) 火焰的传播（回火、离焰及脱火）

图 A102-1 表示在一个充满可燃气体的燃烧管中火焰传播的情况。当燃烧管中的可燃气体不流动时（气流速度 $W=0$ ），点燃火焰后，火焰由 A 截面传播到 B 截面（见图 A102-1 左）。当燃烧管内可燃气体流动时，气流速度 W 大于火焰传播速度 S 时，管内的火焰面来不及燃尽流过来的可燃气体时，火焰被推出燃烧管外，并稳定在燃烧管出口（燃烧火孔），见图 A102-1 的右图。

继续加大 W ，可燃气体流量增加，原来的火焰面积不足以燃尽可燃气体，这时火焰会加长，增加火焰燃烧面积达到稳定时，满足下式。

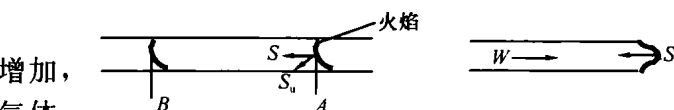


图 A102-1 火焰传播示意

$$W \times A_g = S_u \times A_s \quad (\text{A102-1})$$

式中 W ——气流平均流速，m/s；

S_u ——火焰法向传播速度（亦称燃烧速度），m/s；

A_g 及 A_s ——分别为燃烧管截面面积及火焰面积， m^2 。

火焰法向传播速度 S_u 的物理意义是单位时间、单位火焰面积能流过的可燃气体的体积，也就是说单位时间，在单位火焰面积上能够燃尽的燃气体的体积。在层流绝热层流的条件下 S_u 是一个与燃气性质有关的物理常数。 S_u 随温度升高而增大。当可燃与助燃物的混合比接近完全燃烧要求的比值时 S_u 达到最大，离开此比值 S_u 将下降。

由图 A102-1 可见，气流速度小时火焰会向燃烧火孔内回流，即回火；气流速度大时火焰的长度会增加，但是不能无限增加，当燃烧火孔的周围（火焰的根部）达不到燃烧条件时，火焰会部分离开燃烧火孔，即离焰；然后会很快整个离开，即脱火。离焰时已经有未燃的可燃气体流出，是稳定火焰所不允许的。

(二) 单个火孔的回火及离焰极限流量

图 A102-2 是天然气混空气在直径为 0.577cm 的燃烧管出口燃烧的离焰及回火的流量曲线^[1]。

1. 回火流量曲线：图中的 1F 线是回火的极限流量曲线。也就是说，流量小于曲线上的值时会发生回火。此曲线形似 S_u 的变化，当天然气的浓度在混合气中接近 9%，达到燃烧需要的比值， S_u 越大，越易回火。浓度大于或小于 9%， S_u 值下降，回火曲线也下降，不易回火。回火时火焰向火孔内移动，基本不受周围气体影响。

2. 离焰流量曲线：当周围是惰性气体时。3B、4B、5B 是离焰的极限流量曲线。可燃气体流出火孔时，周围气体要被卷入。当周围是惰性气体时，卷入惰性气体会影响 S_u 值变化。3B、4B、5B 分别是在周围是 N_2 、 CO_2 、 He 惰性气体时的离焰极限流量曲线，可燃气体的流量大于曲线上的值时会发生离焰。这些曲线也形似 S_u 的变化，当天然气的浓

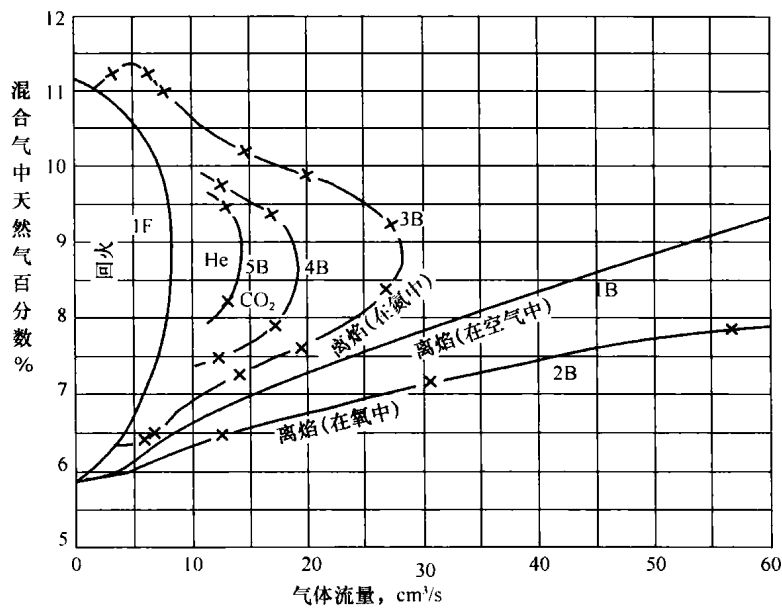


图 A102-2 天然气混空气的离焰及回火的流量曲线

度大于或小于 9% 时, S_u 变小, 离焰曲线都下降, 也就是说容易离焰。由于不同惰性气体卷入可燃气体后, 对 S_u 影响程度不一样, 所以曲线的位置也不一样。

3. 当周围是助燃气体时。1B 与 2B 是此时的离焰的极限流量曲线。周围如果是助燃气体时, 情况正好相反。曲线 1B、2B 分别是在周围是空气或氧气 (助燃气体) 时的离焰极限流量曲线。当天然气的百分数大于 9% 时, 虽然可燃气体的 S_u 下降, 但是受周围助燃气体被卷入的影响, 可燃气体的 S_u 反而增加, 使离焰曲线上扬。同理在周围是 O_2 的环境下, 卷入 O_2 使 S_u 值增加更快, 使离焰流量曲线上移。

(三) 单火孔在周围是空气条件下的离焰和回火的周边速度梯度理论

1. 离焰极限: 图 A102-3 进一步解释燃气在可燃气体中浓度大不易离焰的原因^[1]。图中的粗曲线代表 S_u 沿管口射流边界变化曲线, 细斜线代表流速在管口射流边界的气流速度。1—4 代表距管口不同高度的位置。图 A102-3a 是燃气比较浓的情况。1 代表正好在管口的位置。此地受管壁冷却的影响最大, S_u 在离管口较远的地方, 因散热影响逐渐减小才慢慢升高, 在 1 的位置, 气流速度, 以速度梯度 1 表示。在 1 的位置气流速度大于曲线 S_u-1 , 火焰向外移动。在 2 的位置 (比 1 位置稍高), 虽然气流速度梯度降低一些, 降低

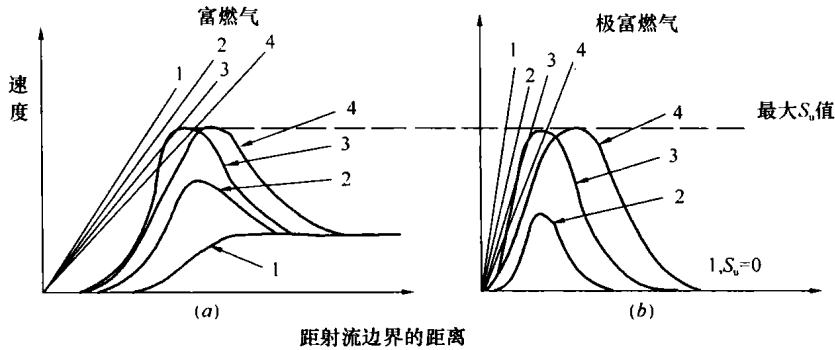


图 A102-3 在空气中的离焰位置示意图

至 2, S_u 值因射流作用卷入周围助燃气体而增大, 增到 S_u-2 , 但气流速度 2 还是大于 S_u-2 。只有在 3 的位置, S_u 进一步提高, 达到 S_u-3 , 气流速度梯度下降到 3, 正好与其相切。 S_u 等于气流速度, 火焰稳定在此位置。此时气流速度 3 是离焰极限流速 (当火孔面积已知时, 可得离焰极限流量)。比此位置再高 (4 位置) 由于卷入的助燃气体过多, S_u 反而下降, 气流速度再增加必然使气流速度大于燃烧速度, 发生离焰。可见位置 3 的气流速度梯度即为离焰的速度梯度极限。

图 A102-3b 表示了燃气特别浓的情况 (扩散燃烧)。在 1 位置, 由于燃气过浓, $S_u = 0$ 。上升到 2 时 S_u 才有所增长, 还是在 3 位置 S_u 与气流速度达到平衡。火焰在此地稳定。对比可见, 此处极限离焰速度 3 大于浓度比其小的 (图 A102-3a) 极限速度 3。结论是, 燃气浓度越大, 离焰极限流量也就越高。另外从图可见, S_u 值靠火孔中心仍为 0, 不会发生回火。最后明确, 扩散火焰的离焰极限流速最大, 最不易离焰。回火极限流量为 0, 不可能回火。

2. 回火极限。根据图 A102-3a, 在管口 1 处气流速度梯度低于燃气的燃烧速度, 火焰就会传向可燃气流传播。发生回火。当气流速度梯度和出口处 S_u 曲线相切时就是回火气流速度梯度的极限。

3. 边界气流速度梯度 (或周边速度梯度)

根据以上所述, 离焰和回火的极限都取决于周边气流速度梯度 g_b , 即

$$g_b = \left(\frac{dv}{dr} \right)_{r \rightarrow R} = \left(\frac{dS_u}{dr} \right)_{r \rightarrow R} \quad (\text{A102-2})$$

式中 g_b ——边界速度梯度;

v ——气流速度;

r ——某点距火孔中心距离;

R ——管口半径。

(1) 层流下的周边速度梯度: 在层流下管道中的速度场呈抛物线形。即

$$v = v_{\max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (\text{A102-3})$$

式中最大流速 $v_{\max}$ 是平均流速 $\bar{v}$ 的两倍。设 L 为气体流量, 则

$$v = \frac{2L}{\pi R^2} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)$$

边界度梯度

$$g_b = \frac{4L}{\pi R^3} = \frac{4v}{R} \quad (\text{A102-4})$$

(2) 边界度梯度的修正: 实际上民用灶的火孔深度很浅, 出口速度不一定是层流, 在前苏联的文献中介绍下面的公式

$$g_b = \frac{2L}{\pi R^3} \left[\frac{1 + v'}{2 - \left(4 - \frac{6v'}{1 + v'} \right)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (\text{A102-5})$$

$$v' = \frac{v_{\max} - \bar{v}}{\bar{v}}$$

式中 $\bar{v}$ 为平均流速。很明显, 当 $v_{\max} = 2\bar{v}$ 时, 式 (A102-5) 等于式 (A102-4)。此公式 (A102-5) 没有经过验证, 只供参考。