

文章编号: 1671-8097(2016)06-0467-06

DOI:10.13738/j.issn.1671-8097.2016.06.007

# 不同喷管间距甲烷微火焰阵列温度场和燃尽特性研究

曾小军, 汪小憨, 赵黛青\*, 蒋利桥

(中国科学院广州能源研究所, 广东广州 510640)

**摘要:** 为了优化微阵列火焰燃烧加热系统, 在相同的燃料负荷和喷管物理条件下, 构建了甲烷预混和微火焰阵列燃烧模型, 并研究了不同喷管中心间距对温度场和燃尽率特性的影响规律。研究表明, 由若干微小喷管火焰优化组成的阵列可形成温度均匀的加热场; 随着喷管中心间距减小, 火焰间相互影响程度增加, 均匀加热场的温度提高; 喷管中心间距继续减小, 微喷管阵列火焰开始聚并、向大火焰转变, 燃烧反应区间变长、均匀加热场的燃尽率下降, 微喷管火焰丧失微火焰特性; 因此确定微火焰阵列加热场喷管中心间距这一重要参数时, 需综合考虑温度均匀性、热负荷、燃尽率和污染物等因素。

**关键词:** 微火焰; 阵列火焰; 温度均匀性; 燃尽率; 甲烷

**中图分类号:** TK16 **文献标识码:** A

## 0 引 言

以电为能源的加热设备因具有加热温度均匀、环境清洁友好、温度灵活可调等优点而被大量应用, 但受热功转换效率的限制, 以电/热为主的能源利用效率大大低于直接燃烧热利用方式, 研究采用火焰直接加热替代某些场合和环境下的电加热利用方式, 提高能源利用效率, 是能源可持续发展中具有重要现实意义的工作。

采用直接燃烧加热代替电加热, 最主要的挑战在于如何形成温度分布均匀、火焰清洁、加热温度可调的燃烧加热场。常规射流火焰加热时存在火焰负荷集中、加热温度难以调节的缺点, 极易导致加热对象受热不均。研究表明, 喷管直径尺度变小时形成的微尺度火焰蓝色透明清洁<sup>[1-2]</sup>, 具有热释放率增大<sup>[3-4]</sup>、燃烧完全、不易产生碳烟等<sup>[5]</sup>优点, 利用微小火焰的技术优势, 将燃烧负荷集中的单喷管火焰分解成由若干微小火焰组成的火焰阵列, 可望实现温度均匀的直接火焰加热面, 且火焰负荷和加热温度可进行灵活调节控制。

在组织微火焰阵列加热场时, 微小喷管间的中心间距是决定微阵列火焰场特性的一个关键因

素。Nakamura 等<sup>[6]</sup>对两个微喷嘴扩散火焰的相互影响和合并条件进行一些探索研究, Lee 等<sup>[7]</sup>考察了微扩散火焰组成的菱形、矩阵和圆形火焰的火焰场特性, Kuwana 等<sup>[8]</sup>采用两个微狭缝扩散火焰考察了燃烧器间距对火焰影响程度的量化关系。这些对两个或多个独立微火焰间影响的研究工作表明, 火焰间影响程度随着燃烧器间距的减小而增强, 且火焰相互作用提高了单个微火焰的吹熄极限; 但在燃烧器间距减小到极限时, 火焰合并将导致微火焰特性的丧失, 对均匀加热场的形成带来不利影响。在多喷管微火焰阵列燃烧场中, 多喷管火焰间影响是否存在同样的影响规律, 温度分布和燃尽特性有无额外的影响, 目前尚无相关报道, 需要进一步进行研究。本文构建了处于无限阵列中的部分 3 个×3 个喷管方形火焰阵列模型, 采用甲烷预混气为燃料, 在相同的燃料负荷、喷管结构条件下, 对不同喷管中心间距下微阵列预混火焰场特性的变化规律进行研究, 为微喷管火焰阵列加热系统的设计优化提供重要参考。

## 1 物理及数学模型

本文构建的 3×3 微喷管火焰阵列系统如图

收稿日期: 2016-03-03; 修回日期: 2016-07-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51176193); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2014CB239600).

作者简介: 曾小军(1980-), 男, 工学博士, 助理研究员, 主要从事微尺度燃烧及新型燃烧器开发. E-mail: zengxj@ms.giec.ac.cn;  
赵黛青(1958-), 女, 博士, 研究员, 主要从事微尺度流动和燃烧解析的研究. E-mail: zhaodq@ms.giec.ac.cn

1 所示,内径 1.5 mm 微喷管等间距呈正方形布置,喷管高度为 5.0 mm,壁厚无限薄,喷管内通入当量比为 1 的常温常压预混甲烷-空气气体,流速 0.50 m/s,喷管外区域有同向 0.02 m/s 的伴流空气,模拟实际喷管周围存在的自然卷吸条件;计算区域  $Z$  方向高度为 40.0 mm,模型四个侧面区域均设置为 symmetry 面对称边界条件,用于模拟无限扩展的微喷管阵列结构;喷管中心间距  $L$  分别设定为 2.0、2.5、3.0 和 4.0 mm。

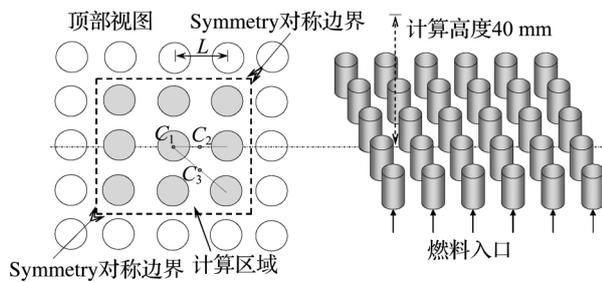


图 1 物理模型示意图

Fig. 1 Schematic of physical model

在物理模型中  $C_1$  为中心喷管圆心点,  $C_2$  为中心喷管与水平方向相邻喷管间距的中心点,  $C_3$  为中心喷管与对角线方向相邻喷管间距的中心点。计算控制方程由质量、动量、能量及组分守恒方程构成,模型采用组分输运和层流有限速率模型进行燃烧反应模拟,化学反应机理为 Chemkin 导入的包含 16 种组分 41 步反应的甲烷空气简化机理<sup>[9]</sup>(16 种组分包括:  $H_2O$ 、 $CO_2$ 、 $O_2$ 、 $CH_4$ 、 $CO$ 、 $H$ 、 $H_2$ 、 $OH$ 、 $O$ 、 $CH_3$ 、 $HCO$ 、 $HO_2$ 、 $H_2O_2$ 、 $CH_2O$ 、 $CH_3O$ 、 $N_2$ )。模型网格燃烧主区域进行加密,采用结构化网格进行划分;离散格式采用二阶中心差分,并采用压力速度的耦合算法进行层流稳态火焰的计算求解。

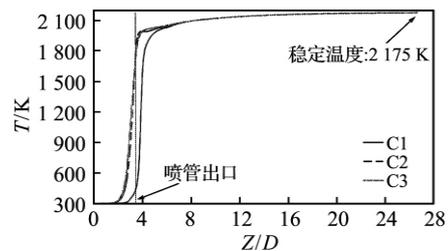
## 2 计算结果及分析

### 2.1 喷管中心间距对火焰场温度特性影响

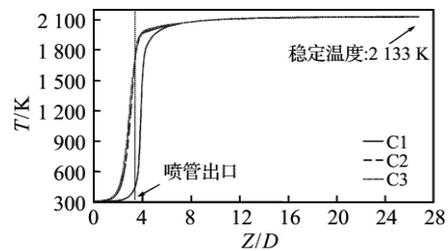
#### 2.1.1 火焰场温度分布特性

图 2 为四种工况下选取以  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  为出发点轴线上点的温度分布,  $Z$  方向同一高度三点温度可代表所在  $XY$  平面上的温度分布。图 2 中横坐标为将高度  $Z$  除以喷管内径  $D$  的无量纲数,虚线表示微喷管出口 (tip of nozzle) 所在位置。从图 2 中可以看出,在喷管内径和输入燃料负荷条件不变时,不同喷管中心间距下微阵列火焰场的

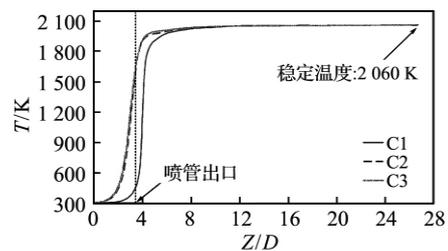
温度先突升后逐渐趋于平缓,随着高度的增加  $XY$  平面上  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  点间温度差逐渐减小,表明此时平面上的温度差值也在逐渐缩小。喷管中心间距为 4.0 mm 时,三点的温度趋势在  $Z/D$  为 6 以后呈近乎水平线的分布,而  $L$  由 4.0 mm 逐渐减小到 2.0 mm 工况时,在  $Z/D$  为 6 以后温度逐渐出现先略微上翘后水平的分布特点,同时温度值变高,这表明随着喷管中心距的减小,燃烧场的反应区间长度将明显拉长,这是喷管间火焰相互影响强度增强的体现。



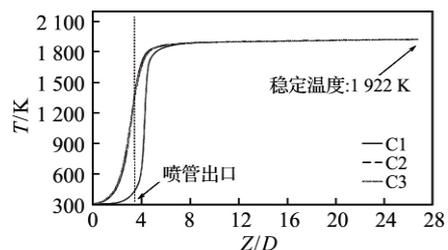
(a)  $L = 2.0$  mm



(b)  $L = 2.5$  mm



(c)  $L = 3.0$  mm



(d)  $L = 4.0$  mm

图 2  $Z$  方向  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  出发轴线温度分布

Fig. 2 Distributions of axis temperature in  $Z$  direction

图 3 为平行于  $Z$  轴的  $C_1$ 、 $C_2$  点所在截面上的温度分布,图 4 为相同截面上的反应热分布,虚

线代表喷管出口位置。从图 3 中可以看出,在  $L$  为 4.0 mm 时由于喷管间空间大,微喷管火焰之间温度扩散的距离变长,再者喷管外卷吸空气量增加,使得火焰向  $XY$  方向的热量传递增加,燃烧下游温差变小,温度扩散也更充分;而  $L$  由 4.0 mm 逐渐减小到 2.0 mm 工况时,火焰间温度扩散的空间变小,喷管外卷吸空气量对火焰形成的影响也减弱,火焰释热主要向燃烧下游  $Z$  方向扩散,燃烧下游的温度增加,这是图 2 中  $L$  为 2.0 mm 时温度呈突升—较长距离缓升—水平分布的主要原因。

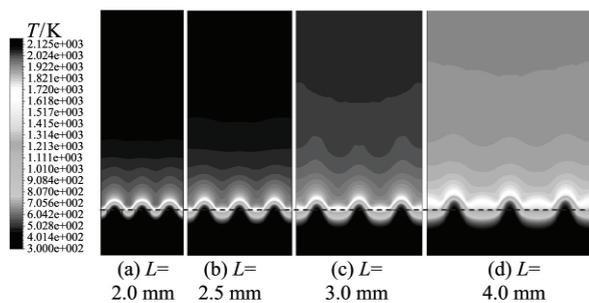


图 3 Z 方向 C1、C2 点截面温度分布

Fig. 3 Temperature distributions of section in Z direction including C1, C2

从图 4 轴截面反应热分布可以看出,在  $L$  为 2.0 mm 工况时,喷管出口外的主放热区域强度大且厚度宽,表明此时阵列火焰的主放热区域较为集中,呈现连成一片的特点;而随着  $L$  逐渐由 2.0 增加到 4.0 mm 时,喷管外的放热空间面积逐渐变大,主放热区间变薄,喷管间主放热区域逐渐分离,火焰呈现明显的独立性特点。

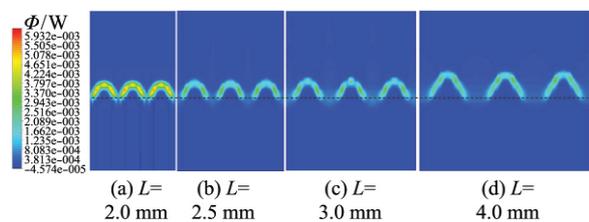


图 4 Z 方向 C1、C2 点截面反应热分布

Fig. 4 Heat of reaction distributions of section in Z direction including C1, C2

### 2.1.2 微火焰阵列温度场均匀性

为了评价微喷管阵列火焰的温度均匀性,参考文献[10]引入微火焰阵列场中的均温度  $\Delta T_j$  定义:同一时刻同一水平面测温点中温度测量值

$T_1, T_2, \dots, T_n$  中最大值和最小值之差,均温度越小,代表测温点所在平面上的温度差值越小,温度均匀性也越好,其计算公式:

$$\Delta T_j = \max(T_1, T_2, \dots, T_n) - \min(T_1, T_2, \dots, T_n) \quad (1)$$

按照所建立物理模型的对称性条件,可知垂直于  $Z$  方向的同一个  $XY$  水平面上  $C_1, C_2, C_3$  点中存在温度的最大值与最小值,此时  $Z$  方向任意高度位置  $i$  的平面均温度计算公式为

$$\Delta T_{ji} = \max(T_{C_1i}, T_{C_2i}, T_{C_3i}) - \min(T_{C_1i}, T_{C_2i}, T_{C_3i}) \quad (2)$$

据此求出的不同喷管中心间距工况下的均温度分布如图 5 所示。文献[10]将热处理炉的温度均匀性等级根据平面测温点的温差范围划分了七个等级,其中温度均匀性最好的 I 级和 II 级对应的温差  $\Delta T$  为  $\pm 3$  和  $\pm 5$  K;本文中均温度  $\Delta T_j$  为温度最大值减去温度最小值所得,故其值为两倍的  $\Delta T$  绝对值,即:  $\Delta T_j = 2|\Delta T|$ ,本文选取温度均匀性最佳的 I 级和 II 级范围作为有效加热区的评判指标,对应  $\Delta T_j$  为 6 和 10 K,同时定义有效加热区内垂直于  $Z$  轴的平面上各点平均温度为有效加热温度  $T_p$ 。

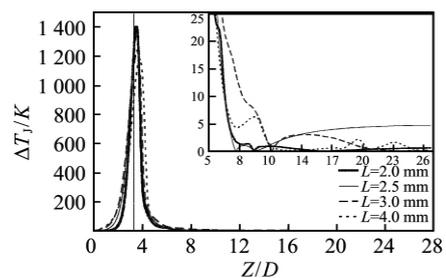


图 5 垂直于 Z 方向截面均温度分布

Fig. 5 Temperature uniformity in plane perpendicular to Z axis

从图 5 可以看出,在四种喷管中心间距下,均温度随着距离喷管口高度的增加而变小,即四种排列的微火焰阵列燃烧下游可形成温度均匀性最佳的加热场;不同之处是当喷管中心间距  $L$  为 4.0 和 3.0 mm 时最佳均温度 6 K 区域出现在  $Z/D$  约 10 的位置,随着  $L$  减小为 2.5 和 2.0 mm 时,均温度 6 K 区域出现在  $Z/D$  约 6 的位置,即喷管中心间距越小时,最佳均温度 6 K 区域形成的位置距离喷管位置越近。

图 6 为四种中心距工况下 6 和 10 K 均温度

所对应的有效加热温度  $T_p$  分布,从图 6 中可以看出,在温度均匀性最佳的 6 和 10 K 区域内, $L$  为 4.0 mm 时对应的有效加热温度  $T_p$  最低,而随着  $L$  从 4.0 减小到 3.0 mm 时,对应的  $T_p$  大幅度增加,平均增加 8.44%; $L$  从 3.0 减小到 2.5 mm 时,对应的  $T_p$  增加幅度变小,平均增加 1.24%, $L$  从 2.5 减小到 2.0 mm 时  $T_p$  增加幅度 0.39%,这表明随着喷管中心间距的增大,最佳均温度形成时的有效加热温度  $T_p$  降低,其降低的幅度约为喷管中心间距  $L$  的二次方函数。结果表明喷管中心间距进一步增加时,火焰场的有效加热温度将会因为火焰的过于独立而出现快速下降,火焰间影响程度大幅减弱,从而影响微阵列火焰场的能源利用效率。

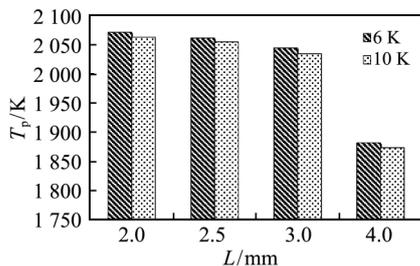


图 6 6、10 K 均温度下有效加热温度

Fig. 6 Effective heating temperature in temperature uniformity of 6 and 10 K conditions

## 2.2 火焰中间组分分布

本文选取了火焰中间产物 CO 来分析喷管中心间距对火焰中间组分的影响规律,图 7 为不同  $L$  下微喷管出口附近轴截面上 CO 摩尔分数分布,虚线为微喷管出口位置,选取的平面为 C1、C2 点所在沿  $Z$  方向截面。

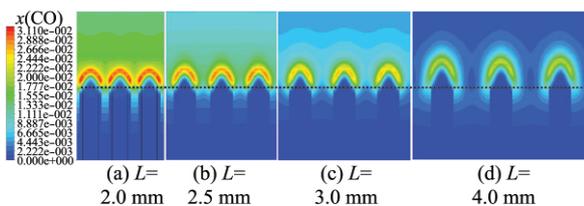


图 7  $Z$  方向 C1、C2 点截面 CO 摩尔分数分布

Fig. 7 CO mole fraction distributions of section in  $Z$  direction including C1, C2

从图 7 中可以看出,喷管中心间距  $L$  为 4.0 mm 时,喷管出口的燃烧中间组分 CO 摩尔分数分布出现明显的独立性趋势,随着  $L$  由 4.0 逐渐

减小到 2.0 mm 的过程中,喷管出口外的 CO 组分摩尔浓度分布表现出明显的扩散和相互叠加现象,说明随着喷管中心间距的缩小,喷管火焰之间的干涉增强,使得燃烧产物和气氛相互扩散,增加了燃烧场温度的混合和扩散程度,火焰向合并大火焰发展,导致燃烧区间变长,此时微喷管火焰将丧失微火焰所具有的特性。喷管中心间距在 2.5 和 3.0 mm 工况时,燃烧气氛下游 CO 浓度梯度明显高于中心间距 2.0 mm 工况,即在微喷管火焰合并为大火焰后,燃烧区域延长,CO 组分需要更长的距离才能被氧化完全。其他中间组分如  $\text{CH}_3$  基、OH 基、H 基等的摩尔分数在喷口附近具有与 CO 组分一致的分布特性。

## 2.3 微火焰阵列场燃尽率特性

不同等级均温度有效加热区域内的燃尽度是影响微阵列火焰加热场性能的另一个主要因素。由于随着喷管中心间距的缩小,计算区域体积也随之缩小,燃烧产物的体积分数和摩尔分数由于体积的改变而不再具有同一个比较基准,为此采用了具有同一比较基准的平面燃尽率,定义为垂直于  $Z$  轴的截面上的积分  $\text{CO}_2$  质量通量  $M$  除以甲烷完全燃烧时产生的  $\text{CO}_2$  质量  $m(\text{CO}_2)$ , $Z$  方向任意高度位置  $i$  的平面燃尽率  $\eta_i$  计算公式为

$$\eta_i = \int M_i ds / m(\text{CO}_2)$$

图 8 为计算得到的不同  $Z/D$  位置水平截面上的燃尽率,喷管出口位置  $Z/D=5.0/1.5$ 。从图 8 中可以看出,在  $Z/D < 5$  的时  $\text{CO}_2$  质量快速升高,表明此范围是火焰的主反应区;当  $Z/D > 5$  以后, $\text{CO}_2$  质量分布逐渐走平,表明燃烧反应逐渐完成。同时燃烧下游区域相同  $Z/D$  位置的燃尽度随着喷嘴中心间距减小而依次下降, $L$  为 2.0 mm 时燃尽度下降幅度高于其他工况。主要是在在喷管中心间距较大时,微阵列火焰主要表现为相互独立的火焰特点,火焰的比表面积增大,在化学当量比条件下很容易燃烧完全,具有很高的燃尽率;随着喷管中心间距减小,微喷管间火焰开始靠近继而逐步聚并,火焰向大火焰发展,导致燃烧区间变长和燃尽率的下降。

图 9 为四种中心距工况下 6 和 10 K 均温度形成位置的截面燃尽率  $\eta$ ,从图 9 中可以看出,在温度均匀性最佳的 6 和 10 K 区域内, $L$  为 4.0 mm 时具有最高的燃尽率,平均达到了 99.13%;

随着喷管中心间距  $L$  的减小燃尽率逐渐下降,  $L$  为 2.0 mm 时燃尽率最低, 平均为 86.76%。

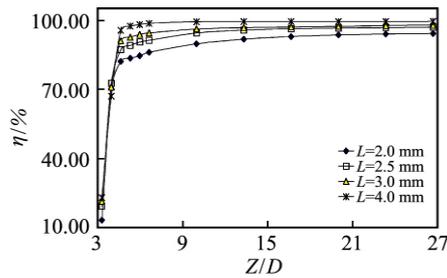


图 8 垂直于  $Z$  方向截面燃尽率分布

Fig. 8 Burn-out rate distributions in plane perpendicular to  $Z$  axis

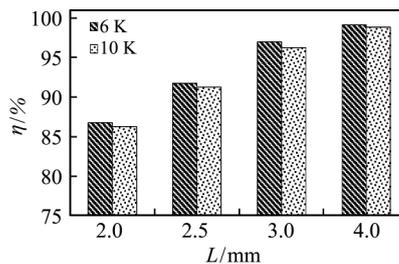


图 9 6 K/10 K 均温度下截面燃尽率

Fig. 9 Burn-out rate in Temperature uniformity of 6 K and 10 K conditions

本文中燃料为  $\text{CH}_4$  时的不完全燃烧产物包括  $\text{CH}_3$ 、 $\text{HCO}$ 、 $\text{CH}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_3\text{O}$ 、 $\text{CO}$  等几种组分, 由于火焰中间产物  $\text{CO}$  可能会造成不完全燃烧污染物的排放, 故本节用不同  $Z/D$  位置截面  $\text{CO}$  积分质量通量与完全燃烧产生的  $\text{CO}_2$  质量的无因次比值来探讨可能的不完全燃烧产物的分布特性。图 10 为通过计算的不同  $Z/D$  位置水平截面上的  $\text{CO}$  无因次生成量分布, 从图 10 中可以看出, 在中心间距  $L$  为 2.0 mm 时, 计算区域内  $\text{CO}$  的无因次生成量分布明显高于其他工况,  $\text{CO}$  的消耗反应在计算区域出口高度仍未完成; 在中心间距  $L$  由 2.0 增加到 2.5 mm 时, 在同样轴向位置,  $\text{CO}$  无因次生成量有一个较大幅度的降低, 而  $L$  继续由 2.5 增加到 4.0 mm 时,  $\text{CO}$  无因次生成量降低幅度变小, 即此时微火焰呈现相互独立的特点, 燃烧也更完全。

分析结果表明, 在位于温度均匀性最佳的加热区域时, 喷管中心间距越小, 区域内的不完全燃烧产物  $\text{CO}$  等越多。设想在实际加热工件时, 由于被加热工件的吸热将导致火焰温度下降, 加热

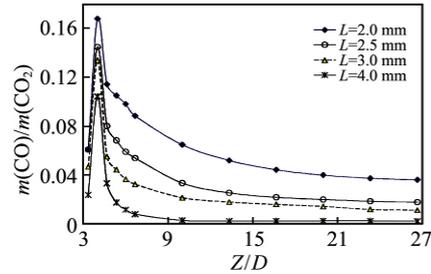


图 10 垂直于  $Z$  方向截面  $\text{CO}$  无因次质量分布

Fig. 10 Distributions of dimensionless quality of  $\text{CO}$  in plane perpendicular to  $Z$  axis

区内大量  $\text{CO}$  等产物被氧化完全的难度增加, 排放  $\text{CO}$  等污染物的几率将增加。因此从燃料的高效利用、减少污染物排放等角度考虑, 在本文研究的工况条件下, 选用 2.5~3.0 mm 的中心间距可以获得理想的微火焰矩阵燃烧场, 此时微喷管火焰间既有较强的影响干涉作用, 同时也没有丧失微火焰特性, 有利于均匀加热场的形成。

### 3 结 论

1) 微火焰阵列场可在不同喷管心间距下形成温度均匀的加热场, 燃烧场区域的温度随着喷管中心间距减小时而变大, 但喷管中心间距过小时, 火焰间的聚并会导致燃烧反应区变长, 微喷管火焰丧失微火焰特性。

2) 最佳均温度 6 和 10 K 区域形成的位置随着喷管中心间距减小而向喷管口方向移动, 中心间距的减小使微火焰阵列能较快形成均温场; 喷管中心间距增加时, 火焰场的有效加热温度将会因为火焰的相互独立而出现快速下降。

3) 最佳均温度 6 和 10 K 区域内的燃尽率随着喷管中心间距的减小而下降, 微火焰阵列场内不完全燃烧产物  $\text{CO}$  等被完氧化全的难度增加, 排放  $\text{CO}$  等污染物的几率将大幅增加。

因此进行微阵列火焰燃烧加热系统设计时, 需综合考虑温度均匀性、热负荷、燃尽率和污染物之间的强耦合关系, 以温度均匀、加热温度和燃尽率高为原则确定喷管中心间距最优取值范围。

### 参考文献 (References):

- [1] MATTA L M, NEUMEIRIE Y, LEMON B, *et al.* Characteristics of microscale diffusion flames [J]. *Proceedings of Combustion Institute*, 2002, **29**: 993-939.

- [2] 赵黛青, 蒋利桥, 黄显峰, 等. 微尺度预混合火焰结构和熄火特性研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(4):711-713.  
ZHAO Dai-qing, JIANG Li-qiao, HUANG Xian-feng, *et al.* Structure and extinction characteristics of premixed micro flames[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2006, 27(4):711-713.
- [3] 蒋利桥, 赵黛青, 汪小憨. 微尺度甲烷扩散火焰及其熄灭特性[J]. 燃烧科学与技术, 2007, 13(2):183-186.  
JIANG Li-qiao, ZHAO Dai-qing, WANG Xiaohan. Structure extinction characteristics of methane micro-diffusion flames[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2007, 13(2):183-186. (in Chinese)
- [4] 康占肖, 蒋利桥, 赵黛青, 等. 直列预混微火焰吹熄特性的研究[J]. 热科学与技术, 2013, 12(2):174-179.  
KANG Zhan-xiao, JIANG Li-qiao, ZHAO Dai-qing, *et al.* Study on blow out characteristics of three premixed micro flames in line[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2013, 12(2):174-179. (in Chinese).
- [5] MARUTA K. Micro and mesoscale combustion [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(1):125-150.
- [6] NAKAMURA Y, ANDHIRASAWA T. Study on microflame array combustor [C]. *Proceedings 2009 China-Japan Workshop on Combustion in Micro Power System*, Guangzhou, 2009.
- [7] LEE B J, KIM J S, LEE S. Enhancement of blow-out limit by the interaction of multiplennonpremixed jet flames[J]. *Combustion Science and Technology*, 2004, 176:481-497.
- [8] KUWANA K, KATO S, KOSUGI A, *et al.* Experimental and theoretical study on the interaction between two identical micro-slot diffusion flames; Burner pitch effects [J]. *Combustion and Flame*, 2016, 164:346-353.
- [9] 李鹏飞, 徐敏义, 王飞飞. 精通 CFD 工程仿真与案例实战[M]. 北京:人民邮电出版社, 2011.
- [10] 全国热处理标准化技术委员会. GB/T 9452-2012 热处理炉有效加热区测定方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2012  
SAC/TC. GB/T 9452-2012 *Testing Method for Working Zone of Heat Treatment Furnace* [S]. Beijing: China Standars Press, 2016. (in Chinese)

## Study of temperature and burn-out characteristics of methane premixed microflame array combustor with different nozzle center distance

ZENG Xiao-jun, WANG Xiao-han, ZHAO Dai-qing\*, JANG Li-qiao

(Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** With the same fuel load and nuzzle physical conditions, a numerical model of methane premixed microflame array combustor was built to optimize the combustion heating system of micro array flame. The temperature and burn-out characteristics with different nozzle center distance was also studied. The results show that a heating field with uniform temperature could be formed by the optimized microflame array combustor. With shorter nozzle center distance, the interaction among microflame would be enhanced, thus the temperature of heating field was increasing. However, when the nozzle center distance shortens further, the micro flames of the array combustor begin to merge and turn to be a big single flame. Correspondingly, the burn-out reaction time was longer and the burn-out rate was lower, until the microflame characteristics disappeared. Therefore, multiple factors, like the temperature uniformity, fuel load, burn-out rate and pollutants, need to be considered comprehensively to design the nozzle distance of microflame array combustor.

**Key words:** micro combustion; array combustor; temperature uniformity; burn-out rate; methane

[责任编辑: 郭万慧]