

壁面材料对微火焰熄火影响的实验研究

冯耀勋¹ 杨浩林² 赵黛青²

(1. 广东海洋大学 工程学院 广东 湛江 524088; 2. 中国科学院广州能源研究所 广东 广州 510640)

摘 要: 采用了两平行测试板间狭缝燃烧器产生的甲烷/空气预混火焰来考察材料对微火焰熄火的影响。实验结果表明, 熄火距离与材料有关, 同时随着壁面温度的升高而减小。燃烧前后测试材料的表面结构以及组成采用了 X 射线衍射 (XRD) 以及 X 射线光电子能谱 (XPS) 进行分析, 结果表明不同材料的表面化学吸附氧的比例从高到低排列顺序为氧化锆陶瓷、硅片以及 304 不锈钢, 这 3 种材料的熄火距离从小到大排列顺序分别为氧化锆陶瓷、硅片和 304 不锈钢, 两者变化趋势一致。表面化学吸附氧对化学熄火起到重要作用, 在相同的壁面温度下, 材料表面的化学吸附氧越少, 化学熄火作用越显著。实验还发现, 表面粗糙度会影响材料表面的吸附特性而产生不同的化学熄火特性。

关 键 词: 微火焰; 化学熄火; 熄火距离; 化学吸附氧; 壁面材料

中图分类号: TK16 文献标识码: A

引 言

微燃烧器是决定整个微能源系统能量转换效率的重要环节^[1~3]。随着尺度的大幅度减小将导致微燃烧器内火焰不稳定甚至熄火, 目前研究微火焰熄火主要有热熄火 (thermal quenching) 机制和化学熄火 (chemical quenching) 机制。对于热熄火主要通过燃烧器结构优化和燃烧工况的优化来解决, 这是当前研究的热点^[4~5]。对于火焰中活性自由基与壁面的碰撞引起壁面反应导致的化学熄火, 当前对此研究较少。Thompson 等人通过分子束质谱仪研究了壁面对火焰的影响发现壁面反应只是在壁面附近 1 mm 的区域影响到熄火, 对实验工况进行数值研究, 所得结果和实验结果相符^[6~7]。Misesse 等人通过实验发现高温时化学熄火是熄火的主要原因^[8]。Kim 等人的实验结果发现壁面温度 400 ~ 600 °C 范围内壁面反应对火焰熄灭起到重要作用^[9]。Fan 等人实验中发现高温壁面下热熄火依然

是导致熄火的主要原因^[10]。当前对于自由基失活对火焰熄火的影响机理的研究还十分缺乏, 有必要对化学熄火行为和机理进行研究, 可以为挑战微尺度燃烧器的尺度极限和优化设计提供对策。

为考查化学熄火的影响, 本研究设计了狭缝火焰实验台, 考查了不同的壁面材料特性以及不同壁面温度对微火焰熄火的影响, 力求从材料特性方面考查壁面对熄火的影响。

1 实验装置

图 1 为实验系统装置示意图。实验采用狭缝火焰进行熄火实验, 狭缝火焰燃烧器结构如图 2 所示。狭缝燃烧器由不锈钢均流腔以及喷嘴两部分构成。喷嘴通过切割蜂窝陶瓷加工而成, 蜂窝陶瓷的规格为每平方厘米 47 孔, 每个孔的尺寸为 1 mm × 1 mm, 整个燃烧器的喷嘴为单排 10 孔。实验中当量比为 1.0 和 1.2 的预混甲烷/空气混合气由质量流量控制器控制流量向燃烧器供气。熄火实验中混合气的流速固定为 1 m/s (以燃烧器的单孔计算得到雷诺数为 82, 处于层流范围)。质量流量控制器的量程分别为 0.5 和 5 L/min, 精度为 1%。

实验中采用两平行加热板上加装不同的测试板来模拟实际微燃烧器壁面。测试板通过 C 型夹固定在加热板上。通过加热板内部的加热元件可以将测试板加热到所需温度。测试板的壁面温度通过插于距测试板外表面 0.5 mm 的 K 型热电偶监控。在整个实验中设定的壁面温度范围内, 测试板的壁面温度比设定的温度值高 0 到 5 °C。壁面温度的微小变化对于火焰熄火的评估没有明显的影响。两测试板安装在调节导轨上, 通过手动调节两板之间的距离, 其调节精度为 0.02 mm。试验中测试板采用了

收稿日期: 2012-08-08; 修订日期: 2012-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51006109); 广东海洋大学引进人才科研启动基金资助项目 (1212099); 湛江市科技攻关计划基金资助项目 (2012C3101002, 2012C3103006)

作者简介: 冯耀勋 (1978-) 男, 湖北黄冈人, 广东海洋大学讲师, 博士。

氧化锆陶瓷、单晶硅以及 304 不锈钢 3 种材料 ,此外为了考察表面粗糙度的影响 ,选择了不同粗糙度的硅材料。

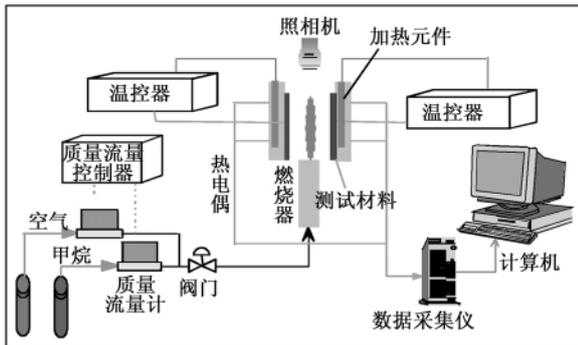


图 1 实验装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the test rig

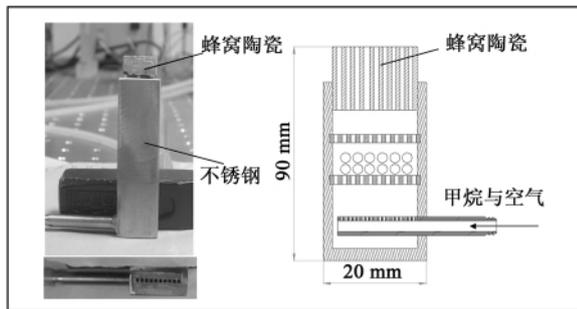


图 2 狭缝燃烧器图片以及示意图
Fig. 2 Image and schematic drawing of a narrow slot burner

实验过程中采用了 X 射线光电子能谱 (X - ray photoelectron spectroscopy)、X 射线衍射 (X - ray diffraction) 以及原子力显微镜 (Atomic Force Microscope) 3 种测试手段对材料表面进行检测。其中 ,用 X 射线光电子能谱测试分析了燃烧前后样品的化学组成以及表面氧的分布情况 ,X 射线光电子能谱检查采用的是型号 Thermo ESCALAB 250X 光谱仪 ,固定透过能为: 20 eV ,其射线激发源为单色 Al Ka($h\nu = 1486.6 \text{ eV}$,功率 150 W ,X 射线束斑 500 μm)。用 X 射线衍射测试分析燃烧前后材料表面结构晶体结构以及结晶程度 ,其型号为 XD - 2 型衍射仪。用原子力显微镜进行材料表面粗糙度的表征 ,采用的型号是 SPA300HV + SPI3800N 原子力显微镜。

2 实验结果与分析

2.1 壁面材料对熄火距离的影响

为了考察壁面材料熄火的影响 ,测量了狭缝火焰的熄火距离。进行熄火距离测量时 ,当两测试板向中心移动时 ,火焰变得不稳定 ,狭缝火焰出现跳动 ,狭缝火焰的中心区域出现部分熄火 ,随着两测试板之间距离的减少 ,中心熄火区域增大 ,火焰只出现在边缘部位 ,最终火焰熄灭。

图 3 是壁面温度对 3 种材料熄火距离的影响。由图可知 ,随着测试板壁面温度的增加 ,熄火距离整体上逐渐减小 ,3 种材料的减小趋势不太一致。采用不锈钢材料时 ,壁面温度在从 100 变化到 500 $^{\circ}\text{C}$ 时熄火距离缓慢下降 ,壁面温度进一步的升高熄火距离迅速下降。采用硅材料时 ,熄火距离与壁面温度之间基本呈线性递减关系。采用氧化锆陶瓷时 ,熄火距离在壁面温度为 100 到 500 $^{\circ}\text{C}$ 范围内迅速下降 ,而后随壁温升高缓慢下降。图 3 所得到的结果是否说明随着壁面温度的升高 ,火焰对测试板壁面的热损失减小从而火焰趋于稳定 ,因而熄火距离减小 ,从而不能证明化学熄火的存在。

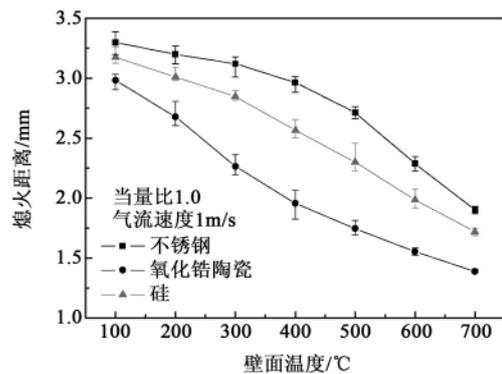


图 3 壁面温度及壁面材料对熄火距离的影响
Fig. 3 Effect of the wall surface temperature and material on the fire extinguishment distance

由图 3 亦可知 ,在相同壁面温度下 ,3 种不同材料的熄火距离大小不同 ,其中氧化锆陶瓷熄火距离最小 ,不锈钢熄火距离最大 ,硅处于中间。对采用这 3 种测试板时的换热情况进行分析 ,在测量熄火距离实验中 ,不同材料在相同壁面温度下 ,导热系数决定了换热的大小 ,导热系数大的热损失大。查阅材料物性手册可知在相同温度下导热系数的大小顺序为^[11]: 氧化锆陶瓷 < 不锈钢 < 硅片 ; 如果按照火焰

与壁面的换热情况进行分析, 热量损失排序为: 氧化锆陶瓷 < 不锈钢 < 硅片; 如果在熄火机制是热熄火机制占主要因素, 那么这 3 种材料的熄火距离大小应该为: 氧化锆陶瓷 < 不锈钢 < 硅片, 但实际测量的结果为: 氧化锆陶瓷 < 硅片 < 不锈钢, 可知在狭缝火焰熄火中除了存在热熄火外, 化学熄火的影响因素也很重要。

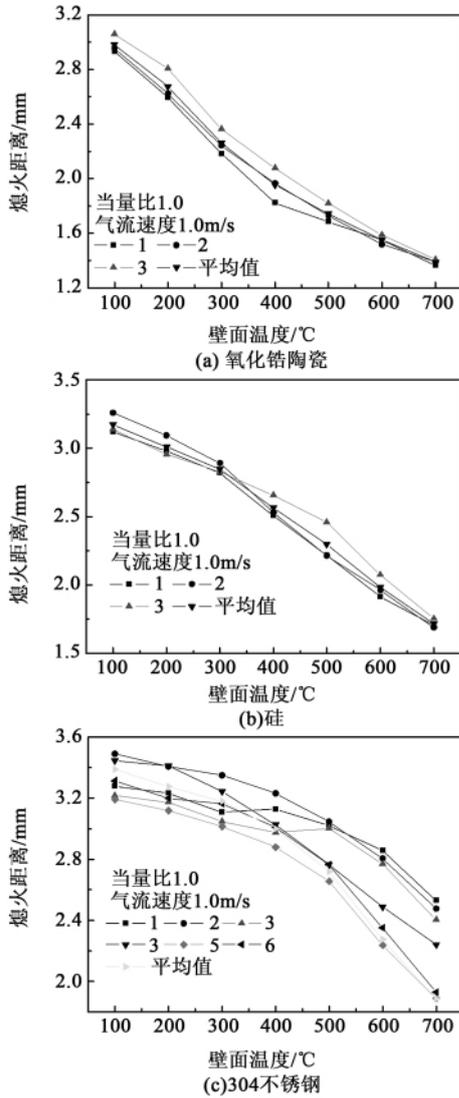


图 4 3 种材料的熄火距离测量连续性实验结果
Fig. 4 Measurement continuity test results of the fire extinguishment distances of three kinds of materials

图 4 给出了多次测量得到的熄火距离实验结果, 图中数字表示测量次数, 平均值代表几次测量结果的平均。熄火距离的连续性实验也显示 3 种材料的不同熄火影响。对于氧化锆陶瓷和硅片, 在实验中熄火距离的改变很小, 然而 304 不锈钢的熄火距离改变很大, 同一温度下的熄火距离差值在低温的

时候只有 0.3 mm, 但是在高温时达到 0.7 mm。随着 3 种材料的熄火距离的连续性熄火距离测量次数的增加, 熄火距离逐渐变的稳定。

2.2 材料表面 XRD 及 XPS 分析

为分析壁面材料对熄火距离的实验结果, 对实验前后材料表面进行了 XRD 及 XPS 测试, 从 3 种材料在燃烧实验前后的变化来探讨材料自身对火焰的影响。

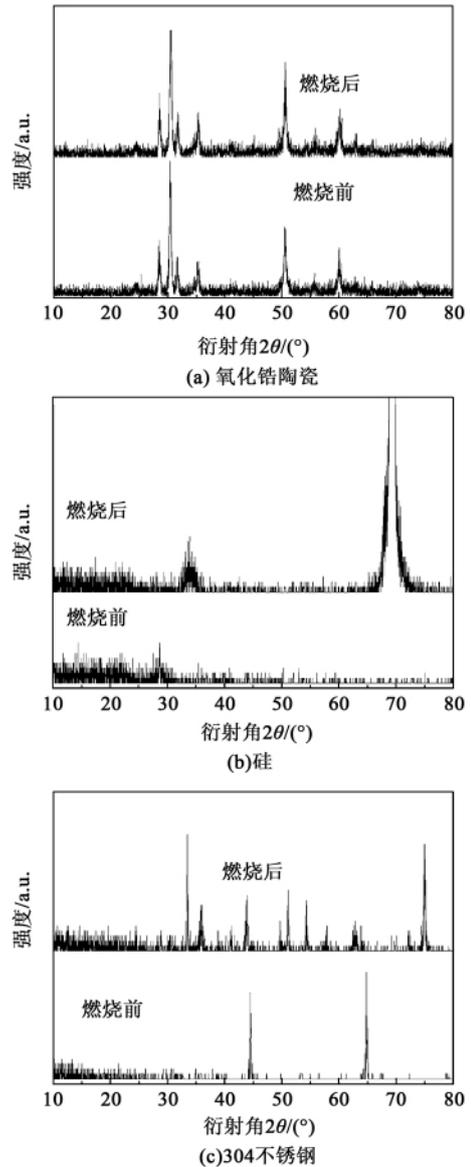


图 5 燃烧前后材料表面的 X 射线衍射图谱
Fig. 5 X-Ray diffraction atlas of the surface of the material before and after the combustion

图 5(a) ~ 图 5(c) 分别给出了燃烧实验前后的氧化锆陶瓷、硅片以及 304 不锈钢 X 射线衍射图。如图可知, 燃烧前后氧化锆陶瓷衍射峰没有改变, 可

知燃烧前后氧化锆表面晶型结构没有发生改变,结构稳定。对于硅,在燃烧实验前没有明显的衍射峰,然而燃烧实验后可以看见两个峰,一个比较弱的在 $2\theta = 35^\circ$,一个比较强的在 $2\theta = 70^\circ$ 。对于 304 不锈钢,燃烧前 $2\theta = 45^\circ$ 和 65° 两个峰在实验后消失,同时很多新的并有较宽分布的峰出现。X 射线衍射峰的改变可能是由于同分异构的转化或者是化合物组成的改变,这些都能通过 XPS 测试结果分析判别。

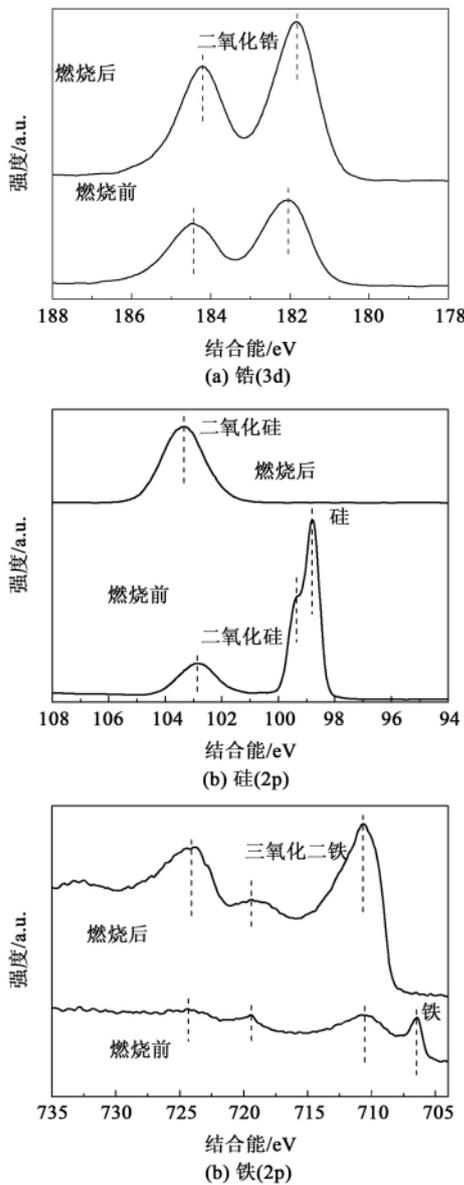


图 6 燃烧前后材料表面主要元素的 XPS 图谱
Fig. 6 XPS atlas of the main elements on the surface of the material before and after the combustion

图 6(a) ~ 图 6(c) 分别给出了 3 种材料表面燃烧前后的主要元素锆、硅以及铁的 XPS 谱图。由图

6(a) 可知 Zr 3d 的 5/2 和 3/2 峰大约在 183 和 185 eV, 对应于二氧化锆的结合能, 这是氧化锆陶瓷的主要成份。由图 6(b) 可知, 对于 Si 2p 图, 实验前可以发现三个峰, 其结合能分别为 97.8、99.4 和 (102.9 eV) 各自对应于硅、硅化物以及氧化硅的结合能, 实验后只有二氧化硅可以检测到。同样可以发现, 燃烧前在 Fe 2p 图上可以发现存在 Fe(其峰对应于 706.5 eV) 和 Fe₂O₃, 燃烧后只发现 Fe₂O₃ 峰。

对比图 4 ~ 图 6 分析可知, 连续实验中熄火距离的改变, 这主要由于材料表面结构和组成的变化导致。由表面分析可知, 氧化锆陶瓷的结构和组成是热稳定性的, 图 5(a) 和图 6(a) 显示表面结构改变很小。304 不锈钢在实验过程中逐步氧化, 其结构和熄火距离改变显著, 其结果如图 4(c) ~ 图 6(c) 所示。随着实验次数的增加熄火距离逐渐减小, 在几次实验后在高温区域几乎不变, 与金属 Fe 氧化变为 Fe₂O₃ 相一致。硅材料随着实验次数的增加熄火距离没有明显的改变, 如图 4(b) 所示。然而在实验后其表面特性发生显著的改变, 如图 5(b) 和 6(b) 所示。分析可知, 单晶硅是一种活性半导体材料, 在接触到高温火焰后表面的硅层很快就被氧化变为二氧化硅。因此, 表面特性没有进一步的变化, 导致在后续的实验稳定的熄火距离。

除对材料的主要元素进行 XPS 分析外, 还对材料表面燃烧前后的氧进行了 XPS 分析。图 7(a) ~ 图 7(c) 分别给出了 3 种材料表面的 O 1s 的 XPS 谱图及分解 O 1s 的 XPS 谱图。由图 7(a) 燃烧前后的 XPS 谱图可知, 燃烧前后 O 1s 峰发生改变, 燃烧前主要是 2 个分峰组成, 燃烧后可分为 3 个分峰, 燃烧前氧结合能主要是在 532.52 eV 及 530.2 eV 两个分峰存在, 按照特征结合能可知这 2 个峰对应于晶格氧和表面上吸附 OH。燃烧后表面的 O 1s 有 3 个分峰分别对应晶格氧、表面吸附 OH 以及硝酸盐中的氧。根据 XPS 方法原理以及相应仪器的 XPS 手册, 可以得到表面不同形式 O 元素的相对含量。经分析可知, 燃烧前后晶格氧的含量占总氧含量比例分别为 0.16 和 0.33, 表面吸附 OH 中的氧占总氧含量为 0.84 和 0.67。可知燃烧后晶格氧增加, 表面化学吸附 OH 减少。结合图 6(b) 中的 Si 2p 谱图与图 7(b) 中 O 1s 谱图分析可知, 硅材料表面燃烧前主要由表面吸附 OH 覆盖, 燃烧后表面 O 的分峰主要是晶格氧, 经分析燃烧前后晶格氧的含量占总氧含量的比例分别为 0.0274 和 0.691, 可以看出燃

烧实验后晶格氧大量增加,表面材料的氧主要以晶格氧的形式存在,表面吸附的 OH 大量减少。通过图 7(c) 可知,燃烧前不锈钢表面有多个 O 分峰,燃烧后 O 的分峰减少,主要由于材料结构发生变化,表面杂质氧化物分解。计算得到燃烧前后晶格氧的含量占总氧的含量的比例分别为 0.444 和 0.75,可知燃烧以后晶格氧大量增加,表面材料的氧主要以晶格氧的形式存在,材料表面吸附的 OH 也大量减少。

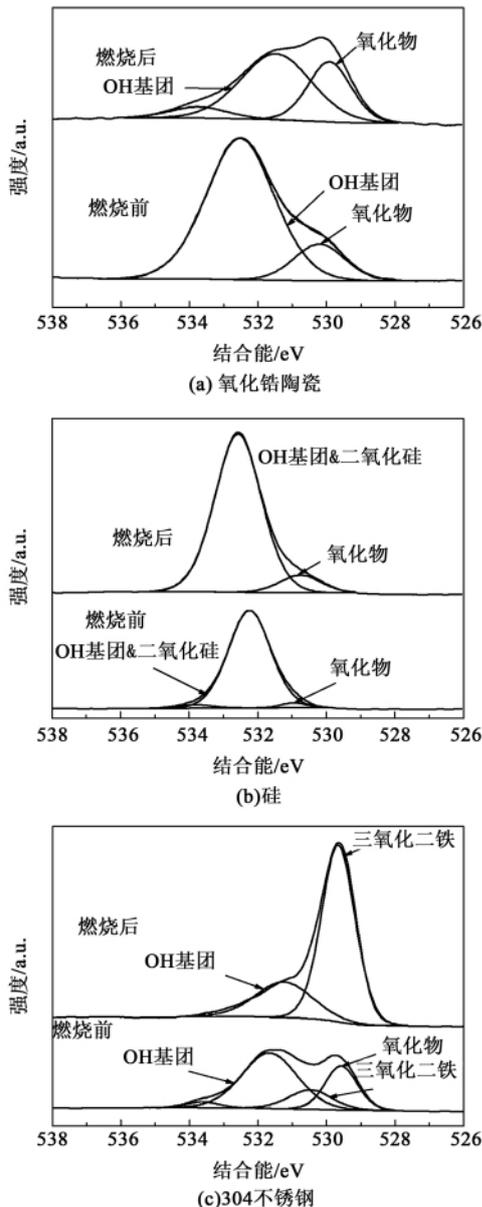


图 7 燃烧前后材料的 O 1s 的 XPS 谱图
Fig. 7 O 1s XPS atlas of the material before and after the combustion

表 1 给出了在燃烧前后 3 种材料表面 O 元素的原子比的汇总表。O 元素在这 3 种材料表面主要以两种形式存在,一种是晶格氧,另外一种 OH 基吸附在材料表面的化学吸附氧。对比所得到的图 3 和表 1 可以发现,燃烧前后氧化锆、硅以及不锈钢材料表面化学吸附氧含量大小次序是氧化锆 > 硅 > 不锈钢,而熄火距离大小次序是不锈钢 > 硅 > 氧化锆,这两者次序相反。分析这两者关系可以发现材料表面的化学吸附氧越少,熄火距离越大。根据实验结果分析认为:吸附在材料表面化学吸附氧占据表面大量位置,导致表面氧空穴减少,阻碍自由基在壁面失活从而导致的化学熄火。氧化锆材料表面化学吸附氧最多,因此表面氧空穴最少,壁面上导致自由基失活点少,化学熄火效应弱,所以燃烧过程中火焰比较稳定,熄火距离在 3 种材料中最小。不锈钢材料表面化学吸附氧最少,氧空穴最多,自由基比较容易在其表面失活,化学熄火效应最强,燃烧过程中火焰最不稳定,熄火距离最大。此外,分析认为 3 种材料的熄火距离随温度的变化趋势不同,主要是由于燃烧实验过程中材料表面化学吸附氧含量随温度的变化趋势有关。由分析可知,材料表面化学吸附氧情况影响着熄火距离,材料表面化学吸附氧越多,材料表面氧空穴越少,导致自由基失活的活性点越少,壁面反应越难以发生,化学熄火作用越弱,火焰越稳定,熄火距离越小。

表 1 燃烧前后材料表面上 O 元素的原子比

Tab. 1 Atomic ratio of O element on the surface of the material before and after the combustion

材料	O _I /O _T		O _{II} /O _T		O _T /A II	
	燃烧前	燃烧后	燃烧前	燃烧后	燃烧前	燃烧后
氧化锆	0.16	0.33	0.84	0.670	54.24	45.26
硅	0.26	0.691	0.74	0.309	40.53	57.85
不锈钢	0.444	0.75	0.556	0.25	33.04	50.6

注: All—所有原子, O_T—总氧 O_I—晶格氧 O_{II}—化学吸附氧

2.3 表面粗糙度对熄火距离的影响

除考察材料对火焰熄火特性的影响,实验中还选用了单晶硅材料的正反表面作为实验样品,考察了表面粗糙度对熄火距离的影响。图 8 为单晶硅材料正反面的 AFM 图像及检测结果,在这里用 AFM 中 RMS(均方根粗糙度)数据代表粗糙度,由检测结果可知正反两面粗糙度分别为 $7.4 \times 10^{-2} \text{ nm}$ 以及 $4.0 \times 10 \text{ nm}$,其对应表面积为 $9.999 \times 10^7 \text{ nm}^2$ 以及

$1.001 \times 10^8 \text{ nm}^2$ 。

图9给出了预混气当量比为1.0、1.2时,两种不同表面粗糙度表面的熄火距离随壁面温度变化的规律。由图可知,当量比为1.0时,光滑表面(粗糙度小)的熄火距离小于粗糙表面(粗糙度大)的。由AFM分析结果可知,光滑硅表面和粗糙硅表面表面积基本相同,可知在外部条件相同时,考虑换热时两表面与外界换热相同,但这两种粗糙度表面熄火距离不同,这可能是由于不同粗糙度的表面对自由基的吸附能力不同,粗糙表面对自由基的吸附能力比较强,壁面反应强烈,火焰更不稳定,所以熄火距离比较大。当量比为1.2时,粗糙表面的熄火距离大于光滑表面。这个趋势和当量比为1.0时相反,与当量比1.0相比,当量比1.2时属于富燃料燃烧,此时火焰中OH自由基含量相对于当量比1.0时急剧下降,火焰中不同自由基浓度发生相对变化,而不同粗糙度的壁面对不同自由基的吸附能力不同,由此导致相反的熄火距离规律。粗糙度对熄火距离影响的实验结果为微燃烧器设计提供了很好的参考,在微燃烧器的设计中也应该考虑到粗糙度的影响。

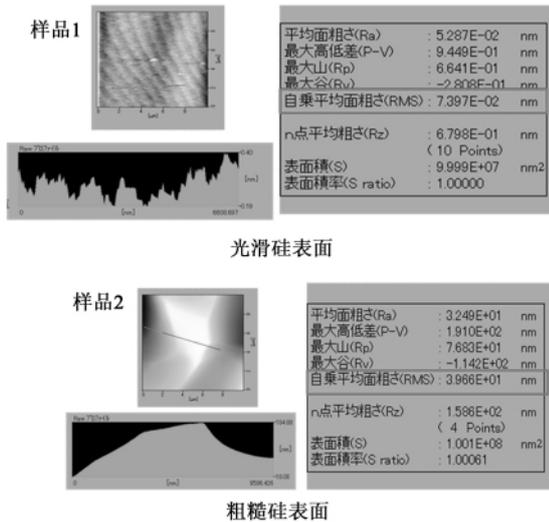


图8 不同硅样品 AFM 图像以及测试结果
Fig. 8 AFM image and test results of different silicon samples

3 结 论

在狭缝火焰实验台上采用不锈钢、硅、氧化锆陶瓷等材料模拟实际燃烧器壁面来考察材料对狭缝火焰熄火特性的影响,得到结论如下:

(1) 随着壁面温度升高,3种材料熄火距离随温度变化趋势不同,熄火距离从大到小的变化为:不

锈钢、硅及氧化锆,材料的导热系数和熄火距离没有直接关系,熄火距离与壁面材料有关,证明了化学熄火效应的存在;

(2) 材料表面上的化学吸附 OH 在化学熄火上起着重要作用。相同的壁面温度时材料表面上化学吸附 OH 越多,材料表面的氧空穴越少,自由基失活越不容易,化学熄火作用越弱,火焰越稳定,熄火距离越小;

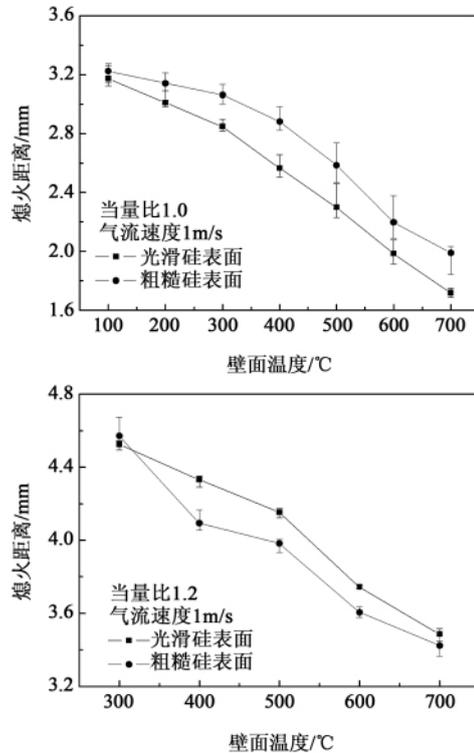


图9 表面粗糙度对熄火距离的影响
Fig. 9 Effect of the surface roughness on the fire extinguishment distance

(3) 连续性实验中熄火距离的变化主要是由于随着实验的进行材料表面与火焰接触后,材料表面的结构逐步发生改变导致;

(4) 在相同的表面积下,粗糙表面对自由基的吸附能力强于光滑表面。当量比发生改变时,火焰中自由基成份发生变化,不同粗糙度表面对不同自由基的吸附能力不同,导致不同当量比时熄火规律变化不同。微燃烧设计中应该考虑粗糙度的影响。

参考文献:

[1] Waitz I A, Gauba G, Tzeng Y. Combustors for microgas turbine engines [J]. Journal of Fluids Engineering, 1998, 120(3): 109-117.

[2] Yang W M, Chou S K, Shu C. Development of a prototype micro thermophoto voltaic power generator [J]. Journal of Physical D: Applied Physics, 2004, 37(7): 1017-1020.

[3] Peirs J, Reynaerts D, Verplaetsen F A. Microturbine for electric power generation [J]. Sensors and Actuators A: Physical 2004, 113 (1): 86–93.

[4] Cao H L, Xu J L. Thermal performance of a micro-combustor for micro-gas turbine system [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(5): 1569–1578.

[5] Kim N I, Kato S, Katapla T et al. Flame stabilization and emission of small Swiss-roll combustors as heaters [J]. Combustion and Flame 2005, 141(3): 229–240.

[6] Sloane T M, Ratcliffe J W. A molecular beam mass spectrometer study of side-wall flame quenching at low pressure by cooled non-catalytic and catalytic surfaces [J]. Combust and Flame, 1982, 47(1/3): 83–92.

[7] Sloane T M, Schoene A Y. Computational studies of end-wall flame quenching at low pressure: The effects of heterogeneous radical re-combination and crevices [J]. Combustion and Flame, 1983, 49(1/3): 109–122.

[8] Miesse C M, Masel R I. Submillimeter-scale combustion [J]. American Institute of Chemical Engineers Journal 2004, 50(12): 3206–3214.

[9] Kim K T, Lee D H, Kwon S. Effect of thermal and chemical surface-flame interaction on flame quenching [J]. Combust and Flame 2006, 146(1/2): 19–28.

[10] Fan Y, Suzuki Y, Kasagi N. Experiment study of micro-scale premixed flame in quartz channels [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2): 3083–3090.

[11] 时均. 化学工程手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.

SHI Jun. Chemical engineering handbook [M]. Beijing: Chemical Industry Press 2003.

(辉 编辑)



Siemens SCC5/6-8000H

据《Gas Turbine World》2012 年年度手册报道, 现有 50 Hz 8000H 联合循环装置的性能已被证实。以天然气为燃料, 在设计条件下, 该装置净输出功率为 578 MW, 效率为 60.75%。

50 Hz SGT5-8000H 燃气轮机在 ISO 条件下的额定输出功率为 375 MW, 效率为 40.0%。其比例缩放后的 60 Hz SGT6-8000H 设计额定输出功率为 274 MW, 效率为 40.0%。

简单循环 8000H 燃气轮机的额定性能

	简单循环	
	50 Hz 燃气轮机	60 Hz 燃气轮机
型号	SGT5-8000H	SGT6-8000H
ISO 基本负荷	375 000 kW	274 000 kW
总热耗率	8000 kJ/(kWh)	8000 kJ/(kWh)
总效率	40.0%	40.0%
压比	19.2:1	19.5:1
涡轮速度	3 000 r/min	3 600 r/min
排气流量	829 kg/s	604 kg/s

在 50 Hz CC 装置的验证试验中, SCC5 联合循环证实了装置净输出功率为 578 MW 和效率为 60.75% 以及在 30 min 内从零到满负荷, 每分钟 35 MW 升负荷速率。

联合循环 8000H 动力装置的额定性能

	单轴	
	50 Hz 联合循环装置	60 Hz 联合循环装置
型号	SCC5-8000H-1S	SCC6-8000H-1S
推出年份	2011	2012
装置净输出功率	570 000 kW	410 000 kW
装置热耗率	<6 000 kJ/(kWh)	<6 000 kJ/(kWh)
装置净效率	>60%	>60%
燃气轮机输出功率	375 000 kW	274 000 kW
汽轮机输出功率	195 000 kW	136 000 kW

(吉桂明 摘译)

垂直矩形窄通道流动沸腾换热特性实验研究 = **Experimental Study of the Boiling Heat Exchange Characteristics of a Flow in a Vertical Rectangular Narrow Channel** [刊 汉] HUANG Li-hao ,TAO Le-ren ,RUI Sheng-jun ,ZHENG Zhi-gao(College of Energy Source and Power Engineering ,Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 ,28 (1) . - 53 ~ 56

The flow boiling heat exchange pertains to a typical two phase flow problem. When a narrow channel is compared with a conventional one ,the flow boiling heat exchange coefficient of the former is markedly higher than that of the latter and the heat exchange mechanism of the former is much more sophisticated. Under the condition of a low pressure ,a supercooling inlet temperature ,different mass flow rates and heating power densities ,the water flow boiling heat exchange characteristics of a vertical rectangular narrow channel with a cross section of 250 mm × 5 mm were experimentally studied. The experimental and analytic results show that the inlet temperature(27 - 60℃) ,mass flow rate(2. 22 - 3. 49 kg/m²s) and heating power density(0 - 12 kW/m²) have an important influence on the saturated boiling starting point and the length of the supercooling section. A high void fraction and limitation of the structure of the channel make the steam-liquid two phase flow unstable and affect the heat exchange coefficient. The heat exchange coefficient will decrease with an increase of the power and the fluid enters into its total convection-based boiling stage. Due to the limitation of the top structure of the section under the test ,with an increase of the dryness ,there will not emerge a dry-out point ,the heat exchange will not get worsened and the heat exchange coefficient will be basically constant with an increase of the power. **Key words:** flow boiling ,narrow channel ,boiling starting point ,void fraction ,dryness

液包式雾化喷嘴出口锥角优化实验研究 = **Experimental Study of the Optimization of the Outlet Cone Angle of a Liquid Bag Type Atomization Nozzle** [刊 汉]ZHANG Jing-zheng ,LIU Ding-ping(College of Electric Power ,South China University of Science and Technology ,Guangzhou ,China ,Post Code: 510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 ,28(1) . - 57 ~ 60

The liquid bag type atomization nozzle represents a novel type desulfurization atomization nozzle and its outlet cone angle directly affects the atomization performance. The test rig as shown in Fig. 3 was used and a nozzle with a cone angle at the outlet was chosen to conduct a test. The atomization characteristics were tested by using a Winner 318 type laser particle diameter analyzer. The test results show that a change of the inner cone angle conspicuously affects the atomization angle while a change of the outer cone angle basically does not influence the atomization angle. A change of the inner and outer cone angle basically has no influence on the mean atomization particle diameter. Both atomization angle and mean atomization particle diameter of the nozzle will decrease with an increase of the gas/liquid pressure ratio. After the gas/liquid pressure ratio has reached 1. 5 ,the influence of the gas/liquid pressure ratio will become smaller. **Key words:** gas-in-liquid ,nozzle ,cone angle ,atomization characteristics

壁面材料对微火焰熄火影响的实验研究 = **Experimental Study of the Influence of the Wall Surface Material**

on the Extinguishment of a Microscale Flame [刊 汉] FENG Yao-xun (Engineering College ,Guangdong Oceanology University Zhanjiang ,China ,Post Code: 524088) ,YANG Hao-lin ,ZHAO Dai-qing (Guangzhou Energy Source Research Institute ,Chinese Academy of Sciences ,Guangzhou ,China ,Post Code: 510640) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28(1) . - 61 ~ 67

A premixed methane/air flame produced by a burner located in a slot between two parallel test plates was used to investigate the influence of the wall surface material on the extinction of a microscale flame. The test results show that the interval of the two plates causing a flame failure is relating to the material and meanwhile will decrease with an increase of the wall surface temperature. The surface structure and composition of the material under the test before and after the combustion were analyzed by using the X-ray diffraction(XRD) and X-ray photoelectron spectrum (XPS) . It has been found that the proportions of oxygen chemically adsorbed by various surfaces made by various materials can be listed out from high to low: zirconia ceramics ,silicon plate and stainless steel 304. The intervals of two plates made by using these three kinds of material causing a flame failure can be given from small to large: zirconia ceramics ,silicon plate and stainless steel 304 ,both having an identical variation tendency. The oxygen chemically adsorbed by the material surface plays an important role in chemical flame extinction. At a same wall surface temperature ,the less the amount of oxygen chemically adsorbed by the material surface ,the more conspicuous the chemical flame extinguishment role. It has been found during the test that the surface roughness may influence the adsorption characteristics of the material surface and give rise to different chemical flame extinguishment characteristics. **Key words:** microscale flame ,chemical flame extinguishment ,chemically adsorbed oxygen ,wall surface material

35 °C ,1 mmol/L CaCO₃ 溶液中黄铜和紫铜表面结垢特性 = **Surface Fouling Characteristics of Brass and Red Copper in 1 mmol/l CaCO₃ Solution at 35 °C** [刊 汉] SHI Xue-fei ,ZHANG Hua ,SHENG Jian ,ZHAO Ping (College of Energy Source and Power Engineering ,Shanghai University of Science and Technology ,Shanghai ,China ,Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28(1) . - 68 ~ 72

Brass and red copper pertain to commonly used materials for heat exchangers. To investigate the growth characteristics of CaCO₃ fouled on the surface of these two metals after the precipitation of CaCO₃ is the first step to conduct a study to combat the fouling. In 1 mmol/l CaCO₃ solution at 35 °C ,such growth characteristics were investigated by adopting the static-state reaction method ,the weights of the foul at various times were obtained by using the weight weighing method and the microscopic morphology of the foul at various times were acquired by employing a scanning electronic microscope(SEM) . In this connection ,the growth characteristics of CaCO₃ fouled on the surface of these two metals and the influence of pH value on the growth of the foul were obtained. In terms of the material quality ,it is easy for red copper to be fouled than brass. In terms of water quality ,a higher pH value can promote the fouling of CaCO₃ on the brass ,however ,prohibit that on the red copper. **Key words:** CaCO₃ crystal precipitation-caused foul , coupon test ,crystal morphology ,crystal dimension distribution