

Investigation of a New Micro T-Mixer for the MTPV System*

MA Chun-hong¹, DING Jian-ning^{1,2,*}, HE Zhen-liang¹, CHENG Guang-gui¹, PAN Jian-feng¹
(1. Center of Micro/ Nano Science and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China;
2. Jiangsu Polytechnic University, Changzhou Jiangsu 213016, China)

Abstract :By using the computational fluid dynamic software FLUENT 6, we have investigated a new micro T-mixer with static mixing elements in the mixing channel, and the performance of the micro T-mixer with and without static mixing elements are compared in the same work condition. We find that the performance is improved after the static mixing elements are used. The enhancement in mixing performance is thought to be caused by the generation of eddies and separation of boundary layers. We have also investigated the effect of the number of static mixing elements affect to the mixing intensity, it has proved that the mixing effect will be evidence as the mixing channel gets longer and the number of static mixing elements gets more. The investigation of this kind of micro T-mixer will do a great positive effect on selecting and fabricating of micro T-mixer for the MTPV (micro thermo photovoltaic) system.

Key words :Micro T-mixer; FLUENT simulation; Static mixing elements

EEACC :8250

微型热光电系统的新型微混合器的模拟研究*

马春红¹, 丁建宁^{1,2,*}, 何振良¹, 程广贵¹, 潘剑峰¹

(1. 江苏大学微纳米科学技术研究中心, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏工业学院, 江苏 常州 213016)

摘 要 :通过使用计算流体力学软件 FLUENT 6, 研究了一种混合通道中带有不动凸块的新型 T 型微混合器, 并与直通通道不带不动凸块的相同大小的 T 型微混合器在相同的工况下进行模拟比较, 观察到前者的混合效果比后者有显著改善, 认为这是由于当混合气体通过这些不动凸块时产生漩涡和分层引起的。同时也研究了混合通道内不动凸块的数量对混合强度的影响, 证明混合管道越长, 不动凸块的数量越多, 混合效果越明显。研究结果对微热光电系统中混合器的选用和制造具有指导意义。

关键词 :微混合器; FLUENT 模拟; 不动凸块

中图分类号 :O357.5

文献标识码 :A

文章编号 :1004-1699(2008)04-0676-04

随着科技的进步, 对机械和机电产品的小型化的需求日益迫切。微型热光电系统是随着信息技术、生物技术、微机械的发展而发展起来的一个新的研究领域, 它以氢气或碳氢化合物为燃料, 装置无运动部件, 避免了其它微型动力装置的许多不足, 转换效率相对较高, 在不到 1 cm^3 的体积内能输出 $1 \sim 20 \text{ W}$ 的功率, 比传统电池的能量密度高 100 倍以上^[1], 它的发展为解决小型化和高功率密度输出之间的矛盾提供了可能。

在微型热光电系统中, 燃烧是产生动力的重要过程, 燃烧的稳定性直接影响装置的转化效率。在燃烧室中气体要进行混合后再燃烧, 而燃烧的化学反应时间非常短, 只有几个超毫秒甚至更少, 为了混合量能满足燃烧所需的量, 必须在燃烧室前加上一个预混合室, 要求能在超毫秒的时间内将两种反应气体完全混合, 因此研究一种既能快速混合又能达到较好混合效果的微混合器具有重要意义。

微混合器分为两种类型——主动式微混合器和

基金项目: 新世纪优秀人才资助计划项目 (NCET)

收稿日期: 2007-09-30 修改日期: 2008-03-04

被动式微混合器^[2]。主动式微混合器需要外加动力如电压源输入,而被动式微混合器通过施加压力使流体流动进行混合。通常主动式微混合器通过激励一些运动部件运动产生紊流进行混合,但本系统本身是产生动力的系统,加入主动式微混合器将消耗能量,减少能量输出,降低了装置的转换效率。因此,本系统只能采用一种快速高效的被动式微混合器。被动式微混合一般通过增加流体间的接触面积,缩短分子扩散距离来实现。具体方法可以通过将每种流体分成许多支流,然后支流间两两混合,最后汇总到一条总干流来实现;也可以通过挤压两种流体使其流过突然变小的窄通道,产生涡流、二次流、回旋流获得快速混合。2004 年 Seck Hoe Wong 等人^[3]报道了一种十字交叉型微混合器,并对其混合过程进行了模拟,已经取得了超毫秒级的混合时间。但是这种微混合器尺寸较小,产生的反应物较少,不能满足一般反应所需要的量,在实际生产和科研中应用较少。

1 实验模型设计

设计能实现快速混合且能制造的实体结构是研究的关键。Seck Hoe Wong 等人^[4]已经用实验模拟表明,T 型微混合器的混合时间为毫秒级,但仍不能满足本系统中超毫秒混合的要求。为加快混合,在 T 型微混合器的通道上加入了不动凸块。理论上,为了实现超毫秒的快速混合,需要有紊流产生。紊流将会使流体束产生短暂混乱,加快两相流体的扩散。在平直通道中不加很高的压力很难产生紊流现象,但压力过高又会使键合成的微混合器破裂失效。加入有一定几何形状的不动凸块后,混合通道在表面方向突然改变形状,流体只能部分流过,引起流体分裂产生涡流。涡流的产生使得两种液体间接触面积增大,同时减小了扩散距离,快速达到完全混合,缩短了混合时间。随着微加工技术的发展和成熟,目前 T 型微混合器已制造出实体结构^[4],另外微加工材料的发展为制造不动凸块提供了可能。国内已有利用高分子材料聚甲基硅氧烷(PDMS)制造出了微混合器^[5]。这些都为设计制造上述的带有不动凸块的微混合器提供了可行性条件。本模拟实验模拟了带有和不带有不动凸块以及带有不同数量的不动凸块对微混合的影响,比较了在相同的工况下氢气和氧气在出口处的混合强度,这为选择适合于微光电系统的混合器提供了依据。

1.1 模拟条件

根据唐维星等人^[1]对 TPV 系统中燃烧室中燃

烧的研究,证明得到最佳燃烧时,氢气和氧气的最佳比例为 1.8/1。进行混合模拟时即采用该混合比例,混合气体的总流量为 1 000 sccm。模拟时氢气与氧气的工况如表 1 所示。

表 1 模拟时氢气与氧气的工况

进口	流量 (sccm)	进口压力 (Pa)	温度 ()
氢气	642.8	40000	20
氧气	357.2	20000	20
出口	1000	0	20

模拟时将氢气和氧气看作为不可压缩理想气体,根据理想气体状态方程:

$$PV = nRT \tag{1}$$

式中 R 为摩尔气体常量, n 为气体摩尔数。根据式(1)及设定工况,得出两种气体进口速度。

1.2 模型尺寸确定

考虑到将模型制造成实体时,实体是由硅和玻璃键合而成,而硅与玻璃的键合强度为 12 MPa^[6],由式(1)得出为了使压入气体的压力不破坏键合,混合通道的长度必须大于等于 8 mm,由此设计出的不带不动凸块和带有三个或四个的试验模型外形及剖面图如图 1 所示。

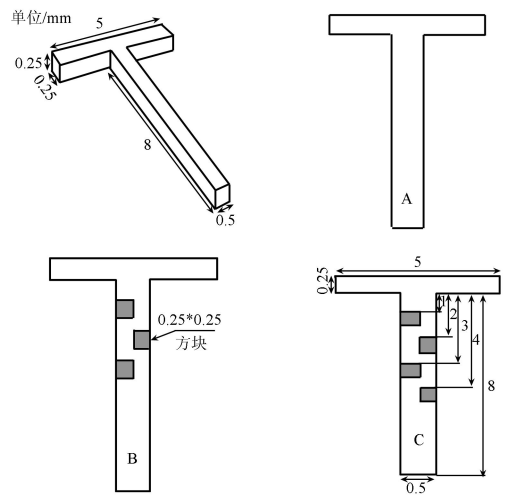


图 1 整体模型外型示意图和各模型剖面图

图中,凸脊为边长 0.25 mm 的方块,各凸脊之间的平均间距为 1 mm,且左右交错分布。分别用 A、B、C 表示这三种模型。

1.3 模拟过程

模拟实验是在流体软件 FLUENT 6 上进行的。在模拟中首先应用 FLUENT 6 中的前处理软件——GAMBIT 建立了三个 3 维实体模型。在模拟过程中,为了获得紧凑高效的模型,我们将其划分成较为细密的像素网格,即空间间隔为 0.05 的四边形网格元素。

在常温下,将氢气和氧气按照充分燃烧所需的

1.8/1 的比例,分别通过 T 型混合器的两个通道口,氧气从左边通道进入,氢气从右边通道进入,模拟了表 1 的工况。在这个模拟中,选用了混合模型来模拟这两种气体的混合。

2 模拟结果及分析

在用求解器对三种模型进行了若干步迭代后,两种气体在混合通道内的混合达到设定的收敛值。根据设定的工况,分别对三种模型的中心对称面以及其出口通道出口面上的混合进行了观察。图 2 所示为三种模型的中心对称面上气体混合后氧气在混合通道中的体积分数。由于氢气和氧气的比例是 1.8/1,所以当两种气体完全混合时,理论上氧气在总体积中体积分数大约为 0.357。根据模拟结果发现,A、B、C 三个模型在接近出口处氧气的体积分数分别为 0.433~0.467、0.4~0.433、0.367~0.4。从中可以看出在混合通道中加入不动凸块后,混合效果明显增强,且适当增加不动凸块的数量有利于混合。

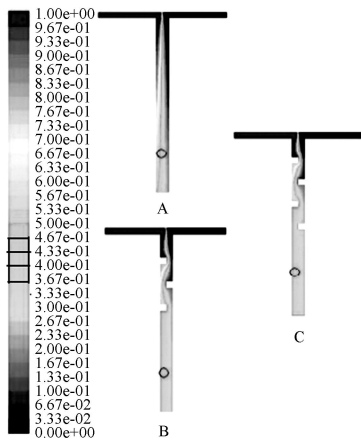


图 2 完全混合后模型对称面上氧气 O_2 体积分布图

在本模拟研究中,我们所要得到的关键是混合通道出口处氧气和氢气的混合情况。图 3 为混合通道出口面上氧气的体积分布。从图中我们可以看出,在混合通道出口面上,各模型氧气的体积分数与图 3 中基本相同,说明从图 3 中圈住的位置到出口面这段短距离上气体的扩散作用较小。但从图 3 中较为明显地看出,模型 A 出口面上氧气体积分数过渡界限较为明显,而模型 B、C 出口面上氧气体积分数的过渡较为缓和,说明在模型 A 中混合不均匀,而在模型 B、C 中混合较为均匀。

从图 3 的混合图像可以看出,模型 A 中氧气在混合通道出口面上各区域上体积分数有明显区别,表明两种气体未完全混合,这是由于在混合通道中没有不动凸块来破坏层流,因此完全靠扩散来进行混合。当在模型 B、C 中加入不动凸块后,从图 3B、

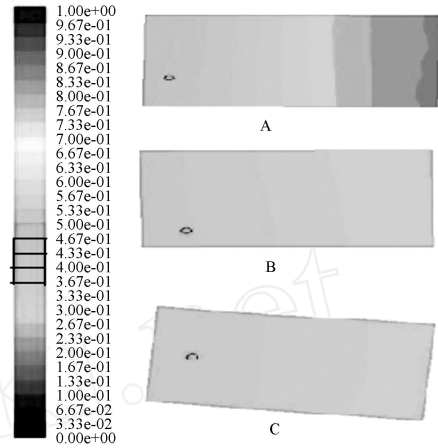


图 3 混合完成后混合通道出口面上氧气体积分布图 C 中看出氧气分布较为均匀,混合性能有显著提高。这是由于混合通道加入不动凸块后产生了漩涡增加了两种气体的接触面积,同时通道变窄,减小了分子扩散的距离,加速了扩散混合。

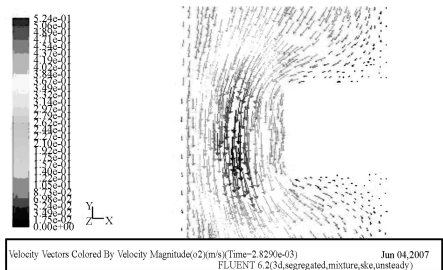


图 4 在混合通道不动凸块附近氧气 O_2 的速度矢量图

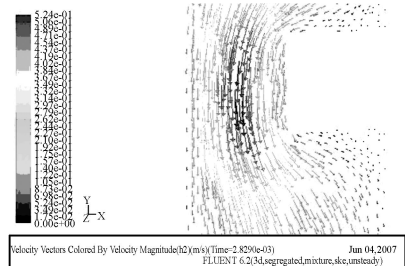


图 5 在混合通道不动凸块附近氢气 H_2 的速度矢量图

从图 4 和图 5 不动凸块周围的气体速度矢量图中可以看出,当气体流过不动凸块周围时,氢气及氧气两者速度均增大(红色区域),扰动了分离层中运动缓慢的气体分子,在凸脊下游,不稳定流速气体重叠将会确保气体流动时混合均匀。同时当气体在混合通道中遇到不动凸块时,速度加快引起了气体分离,气体分离产生的回流又提高了气体流动速度。已经通过宏观试验观察到使用这种在混合通道中加入障碍的装置,可以使得此时物质的传输速率比在空管道中流动时提高四倍^[7]。

为了进一步定性分析这种微混合器的混合强度与不动凸块个数的关系,使用压力出口处体积分布图像的灰度分布值的标准差来评判混合效果^[8]。

通用的灰度图标准差的计算公式为:

$$= \sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{n=1, m=1}^{NM} [I_{nm} - \bar{I}]^2} \quad (2)$$

其中 \bar{I} 为 I_{nm} 的平均值, I_{nm} 为图像灰度值归一后的值, $0 \leq I_{nm} \leq 1$, \bar{I} 为 I_{nm} 的平均值, 归一化的计算公式为 $I_{nm} = (A_{nm} - A_{\min}) / (A_{\max} - A_{\min})$, 其中 A_{nm} 为图像原始的灰度值, A_{\max} 和 A_{\min} 分别为出口处的氧气和氢气对应得灰度值, 由标准差公式可知当两种气体完全混合时, $\sigma = 0$, 当完全未混合时, $\sigma = 0.5$ 。由表 2 可知, 随着不动凸块的增加, 混合强度值减小, 混合效能增强。当有六个不动凸块时, 出口处的混合强度比直通通道提高了将近一倍。当混合管道无限长, 不动凸块无限增加时, 混合强度趋向于 0, 两种气体完全混合。这与流场分析的结果基本一致。

表 2

凸脊的数量 n	0	3	4	5	6
混合强度	0.0538	0.0377	0.0328	0.0286	0.0230

3 结论

在 T 型微混合器混合通道中加入不动凸块后进行的模拟表明, 与未加入凸块的直混合通道相比, 加入不动凸块后使得两种气体的混合更加均匀, 且增加不动凸块的数量将会提高混合性能。普遍认为这是由于在不动凸块的下游产生了涡流, 这些涡流

增加了两种气体的接触面积, 同时缩短了扩散到相同浓度所需的距离, 加快了混合。已有试验表明在未加不动凸块的 T 型微通道中, 能实现微秒级的混合^[4], 因此在加入不动凸块后加快混合的 T 型微混合器中实现超微秒级的混合是完全有可能的。这种微混合器的应用对提高微热光电系统的燃烧效率具有极大的指导意义。

参考文献:

- [1] 唐维新, 李德桃等. 微型热光电系统中的微燃烧室研究[J]. 邵阳学院学报, 2004, 1(3): 0068-03.
- [2] 朱丽, 侯丽雅, 张维一. 微混合器研究进展[J]. MEMS 技术与器件, 2005(04): 1671-4776.
- [3] S. H. Wong, P. Bryant, M. Ward, C. Wharton. Investigation of Mixing in a Cross-Shaped Micromixer with Static Mixing Elements for Reaction Kinetics Studies[J]. Sensors and Actuators B. Chem. 95 (2003) 414-424.
- [4] Seck Hoe Wong, Michael C. L. Ward, Christopher W. Wharton. Micro T-mixer as a Rapid Mixing Micromixer[J]. Sensors and Actuators B, 100 (2004) 359-379.
- [5] 李淑娴, 吴一辉等. 一种 PDMS 微混合器的制备及性能分析[J]. 微细加工技术, 2006, (2), 49-53.
- [6] 聂磊, 史铁林, 廖广兰, 钟飞, 玻璃中介硅圆片键合研究[J]. 半导体技术, 2006. 4.
- [7] W. W. Focke, On the Mechanism of Transfer Enhancement by Eddy Promoters[J]. Electrochim. Acta 28 (1983) 1137-1146.
- [8] 刘素芬, 傅新, 杨华勇, 谢海波. SOR 微型混合器的设计及实验研究[J]. 浙江大学报, 2005, vol139(12), 1093-1097.



马春红(1983-), 女, 硕士研究生, 主要从事微能源动力装置方向的研究, mch_2004@163.com.



丁建宁(1966-), 男, 江苏工业学院副院长、江苏大学教授、博士研究生导师, 机械电子工程博士点学科带头人, 江苏大学微/纳米科学技术研究中心主任。近年来, 主要从事微/纳器件与系统、微能源、微/纳制造与测试技术以及纳米摩擦学等方面的研究工作。全国优秀博士学位论文奖、江苏省青年科技奖获得者、入选江苏省 333 工程二层次中青年科技领军人才和“新世纪百千万人才工程”国家级人选, dingjn@jpu.edu.cn.