

小型化高床载过氧化氢整体式催化剂床研究

雷娟萍, 林 革

(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 通过理论分析和试验对一种新型整体式层板催化剂床进行了研究。设计了催化剂床流道结构并对催化剂床的加工工艺进行了初步研究。热试车结果表明, 催化剂床性能良好, 最高床载可达 $16.5\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$, 分解效率 96%, 室压粗糙度小于 $\pm 2\%$, 催化剂床累计工作寿命大于 455s, 性能未出现下降趋势。

关键词: 过氧化氢; 整体式催化剂床; 层板; 催化分解

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2008) 04-0012-05

Small high-flux hydrogen peroxide integrated catalyst bed

Lei Juanping, Lin Ge

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: A new kind of hydrogen peroxide integrated platelet catalyst bed is investigated based on theoretical analysis and experiment. The flow path of platelet catalyst bed was designed. The production techniques of the platelet catalyst bed, such as photoetching technique, silver plating technique and the diffusion welding technique are investigated. Finally, the successful hot-firing tests were performed. The investigation results indicate that this kind of catalyst bed has good performances: its high bed loading can be up to $16.5\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$, the decomposition efficiency is 96%, the roughness of chamber pressure is below 2% and the catalyst bed accumulated endurance time more than 455s at different operating conditions without any measurable performance changing.

Key words: hydrogen peroxide; integrated catalyst bed; platelet; catalytic decomposition

收稿日期: 2008-05-06; 修回日期: 2008-06-10。

作者简介: 雷娟萍 (1982—), 女, 硕士, 研究领域为高空发动机技术。

1 引言

过氧化氢催化分解技术是其作为航天推进剂应用的关键技术之一。目前, 国内主要使用的催化剂包括: 颗粒催化剂和银网催化剂。我国从九五期间就开始研制催化分解过氧化氢的颗粒催化剂, 取得了一定成果, 但总体性能不高。目前颗粒催化剂床的最高床载只有 $15 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 寿命 100s 左右, 床长大约 40mm。近年来, 我国又开始研究银网催化剂, 取得了较大的突破。床载可达 $30 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 寿命 2000s 左右, 但床长较长, 一般为 50~90mm, 床参数也不是很稳定, 室压粗糙度较大。2003 年美国 Aerojet 公司率先采用层板光刻技术研制成功了整体式层板催化剂床, 床载大于 $43 \text{ g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$, 工作寿命大于 900s, 而床长只有 13mm。对这种小型化、高性能过氧化氢催化剂床的研究, 我所也进行了一些探索, 取得了初步成果。

2 整体式层板催化剂床的结构及特点

整体式层板催化剂床是一种新型的催化剂床, 它采用 MEMS 光刻的方法在每层金属薄板上刻蚀出流道, 然后在板片上镀活性金属或银, 最后把板片叠放在一起并用扩散焊连接成单块整体式结构。图 1 为层板催化剂床的一种流道结构简图。层板催化剂床每两层为一个结构单元。第一层板片正面为等距离的通孔, 板片背面也刻蚀出一定深度的盲孔, 盲孔与通孔位置相对错开, 但有一定的相交面积, 第二层板片的结构与第一层板片类似, 但盲孔与通孔的分布不同, 第二层板片通孔的位置恰好是第一层板片盲孔的位置, 其盲孔的位置是第一层板片通孔的位置。推进剂在催化剂床内部的流动过程中, 首先从入口板的一个通孔流向与之相交的三个盲孔, 通过盲孔流向其它的通孔和盲孔, 整个通道都是相通的, 形成了横向流动和纵向流动, 增加了过氧化氢与催化剂的接触面积和其在催化剂床内的停留时间, 提高了过氧化氢的催化分解效率, 从而大幅提高床

载荷 (即催化剂床单位面积通过的推进剂流量)、缩小结构尺寸并减轻催化剂床的重量。由于推进剂流道和板片上的型孔可不受工艺束缚而自由设计, 而且在催化剂床工作时, 型孔不会变形, 所以与传统的催化剂床相比具有床载高、结构整体化、床参数稳定、起动时间短、工作寿命长等较为明显的优点。

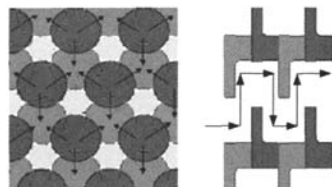


图 1 层板式催化剂床的一种流道

Fig.1 One of the flow path-type of the platelet catalyst bed

层板式催化剂床还具有以下优点:

(1) 流道设计比较灵活。层板式催化剂床的流道是通过光刻方法加工出来的, 这样就可以设计最佳的流道结构形式, 使其有利于提高催化剂床的性能。

(2) 床参数稳定。层板式催化剂床的流道比较规则、均匀性好, 因此其床参数比较稳定。

(3) 结构质量小、床长短。层板式催化剂床的床载荷相对较高, 在推力相同的情况下, 所需催化面积小, 因此, 结构质量较小, 床长较短。

(4) 结构整体化, 容易装配。层板式催化剂床是通过扩散焊将每层板片连接在一起, 形成一个整体, 这样, 相较银网和颗粒催化剂床而言, 比较容易装配。

3 催化剂床流道结构设计

3.1 流道结构设计原则

(1) 由于分解性能是催化剂床的最主要性能, 因此, 流道结构设计要优先保证催化剂床有较高的分解效率, 在催化剂床实际工作时, 过氧化氢与催化剂的接触面积越大, 分解效率就越高, 因此, 应优先保证推进剂与催化剂有较大的接触面积。

(2) 床流阻也是催化剂床的主要性能之一，因此，在优先保证分解效率的前提下，应该尽量减小催化剂床的床流阻，流道结构设计时，应该尽量增大催化剂床的流通面积来减少床流阻。

(3) 催化剂床扩散焊时，应该保证一定的焊接强度，因此，就应该保证一定的焊接面积，使焊接强度满足要求。

3.2 结构参数分析

主要流道结构参数包括：催化剂床单层板片的厚度 H 、催化剂床流道小孔的直径 d 、相邻两个小孔之间的间距 b 、盲孔的深度 h 。

结构参数分析是以单层板片为研究对象，通过改变结构参数，得出接触面积、流通面积、焊接面积随孔径的变化规律。由于在催化分解中，迎面面积起着关键作用，因此，还分析了迎面面积随结构参数的变化规律。图 2~图 6 分别给出了接触比面积 S_T 、迎面比面积 S_H 、单位床长的接触面积、流通面积 S_F 、焊接比面积 S_W 随流道结构参数的变化规律曲线 (图 2~6 中所有的参数为无量纲化参数)。

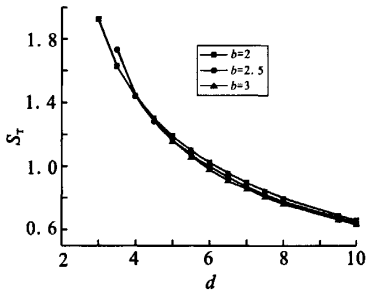


图 2 接触比面积与孔径的关系
Fig.2 Interface area versus orifice diameter

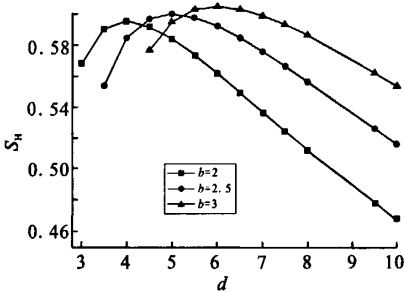


图 3 迎面比面积与孔径的关系
Fig.3 Head-on area versus orifice diameter

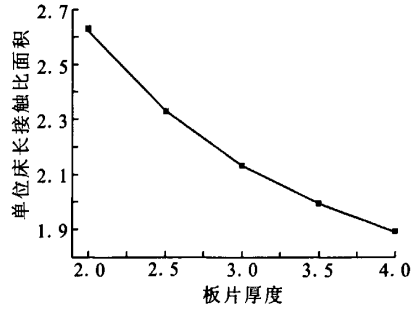


图 4 单位床长接触比面积与板厚的关系
Fig.4 Interface area of unit bed length versus the plate thickness

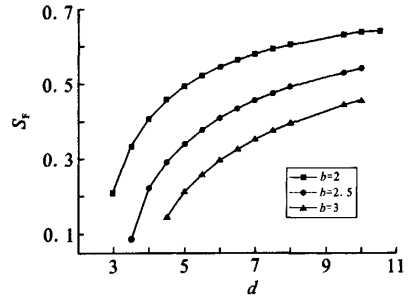


图 5 流通比面积与孔径的关系
Fig.5 Circulating area versus orifice diameter

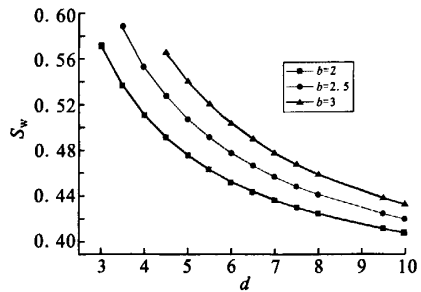


图 6 焊接比面积与孔径的关系
Fig.6 Welding area versus orifice diameter

通过参数分析，可以得到以下结果：

(1) 在其它结构参数不变的情况下，增大孔间距、减小孔径：

- a. 可增大催化接触面积；
- b. 可增大焊接面积；
- c. 相应减少流通面积。

(2) 增加盲孔深度

- a. 可增大流通面积;
- b. 可增大催化接触面积;
- c. 不改变焊接面积。

(3) 减小板片厚度

- a. 单位床长的催化接触面积增大;
- b. 单位床长的板片层数增加, 流道更加曲折;
- c. 不改变焊接面积。

可以看出孔径、孔间距的变化在同时增大接触面积和流通面积的情况下是矛盾的。

3.3 流道结构尺寸确定

根据结构参数分析结果, 并结合光刻工艺和材料现状, 确定了催化剂床流道的结构参数。

3.4 板片材料的选择

板片材料的选择主要考虑光刻、涂镀催化剂的工艺性, 高温条件下板片的刚度等。目前纯镍板的镀银工艺比较成熟, 但由于其刚度不够, 不适合做层板; 不锈钢材料的光刻工艺比较成熟, 但其镀银工艺还有待进一步研究; 因此最终选择了一种镍基不锈钢高温合金作为层板板片材料。

4 加工工艺

层板式催化剂床的主要加工工艺包括: 光刻、镀银、扩散焊。加工层板催化剂床, 对于这三种工艺而言是一种新的挑战, 存在许多有待解决的技术问题。通过大量的试验摸索, 总结出了适合层板催化剂床的加工工艺。图 7 为加工出的层板催化剂床图片。

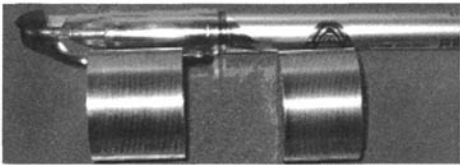


图 7 加工出的层板催化剂床
Fig.7 The platelet catalyst beds

首先, 在光刻工艺中, 解决了厚板刻蚀技术、盲孔刻蚀技术、新材料光刻技术、并摸索出了减少光刻数据量的方法。参照传统的银网镀银

方法, 通过试验摸索确定了镀银厚度、粗糙度等关键参数, 并初步总结出了催化剂的活化方法。扩散焊工艺中, 通过研究解决了银-银扩散焊和银-基本金属扩散焊的技术问题、确定了扩散焊温度、压力、时间、真空度等参数, 并总结出了扩散焊时, 对阻焊剂的涂抹要求和表面清洁度的要求。

5 热试验

5.1 试验系统

为了验证催化剂床的实际工作性能, 对催化剂床进行了热试验。试验系统如图 8 所示。过氧化氢催化分解试验系统由推力室、过氧化氢贮箱、截断阀及其控制电磁阀、吹除阀及其控制电磁阀、主阀及其控制电磁阀、节流圈、相关管路、贮箱增压装置及吹除气源等组成。

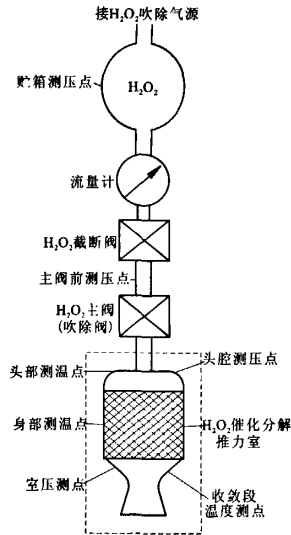


图 8 试验系统简图
Fig.8 The test system

5.2 试验结果

共进行了 3 轮试验, 分别为较长床长高室压试验、较长床长低室压试验和较短床长高室压试验。较长的催化剂床长为 40.3mm, 较短的长为 23mm。试验时, 喷管出口喷出透明气体, 证明分解比较完全。催化剂床试验最高床载 16.5g/(cm²·s),

在此床载下, 分解效率大于 96%, 室压粗糙度小于 2%, 热启动 t_{90} 为 0.03s 左右, 由于试验系统不能满足进行更高床载试验的要求, 未能进行更高床载的试验。图 9 是床载 $16.5\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 时的分解效率曲线。催化剂床在各种工况下, 累计工作时间 455s 以上, 性能没有出现可测下降。图 10 为催化剂床热试验照片。

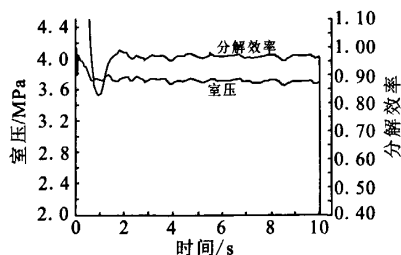


图 9 床载 $16.5\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ 下的分解状况曲线
Fig.9 The decomposition situation at the bed loading of $16.5\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$

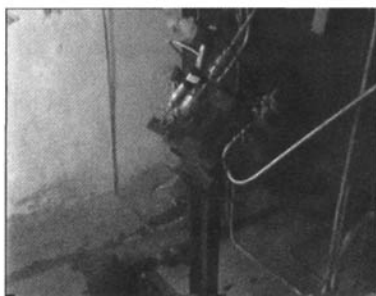


图 10 层板催化剂床热试验
Fig.10 Hot-firing of the platelet catalyst bed

6 结论

整体式层板催化剂床是一种新型催化剂床,

通过分析和试验, 初步验证了整体式层板催化剂床的高性能和可靠性, 得到的主要结论有:

(1) 过氧化氢层板式催化剂床性能良好, 其结构尺寸小、床载高、床参数稳定、整体化装配简单容易, 是过氧化氢催化剂床的一种新的发展趋势, 在工程上具有很大应用前景。

(2) 采用初步优化的方法设计出催化剂床流道结构。经试验证明, 流道设计基本合理。

参考文献:

- [1] 雷娟萍. 过氧化氢层板催化剂床特性研究[D]. 西安: 中国航天科技集团公司六院十一所, 2006.
- [2] Wernimont E, Ventura M, Garboden G, et al. Past and Present Use of Rocket Grade Hydrogen Peroxide[R]. General Kinetics, LLC Aliso Viejo, CA 92656.
- [3] James Ponzio, Small Envelope, High Flux 90% Hydrogen Peroxide Catalyst Bed[R]. AIAA 2003-4622.
- [4] 雷娟萍. 过氧化氢催化剂及其催化剂床技术综述[J]. 火箭推进, 2005, 31(6): 30-34.
- [5] Wernimont Eric J, Dick Durant. Development of a 250 lbfv kerosene-90%hydrogen peroxide thruster[R]. AIAA 2004-4148.
- [6] Wernimont Eric J, Dick Durant. State of the art high performance hydrogen peroxide catalyst beds [R]. AIAA 2004-4147.
- [7] Ahn SangHee, Choi TaeHoon, Krishnan S, Lee Choong-Won. A laboratory scale hydrogen-peroxide rocket-engine facility[R]. AIAA 2003-4647.

(编辑: 陈红霞)