

钢-钢钎焊件冷却通道防堵塞工艺

李 薇

(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

摘 要: 研究了液体火箭发动机推力室扩张段的钎料布局及用量工艺方案, 根据现有设备及生产条件选用正确的钎料, 通过扩张段模拟试验件的钎焊试验, 确定了钎料的用量及分布, 并运用于正式产品的钎焊。经过检测, 未产生钎料堆积及堵塞且符合设计要求的承载能力。

关键词: 液体火箭发动机; 钢-钢钎焊件; 铣槽; 通道堵塞; 液压

中图分类号: V463 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2010) 06-0042-04

Anti-blocking technics of cooling channels of steel-steel brazed components

LI Wei

(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

Abstract: The technique of the solder distribution and quantity for thrust chamber divergent section of liquid rocket engine is discussed. According to the existing equipments and production conditions, proper solder was selected, and its quantity and distribution were determined based on the brazing testing of simulation UUT in the divergent section. The products applying to the above techniques were free of solder accumulation and blocking, and met the designed loading requirement.

Keywords: liquid rocket engine; steel-steel brazed component; milled groove; channel blocking; hydraulic pressure

0 引言

推力室是液体火箭发动机重要的组合件, 在发动机工作过程中承受着较高的工作压力、高温燃气冲刷、大振动等恶劣工况。某推力室扩张段为再生冷却式钢-钢钎焊件结构, 其加工技术难点在于产品铣槽密、通道窄, 易产生钎焊堵塞。

为此, 通过工艺试验研究, 从用料、工艺过程控制等方面采取措施确定出合理可靠的冷却通道焊接工艺方案。

1 扩张段小端钎焊结构及工艺分析

钎焊接头是依靠液态钎料在毛细作用下填充

收稿日期: 2009-11-18; 修回日期: 2010-06-13

作者简介: 李薇 (1977—), 女, 工程师, 研究领域为液体火箭发动机推力室装配焊接技术

钎焊工件之间间隙而形成的。为了得到良好的钎焊接头，钎料必须完全填满钎缝，钎料的填缝作用取决于其毛细管作用。对于间隙很小的两平板母材，液态钎料在母材之间的上升高度由下述公式决定

$$h=\frac{2\sigma\cos\theta}{\rho gD}\tag{1}$$

式中： h 为液态钎料的上升高度； σ 为液相与气相之间的表面张力； ρ 为液体的密度； $\cos\theta$ 为润湿系数； D 为两平板母材之间的间隙； g 为重力加速度。

由公式 (1) 可以看出，在润湿的情况下，随着间隙的减小，液态钎料上升高度增大。因此，钎焊时要使钎料填满间隙，必须在装配时保证小的间隙，这就要求扩张段钎焊件内、外壁贴合良好才能保证钎焊质量。

同时，钎料的用量需根据产品的钎焊面积来确定。在内、外壁配合间隙一定的情况下，如果钎料用量过大，超出钎焊缝所需用量，则熔融钎料填充钎焊间隙后，超出的部分会流向钎焊面以外区域。对于铣槽结构产品，钎焊面（内壁筋顶与外壁接合面）面积由铣槽结构决定，因此，钎料的用量及分布也应根据铣槽结构来确定，钎料过多，多余的熔融钎料会流向铣筋两侧的铣槽中，形成钎料堆积或堵塞铣槽。

扩张段内壁为较厚不锈钢板材，经钣金成型后进行表面铣槽加工，为变槽宽、筋宽结构，其小端具有直径小、铣槽密、通道窄的结构特点，如果钎料的用量与分布不恰当，多余的熔融钎料流向铣筋两侧，即冷却通道，最终将在冷却通道中形成钎料堆积或堵塞，直接导致产品报废。

扩张段内壁铣槽主要分为三段不同形式，由小端向下标记为 A、B、C 三段，其中 B 段又分为上、下两段。

各段筋槽宽度分布如表 1 所示。

由表 1 可知，A 段与 B 段上段筋宽、槽宽都较窄，排列密集，为钎焊过程中易于产生堵塞的部位，因此这两段的钎料用量及分布极为重要。而 C 段槽宽沿轴向逐渐增大，且槽宽最小处大于 A、B 段，因此，不对该段进行防堵塞钎焊试验。

表 1 筋、槽宽度分布

Tab. 1 Width distribution of ribs and grooves

筋、槽宽沿轴向变化		筋、槽宽度沿周向分布
A 段	筋宽不变	筋、槽均匀分布
B 段	上段 筋宽不变	变筋宽与等筋宽筋条相间分布
	下段 宽、窄筋条相间	
C 段	等筋宽，槽宽沿轴向增大	筋、槽均匀分布

2 防堵塞钎焊工艺控制方案

2.1 面积比例系数

由于所选用的钎料为厚度均匀的箔片状，钎料用量可用其面积来表征，因此，钎料用量及分布的确定问题即转化为筋槽钎焊面（即筋顶）面积与钎料面积的比例确定问题。引入面积比例系数的概念如下

$$K=\frac{S_{\text{钎}}}{S_{\text{筋}}}\tag{2}$$

式中： K 为面积比例系数； $S_{\text{钎}}$ 为钎料面积； $S_{\text{筋}}$ 为筋顶面积。由于 $S=l\cdot d$ ，式 (2) 可写为

$$K=\frac{l_{\text{钎}}\cdot d_{\text{钎}}}{l_{\text{筋}}\cdot d_{\text{筋}}}\tag{3}$$

式中： $l_{\text{钎}}$ 为钎料长度； $d_{\text{钎}}$ 为钎料宽度； $l_{\text{筋}}$ 为筋长； $d_{\text{筋}}$ 为筋宽。

根据其他类结构成功的钎料分布经验，充分考虑扩张段的结构特点及承压要求等因素，初步确定， K 在 0.8~1.2 之间选取。

试验件本身的设计应当尽可能体现实际产品的结构特殊性、反映出实际生产的技术难题，同时又要易于加工、具有良好的经济性。

根据以上钎料面积选取原则和模盒试验件结构设计原则，分别按照小推力扩张段内壁不同的铣槽结构设计了与正式产品材料相同、钎焊结构高度仿真的试验件，因其形状如同盒状，称为模盒试验件。进行了等筋宽内壁铣槽和变筋宽内壁铣槽两组模盒试验，两种铣槽结构的单条筋宽则均为等宽度不变。对于等筋宽铣槽结构，为了钎

料点焊操作简化及分布均匀，选取的钎料长度与
筋筋长度相等，即

$$l_{\text{钎}}=l_{\text{筋}} \tag{4}$$

将式 (4) 代入式 (3)，可得

$$K=\frac{d_{\text{钎}}}{d_{\text{筋}}} \tag{5}$$

由式 (5) 可知，钎料用量确定问题进一步转化

为筋宽与钎料宽度比例确定问题。

2.2 钎料用量及分布工艺方案

1) 扩张段内壁小端 A 段

针对扩张段内壁小端 A 段铣槽结构，根据经验范围选取 3 个不同的宽度比例系数 *K*，剪制不同宽度的钎料进行了钎焊工艺试验。钎料用量（宽度）及钎焊质量检测情况见表 2。

表 2 A 段铣槽结构钎料宽度选取试验

Tab. 2 Selection tests of milled groove structures with different solder widths in segment A

K	X 光检查	模盒数量	液压试验	
			承载强度考核	爆破试验
0.8	无堵塞	3	20~40 MPa, 有鼓起变形	未进行
0.9	无堵塞	3	无异常	爆破压力>产品承载要求×2
1.0	少量堵塞	3	未进行	

从表 2 可知，当选取宽度比例系数 *K*=0.9 时，模盒试验件钎焊试验结果最佳：钎焊后进行 X 光检查，冷却通道未见堵塞；进行液压试验，经检查无异常；最后进行液压爆破试验，爆破压力远大于产品承载压力。

2) 扩张段内壁小端 B 段

扩张段内壁小端 B 段铣槽结构为变筋宽与等筋宽筋条相间分布，随不同筋宽剪制不同钎料，共选了 3 个不同宽度比例系数 *K* 进行钎焊试验。钎料用量（宽度）及钎焊质量检测情况见表 3。

表 3 B 段铣槽结构钎料宽度选取试验

Tab. 3 Selection tests of milled groove structures with different solder widths in segment B

K	X 光检查	模盒数量	液压试验	
			承载强度考核	爆破试验
0.8	无堵塞	3	20~40 MPa, 有鼓起变形	未进行
0.9	无堵塞	3	无异常	爆破压力>产品承载要求×2
1.0	少量堵塞	3	未进行	

从表 3 可看出，当选取宽度比例系数 *K*=1.0，钎料宽度等同于各筋宽时，模盒试验件钎焊试验结果最佳：钎焊后进行 X 光检查，冷却通道未见堵塞；进行液压试验，检查无异常；最后进行液压爆破试验，爆破压力远大于产品承载压力。

3 扩张段钎焊工艺试验

通过以上两种规格模盒试验件的钎焊试验，

确定了易于产生钎料堵塞的两段铣槽段的面积比例系数 *K* 值，为了进一步验证所获得 *K* 值的正确性，采用一件扩张段实物进行钎焊工艺试验。

3.1 钎料用量及分布确定

如前述模盒试验分析，认为扩张段小端铣槽段 A、B 段分别取面积比例系数 *K*=0.9，*K*=1.0 来确定钎料用量较为合理。对于 A 段，为等筋宽，直接采用等宽度钎料逐筋点焊即可；对于 B 段，为变筋宽结构，采用分段点焊不同宽度钎焊料，

需保证面积比例系数 $K=1.0$ 。钎料宽度及分布如 表 4 所示。

表 4 扩张段各铣槽段钎料用量及分布
Tab. 4 Solder quantity and distribution of milled groove segments in divergent section

铣槽段	筋、槽宽沿轴向变化		筋、槽宽度沿周向分布	K
A 段	筋宽不变		筋、槽均匀分布	0.9
B 段	上段	筋宽不变	变筋宽与等筋宽筋条	1.0
	下段	宽、窄筋条相间	相间分布	1.0

3.2 试验结果

扩张段试验件钎焊后进行 X 光检查，冷却通道无堵塞。根据设计要求进行液压强度试验，液压强度 20~40 MPa，无变形等异常情况，说明钎焊质量合格，该试验件满足产品设计要求。

通过上述扩张段钎焊工艺试验，将试验确定的各项工艺方案、控制措施等应用于正式产品，目前已完成了多台扩张段的钎焊，所有产品均未发生钎料堵塞现象，液压强度考核合格，经受多次成功试车（包括长程试车）。试车成功的结果证明扩张段质量合格、本文采取的钎焊用量及分布工艺方案正确、防堵塞工艺措施可靠。

4 结论

扩张段钢-钢钎焊件的钎焊重点难题在于满足钎焊强度要求的同时防止小端冷却通道堵塞。通过工艺试验确定了钎料用量及分布工艺方案。扩张段钎焊后进行 X 光检查，冷却通道无堵塞，说明小端铣槽段 A、B 段分别取面积比例系数 $K=0.9$ 和 $K=1.0$ 来确定钎料用量是合理的；产品通过了液压强度试验并经过多次试车考核证实，所确定的钎料用量及分布工艺可以用于正式产品的钎焊工艺生产。

参考文献：

[1] 张贵田. 高压补燃液氧煤油发动机[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.

[2] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2001.

[3] 关桥. 航空制造工程手册 [M]. 北京: 航空工业出版社, 1993.

[4] 邓健. 钎焊[M]. 北京: 机械工业出版社, 1979.

[5] 粟枯, 李培森, 任耀文, 等. 真空钎焊[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.

[6] 梁凯, 戈和伟, 冯胜利. 滑阀分组件真空钎焊工艺性研究[J]. 海军航空工程学院学报. 2006, 21 (5): 566~570.

[7] 李伟民. 液氧/煤油发动机试验系统[J]. 火箭推进, 2005, 31 (6): 54~60.

[8] 徐浩海, 刘站国. 液氧/煤油补燃发动机系统稳定性分析[J]. 火箭推进, 2005, 31 (2): 3~8.

[9] 肖伟, 李宁, 赵兴保, 等. Cr 对 Ni_P 系钎料钎焊不锈钢接头性能的影响[J]. 金属铸锻焊技术, 2009, 38 (23): 16~19.

[10] 陈建华, 张贵田, 夏开红. 液氧煤油发动机高压推力室冷却技术[J]. 宇航学报, 2008, 29 (1): 242~245.

[11] 王轶, 马光, 郑晶, 等. 镍基钎料钎焊不锈钢的钎缝组织及工艺的研究[J]. 金属铸锻焊技术, 2008, 37 (23): 93~95.

(编辑：陈红霞)