

# 轨控发动机不锈钢喷注器扩散钎焊工艺

宋 凡<sup>1</sup>, 周 杰<sup>2</sup>, 徐晓丹<sup>2</sup>, 李思贝<sup>2</sup>, 陈海伟<sup>2</sup>

(1. 上海空间推进研究所, 上海 201112; 2. 上海空间发动机工程技术研究中心, 上海 201112)

**摘 要:**为研制新型轨控发动机所用的喷注器, 对不锈钢环槽多层板进行了扩散钎焊工艺研究。随着焊接温度和保温时间的增加, 焊缝与母材间各元素的扩散程度逐渐加深; 扩散未完全时焊缝由靠近母材的固溶体和中部的化合物组成, 扩散完全时焊缝全部由固溶体组成。中间层内 Ni、Si、B 向母材扩散, 母材内 Fe 向中间层扩散; Ni、Fe、B 扩散速度较快, Si 扩散速度较慢; Si 和 B 的含量决定组织形态, Ni 的含量影响接头强度。接头抗拉性能与扩散程度成正相关, 其极限值已达母材的 101%; 接头断口形貌最初为准解理完全脆断, 随后发展到细韧窝部分塑断, 最终呈现为大韧窝完全塑断。对于 40  $\mu\text{m}$  厚的 B-Ni2 中间层, 最佳焊接温度、保温时间和加载压强分别为 1 050 ~ 1 075  $^{\circ}\text{C}$ 、2 h 和 0.01 ~ 0.02 MPa。最佳工艺参数先后成功应用于模拟件和产品, 焊接的某新型发动机已通过试车考核。

**关键词:**喷注器; 扩散钎焊; 工艺参数; 镍基钎料; 中间层

**中图分类号:** TG456.7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-9374(2021)01-0090-07

## Process of TLP welding of stainless steel injector in orbit-control engine

SONG Fan<sup>1</sup>, ZHOU Jie<sup>2</sup>, XU Xiaodan<sup>2</sup>, LI Sibe<sup>2</sup>, CHEN Haiwei<sup>2</sup>

(1. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Space Engine, Shanghai 201112, China)

**Abstract:** In order to develop the injector for the new orbit-control engine, the process of TLP welding of the stainless steel ring groove multilayer board was studied. With the increase of welding temperature and holding time, the diffusion of elements gradually deepens. When the diffusion is incomplete, the weld is composed of the solid solution in the edge and the compound in the middle. When the diffusion is complete, the weld is entirely composed of the solid solution. The Ni, Si and B gradually decrease, while the Fe gradually increases in the weld. The diffusion rate of Ni, Fe and B is faster, while the rate of Si is slower. The content of Si and B determines the structure, and the content of Ni affects the tensile properties. The tensile properties increase with the degree of diffusion, and the performance of the best joint can reach 101% of the base material. The fracture morphology changed from intergranular complete brittle fracture to partial plastic fracture of small tough dimples, and finally showed complete plastic fracture of

收稿日期: 2020-05-13; 修回日期: 2020-07-06

基金项目: 上海市科学技术委员会资助课题(17DZ2280800)

作者简介: 宋凡(1989—), 男, 硕士, 研究领域为空间推进系统焊接工艺技术。

larger tough dimples. For the B-Ni2 intermediate layer with a thickness of 40  $\mu\text{m}$ , the optimal welding temperature, holding time and loading pressure are 1 050 ~ 1 075  $^{\circ}\text{C}$ , 2 h and 0. 01 ~ 0. 02 MPa, respectively. The best parameters have been successfully applied to simulation parts and products, and a new welded orbit-control engine has passed the test.

**Keywords:** injector; TLP welding; process; Nickel-base solder; intermediate layer

0 引言

空间推进系统的轨控模块主要由双组元发动机组成,该类轨控发动机在结构上可分为喷注器和喷管两部分,其中喷注器为环槽多层板叠焊结构,所用材料为 TC 系钛合金。对于钛合金喷注器的一体化焊接需求,目前采用扩散钎焊方法解决<sup>[1-2]</sup>。扩散钎焊是一种综合钎焊和扩散焊优点的焊接方法,相比纯钎焊,其拥有独特的等温凝固扩散过程,可实现焊缝组织的类母材化,所得接头的性能显著优于纯钎焊接头;相比扩散焊,其加载压力仅为后者的百分之一,不会导致零件焊接变形,从而不影响产品的结构精度<sup>[3-4]</sup>。

随着载人和探月项目的加速开展,大推力轨控发动机的应用需求愈发迫切。新型轨控发动机的喷注器仍采用环槽多层板叠焊结构,但材料换成了不锈钢。由于 Fe 元素的活性远弱于 Ti 元素,且 Fe 的氧化物也极为稳定,因此不锈钢相比钛合金更难实现扩散钎焊。此外,前人研究<sup>[5-12]</sup>多聚焦于中间层成分对比、元素扩散机理和管焊类工业应用,少见航天发动机行业内的应用研究,尤其是层板喷注器结构上的工艺探索,导致行业内缺乏多圈焊缝一次焊合、待焊面焊前处理、薄壁结构受热压变形等方面的经验数据。因此需针对新型轨控发动机喷注器扩散钎焊工艺进行专项研究。

1 实验方法

实验件根据产品结构简化而来,如图 1 所示。零件待焊面的加工状态与产品相同,均为 0. 01 mm

平面度和 3. 2  $\mu\text{m}$  粗糙度。实验件用材为 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢,主要化学成分如表 1 所示。

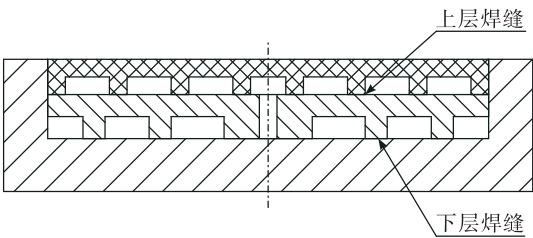


图 1 喷注器实验件结构示意图  
Fig. 1 Structural diagram of the injector experiment piece

相对于固相扩散焊而言,扩散钎焊额外需要中间层以实现瞬时熔化和等温凝固过程。作为扩散钎焊的中间层材料应具备以下特点<sup>[13-14]</sup>:

- 1)熔点比母材低;
- 2)与母材的润湿性好;
- 3)内部降低熔点的元素较易在母材中扩散;
- 4)与母材不形成有害的金属间化合物。

实验采用 B-Ni2 非晶态箔片钎料作为中间层,厚度大约为 40  $\mu\text{m}$  左右。B-Ni2 钎料是一种以 Ni-Cr 固溶体为基体,并与 Si、B、Fe 等元素形成复杂相结构的高温钎料,主要化学成分见表 2,采用差热分析法测得其固/液相线温度分别为 968  $^{\circ}\text{C}$ /986  $^{\circ}\text{C}$ 。

实验设备为华海公司生产的 VBF-150-A 型冷壁式真空钎焊炉,真空度优于  $1. 0 \times 10^{-2}$  Pa,升温速度 15  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ,可炉冷或气冷降温。

对实验件进行清洗(超声 + 酒精)和烘干(80  $^{\circ}\text{C}$  + 1 h),并将中间层固定在两处待焊平面上。

表 1 1Cr18Ni9Ti 不锈钢主要化学成分的质量分数  
Tab. 1 Main chemical composition of 1Cr18Ni9Ti 单位: %

| 元素 | Fe | C      | Cr            | Ni           | Ti          | Si    | Mn    | 其他    |
|----|----|--------|---------------|--------------|-------------|-------|-------|-------|
| 比例 | 余量 | ≤0. 15 | 17. 0 ~ 19. 0 | 8. 0 ~ 11. 0 | 0. 6 ~ 0. 8 | ≤1. 0 | ≤2. 0 | ≤0. 1 |

表 2 钎料主要化学成分的质量分数

Tab. 2 Main chemical composition of solder

单位: %

| 元素   | Ni        | Cr        | Si        | B         | Fe   | 其他 |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|------|----|
| 比例 余 | 6.0 ~ 8.0 | 4.0 ~ 5.0 | 2.7 ~ 3.5 | 2.5 ~ 3.5 | ≤0.6 |    |

按图 1 结构装配实验件,随后在上方安放云母片和金属压块,再从下方用陶瓷片承托并整体置于炉膛内的平台上,最后关闭炉门并开启焊接程序。

## 2 实验结果

扩散钎焊最主要的工艺参数为加载压强、焊接温度和保温时间。确定最佳参数的一般原则如下:

- 1) 母材的晶粒不能明显长大;
- 2) 母材边缘原子充分溶入中间层内,中间层内降熔元素充分扩散入母材边缘<sup>[15]</sup>。

### 2.1 确定最佳焊接温度

原子扩散速率  $D$  与温度  $T$  的关系<sup>[16]</sup>为

$$D = D_0 E^{-Q/RT}$$

式中:  $D_0$  为扩散常数;  $Q$  为扩散激活能;  $R$  为气体常数。

由式(1)可知,温度升高时原子扩散速率加快,即更容易实现充分扩散效果。与此同时,温度升高也会提高金属的塑性变形能力,即焊接面紧密接触的效果更好。但过高的温度会造成液态钎料流动性太好,不符合钎料静置扩散的工艺需要,且高温会造成母材软化,导致零件尺寸精度受损,因此加热温度最好设在中间层液相线上某一特定范围内<sup>[17]</sup>。

在中间层厚度为 40  $\mu\text{m}$  的前提下,将加载压强设置为 0.05 MPa,保温时间设置为 2 h,在 1 000、1 025、1 050、1 075  $^{\circ}\text{C}$  下进行试焊,焊后 4 组接头的显微组织如图 2 所示。

由图 2 可知,当焊接温度为 1 000  $^{\circ}\text{C}$  时,焊缝边缘处的低熔元素向两侧母材内进行了扩散迁移,造成焊缝边缘与焊缝主体的组织形态出现明显差异。但由于此时焊接温度过低,发生扩散的焊缝区域占比很小。当焊接温度增至 1 025  $^{\circ}\text{C}$  时,发生扩散的焊缝区域占比显著增加,但此温度仍不理想,焊缝有近半面积维持钎料的原始组织形态。当焊接温度提高至 1 050  $^{\circ}\text{C}$  时,焊缝中心的未完全扩散相基

本消失,即扩散钎焊效果基本实现。当焊接温度提高至 1 075  $^{\circ}\text{C}$  时,焊缝组织与 1 050  $^{\circ}\text{C}$  时几乎相同。

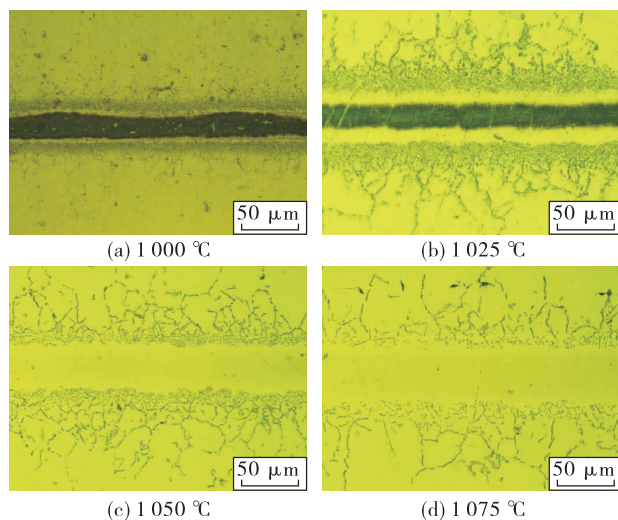


图 2 不同焊接温度下扩散钎焊接头显微组织

Fig. 2 Microstructure of diffusion brazed joints at different welding temperatures

为了探明 1 025  $^{\circ}\text{C}$  和 1 050  $^{\circ}\text{C}$  时扩散钎焊程度的具体差异,对两组接头进行了元素分布线扫描,所得结果如图 3 所示,注意 B 元素由于原子量低而无法测量。对比可知,不仅焊缝元素向母材进行了扩散,母材中的 Fe 和 Cr 元素也向焊缝进行了扩散。随着焊接温度的提高,焊缝内的 Fe、Cr 元素比重增多, Si、Ni 相对比重逐渐下降,最终焊缝由完全的镍基固溶体组织构成。

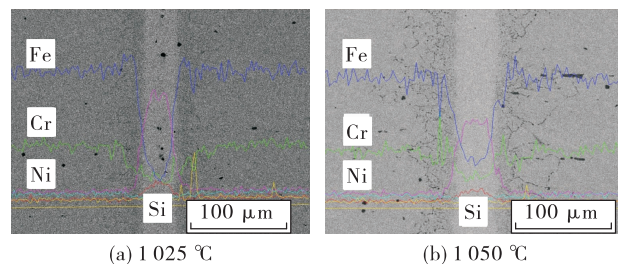


图 3 不同焊接温度下扩散钎焊接头元素线扫描

Fig. 3 Linar scanner of elements in diffusion brazed joints at different welding temperatures

分析认为,中间层中的 Cr 可与 Ni 形成固溶体,提高钎料的再结晶温度,并提高其抗腐蚀性和热强性; Si 也可与 Ni 形成固溶体,且其原子直径较小,能溶于基材中均匀扩散; B 在 Ni 中的溶解度极小,无

法形成固溶体,主要作用是沿母材晶界渗入,起晶界强化作用。此外,Si 和 B 都能使钎料的熔点显著下降,使保温开始时钎料处于液态,随后在扩散离开后使液态焊缝的熔点迅速升高,造就扩散钎焊独有的等温凝固现象。

2.2 确定最佳保温时间

焊接温度只决定了原子的扩散速度,对于不同的速度还需不同的时间才能使特定位置的原子完成扩散<sup>[18]</sup>。

在中间层厚度为 40 μm 的前提下,将加载压强设置为 0.05 MPa,焊接温度设置为 1 050 ℃,在 3 min、0.5、1、2 h 下进行试焊,焊后 4 组接头的典型显微组织如图 4 所示。

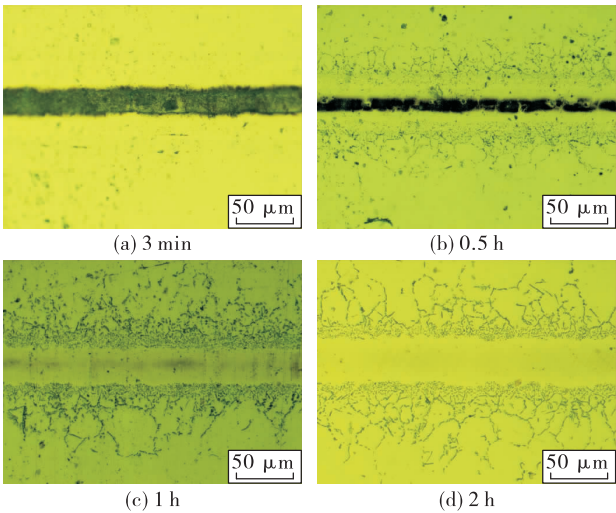


图 4 不同保温时间下扩散钎焊接头显微组织  
Fig. 4 Microstructure of diffusion brazed joints at different holding time

由图 4 可知,对于 40 μm 厚度的 B-Ni2 中间层和 1 050 ℃ 的加热温度,焊缝在 3 min 保温时间下基本未发生扩散,在 0.5 h 保温时间下过半厚度完成了扩散,在 1 h 下勉强完成扩散(焊缝中心尚余极少量未完全扩散相),在 2 h 下实现完全扩散。

为了探明各元素在不同扩散时间下的分布规律,对后 3 组接头进行了元素能谱分析,所得结果如图 5 和表 3 ~ 表 5 所示。

综合对比可知,随着保温时间的延长,焊缝内部相同位置的 Ni、Si 元素含量逐渐减少,Fe 元素含量逐渐增加,而 Cr 元素含量变化很小。定点考察焊

缝中心位置可知,2 h 的 Si 元素的质量分数分别比 1 h 和 0.5 h 少 20% 和 34%,Ni 元素的质量分数分别少 1% 和 11.2%,Fe 元素的质量分数分别多 12.7% 和 62.1%;可见 Ni、Fe 元素扩散速率较快,在 1 h 左右时扩散完成度已较高,而 Si 元素的扩散速率较慢,每小时的扩散程度大体相同。在保温时间较短时,钎缝组织由两部分组成:一部分是靠近母材的固溶体组织;另一部分是位居中部的化合物组织。这是因为钎缝中 B 元素的分布不均匀,在靠近母材的钎缝边缘处,B 元素的含量由于扩散已降低到极限固溶度以下,因此此处呈现固溶体组织。在钎缝中部,扩散路径长,扩散速度慢,该处的 B 元素的含量仍在极限固溶度以上,从而在钎缝中部形成化合物相。

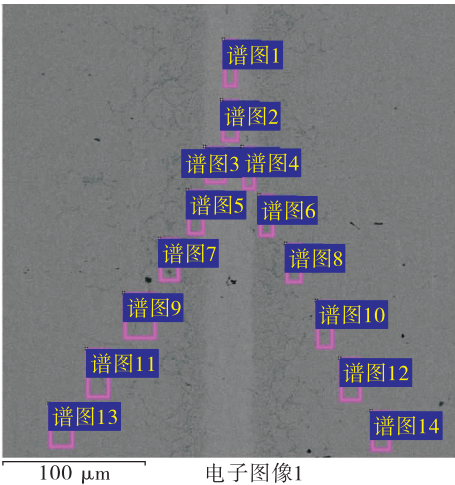


图 5 接头元素能谱分析取样位置示意  
Fig. 5 Sample location of elemental energy spectrum analysis

表 3 0.5 h 扩散接头多区域元素能谱分析结果  
Tab. 3 Elemental energy spectrum analysis results of diffusion brazed joints of 0.5 h

| 谱图 | Ni    | Cr    | Si   | Fe    | Ti   |
|----|-------|-------|------|-------|------|
| 1  | 72.00 | 9.79  | 5.60 | 12.60 | —    |
| 2  | 71.25 | 9.71  | 5.65 | 13.39 | —    |
| 3  | 58.34 | 9.76  | 3.07 | 28.83 | —    |
| 4  | 42.14 | 10.51 | 2.11 | 45.24 | —    |
| 5  | 12.77 | 13.14 | 0.68 | 73.41 | —    |
| 6  | 14.03 | 13.39 | 0.79 | 70.29 | 0.50 |
| 7  | 9.62  | 18.83 | 0.66 | 68.95 | 0.65 |
| 8  | 10.65 | 17.06 | 0.67 | 71.07 | 0.55 |
| 9  | 10.88 | 17.52 | —    | 69.39 | 0.70 |
| 10 | 9.93  | 18.72 | —    | 68.99 | 1.11 |



表 4 1 h 扩散接头多区域元素能谱分析结果

| 谱图 | Ni    | Cr    | Si   | Fe    | Ti   |
|----|-------|-------|------|-------|------|
| 1  | 65.94 | 10.36 | 5.10 | 18.60 | —    |
| 2  | 64.17 | 10.19 | 4.98 | 18.81 | —    |
| 3  | 52.62 | 11.38 | 3.41 | 32.59 | —    |
| 4  | 48.71 | 12.65 | 2.96 | 35.68 | —    |
| 5  | 17.15 | 20.67 | 0.91 | 61.27 | —    |
| 6  | 13.77 | 18.59 | 0.87 | 65.49 | —    |
| 7  | 10.20 | 20.43 | 0.72 | 66.56 | 0.65 |
| 8  | 9.40  | 19.06 | —    | 69.19 | 0.53 |
| 9  | 10.57 | 18.26 | —    | 68.17 | 0.63 |
| 10 | 9.56  | 19.12 | —    | 68.64 | 0.63 |

表 5 2 h 扩散接头多区域元素能谱分析结果

| 谱图 | Ni    | Cr    | Si   | Fe    | Ti   |
|----|-------|-------|------|-------|------|
| 1  | 63.89 | 10.51 | 4.26 | 21.34 | —    |
| 2  | 64.92 | 10.13 | 4.12 | 20.83 | —    |
| 3  | 58.11 | 10.83 | 3.05 | 28.01 | —    |
| 4  | 48.97 | 12.43 | 2.93 | 35.67 | —    |
| 5  | 15.07 | 16.87 | 0.98 | 65.95 | —    |
| 6  | 13.32 | 16.15 | 1.03 | 68.14 | —    |
| 7  | 10.50 | 15.91 | 0.69 | 71.59 | —    |
| 8  | 9.96  | 16.82 | 0.80 | 70.92 | 0.51 |
| 9  | 9.70  | 18.58 | 0.63 | 69.32 | 0.69 |
| 10 | 9.51  | 18.11 | 0.63 | 69.63 | 0.76 |

对不同保温时间的接头进行抗拉性能测试,所得结果如图 6 所示。

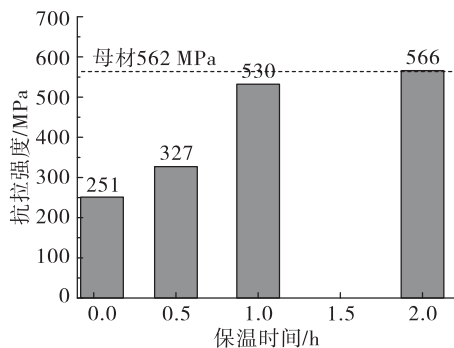


图 6 保温时间对接头抗拉强度的影响规律

Fig. 6 Effect of holding time on joint tensile strength

由图 6 可知,随着保温时间的延长,接头的抗拉性能也随之提高。对于 40  $\mu\text{m}$  厚的 B-Ni2 中间层,保温 1 h 和 2 h 接头的抗拉强度分别达母材实测值的 94.3% 和 101%,证明扩散钎焊的效果非常好。

对断口用扫描电镜进行观察,结果如图 7 所示。

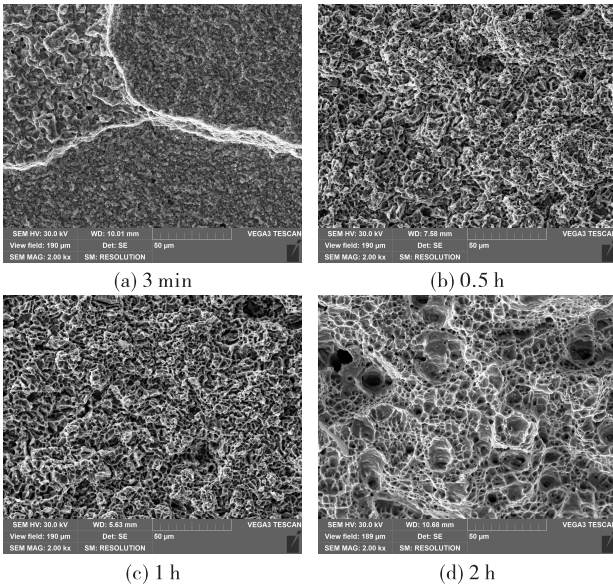


图 7 不同保温时间下的试样断口形貌

Fig. 7 Fracture morphology of samples at different holding time

由图 7 可知,保温 3 min 试样的断口为准解理沿晶的完全脆断形貌;保温 0.5 h 和 1 h 试样的断口为细小韧窝状的部分塑断形貌;保温 2 h 试样的断口为粗大韧窝状的完全塑断形貌。

比较之前 3 种扩散时间下 Ni、Fe、Si 元素含量变化趋势,Ni 在 1 h 和 2 h 下质量分数相差 1%,Fe 相差 12.7%,Si 相差 20%,因此可推断焊缝固体组织中 Ni 元素对接头强度的影响最大,且当其在焊缝中部质量分数比例降至 65% 左右时接头强度即接近极限水平。

2.3 确定最佳加载压强

增大加载压强会使零件接触面发生微观变形,增大紧密接触部分的面积,从而利于原子扩散。但加载压强不能过大,否则容易超过材料在高温下的屈服点,对产品造成不必要的形状尺寸改变<sup>[19-20]</sup>。

将焊接温度设置为 1 050  $^{\circ}\text{C}$ ,保温时间设置为 2 h,在 0.01、0.05、0.09 MPa 下进行试焊,焊后 3 组接头的典型显微组织如图 8 所示。

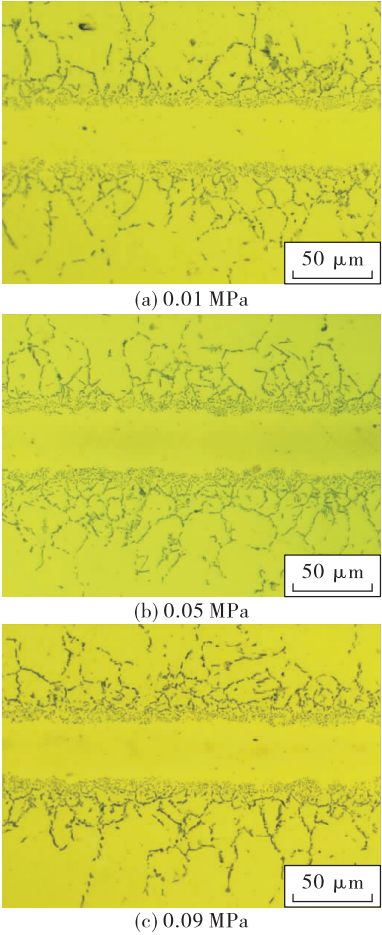


图 8 不同加载压强下扩散钎焊接头显微组织  
Fig. 8 Microstructure of diffusion brazed joints at different loading pressure

由图 8 可知,在压强增大近十倍的过程中,接头组织并无可见的区别,即在最有利于充分扩散的温度和时间规范下,不锈钢扩散钎焊过程可应用的压强范围较宽。考虑到压强越大则零件的热变形程度越大,因此加载压强应设置在稍小的数值范围内,例如 0.01 ~0.02 MPa。

3 产品验证

为了将所得的最佳工艺参数实际应用,按图 9 结构进行了产品模拟件的焊接。

产品模拟件的气密测试和金相分析判定依据为产品技术文件的 I 级要求,具体如表 6 所示。在气密测试中,模拟件焊缝在 5 MPa 气压下历时 15 min 无气泡逸出。将模拟件进行剖切观察焊缝截

面金相,未发现焊缝中有孔洞或未扩散相。

在模拟件焊接实验合格之后,该项焊接工艺技术已应用于某新型号发动机的试制过程,该发动机已通过试车考核。

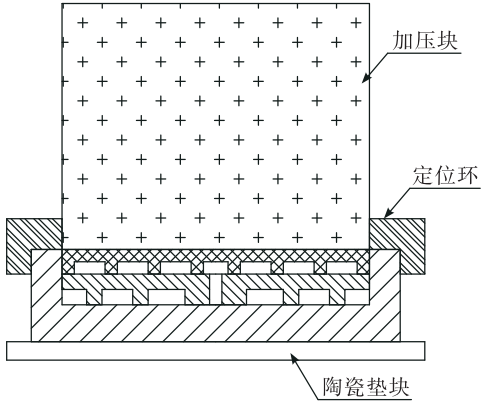


图 9 产品模拟件装焊结构示意图  
Fig. 9 Schematic diagram of assembly and welding of product simulation parts

表 6 产品扩散钎焊接头质量要求  
Tab. 6 Quality requirements of diffusion brazed joints

| 项目 | 气密性能           | 未焊合长度比 | 穿透性缺陷 | 未扩散相 |
|----|----------------|--------|-------|------|
| 指标 | 5 MPa + 15 min | < 10%  | 无     | 无    |

4 结论

1)随着焊接温度和保温时间的增加,焊缝与母材间各元素的扩散程度逐渐加深;扩散未完全时焊缝由靠近母材的固溶体和中部的化合物组成,扩散完全时焊缝全部由固溶体组成。

2)中间层内 Ni、Si、B 向母材扩散,母材内 Fe 向中间层扩散;Ni、Fe、B 扩散速度较快,Si 扩散速度较慢;Si 和 B 的含量决定组织形态,Ni 的含量影响接头强度。

3)接头抗拉性能与扩散程度成正相关,其极限值已达母材的 101%;接头断口形貌最初为准解理完全脆断,随后发展到细韧窝部分塑断,最终呈现为大韧窝完全塑断。

4)对于 40 μm 厚的 B-Ni2 中间层,最佳焊接温度为 1 050 ~1 075 ℃,最佳保温时间为 2 h,最佳加载压强为 0.01 ~0.02 MPa。

## 参考文献:

- [1] 单黎波,金作花,贺云龙,等. 液体火箭发动机钎焊、扩散焊质量检测技术研究[J]. 火箭推进,2009,35(6):47-51.  
SHAN L B, JIN Z H, HE Y L, et al. Testing techniques of brazing and diffusion welding quality of liquid rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2009, 35(6): 47-51.
- [2] 赵鼎,刘琳,孙龙飞. 钛合金夹层结构扩散钎焊工艺研究[J]. 火箭推进,2018,44(1):67-74.  
ZHAO D, LIU L, SUN L F. Study on diffusion brazing process for titanium alloy sandwich structure[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2018, 44(1): 67-74.
- [3] 张贵锋,张建勋,王士元,等. 瞬间液相扩散焊与钎焊主要特点之异同[J]. 焊接学报,2002,23(6):92-96.
- [4] 宫少涛,李为卫,仝都喜,等. 不锈钢的瞬间液相扩散焊研究[J]. 热加工工艺,2009,38(19):120-121.
- [5] 王学刚,闫风洁,严黔,等. 中间层成分对 TP304H 不锈钢瞬间液相连接的影响[J]. 钢铁研究学报,2008,20(4):43-46.
- [6] 张远辉,王非森,张安民. 瞬时液相扩散连接工艺参数及应用研究进展[J]. 热加工工艺,2010,39(9):163-166.
- [7] 袁新建,罗军,唐昆仑,等. 双相不锈钢瞬时液相连接接头的组织结构及等温凝固模拟[J]. 焊接学报,2012,33(12):49-52.
- [8] 井晓天,陈思杰,卢俊峰,等. TP304H/12Cr<sub>1</sub>MoV 异种钢管的瞬间液相扩散连接[J]. 焊接学报,2006,27(2): 97-101.
- [9] 石智华. 瞬时液相扩散焊焊接温度场有限元模拟[J]. 机械制造与自动化,2005,34(4):40-42.
- [10] 郭夏阳,林建平,孙博. 扩散焊技术的研究进展[J]. 热加工工艺,2014,43(17):15-20.
- [11] 陈思杰,王振江,邢增为. 20 钢瞬时液相扩散焊降熔元素的扩散过程研究[J]. 热加工工艺,2008,37(19): 105-107.
- [12] 何鹏,冯吉才,钱乙余,等. 扩散连接接头金属间化合物新相的形成机理[J]. 焊接学报,2001,22(1):53-55.
- [13] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册[M]. 北京:机械工业出版社,2016.
- [14] 方洪渊. 简明钎焊工手册[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [15] 张凌云. 镍基中间层 TLP 焊接的组织转变与扩散行为研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2009.
- [16] 赵熹华. 压力焊[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
- [17] 宋晓国,曹健,冯吉才,等. 连接温度对 GH4169 合金 TLP 接头界面组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报,2012,22(9):2516-2521.
- [18] 岳龙,俞建荣,邓祎楠,等. TLP 焊接工艺对接头界面元素扩散及力学性能的影响[J]. 热加工工艺,2016,45(13):26-28.
- [19] 王海东. 压力在 TLP 焊接过程中的作用[D]. 兰州:兰州理工大学,2011.
- [20] 郭世敬,陈思杰. 瞬时液相扩散焊连接压力的研究[J]. 热加工工艺,2010,39(1):122-123.