

结构钢与锡青铜异种材料扩散焊

邹文江, 程耀永, 陈波, 张元伟, 冯洪亮

(中国航发北京航空材料研究院, 焊接与塑性成形研究所, 北京 100095)

摘要: 采用真空扩散焊的方法实现了 30Cr3MoA 结构钢与 ZQSn10-2-3 锡青铜的连接。测试了不同工艺下接头的抗拉强度, 并通过扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线能谱分析(EDS)观察了接头的微观组织成分。结果表明, 在 820 °C 时所得扩散焊接头质量最佳, 该温度下提高压力和延长保温时间都能提高接头强度, 820 °C/1 h/10 MPa 工艺下所得接头抗拉强度达 294 MPa, 拉伸试样均断于锡青铜母材, 其焊缝为无缺陷的冶金结合, Cu 元素和 Fe 元素互扩散层厚度约为 3 μm。

关键词: 结构钢; 锡青铜; 扩散焊; 性能; 组织
中图分类号: TG445

0 前言

柱塞泵为航空发动机的关键部件之一, 是发动机液压系统的通用构件, 用于国内多个发动机型号当中。柱塞泵是靠成组的滑靴在转子体上均匀分布的柱塞孔里作往复运动而输出高压液流, 油泵工作时, 转子内滑靴与柱塞孔之间、端面与分油盖之间都产生相对的滑动摩擦, 故对转子的分油盘端面和柱塞孔要求具有良好的耐磨性^[1]。目前航空发动机柱塞泵的转子和滑靴是用锡青铜和结构钢扩散焊制成。锡青铜是一种优秀的耐磨材料, 采用此结构, 锡青铜与结构钢组成摩擦副, 摩擦系数小, 耐磨性好, 大大地提高了柱塞泵的润滑性能和使用寿命^[2]。

异种材料的扩散焊, 由于热膨胀系数、弹性模量及热导率等物理性能的差异, 在两者连接过程中会产生较大的残余应力, 影响接头性能^[3]。据统计研究, 在转子生产中, 由于产品本身的要求高、难度大, 产品的合格率波动大, 其中大端面扩散焊容易出现局部未焊合的缺陷^[4]。吴涛等人^[5]在 850 °C/20 min/2 MPa 的工艺参数下实现了锡青铜和钢的扩散焊, 接头强度达到 180 MPa; 王飞等人^[6]在 910 °C 进行扩散焊接实现了 45 钢和铜合金的冶金结合; 但是 ZQSn10-2-3 锡青铜在 850 °C 以上焊接时会产生过烧现象, 这在实际应用中会影响整个柱塞泵的使用性能, 因此需进一步开展结构钢-锡青铜扩散焊工艺的研究。

1 试验材料及方法

试验中所使用的 30Cr3MoA 结构钢和 ZQSn10-2-3 锡青铜的化学成分见表 1 和表 2, 结构钢和锡青铜都加工成 φ50 mm × 38 mm 的圆柱状块材, 用于对接扩散焊。

表 1 30Cr3MoA 结构钢的化学成分(质量分数, %)

C	Mn	Si	Cr	Mo	Fe
0.28 ~ 0.35	0.4 ~ 0.7	0.1 ~ 0.4	3	0.3 ~ 0.5	余量

表 2 ZQSn10-2-3 锡青铜的化学成分(质量分数, %)

Sn	Pb	Ni	Fe	Cu
10	2	3	0.3	余量

试样装配前用 2000 号砂纸对两种母材被焊面进行打磨, 去除表面的氧化膜, 之后将其置于丙酮中进行超声清洗并吹干。然后将装配好的样品置于真空扩散焊炉中, 真空扩散焊炉以 10 °C/min 的加热速度分别升温至 800 °C, 820 °C, 840 °C 和 860 °C, 升温及保温过程中炉内真空度不低于 1.0×10^{-2} Pa, 保温过程对结构钢/锡青铜扩散焊试样分别施加 5 MPa 和 10 MPa 的压力, 保温结束后试样随炉冷却到室温后出炉。测试不同真空扩散焊温度下所得结构钢/锡青铜接头的室温抗拉强度, 并通过扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线能谱分析仪(EDS)分析了钎缝的组织形貌和元素分布。

2 试验结果及讨论

2.1 接头抗拉强度

采用真空扩散焊在不同温度、压力和保温时间下获

得了结构钢/锡青铜扩散焊接试块,从每个试块中取三根标准拉伸试样如图1所示。在室温条件下测量各试样的抗拉强度,所得结果见表3,可以看出,800℃,820℃,840℃和860℃这四种焊接温度下,保温1h压力5MPa时,820℃所得的接头抗拉强度最高,为276MPa。维持820℃温度不变时,增加压力和保温时间都能提高接头的抗拉强度,其中增加压力的提高效果要高于增加保温时间的效果,在820℃/1h/10MPa的工艺条件下结构钢/锡青铜接头抗拉强度最高,达到了294MPa。



图1 结构钢/锡青铜拉伸试样

表3 不同工艺下的结构钢/锡青铜接头抗拉强度

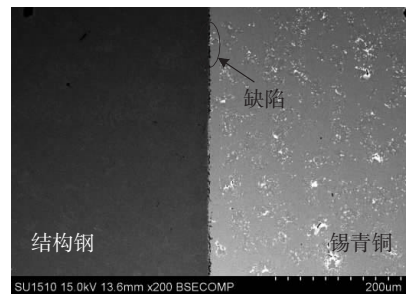
焊接温度 $T/^\circ\text{C}$	保温时间 t/h	焊接压力 R_1/MPa	抗拉强度 R_m/MPa
800	1	5	116
820	1	5	276
840	1	5	236
860	1	5	234
820	1	10	294
820	3	5	281

观察不同工艺下的扩散焊接头的拉伸断口,800℃/1h/5MPa的接头平齐断于扩散焊界面,断面并无韧窝形貌,说明结构钢和锡青铜只是紧密的机械结合,并无冶金结合;840℃/1h/5MPa和860℃/1h/5MPa的接头处明显可见有液相挤出,表明在该温度下锡青铜的低熔点相发生了初熔,断裂处也是在扩散焊的焊缝,但是在结构钢侧粘连下来些许铜母材,证明接头的局部产生了冶金结合;820℃/1h/5MPa和820℃/3h/5MPa的接头断口主要发生在锡青铜母材之上,但是也有断裂于扩散焊界面的现象,而820℃/1h/10MPa的接头全部断裂于锡青铜母材上面,这说明820℃/1h/10MPa工艺下所得接头是强于锡青铜母材的冶金结合。

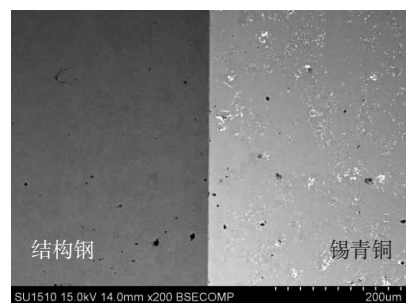
2.2 接头组织及成分

不同焊接温度下所获得的结构钢/锡青铜扩散焊接头微观组织如图2所示,可以看出四种接头都是典

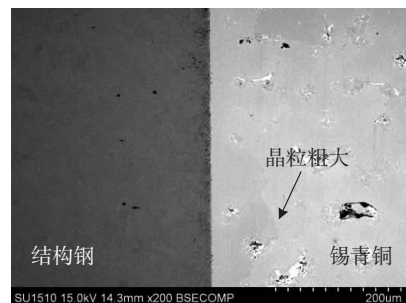
型的扩散焊平直界面,图2a和2d中扩散焊界面存在着不连续的点状缺陷,尤其是图2a中的点状缺陷分布于整个焊缝,这说明结构钢和锡青铜没有实现紧密的结合,其扩散焊接头强度也最低,仅为116MPa。从图2c中可以看出锡青铜中的晶粒要比图2b中明显粗大,这是锡青铜在840℃及以上温度产生初熔所造成的,与前面扩散焊界面有液相挤出的现象一致。图2b中



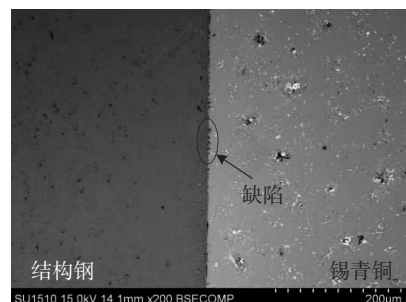
(a) 800℃/1h/5MPa



(b) 820℃/1h/5MPa



(c) 840℃/1h/5MPa



(d) 860℃/1h/5MPa

图2 不同工艺下扩散焊接头的显微组织

扩散焊界面结合良好,无点状缺陷,界面两侧母材在焊接热循环后晶粒尺寸变化不大,因此在以上四种焊接温度中 820 °C 所得的扩散焊接头强度最高。

通过优化保温时间和焊接压力,得出 820 °C/1 h/10 MPa 这一工艺下的扩散焊接头强度最高,图 3 为其扩散焊接头的金相组织,由图中可见,结构钢和锡青铜的扩散焊界面整体平直,局部有互相嵌入的凹凸形貌,在结构钢侧主要包括母材的深灰色相和网状的浅色灰相,在锡青铜侧主要是均一的白灰色相母材。

进一步对图3中的金相组织进行分析,图3中红

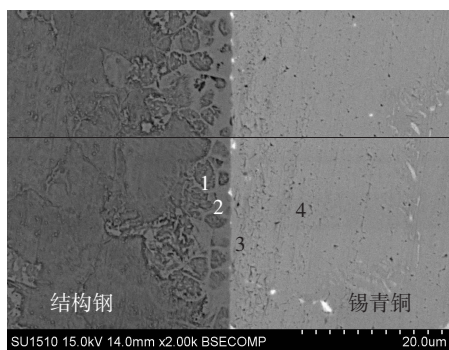


图3 820 °C/1 h/10 MPa 所得扩散焊接头金相显微组织

线处的线扫描结果如图 4 所示,图 4 中虚线处所示为结合面的扩散层,厚度约为 3 μm,其中 Cu 元素和 Fe 元素发生了明显的互扩散,在扩散界面两侧结构钢以 Fe,Cr 为主要元素,锡青铜以 Cu,Sn 为主要元素。

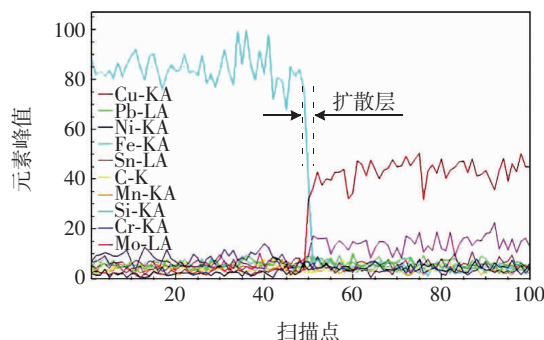


图4 与图3 相对应的线扫描图

表 4 为图 3 中各微区位置的能谱分析结果,通过元素分析可知,1 区和 4 区分别是 30Cr3MoA 结构钢和 ZQSn10-2-3 锡青铜的母材,2 区为钢侧的扩散区,3 区为铜侧的扩散区,钢侧扩散区的 Cu 元素和 Ni 元素含量较高,以网状结构分布于扩散焊界面钢侧;铜侧扩散区富集 Fe 元素和 Mo 元素,与锡青铜母材形成连续相。

表 4 对应图 3 中各特征区域的能谱分析结果

微区	元素含量(原子分数,%)										推测物相
	Fe	Cr	Mo	Mn	Si	C	Cu	Sn	Pb	Ni	
1	94.65	3.06	0.25	0.49	0.59	0.31	0.44	—	0.07	0.13	30Cr3MoA
2	82.39	2.46	0.08	0.57	0.58	—	7.66	0.13	—	6.12	钢侧扩散区
3	6.71	0.23	4.22	0.18	0.65	—	80.75	4.34	0.07	2.84	铜侧扩散区
4	0.21	0.39	—	0.51	—	—	87.2	7.09	2.08	2.52	ZQSn10-2-3

3 结论

(1)通过真空扩散焊的方式实现了结构钢和锡青铜异种材料的连接,820 °C 时所得接头质量最佳。

(2)在 820 °C 下提高压力和延长保温时间都能提高接头强度,820 °C/1 h/10 MPa 工艺下的接头抗拉强度达 294 MPa,其拉伸试样均断于锡青铜母材。

(3)820 °C/1 h/10 MPa 工艺下所得焊缝为无缺陷的冶金结合,Cu 元素和 Fe 元素互扩散层的厚度大约为 3 μm。

参考文献

[1] 张琳娜. 柱塞泵转子毛坯双金属成形工艺方案和模具研究[D]. 贵阳:贵州大学硕士学位论文,2010.
 [2] 侯金保,董宝明,王凯. 锡青铜-合金钢扩散焊技术研究

[C]. 天津:第九次全国焊接会议论文集,1999:180-183.

[3] 赵赫,曹健,冯吉才. TC4/ZQSn10-2-3 直接扩散连接[J]. 焊接学报,2010,31(2):60-62.
 [4] 张军. 转子真空扩散焊工艺研究[J]. 热加工工艺,2015,44(3):205-206.
 [5] 吴涛,田鹏. 铜与钢的异种材料扩散焊接技术[J]. 黑龙江冶金,2007(4):30-32.
 [6] 王飞,田玉清. 铜合金-钢双金属柱塞液压泵转子材料的研制[J]. 粉末冶金工业,2013,23(3):56-60.

第一作者简介: 邹文江,1988 年出生,硕士,工程师;主要从事高温合金、钛合金、不锈钢、钛-铝金属间化合物和陶瓷基复合材料等的钎焊及扩散焊技术研究;已申请专利 13 项,已发表论文 10 余篇。