

铝合金和不锈钢导管高频感应钎焊研究

王奇娟¹ 曲文卿²

(1 北京卫星制造厂,北京 100080)

(2 北京航空航天大学,北京 100083)

文 摘 通过对航天、航空飞行器管路系统常用材料(铝合金和不锈钢)的薄壁、小直径异材管路结构高频感应钎焊工艺试验研究,重点叙述了试验工艺、分析了影响接头质量的主要因素,并观察分析了接头微观组织和元素分布情况。结果表明:采用本试验研究中确认的合理工艺参数(钎料为 Al-Si 钎剂为自制铝钎剂、装配间隙为 0.04~0.1 mm、搭接长度为 3 mm、钎焊电流为 220 A、钎焊时间为 30~33 s)焊接,能够获得质量优良和满足性能要求的不锈钢和铝合金导管钎焊接头,为航天、航空飞行器薄壁、小直径异材管路结构的工程应用提供了技术基础。

关键词 不锈钢,铝合金,导管,感应钎焊

High-Frequency Induction Brazing of Aluminium Alloy and Stainless Steel Tubes

Wang Qijuan Qu Wenqing

(1 Beijing Spacecraft Manufacture Factory, Beijing 100080)

(2 Beihang University, Beijing 100083)

Abstract The experimental study was carried out on the high frequency induction brazing of thin-wall, small-diameter dissimilar metals tubes structure, such as stainless steel and aluminum alloy, which were common metals used in tube system in space technology and aircraft etc. The influence factors on the brazed joint quality were discussed, and the microstructure and the element profile in the brazed joint were observed and analyzed. The results indicated that, by using the optimized parameters (the filler metal is Al-Si alloy filler metal, and the flux is Aluminium brazing flux developed by ourselves, and the brazing clearance is selected from 0.04 mm to 0.1 mm, the lapped length is 3 mm, and the heating current is 220 A, the heating time is 30 - 33 s) in this study, the brazed joint with good quality and property of stainless steel and aluminum alloy is easily obtained. The study can provide the technique base for actual application of thin-wall, small-diameter dissimilar metals tubes structure in space and aircraft technology etc.

Key words Stainless steel, Aluminium alloy, Tube, Induction brazing

1 引言

铝合金和不锈钢在航天、航空、船舶等国防工业领域中广泛应用^[1],航天、航空飞行器已大量应用不锈钢和铝合金导管作为燃料输送管道,但铝合金与不锈钢导管由于需要满足特殊结构性能要求,存在着众多的铝合金和不锈钢导管的连接部件。

目前铝合金与不锈钢之间的连接还是依靠机械连接(如螺接)方式,存在着强度低、结构质量大、胶接产生多余物等缺点。采用常规熔焊方法则存在:

(1)冶金不相容性,界面形成脆性化合物相;(2)由于

热物理性能不匹配产生残余应力;(3)力学性能差异巨大导致连接界面力学失配,产生严重的应力奇异行为。上述问题的存在,使得异种材料连接困难,还影响到接头组织、性能和力学行为,甚至严重影响结构的完整性和可靠性^[2]。而钎焊具有母材不熔化、钎料能够改善因热物理和力学性能差异而产生的应力问题等特点,因而在异种材料连接中广泛应用。

本文通过对不锈钢与铝合金导管的高频感应钎焊工艺研究,主要介绍和分析试验材料、试验设备、试验工艺、接头质量的影响因素以及微观组织成分等。

收稿日期:2007-09-17;修回日期:2007-11-06

作者简介:王奇娟,1972年生,硕士,主要从事先进材料焊接工艺、ISO9000质量体系认证与质量工程工作。E-mail: wangqijuan529@sina.com

2 试验

2.1 材料

采用的材料为: 1Cr18N9Ti 不锈钢、LF21 铝合金, 其物理、化学以及力学性能见表 1~表 3, 可以看出存在较为明显的物理、化学性能差异。

表 1 1Cr18N9Ti(退火状态)和 LF21 的物理性能

Tab 1 Physical properties of 1Cr18N9Ti and LF21

材料	密度 /g·cm ⁻³	熔点 /	沸点 /	线胀系数 /10 ⁻⁶ ·K ⁻¹	电阻率 /10 ⁻⁶ ·cm ⁻¹
1Cr18N9Ti	7.85	1400~1450	2857	17~19.2	69~102
LF21	2.73	643~654	2327	23.2	3.45

表 2 1Cr18N9Ti 和 LF21 主要元素的化学性能

Tab 2 Chemical properties of 1Cr18N9Ti and LF21

元素	原子序数	相对原子质量	原子半径 /nm	晶格类型	原子外层电子数
Fe	26	55.85	0.127	面心立方	2
Al	13	26.98	0.143	面心立方	1

表 3 1Cr18N9Ti(经固溶处理)和 LF21(退火)的力学性能

Tab 3 Mechanical properties of 1Cr18N9Ti and LF21

材料	拉伸强度 /MPa	屈服强度 /MPa	延伸率 /%	硬度 (HB)
1Cr18N9Ti	520	206	40	187
LF21	130	50	20	30

2.2 方法

采用功率为 25 kW、设备频率为 20~50 kHz 感应圈为 4 mm × 1 mm 的纯铜管制成的 SP25 型感应加热进行钎焊工艺试验; 用 10 倍放大镜目视接头钎缝外观质量; 在 CMT5205 型微机控制电子万能试验机上进行接头的力学性能试验; 采用 PH LIPS - 225 型 X 射线机检测接头钎缝内部质量; 采用 ASM142 型真空氦质谱检漏仪检测接头的气密性能; 采用放大倍数为 500 倍的金相显微镜进行接头的微观组织观察; 利用扫描电镜和能谱分析仪进行接头的成分分析。

2.3 试件结构

根据卫星推进系统异材管路结构特点设计如图 1 所示的焊接试件结构。

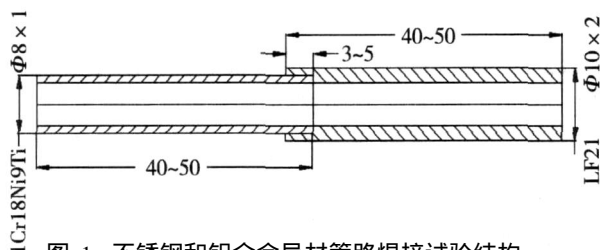


图 1 不锈钢和铝合金异材管路焊接试验结构

Fig 1 Brazing structure of 1Cr18N9Ti and LF21 tubes

2.4 试验过程

(1) 试件焊前清理

对于铝合金, 采用化学清洗方法去除母材表面氧化膜和其他油污。对于不锈钢, 先去除表面的油污, 机械清理母材表面氧化膜, 然后用丙酮将表面擦拭干净。

(2) 试件装配

首先将不锈钢管和铝合金管按照图 1 所示结构进行装配, 然后将钎料绕制成直径为 8 mm 的钎料环, 放置在试件导管搭接处, 最后将钎剂抹在待焊部位。

(3) 试件放置

将装配好的试件放进感应圈的中央, 保证铝合金导管外壁和钎料环的外侧到感应圈的内壁距离相同, 然后关闭加热室。

(4) 试件焊接

向加热室中充入氩气, 启动高频感应加热设备, 对试件感应加热钎焊。

3 结果与分析

3.1 钎焊功率

焊接功率的选择主要遵循在合适的时间内完成钎焊的原则。钎焊功率小, 导致加热温度过低, 钎料熔化不完全, 钎焊接头出现未填满或未焊透等缺陷, 或者导致钎焊时间过长, 钎料填缝能力下降, 甚至造成钎剂失效, 影响接头质量; 钎焊功率大, 导致钎焊时间过短, 工件温度分布不均匀, 甚至母材发生熔化现象等问题, 焊接过程难于控制。

采用 160、180、200、220、250、270 A 等焊接电流进行铝合金与不锈钢高频加热试验, 当焊接电流为 160 A 时, 电流太小, 铝基钎料不熔化; 焊接电流分别为 180、200、220、250、270 A 时的加热时间分别为 50、42、35、23 和 14 s。当焊接电流较小 (如 180 A) 时, 加热时间长, 容易造成试件氧化和钎剂失效, 影响焊接质量; 当焊接电流较大 (如 250 和 270 A) 时, 加热时间短, 铝合金与不锈钢的焊接过程难于控制, 容易出现铝合金母材熔化的现象, 工艺操作性差。因此确定焊接电流为 220~230 A, 钎焊时间 30 s 左右。

3.2 装配间隙

装配间隙是影响钎焊接头质量和强度的重要因素, 装配间隙过大, 首先造成钎焊接头尺寸精度明显下降, 出现内外金属导管不同心, 甚至倾斜偏心, 影响接头质量和性能; 其次, 钎缝处容易出现气孔、未钎透等缺陷; 此外还会影响接头的力学性能。间隙过小, 影响钎料流动。

图 2 给出了搭接长度为 3 mm 时, 装配间隙对铝合金与不锈钢导管高频感应钎焊接头力学性能的影响。可看出, 在搭接长度为 3 mm 情况下, 对于铝合金与不锈钢导管的高频感应钎焊, 随着装配间隙的不

断增大,接头承载能力也相应有所增加,当装配间隙为 0.04~0.1 mm 时,接头力学性能较高,其中尤以 0.1 mm 装配间隙的钎焊接头力学性能最高,达到了 5.54 kN。而随着装配间隙的继续增大,接头承载能力大幅度下降,如装配间隙达到 0.15 mm 时,接头承载能力最低。可见铝合金与不锈钢的高频感应钎焊,装配间隙过大(0.15 mm)或过小(0.02 mm),都会严重影响钎焊接头的力学性能,而当间隙在 0.04~0.1 mm 时,钎焊接头的力学性能较高。说明对于铝合金与不锈钢导管高频感应钎焊,装配间隙 0.04~0.1 mm 是优化的。

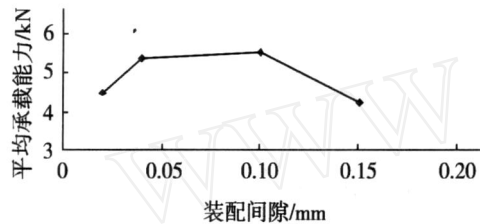


图 2 装配间隙对铝合金与不锈钢钎焊接头力学性能的影响
Fig 2 Effect of lap clearance on mechanical properties of 1Cr18Ni9Ti and LF21 tubes brazing joints

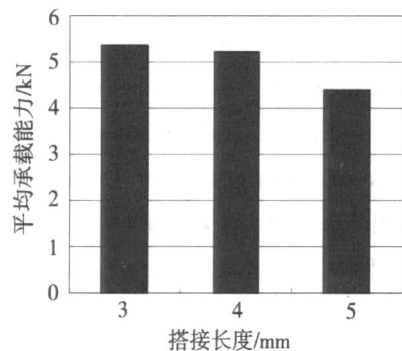


图 3 搭接长度对铝合金与不锈钢钎焊接头力学性能的影响
Fig 3 Effect of lap length on mechanical properties of 1Cr18Ni9Ti and LF21 tubes brazing joints

3.3 搭接长度

图 3 是装配间隙为 0.04 mm 时,搭接长度对铝合金与不锈钢导管高频感应钎焊接头力学性能的影响。可以看出,搭接长度对铝合金与不锈钢、铝合金与钛合金导管高频感应钎焊接头力学性能具有一定的影响,总的趋势是随着搭接长度的减小,接头力学性能有所提高,搭接长度为 3 mm 的接头力学性能较高,达到了 5.25 kN。原因是随着搭接长度的增加,出现缺陷的可能性也增加。在本研究中搭接长度 3 mm 是铝合金与不锈钢导管高频感应钎焊的优化值。

3.4 优化的钎焊工艺参数及实验验证

由试验结果与影响因素分析得知,合理焊接工艺参数为:钎料为 A1-Si,钎剂为铝钎剂,装配间隙为 0.04~0.1 mm,搭接长度为 3 mm,钎焊电流为 220 A,钎焊时间为 30~33 s。在此工艺条件下能够获得质量优良、性能稳定的钎焊接头,对该工艺条件下钎

焊的铝合金与不锈钢导管钎焊接头进行了质量检验、密封性能和力学性能测试。钎焊接头外部质量检测结果表明,未发现钎料未熔化、钎焊漫溢、外部未钎透、溶蚀、外部气孔等缺陷,并且钎缝边缘连续、均匀、圆滑过渡。内部质量未发现直径超过 0.5 mm 的超标气孔和其他缺陷等,说明钎焊接头外部和内部质量达到预定指标要求;钎焊接头拉伸试验结果发现,接头全部在铝合金母材上发生断裂,说明钎焊接头性能与铝合金母材等强;所有钎焊接头的漏率均小于 $1 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$,漏率指标远远高于预定的密封性能指标要求。

4 微观组织与接头区域各元素分布

图 4 给出了合理工艺参数下焊接的接头区域微观组织。

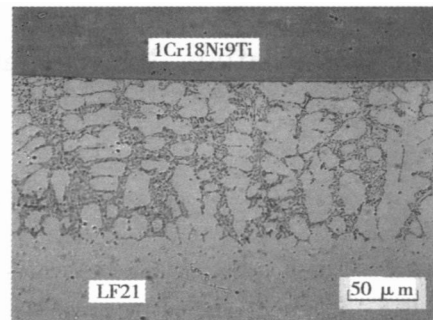


图 4 钎焊接头区域微观组织

Fig 4 Microstructure of brazing joint

可以看出,铝合金与不锈钢母材在钎料的润湿、钎剂的去氧化膜作用下完全连接到一起,形成了一个完整的统一体。钎料与铝合金母材、钎料与不锈钢母材均形成了良好的连接,钎料与铝合金母材之间的反应良好,铝合金与钎料之间过渡均匀。另外从微观组织可以看出,在钎料与母材的交界处没有发现脆性的金属间化合物,这是由于钎焊时间非常短,金属间化合物还来不及形成。图 5 给出了接头区域各元素线分布情况。

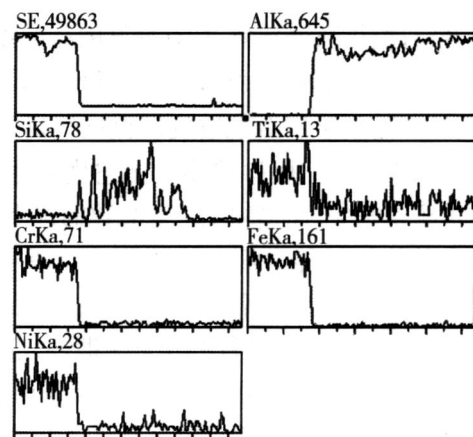


图 5 接头区域各元素的线分布情况

Fig 5 Elements line-distribution of brazing joint

(下转第 56 页)

5 吴静,鲁世强,刘志和等. TC11钛合金的热态变形行为研究. 南昌航空工业学院学报(自然科学版), 2006; 20(2): 29~33

6 朱磊,张麦仓,董建新等. TC11合金本构关系的建立及其在盘件等温锻造工艺设计中的应用. 稀有金属材料与工程, 2006; 35(2): 253~256

7 Semiatin S L, Seetharaman V, Weiss I. Flow behavior and globularization kinetics during hot working of Ti-6Al-4V with a colony alpha microstructure. Materials Science and Engineering A, 1999; 263: 257~271

8 Seshacharyulu T, Medeiros S C, Frazier W G et al. Hot working of commercial Ti-6Al-4V with an equiaxed microstructure: materials modeling considerations. Materials Science and Engineering A, 2000; 284(1~2): 184~194

9 Whittenberger J D. The influence of grain size and composition on slow plastic flow in Fe-Al between 1 100 and 1 400 K. Materials Science and Engineering A, 1986; 77: 103~106

10 Liu Jiantao, Chang Hongbing, Wu Ruiheng et al. Investigation on hot deformation behavior of A ISI Ti high-speed steel

Materials Characterization, 2000; 45(3): 175~186

11 Prasad Y V R K, Seshacharyulu T. Processing maps for hot working of titanium alloys. Materials Science and Engineering A, 1998; 243(1~2): 82~88

12 周军,曾卫东,舒滢等. 应用热加工图研究 TC17合金片状组织球化规律. 稀有金属材料与工程, 2006; 35(2): 265~269

13 Pokler J P, 关德林译. 晶体的高温塑性变形. 大连: 大连理工大学出版社, 1989

14 Weiss I, Semiatin S L. Thermo-mechanical processing of beta titanium alloys-an overview. Materials Science and Engineering A, 1998; 243(1~2): 46~65

15 Medeiros S C, Prasad Y V R K, Frazier W G et al. Microstructural modeling of metadynamic recrystallization in hot working of N 718 superalloy. Materials Science and Engineering A, 2000; 293(1~2): 198~207

(编辑 吴坚)

(上接第 51 页)

沿着不锈钢母材、钎料层、铝合金母材方向扫描的元素分布曲线可以清楚地看出,从直线起始点最先出现的元素是 Fe、Cr、Ni、Ti 元素,显然是 1Cr18Ni9Ti 不锈钢母材;当到达不锈钢与钎料层连接界面后,Fe、Cr、Ni、Ti 元素消失,取而代之的是 Al、Si 两种元素,显而易见该区域为钎料层;当到达钎料层与铝合金连接边界时, Si 元素消失,只剩下 Al 元素,说明是 LF21 铝合金母材。从元素分布情况可以看出,钎料各元素分布均匀,没有出现成分偏析现象,钎料与母材交界处各元素过渡平缓。

5 结论

(1) 实现了铝合金与不锈钢导管的直接钎焊,焊前不锈钢表面不需要任何预先镀敷处理,优化的高频感应钎焊工艺参数为:钎料为 Al-Si 钎剂为自制钎剂、装配间隙为 0.04~0.1 mm、搭接长度为 3 mm、

钎焊电流为 220 A、钎焊时间为 30~33 s,能够获得稳定可靠能满足预定指标要求的钎焊接头质量和性能。

(2) 采用优化的工艺参数进行不锈钢、铝合金薄壁小直径导管的高频感应钎焊,其接头力学性能超过了铝合金导管母材;钎焊接头的单点漏率小于 $1 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$;钎缝边缘连续、均匀、圆滑过渡,接头外部未发现钎料未熔化、钎焊漫溢、外部未钎透、溶蚀、外部气孔等缺陷;接头内部未发现直径超过 0.5 mm 的超标气孔和其他缺陷。

参考文献

1 李亚江等. 异种难焊材料的焊接及应用. 北京:化学工业出版社, 2004

2 王宗杰等. 工程材料焊接技术问答. 北京:机械工业出版社, 2002

(编辑 李洪泉)