航天器异种金属钎焊接头静态裂纹行为分析

曲文卿 卢洁红 庄鸿寿

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 采用高频感应钎焊方法连接了航天推进系统的异种金属(钛合金与不锈钢)薄壁小直径导管结构,结构的质量和性能远远优于螺栓连接的导管结构. 钎焊接头静态拉伸试验发现,银基钎料钎焊的接头承载能力要优于铜基钎料. 对静态拉伸断裂接头的微观组织进行了分析,结果发现,银基钎料钎焊的接头区域出现的裂纹仅在钎缝区域萌生和扩展,当裂纹扩展到钎缝与母材的界面位置时停止扩展. 铜基钎料钎焊的接头区域的裂纹从3个位置萌生:钎缝2种组织的交界处,钎缝与钛合金、不锈钢的界面. 裂纹驱动力主要是由静态拉伸载荷和异种金属钎焊接头失配行为构成的,而裂纹扩展抗力主要与钎焊接头的微观组织有关.

关 键 词: 航天推进系统; 异种金属导管结构; 钎焊; 断裂行为

中图分类号: TG 454

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)02-0142-04

Static tensile crack behavior of brazed joints of dissimilar metals tubes in aerospace system

Qu Wenqing Lu Jiehong Zhuang Hongshou

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The dissimilar metals(such as Titanium alloy and stainless steel) thin-wall small-diameter tube structrues in aerospace propulsion system were bonded, using high frequency induction brazing process. Their qualities and properties are largely superior to the bolt connection tubes structures. The static tensile experiments of the brazed joints were conducted. The results indicate that the mechanical properties of joints brazed using Ag-based filler metals are slightly better than those using Cu-based filler metals. And then the joints microstructures after static tensile experiments were analyzed. It is found that, all the cracks in the joint area brazed by Ag-based filler metals germinate and propagate in the brazing seam, the cracks stop when they propagate on the interfaces between brazing seam and the base metals. The cracks in the joint area brazed by Cu-based filler metals germinate in three locations: the boundary of two phases in the brazing seam, the interface between brazing seam and Titanium alloy, the interface between brazing seam and stainless steel. The crack driving force consistes mainly of the static tensile load and the mismatch behaviour of dissimilar metals brazed joint. And the resistance force of crack extension is related to the microstructures in the brazed joint.

Key words: aerospace propulsion system; dissimilar metals tube structures; brazing; fracture behaviour

航天推进系统的导管承担着输送燃料或冷却介质的功能,对结构的性能、密封、内部质量要求非常高,尤其是对内部多余物很敏感,一旦有异物侵入,将严重影响推进系统的安全. 推进系统导管结构存在大量的异种金属(如钛合金和不锈钢等)导管连接部位,目前的连接方式一般是先将异种金属导管对接安装,然后采用密封物质密封,最后采用螺栓连接方式连接. 这种连接结构存在着质量大、强度和密封性差、生产质量难以保证等缺点,最重要的是容易产生多余物,因此已不能满足现代航天器的长寿命要求. 钎焊方法是最适合异种金属连接的优良方法,采用钎焊方法获得了

收稿日期: 2008-07-20

作者简介: 曲文卿(1972 -),男,山东莱州人,副教授, quwenqing@buaa.edu.cn.

成功的异种金属(钛合金和不锈钢)连接结构[1],接头的力学性能、密封性能、内部质量以及多余物控制等都远远优于传统的螺栓连接方式[2].钎缝是钎焊结构最薄弱的环节,在使用过程中钎缝容易萌生裂纹,且可能发生扩展,从而影响结构的安全和使用寿命.本文重点对钛合金与不锈钢异种金属组合导管结构进行了钎焊试验研究,通过钎焊接头的静态拉伸试验微观观察钛合金与不锈钢钎焊接头断裂裂纹分布状况,并理论分析了裂纹扩展行为.所得结果对于异种金属钎焊连接、结构优化设计以及断裂控制具有重要的参考价值.

1　试验材料及方法

本研究采用的试验材料为 Ti-6Al-4V钛合金和 1Cr18Ni9Ti不锈钢.钛合金与不锈钢均为薄壁、小直径的导管结构,接头形式为插接结构,钛合金作为内插管,外径为 8mm,壁厚为 1mm;不锈钢作为外套管,外径为 10mm,内径为 6mm,插接部位内径为 8mm,插接深度为 4mm,装配间隙为 0.08mm.本研究采用真空高频感应钎焊方法连接钛合金与不锈钢,高频加热设备的频率为 30～50 kHz,加热电流 190A,加热时间为 25 s,真空度为 5×10^{-3}～7×10^{-3} Pa.钎料采用银基钎料和铜基钎料两种.钎焊前用丙酮清洗钛合金和不锈钢导管,去除表面油污.将装配好的试件放入真空室进行高频感应钎焊.钎焊完成后,取出试件,进行质量检测和性能测试.

2　钎焊接头性能

对钛合金与不锈钢异种金属导管的高频感应钎焊接头进行了质量和性能测试.钎焊接头的外部质量采用 5倍放大镜目视检查,结果未发现钎料未熔化、钎焊漫溢、外部未钎透、溶蚀、外部气孔等缺陷,钎缝边缘连续、均匀、圆滑过渡.内部质量采用 X射线检验,结果未发现任何缺陷存在.钎焊接头的密封性能通过氦质谱检漏检验,单点漏率低于 1×10^{-9} Pa/(m^3·s),优于螺栓连接结构密封性能 3个数量级.钎焊接头的力学性能采用静态拉伸试验测试,所有钎焊接头全部从搭接部位的不锈钢母材上断裂,说明获得了质量优良的钎焊接头.其中,采用银基钎料的钎焊接头平均承载能力达到了 17.2 kN,采用铜基钎料的钎焊接头平均承载能力达到了 15.8 kN.

测试结果可见,采用钎焊方法连接钛合金与不锈钢异种金属导管的质量和性能都远远优于螺栓连接结构.螺栓连接的异种金属导管连接区域中钛合金导管和不锈钢导管仅仅是对接后通过螺母连接在一起,导管之间存在间隙,没有形成冶金连接,结构力学性能较低(接头难以从母材发生断裂),导管内部和外部仅仅通过密封物质来密封,导致密封性能差(仅有 1×10^{-6} Pa/(m^3·s)).而钎焊连接的异种金属导管之间形成了冶金连接,并且内外部质量优异,因此密封和力学性能都获得了优良的结果.

钛合金与不锈钢导管钎焊接头静态拉伸试验中发现:尽管所有的钎焊接头全部在不锈钢母材上发生断裂,但是不同钎料钎焊的接头力学性能存在一定的差异,应用银基钎料钎焊的接头力学性能稍高于铜基钎料钎焊的接头.因此需要通过对静态拉伸过的钎焊接头进行微观裂纹行为的分析,并且钎焊区域的裂纹扩展行为可能会影响到整个导管结构在服役过程中的安全性和可靠性.

3　钎焊接头裂纹微观分析

3.1　银基钎料钎焊接头裂纹行为

由于所有钎焊接头在不锈钢母材上发生断裂,因此可以对接头的钎缝区域进行微观分析,观察钎缝区是否有裂纹的存在.

图 1给出了采用银基钎料高频感应钎焊不锈钢与钛合金异种金属导管组合的接头区域微观组织.从图 1看出,在银基钎料钎焊的不锈钢与钛合金异种金属导管接头区域,经历了静态拉伸试验之后,钎缝区出现了明显的裂纹,而钎缝与两侧母材的界面上没有发现裂纹的存在.这说明,钎料与两侧母材的连接界面强度很高,在静载拉伸作用下,界面上裂纹难以萌生,而钎缝强度稍低,在静载拉伸作用下,钎缝区域萌生了裂纹,并且裂纹只在钎缝中扩展.

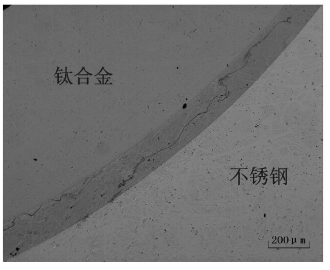

图 1　银基钎料焊接头区域形成的裂纹情况

图 2说明了当裂纹在钎缝中扩展到连接界面时,裂纹停止扩展.说明银基钎料与钛合金、不锈钢母材之间发生了良好的润湿反应,但没有金属间化合物的生成,因此接头的力学性能较高.

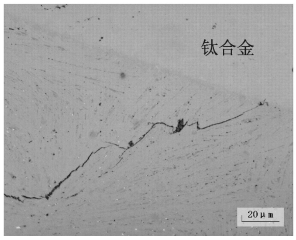

图 2 钎缝区裂纹扩展到钎料与钛合金界面时停止扩展

3.2 铜基钎料钎焊接头裂纹行为

图 3~图 5给出了采用铜基钎料高频感应钎焊不锈钢与钛合金异种金属导管组合的接头区域微观组织.可见,采用铜基钎料钎焊的钛合金与不锈钢导管,经历了静态拉伸试验之后,同样在钎缝区出现了明显的裂纹.图 3表示的是仅在钎缝中扩展的一条裂纹.图 4中出现了 3条不同情况的裂纹,一条最粗大的裂纹在钎缝中萌生后向靠近钛合金的界面上扩展,而另外一条裂纹则在钎缝与不锈钢界面上萌生后向钎料中心部位扩展,第 3条裂纹在钎缝中萌生和扩展,并且几条裂纹之间已经相互扩展到一起.图 5中同样出现了 3条裂纹,呈现了不同的情况.一条裂纹从钎缝与不锈钢界面上萌生后向钎料中心部位扩展,第 2条裂纹同样在钎缝中萌生和扩展,第 3条裂纹则在钎缝与钛合金界面上萌生后向钎料中心部位扩展.

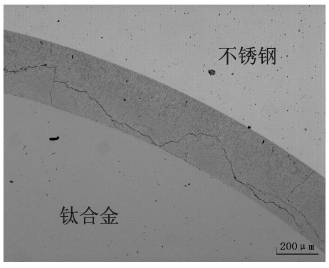

图 3 在铜基钎料钎缝区扩展的裂纹

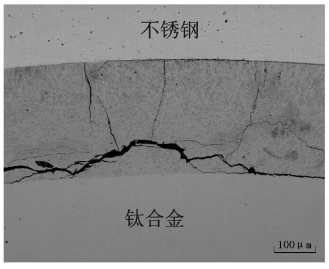

图 4 铜基钎料钎缝区域中扩展到一起的裂纹

从图 3~图 5中还可以发现,裂纹在钎缝中心部位的扩展都是沿着一条大致相同的边界扩展,而这条边界与钎缝中不同的组织有关.图 6显示了裂纹两侧的不同组织.从图 6可以看到,裂纹扩展路径两侧出现了两种不同的组织,裂纹下方的组织呈树枝状从钎缝与不锈钢母材的连接界面

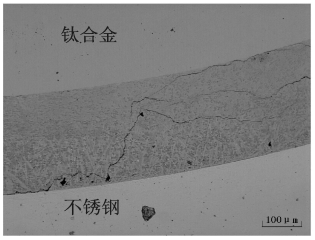

图 5 铜基钎料钎缝区域 3条起裂位置不同的裂纹

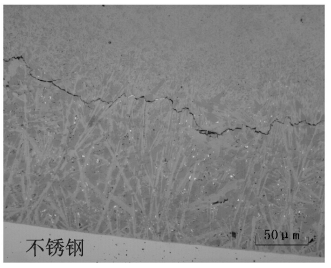

图 6 铜基钎料钎缝区扩展裂纹两侧的不同组织

上生长,而裂纹上方的组织呈细颗粒状,这两种组织的产生显然与钎料和两侧母材的不同冶金反应有关,钎焊结束后,熔化的钎料首先从钛合金和不锈钢母材上结晶形核,然后向钎料中心部位生长,由于钛合金与不锈钢两种材料的热导率不同,因此钎缝形成了两种不同的组织状态.

总体来讲,采用铜基钎料钎焊接头的钎缝区裂纹的萌生有 3种情况:①裂纹在钎缝中心两种不同组织交界处萌生,然后或者在钎缝中心扩展,或者向钎缝与两侧母材的界面扩展,有时还继续在界面上扩展;②裂纹在钎缝与钛合金的界面上萌生,然后或者沿着该界面扩展,或者向钎缝中心扩展;③裂纹在钎缝与不锈钢的界面上萌生,然后沿着界面扩展,或者向钎缝中心扩展.

4 裂纹扩展行为分析

比较两种钎料钎焊接头区域的裂纹可以发现,银基钎料钎焊接头区域的裂纹不是从钎料与两侧母材的连接界面上萌生,而是从钎缝区域萌生,并扩展.而当裂纹扩展到钎缝与母材的界面位置时,裂纹停止扩展.说明银基钎料与钛合金、不锈钢母材之间发生了良好的润湿反应,界面强度很高,在静载拉伸作用下,裂纹难以从界面上产生,并且从图 1和图 2中也可以发现钎料与不锈钢、钛合金两种母材的连接界面上没有金属间化合物的生成.而铜基钎料钎焊接头区域的裂纹不仅从钎缝萌生,而且还从钎料与两侧母材的界面上萌生,然后在钎缝和两个连接界面上扩展.说明尽管铜基钎料与钛合金、不锈钢母材之间的连接界面也没有发现金属间化合物的存在 (图 3~图

6),但是铜基钎料与钛合金、不锈钢母材之间的连接界面强度以及钎缝中两种不同组织的交接面连接强度较差,弱化了接头的力学性能.

裂纹的萌生和扩展行为则是影响异种金属钎焊结构使用寿命的重要因素.因此国外众多研究者对异种金属连接结构中的裂纹扩展行为开展了大量的研究.文献[3]在研究异种材料异材界面结构残余应力场和界面断裂能的基础上,分析了试验所观察到的裂纹的位置方向及轨迹.文献[4]论证了三明治结构中裂纹在两个界面之间交替扩展的机制和条件.文献[5]采用有限元方法对焊缝中心穿透裂纹扩展行为进行了模拟分析,探讨了残余应力产生的裂纹扩展驱动力的影响.文献[6]则讨论了温度、外载对压力容器中裂纹扩展驱动力的影响.研究认为[3-6],界面裂纹发生扩展,是界面裂纹尖端应力应变场直接作用的结果.界面裂纹扩展轨迹变化多端,影响因素复杂,因此至今没有一个统一的描述控制裂纹扩展轨迹的参量.界面裂纹的扩展轨迹是由薄弱的微结构路径对裂纹扩展的抵抗力(主要由材料本身的物理性能决定)以及外载驱动力直接控制的,二者的相互作用决定了裂纹的最终走向.裂纹驱动力本身则是远场载荷与界面结构的弹性失配参数的函数.影响界面裂纹扩展的因素包括裂纹尖端的应力场强度、残余应力、材料性能失配参数、裂纹几何形状及界面结构的断裂韧性等等.

对于钛合金与不锈钢异种金属导管高频感应钎焊接头来讲,在承受静态拉伸作用下,在钎缝区域出现裂纹,其裂纹驱动力主要是由静态拉伸载荷产生的,两种钎料钎焊接接头承载能力差异不大,说明二者裂纹驱动力差异不大.而裂纹扩展抗力主要与钎焊接头的微观组织有关,银基钎料钎焊的接头组织对裂纹扩展的抵抗力较大,而铜基钎料所钎焊的接头中,由于钎料和钛合金、不锈钢发生冶金反应不同、冷却速度不同导致钎缝中产生两种不同组织,这两种组织之间的交接面显然成为裂纹扩展薄弱环节之一;钎缝与钛合金、不锈钢的界面是裂纹扩展的另一个薄弱环节,因此导致钎焊接头区域对裂纹扩展的抵抗力较小,从而出现了几种不同类型的裂纹,最终导致钎焊接头承载能力稍小于银基钎料钎焊的接头.

5　结　论

1) 采用高频感应钎焊方法连接了钛合金与不锈钢异种金属组合的薄壁小直径导管结构,获得了质量和性能优良的钎焊接头,其密封性能远远高于螺栓连接接头,钎焊接头力学性能达到了同尺寸不锈钢导管母材性能.采用高频感应钎焊方法完全可以替代螺栓连接方法.

2) 银基钎料钎焊接头经历了静态拉伸试验之后,钎缝区出现了明显的裂纹,裂纹仅在钎缝区域萌生和扩展,当裂纹扩展到钎缝与母材的界面位置时停止扩展.说明银基钎料与钛合金、不锈钢母材之间发生了良好的冶金反应,并且没有金属间化合物的生成,因此接头的力学性能较高.

3) 铜基钎料钎焊接头的钎缝区裂纹的萌生有3种情况:①裂纹在钎缝中心两种不同组织交界处萌生,然后在钎缝中心扩展,或者向钎缝与两侧母材的界面扩展,有时还继续在界面上扩展;②裂纹在钎缝与钛合金的界面上萌生,然后沿着该界面扩展,或者向钎缝中心扩展;③裂纹在钎缝与不锈钢的界面上萌生,然后沿着界面扩展,或者向钎缝中心扩展.说明铜基钎料与钛合金、不锈钢母材之间的界面强度以及钎缝中两种不同组织的交接面强度较差,因此弱化了接头的力学性能.

参考文献 (References)

[1] 曲文卿, 王奇娟, 庄鸿寿, 等. 异种金属管的真空钎焊[C]//曹春晓. 第六届先进材料技术研讨会论文集(材料工程(增刊)). 北京: 材料工程杂志社, 2002: s295 - s298
Qu Wenqing, Wang Qijuan, Zhuang Hongshou, et al. Vacuum brazing of dissimilar metals tube[C]//Cao Chunxiao. Proceedings of 6th Advanced Material Technique Forum (Journal of Material Engineering (Supplement)). Beijing: Material Engineering Publisher, 2002: s295 - s298 (in Chinese)

[2] 薛忠明,王奇娟,曲文卿,等. 钛合金与不锈钢高频感应钎焊工艺试验研究[J]. 航天制造技术, 2004(6): 31 - 35
Xue Zhongming, Wang Qijuan, Qu Wenqing, et al. Reserch on high-frequency inductive brazing process of different pipeline between Ti-Alloy and stainless steel[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2004(6): 31 - 35 (in Chinese)

[3] Bartlett A, Evans A G, Ruhle M. Residual stress cracking of metal/ceramic bonds[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1991, 39(7): 1579 - 1585

[4] Fleck N A, Hutchinson J W, Suo Z. Crack path selection in a brittle adhesive layer[J]. International Journal of Solids Structures, 1991, 27(13): 1683 - 1703

[5] Smith C, Bouchard J, Goldthorpe R, et al. Fracture margins for growing cracks in weld repairs[C]// Todd J A. Proceedings of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference 2005-Materials and Fabrication. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2005, 6: 371 - 383

[6] Siegele D, Varfolomeyev I, Nagel G. Brittle failure assessment of a PWR-RPV for operating conditions and loss of coolant accident[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, 2008, 130(3): 0314031 - 0314038