

# 铝合金与不锈钢的连接技术

Joining Technology of Aluminum Alloy With Stainless Steel

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 卢杰红 曲文卿 张雷

**[摘要]** 阐述了钎焊、摩擦焊技术在铝合金与不锈钢连接中的应用情况。此外,介绍了液相扩散连接、爆炸焊、超声波焊、表面活化连接等新型连接技术。

**关键词:** 铝合金与不锈钢 连接技术 钎焊 摩擦焊

**[ABSTRACT]** Application of brazing and friction welding technology for joining aluminum alloy with stainless steel are expatiated. Besides, some new joining technologies, including liquid-phase diffusion bonding, explosive welding, ultrasonic welding and surface activated bonding are introduced.

**Keywords:** Aluminum alloy and stainless steel Joining technology Brazing Friction welding

铝合金与不锈钢的连接结构在工业生产和日常生活中都有着非常广泛的应用,如航天推进器的导管结构、热管结构、铝合金与不锈钢筒体结构、高压锅中不锈钢与铝合金锅底结构等。铝合金的比重轻,可以有效减轻结构件的重量;不锈钢则具有较高的强度和出色的抗腐蚀性。铝合金与不锈钢的焊接连接结构综合了2种材料的优点,既节省了材料,又提高了系统结构的可靠性。

但是,无论在热物理性能(如熔点、热导率、线膨胀系数等)方面,还是在材料力学性能方面,铝与不锈钢毕竟是2种存在着巨大差异的材料(见表1),把它们焊接在一起,将产生严重的残余应力。此外,不锈钢中含有铬元素,它和铝的化学性质都非常活泼,在施焊过程中极易氧化;而冶金不相容性又很容易导致脆性化合物的出现。这些都是制约铝合金与不锈钢连接构件应用的重要因素。

尽管传统的机械连接方式(如螺纹连接、铆接、胶接等)不存在以上问题,却会大大增加结构重量,而且在管路连接时,很难保证管路的气密性和内部质量,螺接连接方式还可能造成密封物质对管路输送物质的污染<sup>[1]</sup>。随着固态焊、过渡液相扩散连接等先进焊接技术的发展,人们提出了许多不同的解决方案,铝合金与不锈钢的低缺陷连接技术得以不断进步。本文系统总结了近年来人们在该领域的研究成果。

## 1 铝合金与不锈钢的钎焊

钎焊是一种古老的焊接方法,它是把材料加热到适当的温度,同时将钎料熔化,依靠毛细吸引作用流布于接头的紧密配合面,从而使材料结合的焊接方法<sup>[2]</sup>。由于母材在钎焊过程中并不熔化,大大降低了异种金属的不匹配性。因此,钎焊是连接异种金属最常用的方法。

焊接铝合金与不锈钢所用的钎料通常采用标准的铝硅钎料,其中,Al-12Si被广泛应用<sup>[3]</sup>。由于铝合金与不锈钢表面的氧化膜很坚固,通常的物理去氧化膜的方法并不是很理想。Hamid Reza Faridi博士<sup>[4]</sup>指出:无钎剂超声波钎焊铝合金2024和不锈钢304时,仅仅依靠超声波清除其表面的氧化膜是不够的。因为虽然去除 $Cr_2O_3$ 比 $Al_2O_3$ 容易一些,但是前者在空气中的生成速度是后者的数倍,当 $Cr_2O_3$ 较厚时,利用超声波去除就显得有些差强人意,必须靠去膜能力强的钎剂才有可能获得良好的接头。通常采用氟铝酸钾这类无腐蚀性的钎剂<sup>[5]</sup>;另外,吕学勤等人<sup>[6]</sup>在KCl-LiCl的基础上,对其成分进行调整,降低腐蚀性和成本,使其更适用于铝和不锈钢的钎焊。

铝合金与不锈钢极易形成脆性金属间化合物,采用常规的电阻热作为真空钎焊的热源时,接头区域会出现非常明显的金属间化合物层<sup>[6]</sup>。为了解决这个问题,北京航空航天大学的曲文卿、庄鸿寿在这方面作了深入而细致的研究<sup>[1]</sup>:他们选择Ni为中间层,即在不锈钢表面镀2~4 $\mu m$ 的Ni,镀Ni的好处在于,它不但对Al、

表1 铝与不锈钢的性能比较

材料	熔点 $T_f$ /	热导率 $\lambda$ /	密度 $\rho$ /	线膨胀系数 $\alpha_L$ /	弹性模量 /	泊松比
		$W(m \cdot K)^{-1}$	$(g \cdot cm^{-3})$	$(10^{-6}K^{-1})$	MPa	
纯铝	600	207.7	2.70	24	$7.3 \times 10^4$	0.33
1Cr18Ni9Ti	1450	16.3	7.98	16.6	$1.93 \times 10^5$	0.27

Fe等元素之间形成金属间化合物起到很好的抑制作用,同时提高了钎料的润湿性与流动性,能够获得致密的钎焊接头,得到较高的剪切强度。

吕学勤等人<sup>[7]</sup>采用过渡层钎焊的办法,即在活化的不锈钢表面依次镀Ni、Cu,将LF3和0Cr18Ni9Ti在SXZ-10-12型箱式电阻炉中钎焊,温度设定在540左右,时间为5~10min,得到了强度为30~35MPa的接头。钎缝与镀Cu界面上虽然生成了少量的AlCu<sub>3</sub>,但由于组织不连续,并没有大幅度降低钎缝的剪切强度。

哈尔滨工业大学的何鹏<sup>[8]</sup>在连接纯铝L1与不锈钢1Cr18Ni9Ti时,采用Si作为接触反应钎焊膏,通过钎焊膏与纯铝的接触反应产生Al-Si液相,并依靠反应液相层的阻隔延迟效应,限制了Al<sub>13</sub>Fe<sub>4</sub>、AlFe<sub>3</sub>、AlFe<sub>5</sub>等脆性化合物的大量生成。他认为,脆性层的厚度是可以控制的,只要其厚度不大于10μm,就不会产生明显的接头脆性。

事实上,钎焊时间的长短对接头的强度也有着直接的影响。M Roulin<sup>[9]</sup>做的一系列关于连接纯铝和不锈钢X2CrNi18/9(304L)的钎焊试验表明:在钎焊温度为600℃时,时间不超过10min是最合适的;当钎焊时间大于这个值时,就会导致脆性金属间化合物AlFe<sub>3</sub>超过临界值。曲文卿<sup>[10]</sup>所做的试验研究也证实了这一点:他采用高频感应加热方法,抽真空后加入氩气保护,结果发现钎料与不锈钢之间没有形成金属间化合物,接头的承载能力大大提高,在进行强度实验时,接头从铝合金母材处发生塑性断裂。他认为,其原因是加热时间很短(只有30s左右),金属间化合物还没有来得及生成。

上述研究表明,为了避免或减少铝合金与不锈钢形成脆性金属间化合物,比较有效的措施是:镀中间层;利用Si生成反应液相层;制定合适的钎焊时间。至于更加有效的解决措施,还有待于人们进一步探究。

## 2 铝合金与不锈钢的摩擦焊连接

摩擦焊是以机械能为热源的固相焊接方法,它利用两表面间机械摩擦所产生的热来实现金属的连接。这类焊接方法特别适合于铝合金与其他金属的连接,这是因为固相焊接大大降低了材料因熔化而形成脆性金属间化合物的可能性。

傅莉等人<sup>[11]</sup>采用连续驱动摩擦焊,将防锈铝LF6与抗氢不锈钢HR-2棒材成功地焊合在一起。他们选

取厚度为0.05mm的L6纯铝箔为中间过渡层,延迟了异种金属的直接焊合,减轻或避免了防锈铝中的镁促使焊合区脆性金属间化合物形成和发展的作用;所得焊接接头力学性能达到或超过防锈铝LF6(退火态)标准规定( $\sigma_b$ :270MPa)。

北京航空制造工程研究所的张田仓<sup>[10]</sup>对纯铝L4/不锈钢0Cr18Ni9Ti的惯性摩擦焊做了研究:选用铝包不锈钢的接头,接头形式选用斜接,锥角为90°;经过试验获得了牢固的固相连接接头,通过对接头进行冷热冲击、气密性以及拉力试验,证明纯铝L4/不锈钢0Cr18Ni9Ti惯性摩擦焊接头的各项使用性能指标均达到母材水平。

搅拌摩擦焊(FSW)是一种新型摩擦焊接技术,它依靠高速旋转的搅拌头在两被焊材料连接的边缘产生摩擦热,使接缝处金属产生塑性软化,在挤压的条件下形成焊接接头。Huseyin Uzun和Claudio Dalle Donne等人<sup>[11]</sup>用FSW技术成功地将4mm厚的Al6013与X5CrNi18-10不锈钢平板对接,并对焊缝的微观组织、硬度、疲劳特性进行了研究。他们发现:不锈钢热机械影响区(Thermo-Mechanical Affect Zone, TMAZ)的硬度值远大于焊核区的硬度值;焊核区的硬度值不均匀是由于熔入焊缝的不锈钢金属颗粒大小不一所造成的;接头的疲劳强度比铝合金低了约30%;铝合金与不锈钢元素之间的相互扩散并不是很明显。

S. Fukumoto<sup>[12]</sup>对用搅拌摩擦焊连接Al5052和不锈钢304的微观界面组织进行了观察,首次发现了非晶与金属晶体的层错堆垛,并解释非晶相是在高温的情况下金属合金化和固态反应共同作用的产物。

## 3 其他连接方法

### 3.1 过渡液相扩散连接

过渡液相扩散连接是一种可用于多种合金系统的连接方法,其原理是在母材与中间层之间形成低熔点液相,然后通过溶质原子的扩散发生等温凝固,形成组织均匀的焊缝接头。李红、韩静涛<sup>[13]</sup>利用该法对不锈钢/铝蜂窝夹芯板进行连接:他们以Al-Si合金作为中间层介质,加入适当比例的中间活性剂,在加热温度为610~620℃时,保温时间为5~7min,利用中间层介质的冶金反应产生液相,通过液相与不锈钢、铝2种基体金属的润湿、溶解和相互扩散,界面形成了牢固的冶金结合。经扫描电镜和能谱分析,不锈钢304和铝合金3003蜂窝夹芯板结合界面附近存在较为明显的扩散特征,界面呈镶嵌状互相咬合,没有发

现空洞、裂纹等微观缺陷;界面区由 (A1) 固溶体、Al-S 共晶相和少量 Fe-S-Al 金属间化合物组成,没有 Fe-Al 这样的脆性金属间化合物层形成;采用  $N_2$  保护,减少了金属表面氧化对界面复合的不利影响。

### 3.2 爆炸焊

爆炸焊是实现铝和其他金属焊接的特殊方法,西北有色金属研究院的王宝云等<sup>[14-15]</sup>对纯铝 L2 和不锈钢 316L 的薄壁双合金复合管采用内爆法进行连接。试验结果表明:铝-不锈钢复合管的结合区界面,是平直界面和平直至波形过渡的非稳态波形界面,二者混合出现;结合面附近不锈钢侧有明显硬化现象,而爆炸焊接瞬间温度的提高,消除了铝层由于塑性变形造成的硬化现象;元素在界面扩散主要是 Fe、Cr、Ni 等元素向 Al 层内扩散,铝元素向不锈钢层内扩散量极少,但存在不锈钢微粒进入铝层的现象;铝/不锈钢薄壁复合管的爆炸复合工艺范围狭窄,需要严格控制静态参数,尽量减少 Al-Fe 化合物脆性相的生成量。

### 3.3 超声波焊

超声波焊适合于几乎所有的铝合金和其他金属组合,并且不需要严格的表面清理,适用于丝、箔、片等的搭接接头,焊接功率随工件厚度及硬度的提高呈指数递增<sup>[1]</sup>。Jiromaru Tsujino<sup>[16]</sup>通过该技术,实现了对 6mm 厚的铝合金 5052 与不锈钢 304 平板试样的超声波焊对接。他采用一台 15kHz 的超声波发生器,工艺参数定为:振动幅度 17~27  $\mu\text{m}$ ,对焊接界面的静压力维持在 30MPa,焊接时间 2.0s,电流输出功率 4kW。由于铝合金材质较不锈钢软,在铝合金接头一侧出现轻微毛刺;所得接头强度接近于铝合金的强度,其周边的强度有所提高;焊缝附近的铝合金硬度有所降低,不锈钢一侧有所增加,但是在距焊缝 2mm 处硬度开始下降。

### 3.4 电极放电连接

K Matsugi<sup>[17]</sup>利用电极放电(或称为电火花烧结)连接铝合金 L110 和不锈钢 SUS340 薄片。他通过试验确定,在施加 30MPa 压力时,833K 的温度下加热 0.4~3.6ks,焊合率从 25%到 70%;保温 1.8ks 后,连接界面的剪切强度可以达到 60~68MPa,基本接近于铝合金母材的剪切强度,但是在保温 2.7ks 后,由于脆性相的产生,强度降到 30MPa。通过计算放热当量,认为接头焊合率最大只有 70%,是由于不锈钢片比石墨电极面积大、受热不均匀造成的。

### 3.5 表面活化连接技术

表面活化连接技术(Surface Activated Bonding)是

一种对异种材料进行紧密连接的新型技术,它的理论依据是:当表面清洁的两种固态物质足够接近时,分子之间将产生较强的结合力。Liu Yang 等人<sup>[18]</sup>获得了完好的纯铝和不锈钢 SUS304 接头,接头界面的过渡层约有 10nm 厚,其主要构成除了基体元素(铝、铁)外,还有元素硅和少量的氧化物、碳化物。研究者认为,硅在不锈钢表面的富集,可能是由于不同成分的溅射速率不同造成的;而氧化物、碳化物的出现,则是在溅射气氛中新的界面形成时,吸入了一些残留杂质的缘故。

## 4 结束语

随着生产的不断发展,对铝-不锈钢这类异种材料结构件的需求将更为迫切;而随着科学的不断进步,新型焊接技术也将不断涌现,将实现铝合金与不锈钢的牢固结合。尽管现有用于焊接铝合金与不锈钢的方法可能还有种种缺陷,如:对于铝-不锈钢之间的大面积结构,采用钎焊容易出现夹气、夹渣等缺陷,导致钎缝的致密性较差<sup>[9]</sup>,且容易出现脆性相;摩擦焊在焊接过程中要施加一定的压力,虽然能够把铝与不锈钢形成的少量金属间化合物从缝隙中挤出,但对工件的形状要求严格,装配要求也比较高,且焊接件一般工作在变化的温度场中,接头的韧性差,易于发生开裂;新兴的搅拌摩擦焊一般仅限制在低熔点同种材料的连接<sup>[7]</sup>。但是,随着新技术的发展,通过对传统焊接技术的改进和对表面活化技术等新型连接技术的研究,对这类异种材料的连接问题必将有更多更好的解决办法。

## 参 考 文 献

- [1] 曲文卿. 铝合金同其他金属连接技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2002.
- [2] 美国焊接协会, 焊接手册(第一卷). 清华大学焊接教研室译. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [3] Roulin M, Luster J W, Karadeniz G, et al. Strength and structure of furnace-brazed joints between aluminum and stainless steel. *Weld Journal*, 1999, 78(5): 151.
- [4] Faridi Hamid Reza. Flux-free ultrasonic soldering of aluminum and stainless steel [D]. U.S.A: University of Pierre & Marie Curie, 1988.
- [5] 吕学勤, 杨尚磊, 吴毅雄, 等. 铝合金与不锈钢钎焊用钎剂性能研究. *焊接技术*, 2003 32(4): 45-46.
- [6] 曲文卿, 董峰, 齐志刚, 等. 异种材料的连接, *航天制造技术*, 2006(3): 23-28.

(下转第 93 页)

将热安定性提高 55 (100)。这个计划被称为 JP-8+100 计划。美国经过大量添加剂及其组合试验, 终于研究出了一种理想的添加包, 并于 1994 年在军队试用, 试用相当成功。使用 JP-8+100 燃料的飞机无故障工作时间增加了 3 倍, 提高了飞行出勤率, 减少了飞行事故, 发动机系统结焦问题大大减少。几个月的试用表明节约发动机维修费用 264 美元/飞行小时, 1 年可节约 8000 万美元左右。所以, 美空军在 1998 年前对全球范围内的美空军 F-15 和 F-16 基地均换用 JP-8+100 燃料。JP-8+100 喷气燃料在 F-16 和 F-15 飞机上使用结果表明, 它具有极大的军事和经济效益<sup>[9]</sup>: 可延长飞机无故障工作时间 340%, 提高飞行出勤率 3%, 减少架次故障 1%, 节约人力维修时间近 73%, 减少污垢近 90%, 减少结焦近 50%。还明显减少了燃料在发动机燃料控制装置、主燃烧室喷嘴、管线及加力燃烧室喷雾器/喷雾滤网沉积物和积碳, 对老式发动机而言, 还减少了烟尘和烟垢。

JP-8+100 添加剂包不仅具有上述优良性能, 而且经济效益很好, 每加仑油料最低仅需花费 4~5 美分即可, 并且由于减少了维护时间、日常费用和由于维护时间原因导致的不可飞行时间, 大大节省了开支。目前, 该燃料已作为标准燃料在多种军用飞机上普遍使用。

作为美军于 1992 年制定并开始执行的“先进燃料研究计划”的一部分, JP-900 这种新研发的吸热燃料高热安定性达到了 482。据称各项性能指标符合和超过 JP-8 要求。使用这种燃料可取消发动机再循环燃料系统。据报道, 美国空军与美国宾西法尼亚州能源研究所合作, 研制出的 JP-900, 是一种以煤为原料的高热安定性燃料。该燃料可在 482 的高温下长时间保持稳定而不发生分解。

我国针对喷气燃料热氧化性的研究早期侧重于通过改善炼制工艺来提高热氧化安定性, 对燃料添加剂的研究不够深入。不过目前这种局面已得到改善, 某研究所正在研制的添加剂包在提高喷气燃料热安定性方面取得了较大成绩。

第四代战机的研制和应用对新型热安定性喷气燃料添加剂的研究已成为一种必然。

#### 4 结论

热安定性是喷气燃料的一项重要使用指标, 热安定性对飞机和发动机的工作可靠性、飞机飞行安全及技战术性能的发挥产生很大的影响。因此, 加强对热

安定性的研究对提高航空发动机的使用可靠性和飞机的飞行安全具有十分重要的意义。

#### 参 考 文 献

- [1] 刘济瀛. 中国喷气燃料. 北京: 中国石化出版社, 1991.
- [2] 黎文济, 张智勇. 未来美国军用航空油料发展概论. 北京: 国防工业出版社, 1992.
- [3] Ed Owen, Ed Frame. Implications of JP8+100 for army aviation and ground forces. Fuel Line, 1999, 2: 35-37.

(责编 金卯)

(上接第 83 页)

- [7] 吕学勤, 杨尚磊, 吴毅. 铝合金与不锈钢的过渡层钎焊. 焊接学报, 2006, 25(1): 95-99.
- [8] 何鹏, 冯吉才, 钱乙余. 接触反应法解决铝/不锈钢钎焊的缺陷及脆性. 材料科学与工艺, 2005, 13(13): 82-85.
- [9] 傅莉, 毛信孚, 史学芳. LF6 防锈铝与 HR-2 抗氢不锈钢摩擦焊接. 焊接学报, 2003, 24(1): 9-13.
- [10] 张田仓, 栾国红, 陈沁刚, 等. 纯铝-不锈钢异种材料惯性摩擦焊的研究. 新工艺 新技术 新设备, 1998(3): 33-36.
- [11] Huseyin Uzun, Claudio Dalle Donne, Alberto Argagnotto, et al. Friction stir welding of dissimilar Al 6013-T4 ToX5CrNi18-10 stainless steel. Materials and Design, 2005(26): 41-46.
- [12] Fukumoto S, Tsubakino H, Okita K, et al. Amorphization by friction welding between 5052 aluminum alloy and 304 stainless steel. Scripta Materialia, 2000, 42(8): 807-812.
- [13] 李红, 韩静涛. 不锈钢-铝蜂窝夹芯板的液相扩散连接. 北京科技大学学报, 2006, 28(2): 138-143.
- [14] 王宝云, 马东康, 李争显, 等. 内爆炸法制备铝/不锈钢细长双金属复合管的研究. 焊接, 2005(9): 54-57.
- [15] 王宝云, 马东康, 李争显. 爆炸焊接铝/不锈钢薄壁复合管界面的微观分析. 稀有金属快报, 2006, 25(2): 26-30.
- [16] Jirromaru Tsujino, Kazuaki Hidai, Atsushi Hasegawa. Ultrasonic butt welding of aluminum, aluminum alloy and stainless steel plate specimens. Ultrasonics, 2002(40): 371-374.
- [17] Matsugi K, Wang Y, Hatayama, et al. Application of electric discharge in joining aluminum and stainless steel sheet. Journal of Materials Processing Technology, 135(2003): 75-82.
- [18] Liu Yang, Hosoda Naoe, Suga Tadatama. TEM investigation of the stainless steel/aluminum interface created by the surface activated bonding method. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1997, 121: 519-523.

(责编 晓霏)