

不锈钢及其板翅式换热器钎焊技术

张洪涛 陈怀宁 吴昌忠 林泉洪

(中国科学院金属研究所,沈阳 110016)

文 摘 对不锈钢及其板翅式换热器钎焊技术研究现状作简介,内容包括不锈钢软钎焊、硬钎焊的连接材料选择,不锈钢与陶瓷、钛、铝等异质材料的钎焊技术。阐述了新工艺方法的应用,包括钎焊-热处理一体化、PTLP(partial transient liquid phase)技术、加压钎焊、真空电弧钎焊、大间隙钎焊、真空电子束钎焊、辉光放电钎焊等。最后简要说明了计算机模拟技术在不锈钢钎焊中的应用,介绍了不锈钢板翅式换热器的钎焊现状和待解决的主要问题。

关键词 不锈钢,钎焊,钎料,钎焊工艺,计算机模拟,板翅式换热器

Brazing Technique for Stainless Steels and Stainless Steel Plate-Fin Heat Exchanger

Zhang Hongtao Chen Huaining Wu Changzhong Lin Quanhong

(Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

Abstract This paper introduces briefly the research situation of brazing technique for stainless steels and stainless steel plate-fin heat exchanger, including filler material selection of soldering and brazing, the processes of brazing for stainless steel and its joining with dissimilar materials such as ceramic, titanium, aluminums, etc. Some new processes, such as unification of brazing and heat treatment, PTLP (partial transient liquid phase) brazing, pressure brazing, vacuum arc brazing, large gap brazing, vacuum electron beam brazing, glow discharge brazing, etc are also exhibited. At last, computer simulation on stainless steel brazing and problems to be solved are introduced as well.

Key words Stainless steel, Brazing and soldering, Filler, Brazing processing, Computer simulation, Plate-Fin heat exchanger

1 前言

不锈钢按室温组织可分为四大类:奥氏体不锈钢、铁素体不锈钢、马氏体不锈钢和双相不锈钢。奥氏体不锈钢应用最广,高铬镍钢和高铬锰氮钢均属此类,典型代表为 Cr18Ni8 (SUS304)系列和 SUS316 系列。铁素体不锈钢为含 17% ~ 28% Cr 的高铬钢(中低碳含量,高碳时会变成马氏体型钢),典型代表为 1Cr17 (SUS430)。马氏体不锈钢主要以 Cr13

(SUS410、SUS420)系列的 1Cr13、2Cr13 等简单组成的高铬钢为代表,还有复杂合金化的 Cr12 基的高铬钢如 Cr12Ni2W2MoV 等。在价格昂贵、应用较少但性能更加优越的双相钢(也称复相钢)中,最值得注意的是比例相近的铁素体+奥氏体(+)钢,如 Cr21Ni5Ti00Cr18Ni5Mo3Si2 等。

对于不锈钢的连接,可采用钎焊,也可采用熔化焊方法,但关键要考虑接头的设计和工作条件等情

收稿日期:2004-04-12

作者简介:张洪涛,1976年出生,硕士,主要从事材料连接技术方面的研究工作

况。钎焊是采用比母材熔点低的填充材料作钎料,将焊件和钎料加热到高于钎料熔点、低于母材熔点的温度,借钎料熔化填满母材间的间隙并与母材相互扩散实现连接的焊接方法。不锈钢钎焊广泛应用于航空航天、电子通讯、机械、能源、交通、仪器仪表等领域,如蜂窝结构、火箭发动机燃烧室、换热器等。不锈钢钎焊经过很长时间的研究发展,已基本解决了的诸多基础问题,包括不锈钢表面氧化膜去除、钎料的润湿和铺展、工艺参数对母材和接头性能的影响等。本文就不锈钢的钎焊钎料选择、钎焊工艺的发展作简要介绍。

2 不锈钢软钎焊

不锈钢软钎焊主要用于常温和不受力条件下工作的结构,常用钎料为锡铅钎料,尤以含锡量高的锡铅钎料为宜,如 HL Sn63Pb、HL Sn60Pb、HL Sn50Pb、HL Sn40Pb,这些钎料的润湿性能好。也可选择锡银钎料,如 HL605等。不锈钢的软钎焊,钎剂选择比较关键,必须用活性强的钎剂去除表面氧化膜,一般选用正磷酸水溶液或氯化锌盐酸水溶液^[1]。

近年来,李燕京等人用铅锡钎料对不锈钢进行钎焊时,使用 50%的正磷酸 +乙醇 +少量松香的钎剂,发现钎料润湿、铺展情况和焊后剪切强度等都比采用传统的钎剂提高许多。他们还发现:使用苯胺 +正磷酸 +乙醇 +松香钎剂,漫流面积较大,表面无氧化膜皱折,且较光亮,剪切强度也超过了铅锡钎料^[2]。

3 不锈钢硬钎焊^[1,3-4]

3.1 钎料选择

不锈钢的硬钎焊,钎料的选择是关键,要综合考虑工件使用的可靠性、经济性、工艺性等因素,权衡利弊,做出合理的选择。

3.1.1 银基钎料

在银基钎料中,有一类属于自钎剂钎料,用于在保护气氛下钎焊不锈钢,如 BA_g72CuNiLi,钎料中的Li能保证钎料对不锈钢的润湿。若在真空下钎焊,可采用 BA_g72、BA_g50Cu和 BA_g60CuSn等不含易挥发元素的钎料,为了保证钎料的润湿,母材表面应预先镀铜或镀镍。采用 Ag - Cu - Pd钎料(SCP系列)钎焊时,由于该类钎料的良好润湿性,能在较低温度不用镀铜或镍的情况下和不锈钢表面很好地润湿。

BA_g40CuZnCdNi、BA_g45CuZnCd、BA_g50CuZnCd、
宇航材料工艺 2005年 第4期

BA_g56CuZnSn、BA_g50CuSnNi等钎料可钎焊马氏体型不锈钢如 1Cr13、2Cr13等。应注意的是,钎焊温度应低于 700 ,因为母材温度过高会发生软化。另外 Ag - Cu - Zn钎料的高温性能较差,一般用来钎焊 300 以下工作的焊件,而 Ag - Cu - Zn - Cd钎料高温性能较好。

采用 BA_g50CuZnCdNi (3% Ni)和 BA_g - 22 (63Ag - 28.5Cu - 6Sn - 2.5Ni)钎料钎焊 1Cr17钢时,由于镍的作用,在焊缝和母材之间形成了明显的过渡层,电极电位的过渡比较平缓,接头的抗腐蚀性较高。而不含镍的银基钎料焊接 1Cr17铁素体钢容易引起界面腐蚀,这种腐蚀是由于钎料与母材的电极电位不同,在潮湿空气和水中形成的一种电化学腐蚀,选择钎料要特别注意。

3.1.2 铜基钎料

纯铜作钎料时主要用于钎焊 1Cr18Ni9Ti不锈钢,采用氢或分解氨作保护气体,气体露点低于 -40 ,以保证钎料的润湿。

黄铜虽然也可作钎料,但容易引起不锈钢母材发生自裂倾向,焊前必须消除材料本身存在的内应力,钎焊时也应采用造成热应力较小的方法,减少接头的刚性,使接头在加热时能自由伸缩。此外黄铜钎料的高温强度和蠕变强度比较低,且钎料的氧化也很严重,不适合在较高温度工作的焊件。若不锈钢在高温工作,可采用高温铜基钎料,但也应特别注意不同铜基钎料的特点,如 HLCuNi30 - 2 - 0.2钎料钎焊时温度高,不锈钢的晶粒明显长大,钎料向母材的晶间渗入度大(最大为 0.17 mm)。而 Cu69NiMnCoSB钎焊温度较低,不会发生晶粒长大现象,而且该种钎料向母材的晶间渗入度小,最大为 0.03 mm。高温铜基钎料可用火焰、感应加热等方法钎焊。要根据工作条件和工艺特点合理的选用钎料。

另一种铜基钎料 Cu59MnCo钎焊 1Cr13不锈钢,接头强度较高,抗氧化性强、钎料对母材的溶蚀小,可用来焊薄件,并与马氏体不锈钢的淬火温度相适应,工作温度可达 500 以上。但这类钎料含 Mn 较高,而 Mn易挥发、氧化,故不适合用火焰钎焊和真空钎焊。

应注意黄铜以及铜基钎料不适用于在含氨介质环境中使用的钎焊接头。

3.1.3 锰基钎料

虽然高温铜基钎料比黄铜和银基钎料更适合高温工作的要求,但它们要求工作温度也仅在 400 ~ 600 之间,对于工作温度高于 600 时,可采用锰基钎料。

BMn70Ni25Cr5 钎料有良好的润湿性和填隙能力,对母材的溶蚀小,可满足于较薄的不锈钢波纹板夹层结构换热器的低真空钎焊,可用于 600 ~ 700 场合。而 BMn40NiFeCo 钎料,由于改变了 Mn 与 Ni 的比例,还添加了少量的 Co,钎料的熔化温度有所上升,容易在钎焊过程中引起不锈钢晶粒长大。此类钎料的流动性较 BMn70Ni25Cr5 低,易于控制。对于更高工作温度的薄件钎焊,可选择 Mn68NiCo 钎料。

Mn - Ni - Co - B 钎料的熔点较低,钎焊温度在 1060 左右,不锈钢晶粒不长大,钎焊 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的拉伸强度和 HLCuNi30 - 2 - 0.2 钎料钎焊的相近,但钎料向母材的晶间渗入深度小、在不锈钢上的铺展性差,如 BMn65NiCoFeB 钎料,只适用于钎焊毛细管等易被钎料填充的场合,或用于大间隙钎焊。

3.1.4 镍基钎料

镍基钎料适于钎焊更高温度工作的焊件。采用 BNi - 1、BNi - 2、BNi - 5 钎料钎焊 1Cr18Ni11Nb 不锈钢时,间隙的大小对接头的质量影响很大。当间隙大于 0.05 mm 时,接头的强度和塑性急剧下降;间隙达 0.1 mm 时,接头的塑性接近于零^[3]。这主要是因为随着间隙的增大,接头中的脆性相增多。BNi74Cr5B 钎料钎焊 1Cr13,即使接头间隙为零,焊缝中仍然存在少量脆性相,使拉伸强度下降。比较而言,采用 BNi - 2 (BNi82Cr5B) 的钎焊间隙较大,通过适当提高钎焊温度和保温时间,有利于增加不出现脆性相的最大间隙 (0.02 ~ 0.09 mm)。BNi - 2 的常用钎焊温度为 1010 ~ 1175,并可做成非晶态。Ni 基钎料中熔化温度最低、流动性最好的是 BNi89P、BNi76CrP,它们在 900 左右熔化,因不含 B 元素,适用于薄件焊接。应指出 BNi66MnSiCu 钎料和 BNi76CrP 钎料相似,但较脆。由于含铜和锰,腐蚀性和抗氧化性比 BNi76CrP 差。

镍基钎料的组织中大都含有大量的非常脆的金属间化合物,因此镍基钎料通常是以粉状、粘带和非

晶箔状供应。非晶钎料和非晶态预晶化处理后,其中的杂质和气体含量远小于晶态钎料,钎料的润湿性比晶态钎料和粘带钎料润湿效果好,对母材的溶蚀性也较小,成分均匀。最近 A. RAB NKN 等人研制的 Ni - Cr - B - Si 系列非晶态钎料焊接奥氏体不锈钢取得较好效果。接头在海水、氨水溶液及磷酸水溶液中有很高的耐蚀性,该钎料已成功用于钎焊大型的有耐蚀要求的板翅式不锈钢换热器^[5]。

3.1.5 金属钎料

钎焊不锈钢所用的贵金属钎料主要是金基和含钯钎料。金基钎料可用来钎焊首饰,也广泛应用于电子工业、核工业、航空航天等领域。Au - 17.5Ni 钎料钎焊 1Cr18Ni11Nb 不锈钢,不会发生晶粒长大现象,对间隙大小不敏感,且没有向不锈钢晶间渗入的现象,对母材的溶蚀也不大,可以焊接薄件。钎焊马氏体不锈钢,可使淬火和钎焊过程结合起来^[3]。钎料可工作到 649 以上,疲劳强度很高,达 206 MPa,且对接头间隙变化要求不严,这主要是因为金镍钎料中不含脆性相的缘故。

含钯钎料是在银铜合金和银锰合金基础上加入钯而成,延性好且溶蚀作用小,没有向母材晶间渗入的倾向,因此 BA_g54CuPd 具有和 Au - 17.5Ni 相似的特性,而且价格相对便宜,有取代 Au - 17.5Ni 的趋势。银锰钯钎料的特点是蠕变强度高,工作温度可达 600 ~ 800。NMP1 钎料的剪切强度相当高,尤其是对熔融碱金属的侵蚀很稳定。

3.1.6 含铅钎料

含铅钎料的优点是良好的润湿性和流动性,蒸气压低,接头强度高,对基体的溶蚀小,主要应用于高温工艺装置、电真空和宇航工业部门不锈钢零件的钎焊。

目前开发出一个系列适于不锈钢钎焊的钎料合金,主要有 Pb - Cu 基和 Pb - Ni 基,并就各种钎料合金的接头强度和抗蠕变疲劳性进行了大量试验^[6]。

3.2 不锈钢与异质材料的钎焊

在不锈钢的使用过程中,考虑耐蚀、耐热、抗氧化等功能需要,常常涉及到不锈钢与异质材料的钎焊,如与异质金属或陶瓷的钎焊。

3.2.1 不锈钢与异质金属材料的钎焊

近年来,具有很好热强性及耐蚀性的不锈钢和

低密度的铜或铝合金相结合的产品得到越来越广泛的应用,由于它们之间的熔点、线膨胀系数、比热容等物理参数相差较大,在焊接过程中产生很大的热应力。此外,由于难溶氧化物的存在给钎焊带来了更大的麻烦。针对这些问题国内外研究人员给予大

力关注,如山东大学的 Liu peng等人就不锈钢和铝的钎焊作了深入研究,材料见表 1。真空中钎焊,先加热到 630、保温 10 min,可得到非常优秀的接头^[7]。

表 1 材料的化学成分
Tab 1 Chemical composition of materials % (质量分数)

材料	Al	Cu	Fe	Si	Mn	Mg	C	Cr	Ni	Ti
Al1060	99.6	0.05	0.35	0.25	0.03	0.05	-	-	-	-
1Cr18Ni9Ti	-	-	其余	1.0	2.0	-	0.12	17.0~19.0	8.0~11.0	0.5~0.8
Al-Si钎料	其余	3.4	-	9.15	-	-	-	-	-	-

另外,不锈钢与钛之间高质量的结合,在极端苛刻的条件下如高温环境、腐蚀环境等表现出优良的性能,已经系统地用于航空工业、电子工业及化学精炼工业。P. R. C. CAMARCO等对钛与 304 不锈钢的钎焊进行了探讨,发现共晶成分的钎料 Ag-28Cu比 Ag-46Cu要好些。钎焊温度为 1133 K,保温时间限制在 15 min^[8],此工艺下获得了良好接头组织和性能。

3.2.2 不锈钢与陶瓷的钎焊

陶瓷的高电阻率和高抗腐蚀性以及耐高温氧化性等性能越来越受到人们的关注,正在被广泛应用到核设备、电子、化工及航空航天领域。由于陶瓷塑性低、脆性大,一般很少单独使用,要发挥陶瓷优点,必须将之与金属相复合,使二者性能互补。但是,陶瓷的物理化学性能与金属有太多的不同,所以陶瓷与金属的连接就成了具有挑战性的问题。J. X. Zhang等人研究了 Al₂O₃陶瓷与 SUS304的钎焊,采用 80Ni20Cr作钎料,在 1300 钎焊,取得了满意结果^[9]。另外,包括 Abdulrahman Abed在内的很多人研究了陶瓷与不锈钢的钎焊特点,发现 Cu-Ag共晶钎料不能很好润湿陶瓷,加入少量 Ti之后,就能很好润湿并实现连接。In也具有同样的效果,在 950 进行钎焊,接头强度高^[10]。

3.3 钎焊工艺

不锈钢可采用任何一种钎焊方法进行钎焊。人们大量地采用受控气氛钎焊不锈钢,这种钎焊方法的成功归功于可靠的保护气体和真空炉的发展。对不锈钢钎焊设备的主要要求是,炉子必须具有良好

的温度控制(钎焊温度的偏差要求达到 ±6),并能快速加热和加速冷却;在受控气氛炉中应用的一切气体必须是高纯度的。工业用真空钎焊设备的工作真空度要求在 1.33 × 10⁻³ ~ 13.3 Pa之间。对真空度的要求取决于被焊材料、所用钎料、钎焊接合面积、钎焊过程中基体金属释放气体的多少以及设备的渗漏速度等^[4,11]。

目前发展了一种加压钎焊工艺,如用镍基钎料钎焊不锈钢,可顺利实现“零”间隙装配。增大钎焊压力,除增加拘束强化作用之外,还能促进焊缝中碳、硼、硅,特别是硅元素的扩散,从而抑制焊缝脆性相和提高钎焊接头强度。但压力不能过高,当钎焊压力过高时,会使界面区硅、钛含量升高而生成 C₃S₂Si和 TiC₂脆性化合物,使接头强度降低^[12]。

随着真空加热设备的发展,近年来出现了一种经济实用的钎焊-热处理联合工艺,即真空钎焊与真空热处理一体化工艺。该工艺不仅能赋予接头与母材几乎相同的力学性能,并且还可使部件受热均匀,将变形、有害气体的影响等减少到最低限度,不用焊后处理就可保持光亮的表面。沈阳工业学院的刘红等曾深入研究了马氏体真空钎焊与热处理一体化工艺^[13]。

1990年, Y L tno基于陶瓷-金属活性钎焊的研究结果和 Ni基耐热合金 TLP连接的原理,提出 PILP(partial transient liquid phase)技术。在这种连接方法中,借助微观设计的多层中间层,通过低熔点金属层的熔化或多层材料之间的相互扩散和反应,仅在靠近陶瓷表面处形成局部液相区,起到钎料的

作用,在随后的连接过程中,液相区发生等温凝固和固相成分均匀化,从而使焊接接头又具有固相扩散连接接头的特性。Y Imo的报道,立即引起了许多人的重视,纷纷开始致力于这项研究工作^[14]。此方法广泛地用于钎焊同质和异质材料,当然也可应用于不锈钢的钎焊领域。如 J. X. Zhang等人研究了 Al_2O_3 陶瓷与 SUS304的 PTLP钎焊,效果很好^[15]。

炉中钎焊工艺对加热和保温过程的要求十分严格,稍有不慎,可能造成晶粒的长大,影响母材和焊缝的性能。但是,感应钎焊加热速率超过 100 K/s,可大大减小母材性能的恶化。Wu Xiaowei等人用感应钎焊研究了 X-750与 SUS304的钎焊,发现:在 1423 K感应钎焊,剪切强度达 483 MPa,晶粒长大现象不明显^[16],为这些材料应用在核电站和汽轮机涡轮中提供了保证。

航空发动机的生产和维修越来越多用到大间隙不锈钢的钎焊。航空发动机大多采用钎焊性较差的镍基高温合金和不锈钢制作,但镍基合金和不锈钢钎焊受间隙的影响很大,间隙一般不超过 0.1 mm,否则将产生脆性相。在发动机维修时要保证小于 0.1 mm的间隙是十分困难的,成本也非常高,所以大间隙不锈钢钎焊工艺具有重要价值。与小间隙钎焊不同,大间隙钎焊不能通过毛细作用来填充间隙,因此提出在间隙间除放置钎料外,还放置具有高熔点的合金粉末(称为添加剂)。在整个钎焊过程中,合金粉末保持不充分融化,为钎料的毛细作用提供桥梁作用,促使结合面的连接。X. W. Wu等人用此法成功钎焊了大间隙不锈钢 SUS304和 X-750合金^[17],钎料采用镍基钎料 ASM4777,添加剂为镍粉。陈建民也用此类方法,在钎缝内预填 316粉或 1Cr18Ni9粉,在钎焊过程中,预填粉末融化,焊后能保持原来的形状^[18]。宽间隙钎缝的拉伸强度与重熔温度有较好的对应性,即重熔温度高,拉伸强度也高。

真空电弧钎焊是对不锈钢、钛合金和高温合金等金属进行熔化焊及对小试件进行快速高效的局部加热钎焊的最新技术。该技术由俄罗斯发明,并迅速应用在航空发动机的焊接中^[19]。使用真空电弧进行涡轮叶片的修复、钛合金气瓶的焊接,可以有效地解决材料氧化、软化、热裂、抗氧化性能降低等问题。开展真空电弧焊接方法的研究,可为航空航天

制造业提供一种新的焊接方法,对于新型号喷气发动机的研制、发动机涡轮叶片的修复等都具有一定的实际意义。

上海交通大学的李少青等人深入研究了真空电子束钎焊不锈钢,探讨了不锈钢的真空电子束钎焊中电子束束流、聚焦电流、加热时间等电子束钎焊工艺参数对钎料润湿性的影响及其规律,以及不同的电子束钎焊工艺参数对试件最高温度、加热速度、高温停留时间等与温度场有关的参数的影响。他们发现:真空电子束钎焊与传统的真空炉钎焊相比,钎料的润湿角明显减小,润湿性大大提高;随着电子束功率密度的增加,钎料铺展面积、最高加热温度、加热速度,以及高温停留时间都呈明显上升趋势^[20]。

钛和不锈钢在低真空度下使用一般的钎焊方法,难以实现无钎剂、无镀层钎焊。杨愉平等人采用辉光放电钎焊方法在低真空度下进行钛和不锈钢异种金属的钎焊^[21]。这种方法的优点之一是在钎焊过程中,依靠离子轰击的净化作用,有效地去除母材及钎料表面的氧化膜,改善钎料的铺展条件,从而可以在较低的真空度下实现无钎剂、无镀层钎焊。

应该指出的是,随着计算机模拟技术的发展,越来越多的人用计算机模拟钎焊接头的热力学行为、钎焊的微观界面行为等,为钎料选择和工艺设计提供有力的帮助。如新加坡南洋大学的 J. X. Zhang等人用有限元法分析 Al_2O_3 陶瓷与 SUS304的钎焊,发现 Al_2O_3 陶瓷与 SUS304钎焊接头有很大的残余应力,并有裂纹发生。根据残余应力的分布和应力集中情况,他们在有限元分析的指导下,通过选择合适的焊料成分和设计接头结构,使残余应力大大降低,防止了裂纹的发生,满足了使用要求^[9]。

4 不锈钢板翅式换热器的钎焊

随着航空航天、汽车、家电、石化及能源等行业的快速发展,对换热器的需求大大增加,其中要求采用不锈钢制换热器的呼声越来越高。对于不锈钢换热器,特别是板翅式换热器,尚存在不少问题。

换热器的形式有很多,包括列管式、翅片管式、板式、螺旋板式、热管式、板翅式等。为提高资源利用率,要求换热器结构紧凑、体积小、结构质量轻、效率高,并且要有足够强度,板翅式换热器能满足以上要求。1930年英国马尔斯顿·艾克歇尔瑟公司用铜合金浸渍钎焊方法制成航空发动机散热用铝制板

翅式换热器^[22]。我国从 20 世纪 60 年代开始生产铝制板翅式换热器,目前其真空钎焊工艺已相当成熟,但不锈钢制板翅式换热器的真空钎焊还处于起步阶段,需要完善和改进^[23]。

1991 年,南京燃气轮机研究所为机车燃气轮机配套而研制的不锈钢板翅式换热器的性能基本达到

了设计要求,经过前后较长时间的多次试验,没有发现脱焊和漏气现象,也没有发现氧化和腐蚀,说明钎焊工艺是成功的。试验用材料为 0.75 mm 厚的 00Cr11TiRe 铁素体不锈钢,具体参数如表 2 所示^[24]。

表 2 试验方案

Tab 2 Experimental programs

方案	换热器尺寸 /mm	回热度 μ	翅片高度 H/mm		翅片节距 P/mm		进口压力 $P/10^5 Pa$		流量 $G/kg \cdot s^{-1}$	
			空气	燃气	空气	燃气	空气	燃气	空气	燃气
第一方案	1 500 × 1 500 × 820	0.671	2.5	5.3	2.5	4.4	6.0	1.06	24.849	25.233
第二方案	820 × 750 × 430	0.669	2.5	5.3	2.5	4.4	6.0	1.06	3.605	3.611
第三方案	820 × 750 × 430	0.665	2.5	5.3	2.5	4.4	2.3	1.1	3.605	3.611

1998 年 A. RAB NKN 等人^[5],详细介绍了用 Ni - Cr - B - Si 系列非晶钎料钎焊 SUS316L 板翅式换热器的工艺过程和试验结果,包括钎焊强度、疲劳强度、耐蚀性能等。结果表明,采用 15% Cr, 1.4% B, 7.25% Si 和少量 Mo 的非晶钎料可很好的用于焊接不锈钢板翅式换热器。在大量的试验基础上优化了工艺,提出了用此类钎料钎焊的单步和双步钎焊法,从而无论在钎料的研制还是在钎料的应用上做出了积极贡献。

针对航空发动机中的燃油冷却滑油系统不锈钢高压散热器,孙计生等人研制了一种薄管散热器芯体,采用数百根 0.2 mm 薄细管,用厚 3.0 mm 的端板以 1 mm 的管间距将它们钎焊在一起,形成一组密集的插接接头。这种结构特点给钎焊工艺带来一系列的困难,主要有:管壁薄,要求采用溶蚀性弱、晶间渗入小的钎料;接头多,要求一次焊接成功,否则补焊会造成管子变形,影响散热器的性能;接头承受复杂应力,要求接头密封、耐压和抗震。因此,要求采用高强度钎料,并在焊接过程中使接头双面成形,以形成连续圆根的优良接头。研究采用 1Cr18Ni9Ti 薄管,配合以 0.3 mm 厚的 HBNi82CrSiB - ZD 粘带钎料,钎焊工艺参数为 950 保温 20 min,快速升至 1 060 ~ 1 070 保温 7 ~ 10 min,钎焊的间隙不大于 0.1 mm,获得了优质接头,其接头剪切强度达到 190 MPa^[25]。

鉴于不锈钢板翅式换热器在工业应用上的重要
宇航材料工艺 2005 年 第 4 期

性,国内已有很多单位进行了该方面的研究,如杭氧集团、山东大学、北京航空材料研究院、南京化工大学、中国科学院金属研究所等,有的单位已有定型产品销售。但针对不锈钢板翅式换热器的特点,特别是对换热器结构质量、体积有很高要求的场合,目前尚存在以下一些问题有待解决。

(1)与铝合金相比,不锈钢具有更高的弹性模量、加工硬化能力和强度,使得材料的加工成型、特别是翅片的成型加工存在一定困难,较难获得尺寸精度高的产品,因而要求钎焊料不仅具有好的铺展性,同时应具有好的填充能力,但这两点往往又相互矛盾。

(2)如果将结构质量和尺寸控制放在首位,就要求板材厚度很薄,如隔板的厚度小于 0.5 mm,翅片厚度小于 0.2 mm,从而对钎焊工艺和钎料提出了更高要求,尤其是防溶蚀性能要求。

(3)由于不锈钢结构要承受更高的工作压力,要求其接头更加可靠,如何保证更高的钎着率和更好的接头性能十分关键。影响接头性能的主要因素包括是否存在脆性相、接头成分扩散是否合理等,这对接头强度、塑性和抗热疲劳等性能具有重大影响。

(4)接头要具有很好的耐腐蚀能力(如耐氨气和海水,甚至酸的腐蚀),耐高温性能。

(5)不锈钢制板翅式发生器接头质量的可靠性评价体系。

5 结语

在焊接技术迅速发展的今天,钎焊技术已成为应用最广泛的连接技术之一。随着宇航、家电、能源、通讯等产业的不断发展,不锈钢的钎焊技术研究将进入一个新的应用发展时期,针对不同应用场合的要求,需要针对相应构件的钎焊材料和钎焊工艺方法进行深入研究。

参考文献

- 1 张启运等. 钎焊手册. 北京:机械工业出版社, 1998
- 2 李燕京,王占梅. 不锈钢软钎焊. 北京广播器材厂
- 3 邹僖. 钎焊. 北京:机械工业出版社, 1988
- 4 焊接手册. 第2版. 机械工业出版社, 2001: 477 ~ 560
- 5 Rabinkin A, Wenski E, Ribaud A. Brazing stainless steel using a new MBF-series of Ni - Cr - B - Si amorphous brazing foils. *Welding Research Supplement*, 1998; (2): 66 ~ 75
- 6 董占贵,钱乙余. 国内外钎焊技术发展动态. *机械工人(热加工)*, 1999; (10): 3 ~ 5
- 7 Liu Peng, Li Yajiang, Wang Juan, Guo Jishi. Vacuum brazing technology and microstructure near the interface of Al/18 - 8 stainless steel. *Materials Research Bulletin*, 2003; 38: 1 493 ~ 1 499
- 8 Camargo P C等. 钛与 304 不锈钢钎焊接头的组织特征. *国外金属加工*, 1995; (4): 44 ~ 51
- 9 Zhang J X, Chandel R S, Chen Y Z, Seow H P. Effect of residual stress on the strength of an alumina-steel joint by partial transient liquid phase (PTLP) brazing. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002; 122: 220 ~ 225
- 10 Abdulrahman Abed, Issam S Jalham, Alan Hendry. Wetting and reaction between sialon, stainless steel and Cu-Ag brazing alloys containing Ti. *Journal of the European Ceramic Society*, 2001; 21: 283 ~ 290
- 11 *Brazing Manual*. American welding society. Third Edition, Revised, 1976
- 12 王忠平,白向钰,汪维斌,邹一心. 镍基钎料钎焊不锈钢

的加压钎焊工艺. 新工艺·新技术·新设备, 1994; (3): 33 ~ 34

- 13 刘红,李文,张世航. 马氏体不锈钢真空钎焊与真空热处理一体化工艺. *沈阳工业学院学报*, 1999; 18(2): 37 ~ 41
- 14 Lino Y. Partial transient liquid-phase metals layer technique of ceramic-metal bonding. *J. Mater. Sci. Lett*, 1999; (10): 104
- 15 Zhang J X, Chandel R S, Seow H P. Effects of chromium on the interface and bond strength of metal-ceramic joints. *Materials Chemistry and Physics*, 2002; 75: 256 ~ 259
- 16 Wu Xiaowei, Roop Singh Chandel, Seow Hong Pheow, Li Hang. *Materials Science and Engineering*, 2000; A288: 84 ~ 90
- 17 Wu X W, Chandel R S, Seow H P, Li H. Wide gap brazing of stainless steel to nickel-based superalloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001; 113: 215 ~ 221
- 18 陈建民. 不锈钢接头的宽间隙真空钎焊. *石油大学学报(自然科学版)*, 1999; (6): 53 ~ 56
- 19 韩小宾,汪苏等. 一种新型的焊接技术——空心阴极真空电弧焊. *航空制造工程*, 1998; (3): 16 ~ 18
- 20 李少青,张毓新,梁智,楼松年. 不锈钢真空电子束钎焊工艺研究. 见: 焊接界首次网上会议“2003年高温钎焊及扩散焊技术研讨会”
- 21 杨愉平,赵彭生,古凤英. 钛-奥氏体不锈钢的辉光放电钎焊. *太原工业大学学报*, 1991; 22(4): 61 ~ 68
- 22 王松汉等. 板翅式换热器. 北京:化学工业出版社, 1984: 1 ~ 40
- 23 凌祥,涂善东等. 板翅式换热器的研究与应用进展. *石油机械*, 2000; (5): 54 ~ 58
- 24 任其智. 不锈钢板翅换热器的研制. *能源季刊*, 1991; (2): 3 ~ 10
- 25 孙计生,刘效方. 不锈钢散热器芯体真空钎焊工艺研究. *材料工程*, 1997; (1): 35 ~ 37

(编辑 任涛)

高残碳酚醛树脂

本成果在树脂合成时引入苯基苯酚,提高了碳含量及结构的稳定性,从而提高了整个树脂体系的残碳率。为了有效控制树脂质量,根据分子极性、反应机理,采用高效液相色谱法,对高残碳酚醛树脂作了组成分析,大分子量组成含量随聚合度变化。热重分析表明:该树脂热解温度较高,其残碳率在 700 °C 下大于 75%,其热解表观活化能远高于普通酚醛树脂,耐热性能极为优良,具有广阔的应用前景。

(华东理工大学国防材料工程所,上海 200237)

·李连清·

宇航材料工艺 2005年 第4期