

Nb-1Zr 与 1Cr18Ni9Ti 高温真空 钎焊工艺研究

齐立君, 蔡洪涛

(中国原子能科学研究院 反应堆工程研究设计所, 北京 102413)

摘要:采用 BNi-5 钎料, 对 Nb-1Zr 与 1Cr18Ni9Ti 高温真空钎焊工艺进行试验研究, 对试验钎焊的接头进行了密封性能检验、抗热冲击性能试验、接头界面区微观分析以及钎缝拉伸强度试验。通过分析试验结果, 确定了 Nb-1Zr 与 1Cr18Ni9Ti 高温真空钎焊工艺规范参数。

关键词: Nb-1Zr; 1Cr18Ni9Ti; 真空钎焊

中图分类号: TL352

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2007)S1-0365-05

Study on Technology of High Temperature Brazing of Nb-1Zr and 1Cr18Ni9Ti in Vacuum

QI Li-jun, CAI Hong-tao

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-51, Beijing 102413, China)

Abstract: In order to joint Nb-1Zr alloy and 1Cr18Ni9Ti stainless steel, a series of brazing experiments with different technology parameters of BNi-5 brazing filler metal were carried out. After that, properties of brazing joint, including vacuum seal test, bear thermal shock test, microstructure of brazing seam and tensile strength test of brazing joint, were examined. The testing results show that brazing joint with BNi-5 filler metal has fine properties. At last, reasonable technology parameters were provided.

Key words: Nb-1Zr; 1Cr18Ni9Ti; brazing in vacuum

在核工业中,经常会遇到许多异种金属及难熔金属之间的焊接问题,钎合金和不锈钢的连接就是其中之一。由于钎合金和不锈钢的化学成分及熔点、线膨胀系数等物理性能有较大差异,两者可焊性较差,焊后接头的质量很难保证,因此,钎合金和不锈钢的焊接历来是焊接中的技术难点。

文献[1]指出,钎合金与不锈钢的熔-钎焊

连接时,为使焊接接头具有最佳机械性能,钎合金的加热温度不能低于焊接熔池中的熔融不锈钢温度的 80%,而熔融不锈钢与钎合金的接触时间不得小于 0.8 s 或超过 1.1~1.3 s,否则,不能形成焊接接头,或在焊缝中形成脆性金属化合物。显然这一要求对焊接工艺的控制来说极为苛刻。有关人员曾对 Nb-1Zr 合金和 1Cr18Ni9 不锈钢真空电子束熔-钎焊接头组织

和性能作过研究,研究发现,在连接界面处形成的互扩散层中含有大量的条状析出相,析出相呈全片层状结构。经过分析后确认,析出物为 μ -FeNi₇Nb₆和 σ -FeCr相金属间化合物^[2]。

本工作研究针对 Nb-1Zr 与 1Cr18Ni9Ti 2种母材的高温真空钎焊连接方法。钎合金与不锈钢的熔点、线膨胀系数等性质差异显著,熔-钎焊连接方法的工艺十分复杂,加之实际应用的焊接结构对熔-钎焊的实施有一定的局限性,这使高温真空钎焊的方法方得以应用。在高温真空钎焊过程中,液态钎料在毛细填缝的同时会与母材发生作用,如溶解、扩散等,引起钎缝组织成分、钎焊接头性能和重熔温度等一系列变化^[3]。钎焊工艺的参数,如零件表面的粗糙度和洁净度、真空度、焊缝间隙、钎焊温度、保温时间等,既影响钎料的流动性和润湿性,又决定着钎料与母材之间的冶金反应,影响接头性能。所以,确定合理的工艺规范并较准确地控制这些规范参数对保证获得高质量的高温真空钎焊接头具有重要意义。

1 高温真空钎焊接头形式、应用条件和性能要求

钎焊接头母材选用 Nb-1Zr 合金和 1Cr18Ni9Ti 不锈钢,二者成分差别很大,组织和性能也有很大差异,1Cr18Ni9Ti 的熔点比 Nb-1Zr 低 1 000 °C 以上,线膨胀系数约是 Nb-1Zr 的 2~3 倍,比热容约是 Nb-1Zr 的 2 倍,热导率只有 Nb-1Zr 的 1/3 左右。这些差别使熔焊连接 Nb-1Zr 和 1Cr18Ni9Ti 变得十分困难。相对而言,高温真空钎焊的方法更具优势。

根据应用要求,焊接接头为管接头套接的形式,内层为 1Cr18Ni9Ti,外层为 Nb-1Zr 合金。由于两种母材的线膨胀系数差别较大,对这种接头形式,钎焊过程中会产生很大的热应力,而且没有自由端来释放,冷却后接头内部为拉应力状态。

钎焊接头工作时,内部为真空状态,工作环境中存在有中子辐照,工作温度为 600~700 °C,会伴有一定的热冲击状况。要求钎焊后的接头具有严格的真空密封性能,抗热冲击能力和抗中子辐照能力。

2 高温真空钎焊工艺试验

2.1 真空钎料

选用镍基钎料 BNi-5 作为 Nb-1Zr 合金与 1Cr18Ni9Ti 不锈钢焊接的钎料,BNi-5 钎料具体成分为:Cr,18.5%~19.5%;Si,9.75%~10.75%;C,0.10%;其他,0.5%;余量为 Ni,它是以镍为基体,加入降低熔点的元素 Si 及提高热强度抗氧化耐腐蚀的元素 Cr 形成。钎料固相线温度为 1 079 °C,液相线温度为 1 135 °C,由 Ni+Ni₅Si₂+Cr₃Ni₅Si₂ 组成,但 Cr₃Ni₅Si₂ 相的数量极少。

2.2 接头装配

接头装配时自身定位,保证钎焊间隙均匀,钎料外置于钎缝上部,简便易行,填缝路程适中,钎焊间隙一般为 35~100 μm。间隙过小,影响钎料的润湿流动和填缝效果,达不到全部焊合的目的;间隙过大,毛细作用减弱甚至消失,钎料难以填满间隙,钎料与母材的合金化作用增大,易产生过多硬脆的金属间化合物及低熔点共晶相,导致接头的力学性能下降,且钎料容易流失。接头要有较大的焊合面,以弥补钎料强度的不足,保证接头有一定的承载能力。但焊合面不能过大,否则,钎料难于填满整个钎缝,并产生大量空隙和夹杂,强度反而会降低。

2.3 钎焊工艺规范的确定

钎焊温度和保温时间是钎焊过程中最主要的参数。确定钎焊温度的主要依据是所选用钎料的熔点。通常,钎焊温度比钎料液相线温度高 25~60 °C。钎焊时温度越高,液态钎料表面张力越小,润湿效果越好,填缝能力越强。但温度过高可能造成母材晶粒过分长大、过热、过烧等,且钎料铺展能力过强时,易造成钎料的流失,不易填满钎缝和形成优良圆角,同时也易造成母材的溶蚀。确定保温时间的主要依据是钎料与母材相互作用的特性,还应考虑到焊件的尺寸、钎缝间隙及钎料放置位置等因素。钎焊温度和保温时间不能孤立地确定,二者有一定的互补关系。

加热和冷却速度对钎焊接头质量也有一定影响。在保证均匀加热的前提下,应尽量提高加热速度。一般在室温至 900 °C 范围内升温可较为缓慢,在 900 °C 下保温一段时间,这样,既可实现均匀加热,又可提高钎焊的真空度。在

从均热温度至钎焊温度范围内,应尽可能使其快速升温,以避免钎料散布前与母材过早合金化,甚至发生溶蚀现象。冷却时,合理控制冷却速度,使焊后热处理和焊后冷却同时完成。一般,在钎焊温度至 750 °C 范围内,为避免钎料的偏析,应快速冷却,而在 750 °C 至室温范围内缓冷,则可有效防止焊接变形。

2.4 炉中钎焊

钎焊在真空炉中进行,高温下真空度优于 8×10^{-3} Pa,利用高频感应加热设备加热钼发热体,发热体通过热辐射加热钎焊接头及钎料,实现接头焊接的目的。

利用 BNi-5 钎料,选取一系列的工艺参数,进行 Nb-1Zr 与 1Cr18Ni9Ti 炉中高温真空钎焊工艺试验。焊后,对焊接接头进行性能检验和微观分析。根据检验和分析结果,优化参数,改进钎焊工艺。

3 焊后接头性能检验及微观分析

3.1 Nb-1Zr/BNi-5/1Cr18Ni9Ti 钎焊接头密封性能检验

钎焊后接头的真空密封性能至关重要。利用氦质谱检漏仪对钎焊后的接头进行检验,灵敏度可达到 10^{-10} Pa·m³·s⁻¹。检验结果表明,采用 BNi-5 钎料的钎焊接头的密封性能良好。

3.2 Nb-1Zr/BNi-5/1Cr18Ni9Ti 钎焊接头抗热冲击试验

钎焊接头应用在有一定的热冲击的工况条

件下,钎焊后焊缝区拉应力的存在又使接头的真空密封性能和抗热冲击性能难以确保,在工作条件下,钎焊接头界面区容易产生各种形式的损伤、开裂和断裂。为此,进行了钎焊接头 200 °C → 800 °C → 200 °C,共 20 个周期的抗热冲击性能试验。热冲击试验后再次作氦质谱检漏,以此检验钎焊接头的抗热冲击性能。试验证实,Nb-1Zr/BNi-5/1Cr18Ni9Ti 钎焊接头在热冲击性后的密封性能仍能得到很好保证。

3.3 Nb-1Zr/BNi-5/1Cr18Ni9Ti 钎焊接头界面区微观分析

利用扫描电子显微镜对化学侵蚀后的钎焊接头进行微观观察,对钎焊接头界面区进行线扫描,了解钎缝结合情况和组织结构,分析该区的元素分布及扩散状况。

从 BNi-5 钎料钎焊 Nb-1Zr 与 1Cr18Ni9Ti 的钎焊接头界面区 SEM 照片(图 1)可清楚看到钎缝结合状况和组织结构;焊缝较均匀,连接良好,1Cr18Ni9Ti 无明显的晶粒长大,BNi-5 钎料中形成化合物的主要元素是硅,Si 原子半径比较大,扩散系数相对较小,故钎缝中 Ni₅Si₂、Ni₁₆Cr₆Si₇ 等化合物相多一些^[4]。

在钎焊过程中,母材与熔融的钎料因溶解扩散而相互作用,使钎缝的组织成分不同于钎料本身。从图 1 可见,BNi-5 钎料的主要成分元素 Si、Ni、Cr 都有不同程度的向母材(Nb-1Zr、1Cr18Ni9Ti)中扩散的趋势,以 Si 向 Nb-1Zr 合金的扩散最为明显。同时,母材元素也会溶解进入钎料熔池。研究中观测到,

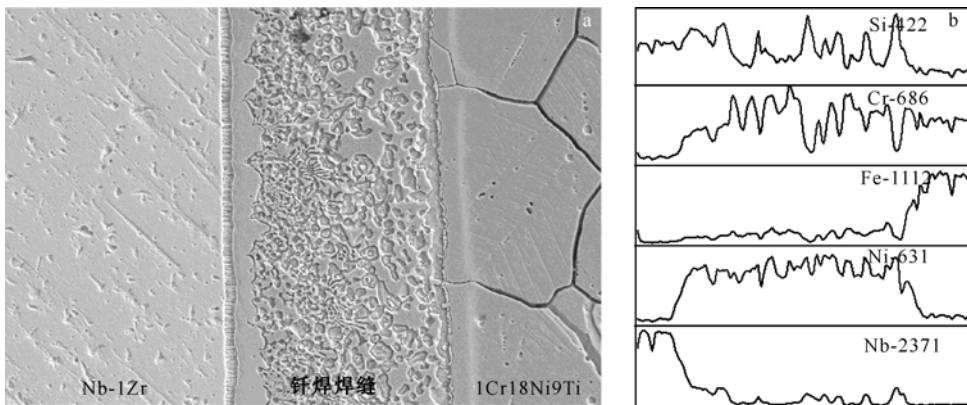


图 1 Nb-1Zr/BNi-5/1Cr18Ni9Ti 钎缝扫描电镜照片

Fig. 1 SEM morphology of brazing seam Nb-1Zr/BNi-5/1Cr18Ni9Ti

a——钎缝扫描照片;b——焊缝成分线扫描图谱

在 Nb-1Zr 合金侧, Nb 元素向钎缝迁移; 在钎缝靠近 Nb-1Zr 合金一侧, 形成一个脆性的富集 Nb、Ni、Si、Cr 的互扩散层(图 1 中钎缝靠左侧牙状组织), 厚度约 10~15 μm , 具体的物相组成还需进一步分析。这一扩散层的存在对钎焊接头的性能十分不利。试验中观测到, 绝大多数的裂纹均出现在该区域。因此, 可通过控制工艺参数, 例如选用非晶态钎料、降低钎焊温度、缩短保温时间、合理控制升降温速率等来抑制互扩散层的形成。

3.4 Nb-1Zr/BNi-5/1Cr18Ni9Ti 钎焊接头拉伸强度试验

按照 GB 8619—88《钎缝强度试验方法》进行接头拉伸强度试验, 检验 Nb-1Zr/BNi-5/1Cr18Ni9Ti 钎焊接头钎缝的破断强度。试件装配时具有预定的装配间隙, 分成 0.050 mm 和 0.100 mm 两组, 每组 3 个样品。BNi-5 钎料粉末预置于接头内部, 钎焊温度为 1 190 $^{\circ}\text{C}$, 保温时间 5 min。将钎焊后的接头加工成标准拉伸试样, 在拉伸试验机上采用慢拉伸速率方式进行钎缝拉伸强度试验。试验在常温下进行, 加载速率为 0.5 mm/min。

装配间隙为 0.050 mm 的钎焊接头钎缝拉伸强度为 226.99 MPa, 装配间隙为 0.100 mm 的钎焊接头钎缝拉伸强度为 222.33 MPa。钎料本身的强度并不是很高, 当在试样上加载拉伸载荷时, 填充在母材金属之间的钎料也受到拉应力作用, 随着拉伸载荷的增加, 拉应力逐渐接近钎料的屈服强度, 这时, 填充在母材金属之间的钎料薄片试图开始形成缩颈, 但对薄焊缝

钎焊而言, 仅通过填充的钎料薄片来减小直径来形成缩颈是不可能实现的, 故在填充钎料薄片上产生了很大的三向轴应力, 迫使钎缝强度超过钎料本身的强度而低于母材的屈服强度^[5]。

Nb-1Zr/BNi-5/1Cr18Ni9Ti 钎焊接头拉伸断口 SEM 形貌如图 2 所示。从图 2 可看出, 拉伸断口周边和中心呈现两种不同的形貌。通过对 BNi-5 钎料钎焊 Nb-Zr 与 1Cr18Ni9Ti 接头的拉伸断口纵向剖面的观察看出, 断裂发生在钎焊焊缝区靠近钎合金一侧的钎料与钎合金的结合界面区, 表明钎料与钎合金的结合处是焊缝相对薄弱的环节, 成为影响钎缝强度的主要因素, 这使得钎焊间隙对焊缝拉伸强度的影响不再明显。这一结果与对钎焊接头界面区 SEM 微观观察分析结果相一致。

4 结论

通过利用 B-Ni5 钎焊 Nb-1Zr 与 1Cr18Ni9Ti 的高温真空钎焊工艺试验, 以及焊后对钎焊接头的性能检验与分析, 对高温真空钎焊工艺提出如下改进方案。

1) 采用 B-Ni5 钎焊 Nb-1Zr 与 1Cr18Ni9Ti 时, 钎焊温度为 1 170~1 190 $^{\circ}\text{C}$, 根据接头的结构和尺寸, 保温时间控制在 2~10 min, 在此条件下可获得良好结果。钎焊后接头的真空密封性能、抗热冲击性能和承载能力能得以确保, 钎焊后的接头满足使用工况要求。

2) 采用 B-Ni5 钎焊 Nb-1Zr 与 1Cr18Ni9Ti 时, 在靠近 Nb-1Zr 一侧的焊缝中, 存在一 10~15 μm 厚 Nb、Ni、Si、Cr 互扩散层。在力学性能

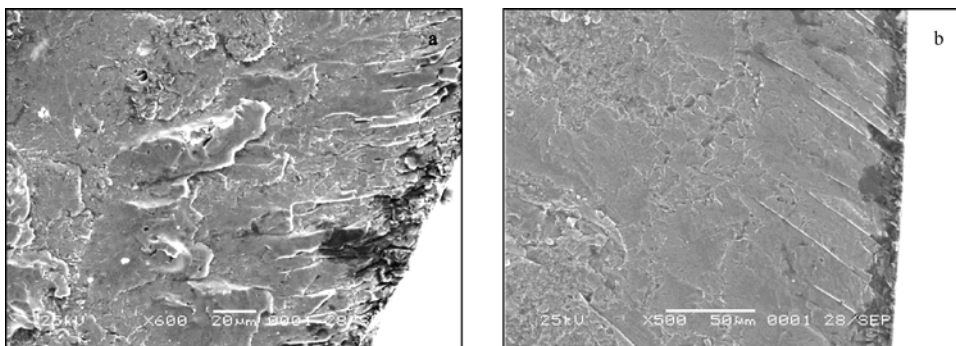


图 2 Nb-1Zr/BNi-5/1Cr18Ni9Ti 钎焊接头拉伸断口 SEM 形貌

Fig. 2 SEM images of tensile fracture of brazing joint Nb-1Zr/BNi-5/1Cr18Ni9Ti

a——靠近 Nb-1Zr 一侧; b——靠近 1Cr18Ni9Ti 一侧

方面看,这个互扩散层是钎焊缝的薄弱环节,钎焊时应尽量从工艺上加以控制,抑制扩散层的形成。

3) 由于 Nb-1Zr 与 1Cr18Ni9Ti 的线膨胀系数存在很大差异,使得钎焊后管件接头存在很大热应力,这给接头的真空密封增加了难度。若实际条件允许,应将接头设计成内层为钨、外层为不锈钢的形式,这种形式可改善接头钎焊后的应力状态。

参考文献:

- [1] 何康生,曹雄夫. 异种金属焊接[M]. 北京:机械工业出版社,1986.
- [2] 马雁,杨启法. Nb-1Zr 合金与 1Cr18Ni9 不锈钢电子束自钎焊形成的互扩散层的微观组织分析[J]. 原子能科学技术,2004,38(2):105-110.
- [3] 庄鸿寿,罗格夏特 E. 高温钎焊[M]. 北京:国防工业出版社,1989.
- [4] 陈建民,朱长福. 真空钎焊不锈钢接头的钎缝组织和相组成特征[J]. 石油大学学报,1999,23(2):66-68.
CHEN Jianmin, ZHU Changfu. Investigation of the microstructure of stainless steel joint brazed in vacuum[J]. Journal of University of Petroleum, 1999,23(2):66-68(in Chinese).
- [5] 戴永年,赵忠. 真空冶金[M]. 北京:冶金工业出版社,1988.