

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.04.11

钎焊参数对SOFC金属连接体钎焊接头组织与力学性能的影响

吴 标¹, 寇 准², 党思远³, 刘 腾¹, 王晓春^{1*}

1. 江苏理工学院, 江苏 常州 213001
2. 常州联德电子科技有限公司, 江苏 常州 213001
3. 华中科技大学, 湖北 武汉 430000

摘 要: 为了提高固体氧化物燃料电池(SOFC)堆的装配效率和可靠性, 研究了不同钎焊参数对Fe-Cr17不锈钢金属连接体钎焊接头组织与力学性能的影响。采用丝网印刷技术在Fe-Cr17不锈钢表面印刷BNi-5镍基钎料, 并在H₂气氛中进行高温钎焊, 研究了H₂流量、钎焊温度、保温时间及焊缝厚度对Fe-Cr17不锈钢钎焊接头微观结构、扩散层以及力学性能的影响。结果表明, 钎料与Fe-Cr17不锈钢在焊缝界面处易形成等温凝固区, 接头组织主要是Ni-Cr-Fe固溶体; 在焊缝中心位置易形成非等温凝固区, 接头组织为连续共晶与脆性金属化合物; 当H₂流量为10 SLM, 钎焊温度为1 190 °C, 保温时间为30 min, 焊缝厚度为80 μm时, 钎焊接头组织均匀致密, 无脆性化合物及孔洞等缺陷, 接头最大剪切强度可达到436.76 MPa, 剪切模式为韧面撕裂, 接头界面结合牢固可靠, 可以应用于固体氧化物电堆中金属连接体装配。

关键词: 固体氧化物燃料电池; Fe-Cr17不锈钢; 钎焊; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG454 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-2303(2025)04-0081-09

Effect of Brazing Parameters on the Organization and Mechanical Properties of Brazed Joints of SOFC Metal Connectors

WU Biao¹, KOU Zhun², DANG Siyuan³, LIU Teng¹, WANG Xiaochun^{1*}

1. Jiangsu University Of Technology, Changzhou 213001, China
2. Changzhou Lambda Electronic Co., Ltd., Changzhou 213001, China
3. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 43000, China

Abstract: The brazing process of metal connectors can effectively simplify the assembly process of solid oxide fuel cell stack, reduce the assembly error and improve the assembly efficiency. In this paper, the screen printing technology is used to print brazing material on the surface of Fe-Cr17 stainless steel metal connectors and then placed in H₂ atmosphere for high temperature brazing, and the effects of H₂ flow rate, brazing temperature, holding time and weld gap on the microstructure, diffusion layer and mechanical properties of Fe-Cr17 stainless steel brazed joints are investigated. The results show that the brazing material and Fe-Cr17 stainless steel are easy to form ISZ at the weld interface, and the joint organization is mainly Ni-Cr-Fe solid solution; in the center of the weld is easy to form ASZ, and the joint organization is continuous eutectic and brittle metal compounds; Test surface when the H₂ flow rate of 10SLM, brazing temperature of 1190 °C, holding time for 30min, weld thickness of 80μm, the joint tissue distribution uniform and dense, no brittle compounds and holes and other defects, the joint maximum shear strength of 436.76MPa, the shear mode of tough surface tearing, the joint interface bonding is strong and reliable, and can be applied to the metal in the solid-oxide power stacks. The joint interface is strong and reliable, and can be applied to the assembly of metal connectors in solid oxide power reactors.

收稿日期: 2024-10-10 修回日期: 2024-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(52202094); 江苏理工学院研究生实践创新计划项目(XSJXC23_47)

作者简介: 吴 标(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事陶瓷与金属钎焊的研究。

通讯作者: 王晓春(1990—), 女, 博士, 讲师, 主要从事SOFC关键材料开发与应用。E-mail: wxc190708@jsut.edu.cn。

Keywords: solid oxide fuel cell; Fe-Cr17 stainless steel; brazing; microstructure; mechanical properties

引用格式: 吴标, 寇准, 党思远, 等. 钎焊参数对 SOFC 金属连接体钎焊接头组织与力学性能的影响[J]. 电焊机, 2025, 55(4): 81-89.

Citation: WU Biao, KOU Zhun, DANG Siyuan, et al. Effect of Brazing Parameters on the Organization and Mechanical Properties of Brazed Joints of SOFC Metal Connectors[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(4): 81-89.

0 引言

固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, 简称 SOFC)是一种高效的连续发电装置,通过电极反应将化学能转化为电能^[1],其热电联供的能源转化效率可高达 95%,在新能源技术领域具有显著优势^[2-3]。为满足大功率输出需求,需要将多个单电池与金属连接体及密封件串联构成 SOFC 电池堆,其中金属连接体主要用来连接单片电池与密封件,为单电池提供物理支撑与电流通道,并隔绝氢气与氧气避免气体接触燃烧^[4]。由于 SOFC 电池堆需要在 650~800 °C 高温氧化/还原气氛下长期服役,金属连接位置必须保持优良的气密性与力学性能^[5]。

传统的 SOFC 电池堆中单电池片与金属连接体间靠层压机机械式压制连接,但是随着 SOFC 堆芯电池层数增加,这种连接方式易造成金属连接体装配误差。通过钎焊工艺连接相邻金属连接体可提高 SOFC 电池堆金属连接体的可靠性,有效提高电堆的输出功率。Fe-Cr17 铁素体不锈钢因其力学性能优异、高温耐腐蚀、热膨胀系数与 SOFC 单电池片以及密封件相匹配,且成本低等优点而被广泛用于 SOFC 连接体^[6-7]。然而,SOFC 电堆在实际运行时伴随升降温热循环工况,金属连接体会出现热胀冷缩现象导致钎焊界面产生热应力,易造成钎焊接头蠕变,降低接头连接强度,最终致使接头开裂而降低 SOFC 电堆的稳定性。因此,优化金属连接体界面的钎焊工艺对于提高接头处连接强度和保持 SOFC 电堆长期稳定性至关重要。

气氛反应钎焊一种金属为主的钎料在高温润湿母材后在冷却过程中实现不锈钢焊接的方法,其接头具有良好的变形能力,可吸收钎焊过程中产生的热应力与冲击应力,提高接头力学性能^[8]。近年来,国内外学者对不锈钢钎焊接头进行了广泛研究。Shi 等人^[9]研究了 FeCrMo 合金接头的钎焊参数、微观形貌及剪切强度,在 1 080 °C 真空钎焊 Mn-

Ni-Cu-Cr-Co 钎料与 FeCrMo 合金后保温 60 min,得到的接头剪切强度最大达 426.7 MPa。田晓羽^[10]等人采用 BNi-2 非晶钎料探究了不同钎焊温度对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢接头界面组织及力学性能影响,结果表明钎焊温度为 1 150 °C 时钎缝中心的块状 Cr-B 相消失,钎缝区组织均匀化,最大抗剪强度出现在 1 050 °C 时,约为 265 MPa,且接头断裂形式主要为韧性断裂。这些研究表明,不锈钢钎焊接头组织结构和力学性能与钎料成分、钎焊接头厚度、钎焊温度、保温时间以及热处理等因素相关,在钎焊界面中形成的化合物对接头力学性能具有明显的影响。师伟伟^[11]等人对利用 X 光无损检测技术优化了单电池与 SOFC 金属连接体的钎焊工艺,验证了 95AgCu 焊料封接 SOFC 的有效性,对解决 SOFC 金属连接体密封问题具有重要意义。Jin^[12]等人研究了 TiO₂ 含量对 CuO-Ag 钎料钎焊 YSZ-铁铬合金 SOFC 连接体组织与性能的影响,结果表明,钎料中 TiO₂ 的添加量对连接体的接头没有显著影响,当 CuO 含量为 8 mol % 时,连接体接头性能达到最大,弯曲强度为 101 MPa,验证了该钎焊方法在 SOFC 连接体中的可实用性。然而,目前针对 SOFC 电堆金属连接体间连接方式的研究仍较为有限。

本文采用镍基钎料对 SOFC 金属连接体(即 Fe-Cr17 不锈钢)进行气氛反应钎焊,研究了不同 H₂ 流量、钎焊温度、保温时间以及焊缝厚度下钎焊接头的微观组织和力学性能的演变规律,旨在为开发 SOFC 金属连接体新型连接方式及解决 Fe-Cr17 不锈钢钎焊问题提供理论依据。

1 试验材料与方法

试验采用 Fe-Cr17 不锈钢作为母材,化学成分如表 1 所示;BNi-5 镍基钎料作为焊料,化学成分如表 2 所示,以 Si 元素作为降熔元素,其熔化温度区间为 1 080~1 135 °C。将 Fe-Cr17 母材加工为 40 mm×

40 mm×15 mm 与 20 mm×20 mm×10 mm 两种尺寸用作钎料涂覆工艺参数与剪切力测试。钎焊前,采用 200#~1000#砂纸打磨 Fe-Cr17 不锈钢试样表面至光亮以去除表面氧化层。将打磨好的母材浸入丙酮溶液浸泡 10~15 min 后清洗烘干,去除母材表面油污及表面附着杂质。采用丝网印刷机将 BNi-5 镍基钎焊膏体通过丝网印刷技术涂覆至 430 母材表面。根据钎料膏体的特性,本试验选用的油性丝网版各项参数:网版目数采用 200 目,网版张力采用 24 N,网框尺寸采用 320 mm×320 mm,将刷好钎料膏体的 430 母材置于鼓风干燥箱,在 80 ℃下烘干 20 min,重复印刷 BNi-5 膏体,根据试验需要印刷不同层数,每层钎料膏体厚度约为 20 μm。最后将均匀涂覆 BNi-5 镍基钎料的 430 不锈钢母材置于气氛炉中进行钎焊。

表 1 Fe-Cr17 不锈钢化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of Fe-Cr17 (wt. %)							
Cr	Mn	Si	Ni	S	P	C	Fe
16.0~18.0	1.0	1.0	0.5	0.03	0.04	0.12	余量

表 2 BNi-5 钎料化学成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of BNi-5 filler metal (wt. %)							
Cr	Si	Co	B	P	C	Ni	
18.5~19.5	9.75~10.5	≤0.1	≤0.03	≤0.02	0.06	余量	

在整个钎焊过程中,持续向炉腔内通入一定流速的 H₂ 以确保钎焊样品在还原气氛中进行,其热处理工艺主要分为四个阶段。第一阶段,去除钎料膏体中有机物,以 3 ℃/min 的升温速率由室温升温至 500 ℃后,保温 60 min,目的是使钎料中的粘结剂等有机物能充分挥发燃烧,随着氢气排出,提高钎焊接头质量;第二阶段,以 5 ℃/min 升温速率升至 1 050 ℃后对钎料进行预热保温 30 min,促使炉腔均匀受热;第三阶段,以 5 ℃/min 的升温速率由 1 050 ℃升温至钎焊温度 1 150 ℃、1 170 ℃、1 190 ℃并保温不同时间后,促使钎料融化浸润 Fe-Cr17 不锈钢;第四阶段,以 5 ℃/min 的速率由钎焊温度 1 150 ℃、1 170 ℃、1 190 ℃降温至 800 ℃并保温 30 min 进行退火处理,然后随炉降温至 100 ℃,关闭氢气,完成焊接。热处理工艺如图 1 所示。

通过线切割将样品从中间切开,进行镶样后抛光处理,采用扫描电镜(东莞市三本精密仪器有限

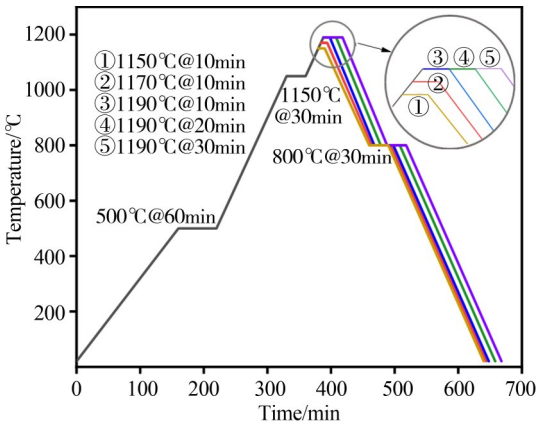


图 1 热处理工艺曲线

Fig. 1 Heat treatment process curve

公司, SEM Zeiss EVO 15) 观察试样接头形貌状态与接头处元素分布,使用显微硬度计(上海恒苟仪器科技有限公司, HV-1000)对钎焊接头进行显微硬度测试,测试条件为载荷为 0.01 kgf,加载时间 10 s。通过万能试验机(昆山鹭工精密仪器有限公司, WAN1000KN 型)对钎焊接头进行剪切测试以及采用扫面电镜观察接头断口形貌。

2 试验结果与分析

2.1 H₂ 流量对焊缝组织的影响

H₂ 作为还原性气体,除了可以使钎焊在氧分压极低的环境中实施,还能还原母材表面的氧化膜,以保证钎料与母材界面的良好结合。此外 H₂ 还原氧化物程度主要由母材表面的氧化物种类决定^[13],因此 H₂ 纯度对于钎焊效果至关重要。为了研究 H₂ 流量对 Fe-Cr17 不锈钢接头界面组织的影响规律,固定钎焊温度为 1 170 ℃、保温 20 min、焊缝厚度为 60 μm,分别在 H₂ 流量为 5 SLM、10 SLM 及 15 SLM 的条件下进行钎焊连接,得到不同 H₂ 流量下接头的界面微观组织,如图 2 所示。可以看出,随着 H₂ 流量的增加,钎焊接头的组织结构开始发生变化,且接头质量逐渐提高,钎料扩散状态逐渐改善。当 H₂ 流量为 5 SLM 时,钎焊过程 H₂ 浓度较低,氧分压相对高,Fe-Cr17 不锈钢表面氧化膜在钎焊过程中未能还原,因而阻碍钎料在不锈钢表面润湿行为^[14],此时 BNi-5 钎料在母材中心凝聚成球状,并未与母材产生润湿,焊缝存在大量孔洞,焊接效果不理想,如

图2a所示。当 H_2 流量增加至10 SLM时,钎焊过程中母材表面的金属氧化膜被完全还原,在界面处钎料与母材逐渐互溶,BNi-5钎料在母材表面上铺展润湿,界面结合较好,焊缝质量有很明显的改善,如

图2b所示。而当 H_2 流量增至15 SLM时,由图2c可以看出焊缝质量和钎料扩散形态与图2b的相似。因此,从经济性角度考虑,优选 H_2 流量为10 SLM作为后续试验中 H_2 的通入量。

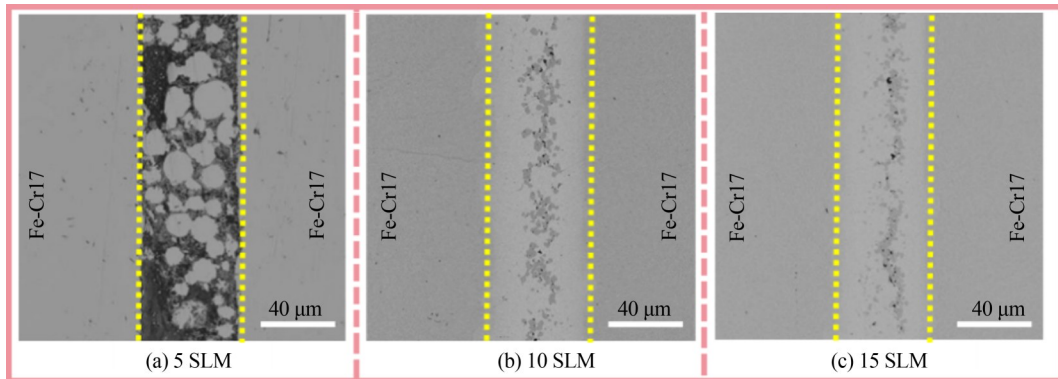


图2 不同 H_2 流量下的钎焊接头微观组织

Fig. 2 Micrographs of brazed joints at different H_2 flow rates

2.2 钎焊温度对焊缝组织的影响

钎焊温度是影响钎料与母材能否充分发生反应以及在母材表面润湿铺展能力的重要因素^[15]。为进一步探索钎焊温度对钎焊接头组织及结合强度的影响,本文通过研究钎焊接头在1 150 °C、1 170 °C、1 190 °C三个温度段、保温10 min后的焊缝组织与钎焊状态,优选最佳钎焊温度。如图3所示,随着钎焊温度的升高,焊缝宽度先减小后增大,焊缝接头处孔洞逐渐减少,且接头焊缝处灰色物质也逐渐减少。由图3a可知,钎焊温度为1 150 °C时,钎焊温度较低,钎料流动性性能相对较差,因而焊缝中心出现少量孔洞,局部区域的钎料未完全填充,造成了未融合区域;此外,钎焊温度较低导致Si元素扩散距离短,焊缝中心Si元素浓度较高,与Ni、Cr元素形成大量细小且分散的金属间化合物,而这些化合物是由Fe-Cr-Ni固溶体和Laves相中析出的 Ni_3Si_2 、 Cr_3Ni_5Si 等硅化物组成^[16],一般具有较大的脆性且容易造成焊缝中心裂纹的形成^[17]。如图3b所示,当钎焊温度升高至1 170 °C时,钎料流动性提升,钎焊接头处孔洞较1 150 °C时有明显减少,焊缝孔洞的填充间接提高了焊接接头的钎焊质量。此外,钎焊温度的升高促使Si原子向母材侧的扩散,钎接头处的硅化物相较于1 150 °C时出现有较为明显的减少趋势,使得焊缝中心处硅化物减少。如图3c所示,当钎焊温度为1 190 °C时,随着温度的升高Si在

Ni中的溶解度进一步增加,Si原子会更容易地被镍晶格所容纳,硅化物脆性相会逐渐被Ni-Cr韧性相包裹,使得焊缝中心处的硅化物再次减少且尺寸变大,改善钎焊接头的性能。若钎焊温度继续升高,会造成钎料流失,还可能会引起熔蚀、晶间渗透以及母材晶粒长大等问题^[18]。根据上述分析,优选1 190 °C作为后续试验的钎焊温度。

2.3 保温时间对焊缝组织的影响

钎焊工艺完成后,对Fe-Cr17不锈钢/BNi-5钎焊接头进行合适的保温处理,可使钎焊接头组织均匀化而增强接头的强度;若处理不当又会破坏接头组织,使接头的强度大幅度降低,甚至自行断裂^[13]。BNi-5钎料组元与Fe-Cr17不锈钢存在固溶度,延长保温时间,钎料中的Si元素能更加均匀地分布在焊缝中,形成较少的金属间硅化合物,提高焊缝质量。为研究保温时间对钎焊接头界面组织规律的影响,分别对钎焊接头进行保温10 min、20 min、30 min处理,得到不同保温时间下接头的界面微观组织,如图4所示。可以看出,随着保温时间的延长,焊缝中心的金属间化合物逐渐减少直至消失,微观组织趋于均匀化。由图4a可知,当钎焊接头保温时间为10 min时,由于Si原子直径大,扩散速度较慢,在较短的钎焊保温时间内大量Si元素来不及扩散至钎焊接头界面而停留在焊缝中心,生成由FCC固溶体和Laves相组成的共晶组织及少量硅化物,如 Ni_3Si_2 、

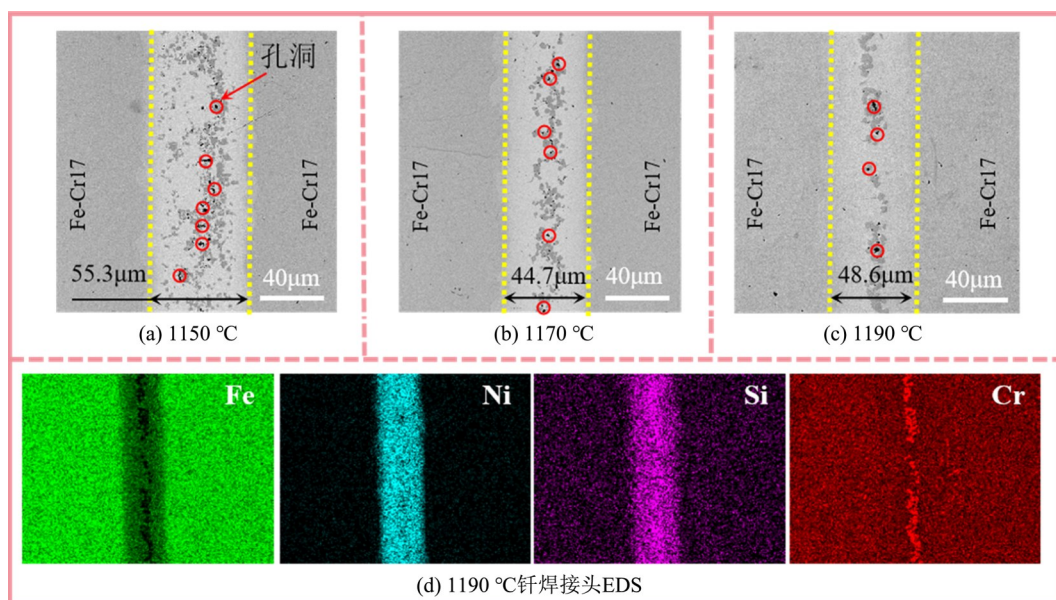


图3 不同钎焊温度下的钎焊接头微观组织和EDS

Fig. 3 Micrographs of brazed joints at different brazing temperatures

$\text{Cr}_3\text{Ni}_5\text{Si}$ 等硅化物^[14]。当保温时间延长至 20 min 时, Si 元素向母材侧扩散更加均匀, 焊缝中心的硅化物明显减少。而当保温时间增至 30 min 时, 焊缝中心金属间化合物消失, 整个焊缝全为 Ni-Cr-Fe 固溶体^[16], Si 元素有足够时间向母材中扩散, Si 元素在母材与焊缝中均匀分布, 结构弥散提高了机械性能。综上所述, 当 Fe-Cr17 不锈钢钎焊的保温时间

为 30 min 时, 钎焊接头的质量较好。

2.4 焊缝厚度对焊缝组织的影响

钎焊过程中, 焊缝厚度的变化会引起缝组织发生改变, 同时也使得钎焊接头的强度和延性发生变化。为了探究 BNi-5 钎料焊接 Fe-Cr17 不锈钢合适的焊缝厚度, 对焊缝厚度为 30 μm、60 μm 及 80 μm 接头组织进行分析。由图 5 可知, 当焊缝厚度较小

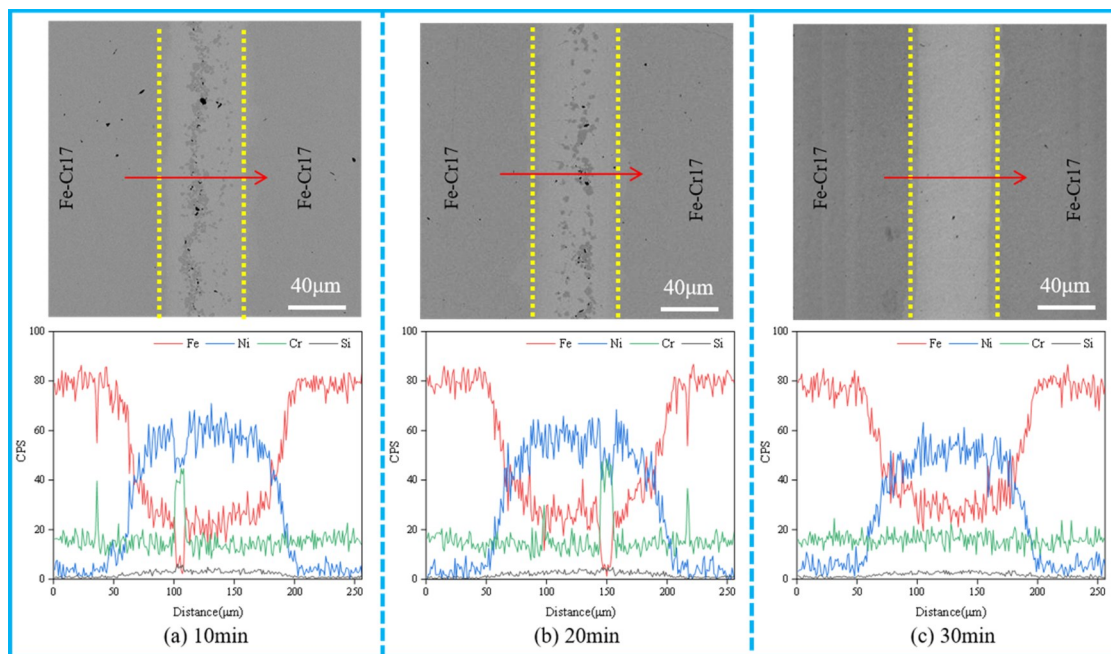


图4 不同保温时间下的钎焊接头微观图和接头成分分析

Fig. 4 Micrographs of brazed joints with different holding times

时,焊缝中心处出现裂缝,随着焊缝厚度的增加,焊缝组织结构逐渐弥散均匀,而当焊缝厚度较大时,焊缝中心出现白色带状物。如图 5a 所示,当焊缝厚度为 30 μm 时,涂敷的钎料较少,钎料填充焊缝变得困难,钎缝间隙内的气体、钎料残渣排出较难,导致焊缝中心处出现连续的裂缝,接头力学性能会急剧下滑。如图 5b 所示,当焊缝厚度为 60 μm 时,钎料中 Si、Cr 等元素含量适中,在镍中的极限溶解度内,扩散距离也适中,因此,在钎焊时间内这些元素可以全部扩散,故焊缝中心并没有脆性相生成,焊缝组织结构弥散均匀,主要为单一的固溶体组织,焊缝质量较好;而当焊缝厚度为 80 μm 时(见图 5c),焊

缝中心出现白色带状物,随着焊缝厚度的增加,母材之间 BNi-5 钎料也增多, Si 元素含量增多,扩散距离也增大,使得其超过在镍中的极限溶解度,而多余的含量与其他元素形成了脆性的硅化物,因此,焊缝中心留下了连续的化合物层。根据各主要元素在 80 μm 接头的元素分布情况(见图 5c), Si 元素在中间位置有小的突起峰, Si 会与其他金属元素生成脆性金属化合物,同样 Ni 元素在接头中心位置也有突起峰,出现了 Ni 的富集,生成了以脆性的镍基为主的铬硅化合物,对应焊缝中心白色带状物,会导致力学性能下降。根据分析确定焊缝最佳厚度为 60 μm 。

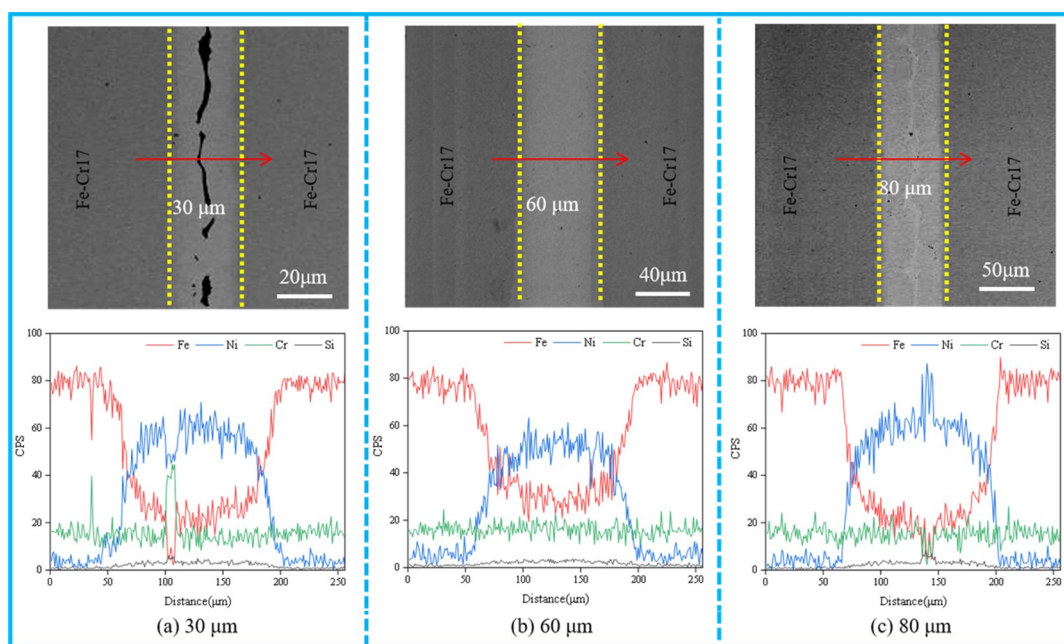


图 5 不同焊缝厚度的接头微观图和接头成分分析

Fig. 5 Micrographs of brazed joints for different weld thicknesses

2.5 力学性能测试

2.5.1 钎焊接头显微硬度分布

根据优选后的钎焊工艺参数,制备显微硬度测试试样。钎焊接头焊缝区域不同位置的显微硬度测试结果由图 6 所示,焊缝处的硬度值分布呈现两边低、中间高的变化趋势,且从母材至焊缝中心的硬度变化梯度较大。这是因为在钎焊过程中,焊缝中心处的硅化物扩散到扩散区与融合区,导致从母材到焊缝中心硬度变化比较陡峭。由图 6b 可知,这种硅化物的分布更加靠近焊缝中心区。扩散区主要由铁基固溶体组成,其硬度值与母材相近;而在

融合区,随着镍元素含量的增加,会形成以镍基固溶体为主的组织,硬度值提高较明显;在焊缝中心区硬度分布平缓,峰值硬度为 748.4 HV 且明显高于钎料与母材界面的位置,这是由于焊缝中心处的共晶组织中的硅化物被 Ni-Cr 韧性相包裹,生成 Ni (Cr, Fe, Si) 固溶体,均匀分散在焊缝中心,使得接头强度提高。

2.5.2 钎焊接头剪切性能测试

钎焊件与其他电池组件的连接必须牢固且可靠,以承受操作过程中的热应力和机械应力。剪切测试是一种力学性能测试方法,用来评估材料在剪

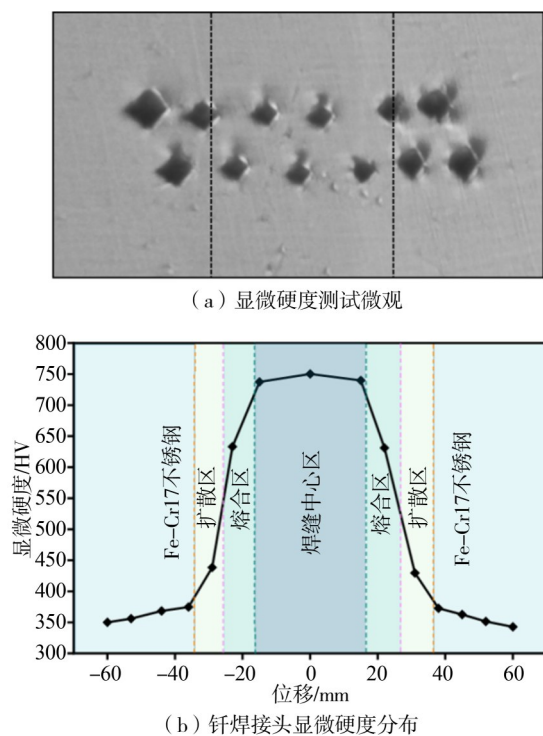


图6 钎焊接头显微硬度测试

Fig. 6 Microhardness test diagram of brazed joints

切力作用下的抵抗变形和断裂能力。采用上述优选的钎焊工艺制备剪切接头试样,对钎焊接头试样进行抗剪切测试,测试时对试样施加的剪切力速度为0.1 mm/min,通过静态加载的方式,缓慢施加剪切力直至试样发生断裂。为了保证试验的准确性,对优选钎焊工艺下的试样进行了5次测试,取其平均值,测试结果如图7所示。由图7c可知,钎焊接头抗剪切强度达到436.76 MPa,有较好的抗剪切强度;根据图7a和图7b接头断裂形貌可知,断裂发生在焊缝之间,接头断裂处明显有韧窝存在,这是由于焊缝中心区域的共晶组织中的硅化物脆性相被Ni-Cr韧性相包裹,当裂纹扩展到Ni-Cr韧性相时,钎焊接头的强度高,呈现出撕裂状的断面特征^[14];受到剪切力后,共析组织的弥散强化效应导致局部区域内发生塑性变形,形成韧窝,接头的断裂模式为韧脆混合断裂。

为进一步评估钎焊件在高温环境下的剪切强度,进行了室温~750℃范围内的长期保温及多次热循环测试。在750℃高温下,分别保温20 h、40 h、60 h、80 h、100 h,随后再以2℃/min的降温速率冷却至室温。对不同保温时长的力学试样进行抗剪

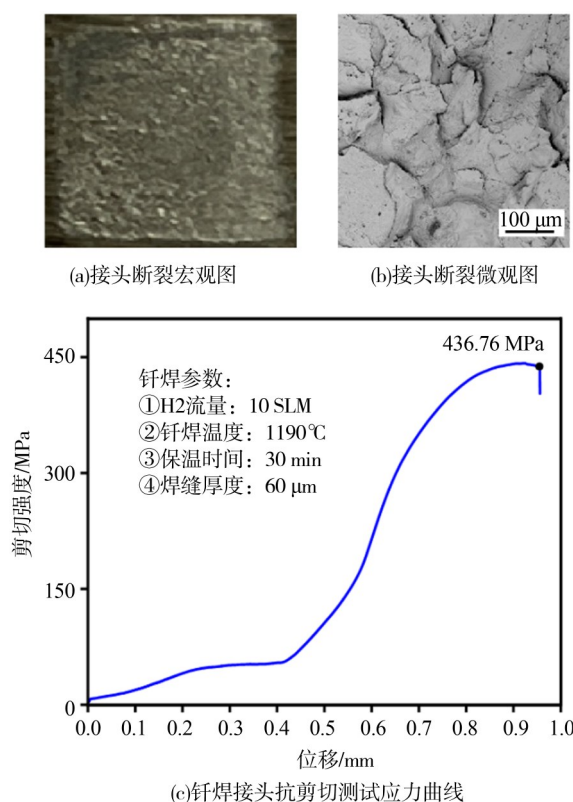


图7 钎焊接头断裂形貌图和抗剪切测试

Fig. 7 Brazed joint fracture topography and shear resistance test

切力测试,结果见图8a,剪切强度拟合曲线见图8b。经过不同时长的高温热处理后,80 h保温试样的剪切强度达到最大值434.32 MPa,而20 h保温试样的剪切强度最低。由测试结果可知,即使经过100 h的高温处理后,抗剪切强度仍保持在400 MPa以上,有较强的结合力。五组试样的平均抗剪切强度为417.25 MPa,且在100 h后力学性能趋于稳定。

热循环抗剪切力测试结果如图8c所示,剪切强度拟合曲线如图8d所示。经历4次热循环的试样表现出最大剪切强度442.09 MPa,而经历2次热循环的试样剪切强度最低,为402.26 MPa。五组试样的平均抗剪切强度为420.26 MPa,钎焊件的力学性能在2次热循环时趋于稳定。相比长期高温服役后的平均抗剪切强度略有上升,表明长期高温服役相比热循环对连接强度影响更大。根据测试结果,在经历长期保温与热循环后,抗剪切强度基本保持不变。因此,此焊接工艺下的钎焊连接强度对于固体氧化物燃料电池堆的组装和长期运行是至关重要的,它能够提高SOFC系统的可靠性、降低维护成

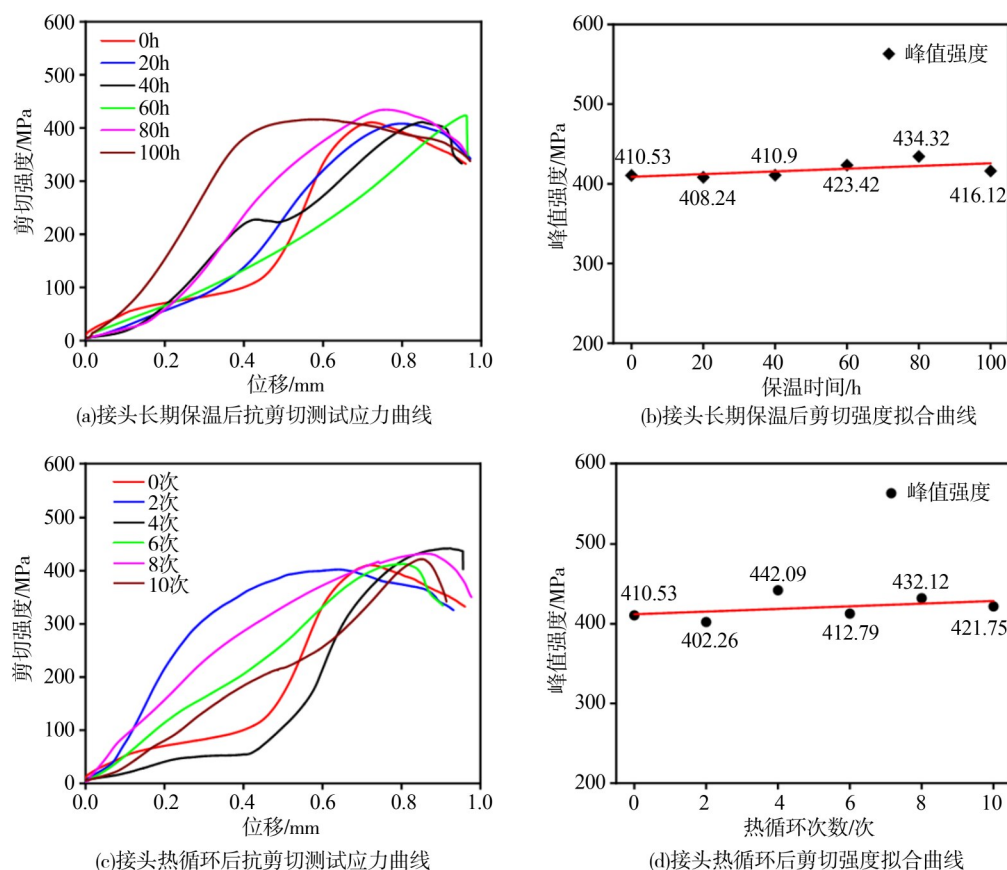


图8 钎焊接头抗剪切测试

Fig. 8 Brazed joint shear resistance test

本,并延长燃料电池的使用寿命。

3 结论

本文研究了 H_2 流量、钎焊温度、保温时间及焊缝厚度对Fe-Cr17不锈钢与BNi-5镍基钎料钎焊接头的微观组织、扩散层及力学性能的影响。主要结论如下:

(1)当 H_2 流量为10 SLM时,钎焊时 H_2 浓度可以还原Fe-Cr17不锈钢表面的氧化膜 Cr_2O_3 ,促进钎料润湿铺展,效果较好。钎焊温度为1 190 $^{\circ}C$,保温时间为30 min,焊缝厚度为60 μm 时,焊缝被镍基铬铁固溶体填满,钎焊接头质量较好。

(2)对钎焊接头进行力学性能测试。钎焊后,焊缝显微硬度呈中间高两边低,中心区域最大硬度748.4 HV,距离焊缝中心越远,显微硬度越小。未作任何热处理的剪切试样,抗剪切强度为436.76 MPa,接头的断裂模式为脆性混合断裂。剪切试样经过

750 $^{\circ}C$ 、不同热循环次数后的平均抗剪切强度为420.26 MPa。在750 $^{\circ}C$ 保温不同时间后测试其抗剪切强度,平均抗剪切强度为417.25 MPa,钎焊接头有可靠的接结合性能以及长期寿命。

参考文献:

- [1] 刘琨,黄辉,陈曦,等.低温固体氧化物燃料电池发展及应用[J].稀土,2024(03):135-142.
LIU K, HUANG H, CHEN X, et al. Development and Application of Low Temperature Solid Oxide Fuel Cell [J]. Chinese Rare Earths, 2024(03): 135-142.
- [2] GANDIGLIO M, MAROCCO P, NIEMINEN A, et al. Energy and environmental performance from field operation of commercial-scale SOFC systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 85: 997-1009.
- [3] ETTALIBI O, BOUMERIAME H, ACHAK O, et al. Advanced electrolyte materials based on natural minerals for low- temperature solid oxide fuel cells applications[J]. Fuel, 2024, 377: 132848.
- [4] YANG Z G. Recent advances in metallic interconnects

- for solid oxide fuel cells[J]. International Materials Reviews, 2008, 53(1): 39–54.
- [5] 刘聚. 固体氧化物燃料电池金属连接体材料高温氧化性能研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023.
- LIU J. High temperature oxidation performance of metal connectors for solid oxide fuel cells[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [6] 蒲健, 华斌, 杨杰, 等. SOFC 金属连接体材料的高温氧化和导电性能[J]. 钢铁研究学报, 2007(10): 34–39.
- PU J, HUA B, YANG J, et al. Oxidation Kinetics and Electrical Conductivity of Heat Resistant Alloys Used as SOFC Metallic interconnects[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2007(10): 34–39.
- [7] 游鹏飞. SOFC 铁素体不锈钢连接体用 NiFe₂O₄ 基涂层的制备与高温性能[D]. 安徽: 中国科学技术大学, 2018.
- YOU P F. Preparation and high temperature performances of NiFe₂O₄ spinel coating for ferritic stainless steel[D]. Anhui: University of Science and Technology of China, 2018.
- [8] 周文龙. 3YSZ 陶瓷与 Crofer22H 不锈钢空气反应钎焊工艺及机理研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2021.
- ZHOU W L. Reactive air brazing process and mechanism of 3YSZ ceramics and Crofer22H stainless steel [D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [9] 石浩江, 颜家振, 李宁, 等. Ag–Cu 钎料真空钎焊 Fe–CrMo/MnCu 阻尼合金钎焊接头的组织及性能研究[J]. 热加工工艺, 2019(13): 50–53.
- SHI H J, YAN J Z, LI N, et al. Study on Microstructure and Performance of FeCrMo/MnCu Damping Alloy Brazed Joint by Vacuum Brazing Using Ag–Cu Filler Metal[J]. Hot Working Technology, 2019(13): 50–53.
- [10] 田晓羽, 张志伟, 周晨, 等. 钎焊温度对 BNi–2 非晶钎料钎焊 1Cr18Ni9Ti 不锈钢组织和性能的影响[J]. 焊接学报, 2024(06): 61–67.
- TIAN X Y, ZHANG Z W, ZHOU C, et al. Effect of brazing temperature on microstructure and properties of 1Cr18Ni9Ti stainless steel brazed by amorphous BNi–2 filler[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024(06): 61–67.
- [11] 师伟伟, 谢斌. 利用 X 光无损检测 SOFC 金属封接的试验研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2017, 47(12): 1002–1005.
- SHI W W, XIE B. Study on X-ray nondestructive testing of SOFC metal brazing[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2017, 47(12): 1002–1005.
- [12] Kim J Y, Hardy J S, Weil K S. Novel Metal–Ceramic Joining for Planar SOFCs [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2005: 152–156.
- [13] 张启运, 庄鸿寿. 钎焊手册第 3 版[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 183–184.
- [14] 谷海明, 唐新华. 不锈钢真空钎焊工艺特点及其应用[J]. 热加工工艺, 2011(23): 164–167.
- GU H M, TANG X H. Process Characteristics of Vacuum Brazing for Stainless Steel and Its Application [J]. Hot Working Technology, 2011(23): 164–167.
- [15] 马壮. TiAl/GH4169 异质高温合金真空钎焊工艺及接头组织性能研究[D]. 河南: 河南农业大学, 2024.
- MA Z. Research on vacuum brazing process of TiAl/GH4169 heterogeneous super alloys and microstructure and mechanical properties [D]. Henan: Henan Agricultural University, 2024.
- [16] 赵公祥. BNi5 镍基钎料真空钎焊 316L 不锈钢接头组织性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- ZHAO G X. Study on microstructures and properties of 316L stainless steel joint vacuum brazing with BNi5 nickel-based filler metal [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [17] 于治水, 祁凯, 李瑞峰, 等. BNi–2+BNi–5 复合钎料钎焊不锈钢填缝能力及其组织性能研究[J]. 热加工工艺, 2009(03): 111–113.
- YU Z S, QI K, LI R F, et al. Study on Clearance Filling Ability and Interfacial Structure of 316L Stainless Steel Brazed joint Using BNi–2+BNi–5 Composite Filler [J]. Hot Working Technology, 2009(03): 111–113.
- [18] 张冠星, 张雷, 沈元勋, 等. 感应钎焊工艺对钎缝组织和性能的影响[J]. 焊接, 2020(07): 30–34.
- ZHANG G X, ZHANG L, SHEN Y X, et al. Effect of induction brazing process on microstructure and properties of brazing seam [J]. Welding & Joining, 2020(07): 30–34.