

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.04.10

Inconel 738Lc/BNi-2/Hastelloy X 接头钎焊工艺与性能研究

陈兴东^{1,2}, 杨季坤^{1,2}, 刘亚兵^{1,2}, 孙浩³, 陈斌³, 付伟³

1. 东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000

2. 清洁能源透平动力装备全国重点实验室, 四川 德阳 618000

3. 哈尔滨工业大学(威海) 山东省特种焊接技术重点实验室, 山东 威海 264209

摘要: 异种高温合金的钎焊, 一直是钎焊领域内的热点。以 Inconel 738Lc 与 Hastelloy X 异种高温合金为对象, 采用 0.3 mm/BNi-2 粘带钎料, 在真空度 1.3×10^{-3} Pa 条件下进行了不同温度下 (1 060~1 140 °C) 的钎焊试验, 系统探究了所获钎焊接头的微观组织、元素扩散和断口形貌等。结果表明, 接头典型界面微观组织为 IN738Lc/ γ -Ni+ β_1 +Ni-boride+Cr-boride/ γ -phase+(Ni, Cr)-B+(Cr, Ni, Fe, Mo) B/Hastelloy X。1 060 °C 时, 钎缝中心形成富 Cr/Ni 硼化物相; 当温度升至 1 100 °C, 硼化物相完全溶解, 形成均匀 Ni(s, s) 组织, 此时接头平均剪切强度达峰值 227.62 MPa, 较 1 060 °C 时提升 13.1%, 断裂机制表现为 IN738Lc 母材解理断裂; 进一步升高温度至 1 140 °C, B 元素在 HX 晶间扩散深度增至 159.2 μ m, 诱发脆性 (Cr, Ni, Fe, Mo) B 相沿晶界析出, 导致强度下降至 189.27 MPa。基于此, 确立了 1 100 °C/10 min 为最优工艺参数, 接头强度达 IN738Lc 母材室温抗拉强度 (247 MPa) 的 92%, 满足燃气轮机蜂窝密封部件长时服役需求。

关键词: Inconel 738Lc 合金; Hastelloy X 合金; 异种材料连接; 钎焊; 力学性能

中图分类号: TG454 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)04-0073-08

Research on Brazing Process and Performance of Inconel 738Lc/BNi-2/Hastelloy X Joints

CHEN Xingdong^{1,2}, YANG Jikun^{1,2}, LIU Yabing^{1,2}, SUN Hao³, CHEN Bin³, FU Wei³

1. Dongfang Electric Group Dongfang Turbine Co., Ltd., Deyang 618000, China

2. National Key Laboratory of Clean and High-Efficiency Turbomachinery Power Equipment, Deyang 618000, China

3. Shandong Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, China

Abstract: Brazing of dissimilar high-temperature alloys has always been a hot topic in the field of brazing. Taking Inconel 738Lc and Hastelloy X dissimilar high-temperature alloys as the research object, and using 0.3 mm/BNi-2 tape brazing filler, brazing experiments were conducted under vacuum condition of 1.3×10^{-3} Pa at different temperatures (1 060~1 140 °C). The microstructure, element diffusion, and fracture morphology of the obtained brazing joints were systematically investigated. The results show that the typical interface microstructure of the joint is IN738Lc/ γ -Ni + β_1 +Ni-boride+Cr-boride/ γ -phase+(Ni, Cr)-B+(Cr, Ni, Fe, Mo) B/Hastelloy X. At 1 060 °C, a Cr/Ni-rich boride phase is formed in the center of the brazing seam; when the temperature rises to 1 100 °C, the boride phase dissolves completely, forming a uniform Ni(s, s) structure, and the average shear strength of the joint reaches its peak value of 227.62 MPa, which is 13.1% higher than that at 1 060 °C, and the fracture mechanism is characterized by the cleavage fracture of the IN738Lc base material. Further increasing the temperature to 1 140 °C, the diffusion depth of the B element in the HX grain boundary increases to 159.2 μ m, inducing the precipitation of the brittle (Cr, Ni, Fe, Mo) B phase along the grain boundary, resulting in a decrease in strength to 189.27 MPa. Based on this, the optimal process parameters are determined to be 1 100 °C/10 min, and the joint strength

收稿日期: 2024-04-01 修回日期: 2024-06-12

作者简介: 陈兴东(1980—),男,硕士,正高级工程师,主要从事焊接工艺、特种焊接技术应用等研究。E-mail: chenxindong@dongfang.com。

reaches 92% of the room temperature tensile strength of the IN738Lc base material (247 MPa), meeting the long-term service requirements of gas turbine honeycomb sealing components.

Keywords: Inconel 738Lc alloy; Hastelloy X alloy; dissimilar materials joining; brazing; mechanical properties

引用格式:陈兴东,杨季坤,刘亚兵,等. Inconel 738Lc/BNi-2/Hastelloy X 接头钎焊工艺与性能研究[J].电焊机,2025,55(4):73-80.

Citation: CHEN Xingdong, YANG Jikun, LIU Yabing, et al. Research on Brazing Process and Performance of Inconel 738Lc/BNi-2/Hastelloy X Joints[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(4): 73-80.

0 引言

蜂窝气封是目前最先进的高温燃气密封结构之一,其采用蜂窝状高温合金材料通过钎焊工艺,将其焊接于高温合金背板或其他合金基体上并经过特殊的加工工艺制成。蜂窝结构除对高温气流具有极强的涡流阻尼作用外,还具有质量轻、比强度高、吸能减震性好等诸多优点,被广泛应用于航空航天、舰载燃机及地面重型燃气轮机的高温燃气密封领域^[1]。而目前,随着高效、绿色的能源发展需求的持续深入,效率及燃烧温度更高的航空、地面重型燃机机型正在不断出现,这对蜂窝密封部件的高温服役性能、抗氧化性与长寿命性能等提出了更高的要求^[2]。

Inconel 738Lc (IN738Lc) 是一种含有 Mo、W、Ta、Nb 等难熔元素的固溶时效镍基铸造高温合金,其通过 γ - γ' -Mc 三相强化,具有优良的抗氧化、耐腐蚀和抗蠕变性能,被大量应用于航空航天的涡轮耐热耐腐蚀零部件及燃气轮机透平叶片的制造^[3-4]。Hastelloy X 镍基合金,是一种面心立方结构的固溶强化合金,因其具有优异的加工性能而被称为变形高温合金,其具有良好的高温性能,在 900 °C 高温下具有出色的抗氧化性能和高强度,广泛应用于航空发动机燃烧区的隔热罩、燃烧室壳体、排气管和机舱加热器等领域。而 Inconel 738Lc 合金良好的铸造性能与 Hastelloy X 合金良好的加工性能有机结合,可实现大型耐高温蜂窝密封结构的制造^[5]。

真空钎焊技术具有对焊接零件尺寸及结构适应性强,制造成本低,操作过程简便易行等优点,广泛应用于复杂结构件的连接^[6]。钎料的选择是真空钎焊试验重要的一环,镍基钎料是最常用的高温钎料之一。Su 等人^[7]采用 DF4B 型镍基钎料在 1 190 °C 下对 IN738Lc 进行钎焊,所获得钎焊接头的室温强

度达到母材的 80%, 980 °C 高温强度达到母材水平。Kokabi 等人^[8]采用 Ni-Si-B 钎料对 TiAl 与 IN738Lc 进行钎焊连接,所获得钎焊接头最高剪切强度达到 273 MPa。杨斯楠等人^[9]采用 Ni-Cr-Fe 基钎料对 Hastelloy X 高温合金进行了活性扩散钎焊,形成了良好的焊接接头,但未对接头强度进行表征。

本文采用国产 BNi-2 粘带钎料进行变形高温合金 Hastelloy X 与铸造高温合金 Inconel 738Lc 的钎焊搭接试验,分析了在不同钎焊温度(1 060~1 140 °C)、不同保温时间(5~20 min)下,钎焊接头中元素的扩散分布、析出相的形成、分布以及接头的剪切强度和断口形貌的变化规律,以期对未来高参数燃气轮机蜂窝密封部件的钎焊工艺技术优化、长时服役评估等提供一些理论数据支撑。

1 试验材料与方法

试验用基体材料为 Inconel 738Lc 铸造合金和 Hastelloy X 镍基合金板材,其化学成分见表 1、表 2。

表 1 Inconel 738Lc 合金的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Compositions of nickel alloy Inconel 738Lc (wt. %)

Ni	Cr	Mo	Co	W	Al	Ti	Ta
Bal	15.92	1.59	8.11	2.66	3.21	3.45	1.73

表 2 Hastelloy X 合金的化学成分(质量分数,%)

Table 2 Compositions of nickel alloy Hastelloy X (wt. %)

Ni	Cr	Fe	Mo	Co	W
Bal.	22.11	18.41	9.07	1.92	1.14

试验用 BNi-2 粘带钎料为国内某公司提供,其化学成分如表 3 所示,差示扫描热量法(Differential Scanning Calorimetry, DSC)测试发现在 520.7 °C 出现了一个显著的放热峰,在 964.7 °C~1 030.9 °C 出现了两个吸热峰,如图 1 所示。钎料在 520.7 °C 时的放热峰说明钎料颗粒发生了晶化,钎料在 981.3 °C 与 1 013.7 °C 出现两个吸热峰的原因是 BNi-2 钎料

在 520.7 °C 晶化时生成了多相晶体,各相熔点有所差异导致多个吸热峰的出现^[10]。由放热峰区间确定钎料的固相线为 964.7 °C,液相线为 1 030.9 °C,因此钎焊温度需大于 1 030.9 °C。

表3 BNi-2粘带钎料的化学成分(质量分数,%)

Table 3 Compositions of BNi-2 tape filler (wt. %)			
Ni	Cr	Si	Fe
Bal.	9.73	5.21	4.49

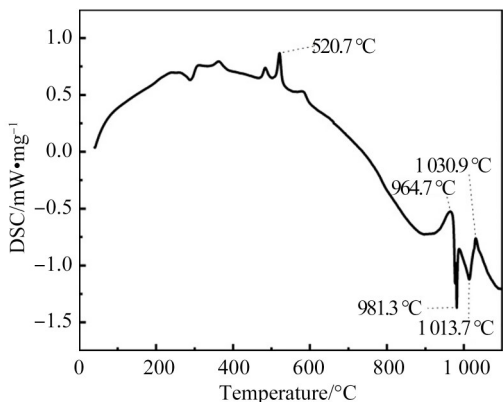


图1 BNi-2粘带钎料的DSC曲线

Fig. 1 DSC curve of BNi-2 tape filler

试验前,依据 GB/T11363—2008《钎焊接头强度试验办法》加工母材,尺寸如图2所示。用砂纸打磨母材待焊面至光滑,然后将 Inconel 738Lc、Hastelloy X 合金放入丙酮溶液中,使用超声波清洗机清洗 10 min 后进行装配,如图3所示,并置于真空度为 1.3×10^{-3} Pa 的真空钎焊炉进行钎焊。钎焊过程为:以 10 °C/min 升温速率升温至 200 °C 并保温 10 min,

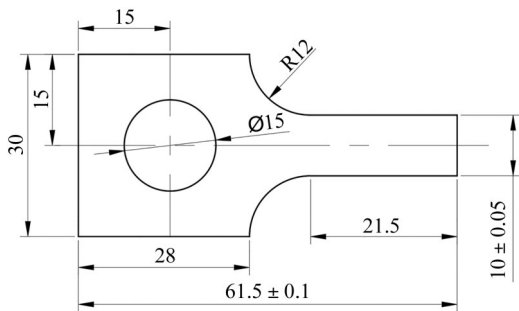


图2 母材加工图样

Fig. 2 Masterbatch processing pattern

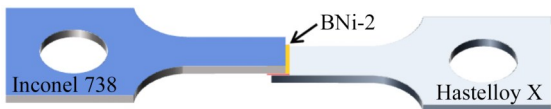


图3 钎焊装配示意

Fig. 3 Diagram of brazing assembly

再以 5 °C/min 的速率升至 920 °C 保温 20 min,最后以 5 °C/min 的速率升至所需焊接温度并保温 10 min 完成钎焊。之后随炉冷却至室温。

采用配备能谱仪(Octane Plus, EDAX, Mahwah, NJ, USA)的场发射扫描电子显微镜(MERLIN Compact, ZEISS, Stuttgart, Germany)对接头组织形貌及物相、元素分析。根据相应参数,使用拉伸试验机对试样(各5支试样,加载速率为 2.4 mm/min)的剪切性能进行测试。断口形貌研究通过扫描电子显微镜(SEM)进行。

2 试验结果与讨论

2.1 钎焊接头典型界面组织

Inconel 738Lc/BNi-2/Hastelloy X 搭接接头的典型钎焊界面如图4所示(钎焊条件:1 060 °C/10 min)。可以看出该钎焊接头呈良好的微观形貌,各类析出相清晰,界面平整无缺陷,可视为典型的钎焊界面。依据该接头界面状态可将其划分为4个区域:I区为 IN738Lc 侧基体互熔区,II区为钎缝的中间区域,III区为 Hastelloy X 侧界面互熔区,区域IV为 Hastelloy X 侧基体扩散区。

通过 EDS 对 I、II、III、IV 区域进行元素面扫描,其元素分布如图5所示。钎缝区域中的 Ni 元素含量高于两侧母材,而钎缝中的黑色块状相中的 Ni 含量极低。同时,在黑色块状相中存在显著的富 Cr 现象。钎料中 Si 元素自 II 区向两侧扩散,单侧扩散区接近 50 μm ,而在钎缝中心的灰白色相中分布极少,表明该灰白色相排斥 Si 元素。Ti 元素从 IN738Lc 一侧向 Hastelloy X 合金一侧扩散并呈梯度分布,且在 IN738Lc 合金一侧的亮白色相中大量富集,同时在钎缝中心的灰白色相中也呈现富集现象。Nb、Ta 元素在 IN738Lc 合金中的亮白色相中也存在富集现象。Mo 元素在钎缝中心的黑色块状相中出现富集,同时在 Hastelloy X 合金中也存在网状富集。Fe 元素的扩散呈现梯度分布,并在 III 区内的含量明显下降。

结合图4、图5可以看出,IN738Lc 一侧出现了明显的互熔,II区中白色相主要由 Ni 组成,附含少量的 Ti、Nb 元素。黑色块状相富含 Cr 及少量 Mo 元

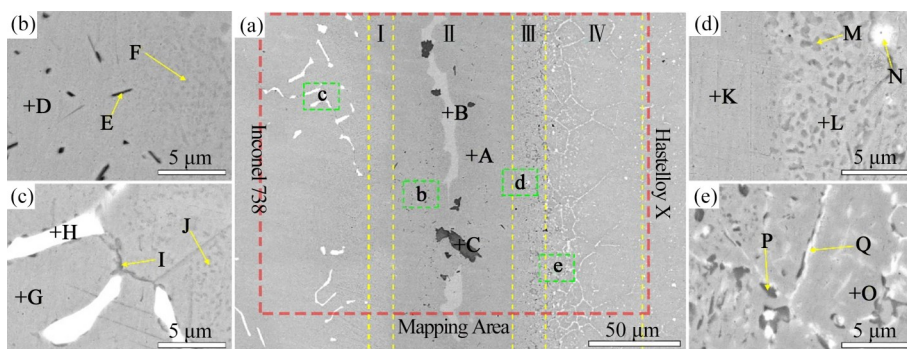


图4 Inconel 738/BNi-2/Hastelloy X接头的典型界面微观组织(1 060 °C/10 min)

Fig. 4 Typical interfacial microstructure of Inconel 738/BNi-2/Hastelloy X brazed joints(1 060 °C/10 min)

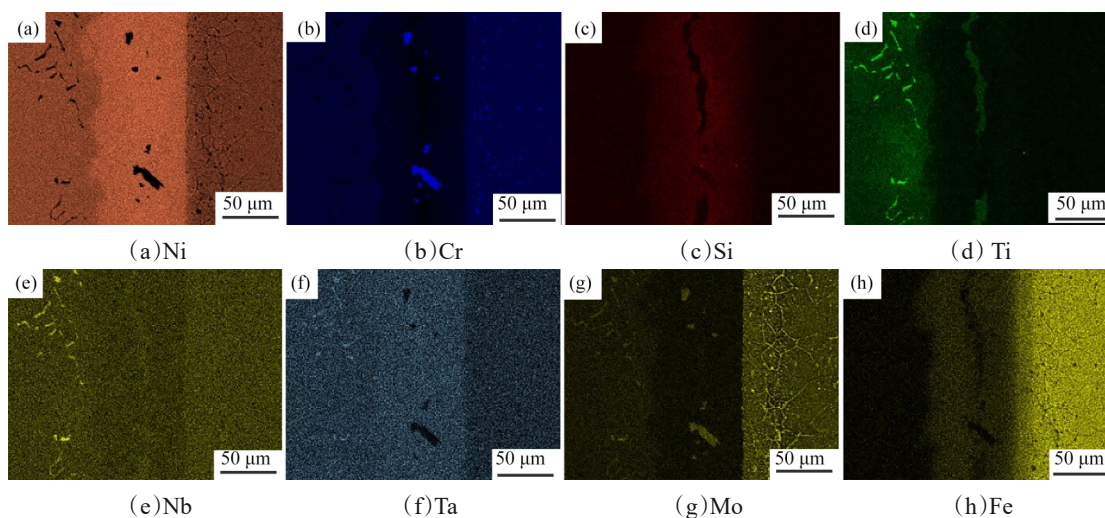


图5 IN738/BNi-2/Hastelloy X接头中元素面扫描结果:

Fig. 5 Element surface scanning results of IN738/BNi-2/Hastelloy X joint

素。钎缝中除Ni、Cr、Si、Fe等BNi-2钎料自身含有的元素外,还存在Ti、Nb、Ta、Mo等元素,说明钎缝两侧的母材已向钎缝内互熔,同时IV区内Cr、Mo元素呈网状分布,表明钎料的元素已向母材扩散。

表4为图4中各标注点的EDS分析结果。结合钎焊接头中元素分布与EDS结果,钎缝中灰色基体相A为富Si的Ni(s,s)相,钎缝中心分布的灰白色相B为富Ni的硼化物相,块状黑色相C为富Cr的硼化物相。从钎缝局部的高倍照片(见图5b)可以看到,浅灰色基体D上分布着大量的颗粒状灰色相F,且F相自钎缝向两侧数量逐渐减少^[11],结合EDS结果与Ni-Si相图^[12]可知,D为 γ -Ni固溶体相,其上分布的F为 β_1 相,同时钎缝中还存在短针状黑色相,根据EDS结果推断其为CrB相;IN738母材基体相G内存在有亮白色相H,结合EDS结果可知其为沿晶界分布的(Ti,Ta,Nb)C相^[13],同时还可观察到沿晶

界分布有深灰色I相以及晶内分布的颗粒状J相,根据EDS结果推断其为(Ni,Cr)-B相。III区基体相L为(Ni,Cr,Fe)固溶体,即 γ 相,其内大量分布着颗粒状M相以及少量的点状白色相N,结合EDS结果推断其M为(Ni,Cr)-B相,N相为富Mo的硼化物相(Cr,Ni,Fe,Mo)B^[14];在IV区内沿晶界分布有黑灰色相P与白色相Q,结合EDS结果推测P为CrB相,Q为富Mo的(Cr,Ni,Fe,Mo)B相^[14]。

综上所述,Inconel 738/BNi-2/Hastelloy X钎焊接头的典型界面组织为IN738/ γ -Ni+ β_1 +Ni-boride+Cr-boride/ γ -phase+(Ni,Cr)-B+(Cr,Ni,Fe,Mo)B/Hastelloy X。

2.2 钎焊温度对钎焊接头界面微观组织的影响

钎焊温度是钎焊工艺中的关键参数之一,其不仅影响钎焊界面的元素扩散、析出相形成和分布等微观特征,还显著影响钎焊接头的力学性能及疲劳

表 4 图 4 中标注点的 EDS 分析(原子分数, %)

Table 4 EDS results of spots in Fig. 4 (at. %)

点	C	Al	Si	Nb	Mo	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Ta	W	可能相
A	—	-	5.59	2.23	—	0.70	7.91	—	3.28	1.58	78.71	—	—	Si riched Ni(s, s)
B	—	-	0.62	3.13	—	4.43	4.55	—	1.86	1.74	83.67	—	—	Ni-boride
C	—	-	—	0.64	4.03	—	90.99	1.64	—	—	2.70	—	—	Cr-boride
D	—	-	3.39	2.22	—	1.13	11.97	0.56	3.94	2.27	73.65	—	0.87	γ-Ni
E	—	-	2.48	2.26	—	1.43	32.33	1.02	3.17	1.93	54.35	—	1.03	(Ni, Cr)-B
F	—	-	5.62	2.22	—	0.61	7.94	—	3.29	1.58	78.74	—	—	β1-phase
G	—	3.28	—	2.58	0.21	4.25	18.68	—	8.52	-	58.60	0.77	1.09	Inconel 738
H	10.10	1.58	—	12.49	1.10	38.25	6.96	—	—	1.73	11.97	12.75	3.07	(Ti, Ta, Nb)C
I	—	3.72	—	2.77	0.79	5.16	30.49	—	—	5.81	49.23	0.55	1.49	(Ni, Cr)-B
J	—	3.33	—	2.61	0.32	3.93	22.59	—	—	8.02	57.35	0.57	1.28	(Ni, Cr)-B
K	—	—	2.64	2.29	0.06	—	12.39	0.79	7.87	2.02	71.03	—	0.91	Ni(s, s)
L	—	—	1.65	2.60	2.33	—	25.10	0.90	13.31	1.81	51.47	—	0.81	γ-phase
M	—	—	1.14	2.64	3.82	—	33.88	1.09	10.95	1.67	43.99	—	0.83	(Ni, Cr)-B
N	—	—	0.49	3.32	9.12	—	36.38	1.15	12.38	1.51	34.57	—	1.09	(Cr, Ni, Fe, Mo)B
O	—	—	—	0.94	1.14	—	24.61	1.13	21.49	2.16	48.54	—	—	γ-phase
P	—	—	—	1.11	6.60	—	60.82	1.25	11.18	0.91	18.14	—	—	CrB
Q	—	—	—	3.61	12.62	—	32.93	1.28	15.77	1.60	31.12	—	1.08	(Cr, Ni, Fe, Mo)B

寿命。为深入研究钎焊温度对界面微观组织、元素扩散及析出相的形成及分布,设定钎焊保温时间为 10 min,分别在 1 060 ℃、1 080 ℃、1 100 ℃、1 120 ℃、1 140 ℃条件下进行 Inconel 738Lc 与 Hastelloy 的钎焊连接试验。不同钎焊温度下接头钎焊界面的微观组织分布如图 5 所示,图中左侧为 Inconel 738Lc 基材,右侧为 Hastelloy X 基材。由图可知,随着钎焊温度的升高,钎缝中的富 Cr 硼化物和富 Ni 硼化物相逐渐消失,Hastelloy X 一侧 B 元素扩散距离增加。

当钎焊温度为 1 060 ℃时,由于钎焊温度较低,不利于钎缝中的低熔点元素向两侧母材扩散,在降温过程中,钎缝两侧靠近母材的区域因低熔点元素部分渗入母材内部,导致钎料熔点提高并发生等温凝固,使得低熔点元素难以越过已凝固的钎料进入母材,从而在钎缝中心聚集,形成了大块的富 Cr 的硼化物(图 5a 中的 C 相)和富 Ni 的硼化物相^[8,15-16](图 5a 中的 B 相);当钎焊温度上升至 1 080 ℃时,由于温度升高,B 元素能够更充分地扩散至两侧母材,而由于 Si 元素的扩散速度低于 B 元素,所以凝固后钎缝中心富 Cr 的硼化物相消失,仅存有少量的富 Ni 硼化物相(见图 5b 中的 B 相)。此外,先扩散进入母材的 B 元素阻碍了 Inconel 738Lc 母材的进一步溶解,导致 Hastelloy X 一侧 III 区内颗粒状黑灰色与白

色硼化物数量显著增加^[17-18],IV 区深度增至 102.5 μm;当钎焊温度进一步上升至 1 100 ℃时,B、Si 元素均可充分向两侧母材扩散,钎缝组织完全均匀,形成均匀的 Ni(s, s)相,由于 B 元素扩散距离增加,III 区内白色硼化物相减少,IV 区深度进一步增加至 121.3 μm;当钎焊温度达到 1 120 ℃时,B 元素渗入深度进一步增加,III 区黑灰色硼化物相数量增多(图 5b 中的 M 相),IV 区渗入深度增大,达到 127.8 μm;当钎焊温度为 1 140 ℃时,III 区黑灰色硼化物数量减少,IV 区渗入区深度进一步增大至 159.2 μm,约为钎缝宽度的两倍。值得注意的是,渗入区内的白色硼化物相为脆性相,其增多会对钎焊接头性能产生不利影响,应当控制钎焊温度在合适范围内。

2.3 钎焊温度对钎焊接头力学性能和断口形貌的影响

在固定保温时间为 10 min,不同钎焊接头的室温剪强度如图 7a 所示。可以看出,钎焊接头的剪切强度在不同钎焊温度下变化不大且均保持在 200 MPa 以上。随着钎焊温度的升高,抗剪强度呈现出较小的上升-下降趋势,在 1 100 ℃时达到最高值,为 227.6 MPa。

当钎焊温度为 1 060 ℃时,由于钎缝中存在大块的富 Cr 的硼化物和富 Ni 的硼化物硬质相,这些

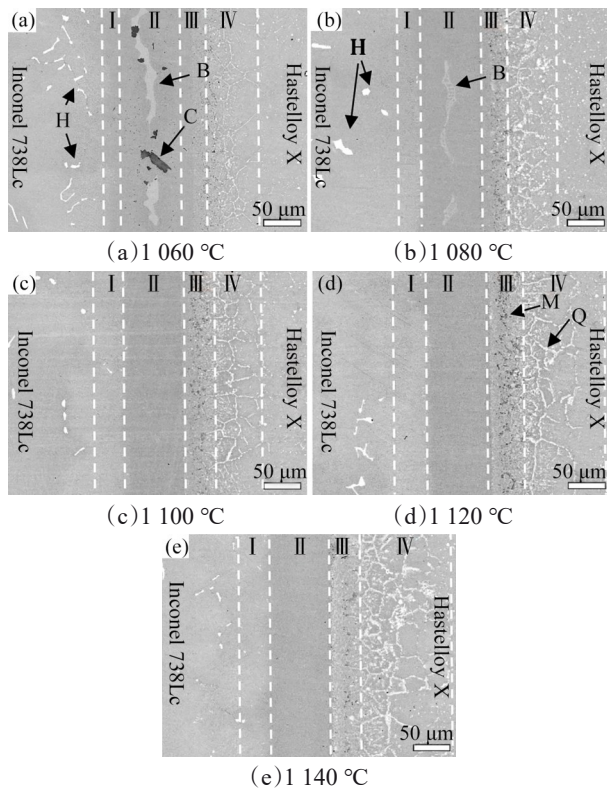


图6 不同钎焊温度下 Inconel 738Lc/BNi-2/Hastelloy X 接头界面结构

Fig. 6 Interface structures of Inconel 738Lc/BNi-2/Hastelloy X joints at different brazing temperatures

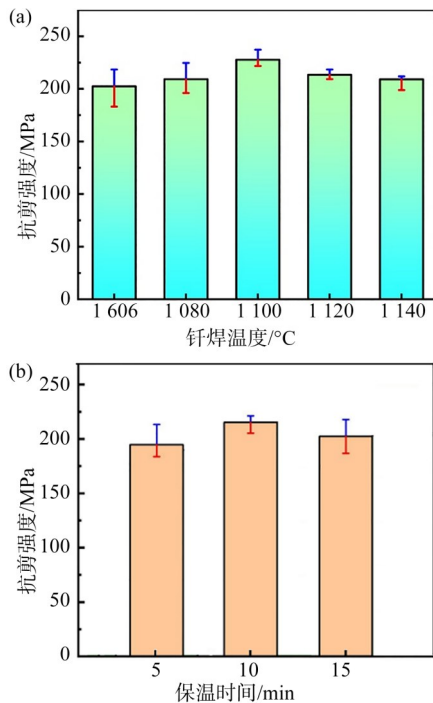


图7 不同钎焊温度及保温时间下接头抗剪强度

Fig. 7 Shear strength of joints brazed at different temperature and times

硬质相将对钎缝的强度产生不利影响。当钎焊温度上升至1080 °C时,钎缝中心的富Cr硼化物相被溶解,仅存在少量的富Ni硼化物析出相,钎缝强度有所提升。当钎焊温度进一步升高至1100 °C时,钎缝组织完全均匀,形成均匀的Ni(s,s)相组织,对接头的强化效果最为明显,接头强度达到最大。当钎焊温度超过1100 °C时,由于Hastelloy X合金一侧B元素渗入深度持续增大,沿晶界分布的白色硼化物相由于其脆性影响接头强度,接头强度持续下降。

此外,本文还采取1100 °C作为保温温度,进行了不同保温时间的剪切性能测试,结果如图7b所示。试验结果显示,剪切强度的变化趋势与不同钎焊温度下剪切强度的变化趋势相似。这主要是由于保温温度和保温时间对元素扩散具有相似的影响。随着保温时间的增加,提供了更充分的元素扩散及反应时间,而温度的增加则使得元素扩散的驱动力增加,因此会产生相似的效果。

在设定保温时间10 min的条件下,不同钎焊温

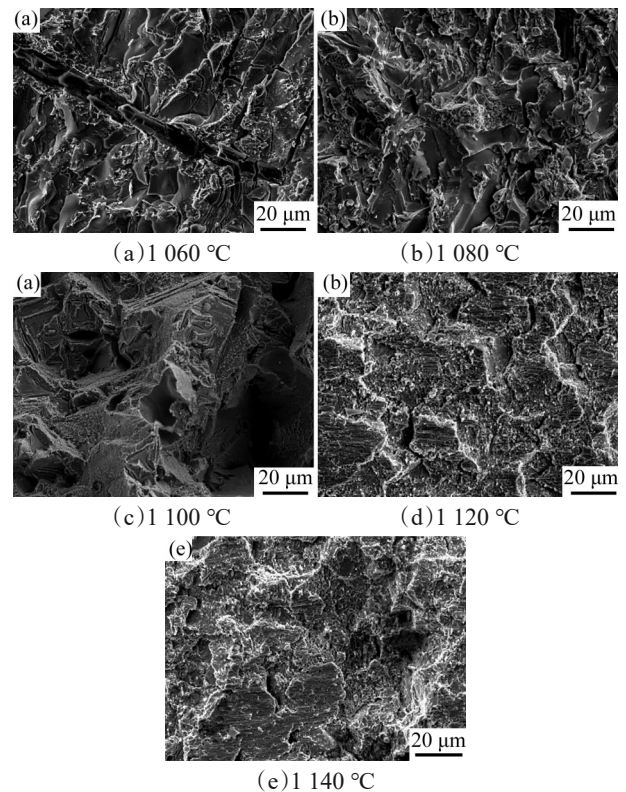


图8 不同钎焊温度下 Inconel 738/BNi-2/Hastelloy X 接头经剪切试验后的断口微观形貌

Fig. 8 Fracture morphology of Inconel 738/BNi-2/Hastelloy X joints brazed at different temperatures after shear test

度下钎焊搭接接头断口形貌如图8所示。1 060 °C时(见图8a),钎焊接头断口可以观察到大块黑色的富Cr硼化物相,断口较平整,可以看到断裂表面上的解理平面、解理台阶与河流状花样,为典型的脆性断裂,同时断口表面可以观察到存在少量韧性断裂,根据2.1节典型界面推测其为 γ -Ni固溶体组织。在1 080 °C时(见图8b),断口表面未发现有CrB相存在,但仍存在有部分区域为韧性断裂。在1 100 °C时(见图8c),由于接头强度升高,断裂位置由钎缝转移至Inconel 738母材,断口表面有解理台阶、解理平面,为脆性断裂。当钎焊温度高于1 100 °C时,断口表面可以观察到沿晶及穿晶断裂特征,这是由于B元素渗入深度增加,且Hastelloy X中渗入区内晶间的白色硼化物相增大,导致强度下降,断裂位置由Inconel 738母材转移至渗入区。

3 结论

通过研究BNi-2粘带钎料钎料连接Inconel 738Lc和Hastelloy X异种镍基合金的温度参数对Inconel 738Lc/BNi-2/Hastelloy X接头界面微观组织、力学性能和断口形貌的影响,得出主要结论如下:

(1)采用BNi-2粘带钎料在1 100 °C下进行钎焊,获得了最佳的接头性能,剪切强度达到227.62 MPa,接近母材强度的92%。接头断裂于Inconel 738Lc母材一侧,呈脆性断裂。

(2)适当的钎焊温度和保温时间能够优化界面组织,形成均匀的Ni(s,s)相,显著提升接头的力学性能。

(3)钎焊温度对界面微观组织和元素扩散有显著影响。在1 100 °C以上,B元素的扩散深度增加,导致Hastelloy X晶间形成脆性的(Cr,Ni,Fe,Mo)B相,从而降低了接头的力学性能。

(4)未来的研究可以进一步探讨时效处理对渗入区硼化物稳定性的影响,以提升接头的高温持久性能。优化钎焊工艺参数以适应更高温度和更长时间服役的需求,将是未来研究的重点方向。

参考文献:

- [1] 付子龙,陈琦,彭俊华. 蜂窝式密封环的优点及加工制造概述[J]. 装备机械,2016(4):21-25.
- [2] 汪超,沈红卫,梅林波. 高温材料在发电燃气轮机中的应用和发展[J]. 热力透平,2014,43(2):94-100.
- [3] 南晴,肖俊峰,唐文书,等. IN738高温合金TIG对接焊温度场及残余应力场数值模拟[J]. 热加工工艺,2017,46(17):202-206.
- [4] 宋昕怡,秦建,钟素娟,等. 镍基高温合金GH4099钎焊连接研究现状[J]. 电焊机,2023,53(8):122-130.
- [5] 柳梓萌,钟嘉城,张檬,等. 哈氏合金X和C-276的力学性能及其在氢燃料电池双极板的应用研究[J]. 力学与实践,2023,45(6):1274-1280.
- [6] 李晓红. 先进航空材料和复杂构件的钎焊与扩散焊技术[J]. 电焊机,2008,38(9):1-12+86.
- [7] 李XH. Brazing and Diffusion Welding Technology of Advanced Aviation Materials and Complex Components [J]. Electric Welding Machine, 2008, 38(9): 1-12+86.
- [8] Su C Y, Lih W C, Chou C P, et al. Activated diffusion brazed repair for IN738 hot section components of gas turbines [J]. JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY, 2001, 115(3): 326-332.
- [9] Kokabi D, Kaflou A, Rastifard H R. Effect of filler metal chemical composition on the TiAl/IN738 dissimilar brazed joint [J]. MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2021, 37(1): 110-120.
- [10] FU Z L, CHEN Q, PENG J H. Advantages and General Overview of the Manufacturing of Honeycomb Seal Rings [J]. Equipment Machinery, 2016(4): 21-25.
- [11] SHEN C, SHEN H W, MEI L B. Application and Development of High-Temperature Materials in Gas Turbines for Power Generation [J]. Thermal Turbines, 2014, 43(2): 94-100.
- [12] NAN Q, XIAO J F, TANG W S, et al. Numerical Simulation of Temperature Field and Residual Stress Field in TIG Butt Welding of IN738 High Temperature Alloy [J]. Thermal Processing Technology, 2017, 46(17): 202-206.
- [13] SONG X Y, QIN J, ZHONG S J, et al. Numerical Simulation of Temperature Field and Residual Stress Field in TIG Butt Welding of IN738 High Temperature Alloy [J]. Thermal Processing Technology, 2017, 46(17): 202-206.
- [14] LIU Z M, ZHONG J C, ZHANG M, et al. Mechanical Properties of Hastelloy X and C-276 and Their Application in Hydrogen Fuel Cell Bipolar Plates [J]. Mechanics & Practice, 2023, 45(6): 1274-1280.
- [15] LI X H. Brazing and Diffusion Welding Technology of Advanced Aviation Materials and Complex Components [J]. Electric Welding Machine, 2008, 38(9): 1-12+86.
- [16] Su C Y, Lih W C, Chou C P, et al. Activated diffusion brazed repair for IN738 hot section components of gas turbines [J]. JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY, 2001, 115(3): 326-332.
- [17] Kokabi D, Kaflou A, Rastifard H R. Effect of filler metal chemical composition on the TiAl/IN738 dissimilar brazed joint [J]. MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2021, 37(1): 110-120.
- [18] 杨斯楠,刘岩,丁坤英,等. Hastelloy X高温合金活性

- 扩散钎焊接头的微观结构[J]. 焊接, 2019(12): 22-26+31+66.
- YANG S N, LIU Y, DING K Y, et al. Microstructure of Hastelloy X high-temperature alloy active diffusion brazing joints [J]. Welding & Joining, 2019 (12): 22-26+31+66.
- [10] 孟卫如, 徐可为, 南俊马, 等. 活性钎料真空单层钎焊金刚石[J]. 稀有金属材料与工程, 2004(7): 771-774.
- MENG W R, XU K W, NAN J M, et al. Vacuum single-layer brazing of diamond with active filler metal [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2004 (7): 771-774.
- [11] 裴冲, 吴欣, 程耀永, 等. 采用 BNi82CrSiB 钎料钎焊 1Cr12Ni3MoVN 不锈钢的接头组织及性能[J]. 电焊机, 2020, 50(9): 268-272.
- PEI C, WU X, CHEN Y Y, et al. Microstructure and properties of joints brazed with BNi82CrSiB filler metal on 1Cr12Ni3MoVN stainless steel [J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(9): 268-272.
- [12] Massalski T B. Binary alloy phase diagrams[M]. Ohio: American Society for Metals, 1986: 66-371.
- [13] Zhang L, Li Y, Zhang S, et al. Selective laser melting of IN738 superalloy with a low Mn+Si content: Effect of energy input on characteristics of molten pool, metallurgical defects, microstructures and mechanical properties [J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 826: 141985.
- [14] 金莹, 刘红亮, 魏鑫, 等. GH4738/GH3536 异种高温合金钎焊接头的组织与性能[J]. 焊接, 2023(10): 18-22+30.
- JIN Y, LIU H L, WEI X, et al. Microstructure and Properties of GH4738/GH3536 Dissimilar High-Temperature Alloy Brazing Joints [J]. Welding & Joining, 2023(10): 18-22+30.
- [15] 孙妍, 张杰, 刘春凤. BNi68CrWB 钎焊 K24/GH648 异种高温合金的界面形成机理[J]. 焊接学报, 2017, 38(6): 61-64+131-132.
- SUN Y, ZHANG J, LIU C F. Brazing mechanism of the dissimilar high-temperature alloy joints (GH648/K24) brazed with BNi68CrWB filler alloy [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2023(10): 18-22+30.
- [16] Kokabi D, Kaflou A, Gholamipour R, et al. Factors affecting strength of dissimilar TiAl/Ni-Si-B/Ni-based superalloy brazed joint [J]. Journal of Materials Science, 2022, 57(8): 5275-5287.
- [17] 李天文, 郭万林, 淮军锋. 镍基钎料钎焊 GH586 高温合金[J]. 材料工程, 2010(10): 48-52.
- LI T W, GUO W L, HUAI J F. Brazing of GH586 high-temperature alloy with nickel-based solder [J]. Materials Engineering, 2010(10): 48-52.
- [18] Lin Y, Jiangtao X, Yajie D, et al. Microstructure and mechanical properties in the TLP joint of FeCoNiTiAl and Inconel 718 alloys using BNi2 filler [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 61: 176-185.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>