

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.08.09

BNi2 非晶钎料钎焊 Haynes 230/Inconel 617 异种金属接头力学性能研究

刘德运¹, 郭瑞臻¹, 李云月¹, 畅海丞¹, 赵 凯², 秦 建^{1*}

1. 中国机械总院集团郑州机械研究所有限公司 高性能新型焊接材料全国重点实验室, 河南 郑州 450001

2. 北京星航机电装备有限公司, 北京 100074

摘 要: 针对 Haynes 230/Inconel 617 异种高温合金精密连接及高温服役需求, 采用 BNi2 非晶镍基钎料开展真空钎焊试验, 固定保温时长 15 min, 设置 1 015 °C、1 035 °C 两组钎焊温度。通过润湿试验、室温剪切及 750 °C 高温剪切试验, 系统探究钎焊温度对钎料润湿铺展性能、异种接头常温及高温力学性能的影响规律。结果表明: 钎焊温度提升对钎料润湿性能存在母材差异化影响, 升温可大幅提高 BNi2 钎料在 Haynes 230 合金表面的铺展面积(平均润湿面积提升 132.9%), 但对 Inconel 617 表面润湿性能无明显改变; 低温工艺(1 015 °C/15 min)接头室温剪切性能与高温力学稳定性俱佳, 室温平均剪切强度达 206.96 MPa, 750 °C 高温平均剪切强度为 126.88 MPa; 高温工艺(1 035 °C/15 min)钎料铺展均匀性更优, 但界面扩散层较宽易生成脆性相, 导致接头高温力学性能下降。基于试验数据揭示了钎焊温度—润湿行为—力学性能的关联机制, 可为镍基异种高温合金钎焊工艺优化及工程应用提供数据支撑。

关键词: BNi2 非晶钎料; Haynes 230 合金; Inconel 617 合金; 真空钎焊; 润湿性能; 力学性能

中图分类号: TG454 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)08-0089-08

Study on Mechanical Properties of Dissimilar Metal Joints Between Haynes 230 and Inconel 617 Brazed with Amorphous BNi2 Filler Metal

LIU Deyun¹, GUO Ruizhen¹, LI Yunyue¹, CHANG Haicheng¹, ZHAO Kai², QIN Jian^{1*}

1. State Key Laboratory of High Performance & Advanced Welding Materials, China Academy of Machinery Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China

2. Beijing Xinghang Mechanical Electric Equipment Co., Ltd., Beijing 100074, China

Abstract: To meet the requirements of precision joining and high-temperature service of dissimilar Haynes 230 and Inconel 617 superalloys, vacuum brazing experiments were carried out using amorphous nickel-based BNi2 filler metal. With the holding time fixed at 15 min, two brazing temperatures of 1 015 °C and 1 035 °C were designed. Wetting tests, room-temperature shear tests and high-temperature shear tests at 750 °C were performed to systematically investigate the effects of brazing temperature on the wetting and spreading characteristics of the filler metal, as well as the room-temperature and high-temperature mechanical properties of the dissimilar joints. The results reveal that increasing brazing temperature exerts differentiated influences on the filler wetting behavior for the two base metals. Temperature rise significantly improves the spreading performance of BNi2 filler on Haynes 230 substrate, while it imposes no obvious variation on the wetting property over Inconel 617. The joint fabricated at the low-temperature process (1 015 °C/15 min) exhibits excellent room-temperature shear strength and superior high-temperature mechanical stability, with an average room-temperature shear strength of 206.96 MPa and an average high-temperature shear strength of 126.88 MPa at 750 °C. Although the high-temperature pro-

收稿日期: 2026-07-01 修回日期: 2026-07-20

基金项目: 中原科技创新青年拔尖人才项目

作者简介: 刘德运(1996—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事钎焊工艺及特种连接。E-mail: ldeyun2022@163.com。

通讯作者: 秦 建(1991—), 男, 博士, 高级工程师。E-mail: qinjianzhu@163.com。



重点
专利
—
高强
钢优
质高
效焊
接

cess (1 035 °C/15 min) achieves more uniform spreading of the filler metal, the excessively thick interfacial diffusion layer facilitates the formation of brittle phases, thereby deteriorating the high-temperature mechanical properties of the joint. The correlation mechanism among brazing temperature, wetting behavior and mechanical properties is clarified based on experimental data. This work can provide reliable data support for process optimization and engineering application of vacuum brazing of dissimilar nickel-based superalloy joints.

Keywords: BNi2; Haynes 230 alloy; Inconel 617 alloy; vacuum brazing; wettability; mechanical properties

引用格式:刘德运,郭瑞臻,李云月,等. BNi2非晶钎料钎焊Haynes 230/Inconel 617异种金属接头力学性能研究[J]. 电焊机,2026,56(8):89-96.

Citation:LIU Deyun, GUO Ruizhen, LI Yunyue, et al. Study on Mechanical Properties of Dissimilar Metal Joints Between Haynes 230 and Inconel 617 Brazed with Amorphous BNi2 Filler Metal[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(8): 89-96.

0 引言

随着航空航天发动机、重型燃气轮机及先进核电装备向高参数、长寿命、轻量化方向迭代,高温承压部件常需在不同温区承担热疲劳、高温氧化与蠕变载荷,单一高温合金已难以满足梯度服役需求^[1-4]。Haynes 230与Inconel 617作为两类典型镍基高温合金,性能互补性显著:Haynes 230合金具备优异的组织热稳定性与抗热疲劳性能,适用于频繁温度交变的结构区域;Inconel 617合金依靠Cr、Co、Mo复合固溶强化效应,在700~800 °C中高温区间具备更高的高温强度与抗蠕变能力,是高温载荷核心区域的优选材料^[5-7]。将两种合金通过可靠连接技术制备成异种复合结构,可实现构件性能分区匹配、减重增效,具备重要的工程应用价值。真空钎焊因焊接变形小、界面应力低、可实现窄间隙精密连接,是镍基高温合金异种连接的主流工艺^[8]。BNi2非晶镍基钎料成分均匀、熔点区间窄,钎后接头组织均匀、缺陷少,广泛应用于高端高温合金构件钎焊制造。

近五年,国内外学者围绕镍基高温合金钎焊工艺、界面组织与性能调控开展了大量研究。国内方面,刘晓芳^[9]等综述了镍基合金焊接技术进展,指出钎焊温度与保温时长是调控脆性金属间化合物析出、改善接头性能的核心参数;薛鹏鹏^[7]等研究了哈氏合金钎焊界面热力强化机制,证实钎料润湿铺展均匀性直接决定接头致密性与服役可靠性;李云月^[10]等针对BNi2钎料钎焊特性开展研究,明确温度升高可提升钎料流动性,但易诱发界面脆性相粗化。国外研究多聚焦Inconel 617合金同种钎焊工

艺优化与长期高温蠕变性能表征,建立了钎焊参数与接头组织稳定性的基础关联模型^[11-14]。现有研究已基本明确单一工艺参数对钎焊接头性能的影响规律,但仍存在明显短板:一是针对Haynes 230/Inconel 617异种金属匹配钎焊的针对性研究较少,缺乏成熟的工艺参数体系;二是多数研究仅测试接头室温力学性能,缺乏750 °C中高温服役工况下的力学数据支撑,无法覆盖构件真实高温服役场景,难以指导工程工艺精准选型。

基于上述研究现状与现存不足,本文开展BNi2非晶钎料钎焊Haynes 230/Inconel 617异种金属接头性能研究,固定保温时长15 min,设置1 015 °C、1 035 °C两组梯度钎焊温度,精准探究钎焊温度对异种母材润湿特性、室温及高温力学性能的单一变量影响规律。本文创新点有:(1)针对Haynes 230/Inconel 617异种金属体系,采用等时变温控制变量设计,剥离保温时长干扰,量化了钎焊温度对两种母材差异化润湿行为的影响机制;(2)基于多组平行试验数据,系统对比两组工艺接头室温与750 °C高温剪切性能,建立“钎焊温度—润湿性能—高温力学性能”的关联规律;(3)明确了低温工艺适配综合服役工况、高温工艺仅适配成形需求的差异化工艺适配机制,为该异种金属钎焊结构的工况化工艺选型提供数据支撑与理论依据。

本文以1 015 °C/15 min、1 035 °C/15 min两组等时变温钎焊工艺为研究对象,基于3组润湿平行试验、5组剪切平行试验原始数据,系统对比两组工艺下BNi2钎料在两种母材表面的润湿铺展性能,以及接头室温、750 °C高温剪切力学性能,结合数据规律与组织形貌揭示工艺影响机制,为该异种合金钎



焊结构的工业化应用提供数据支撑与理论指导。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验母材为商用 Haynes 230 和 Inconel 617 镍基高温合金板材,厚度 2 mm,母材化学成分如表 1 所示。钎料选用厚度 50 μm 的 BNi2 非晶钎料箔,成分为 Ni-7Cr-4.5Si-3.2B,固相线为 970 ℃、液相线为 1 005 ℃,成分均匀、流动性优异,适配镍基合金真空钎焊。

表 1 Haynes 230 与 Inconel 617 合金化学成分(质量分数,%)
Table 1 Chemical compositions of Haynes 230 and Inconel 617 alloys (wt. %)

元素	Ni	Cr	W	Mo	Co	Al	Ti	C	Mn	Si	Fe	La	Cu	S
Haynes 230	余量	22.0	13.0	2.0	4.5	0.3	≤0.10	0.1	≤0.5	≤0.75	≤3.00	0.005-0.05	≤0.03	≤0.015
Inconel 617	余量	20.0	≤0.5	9	13	1.0	0.5	0.1	≤1.0	≤1.00	≤3.00	—	≤0.50	≤0.015

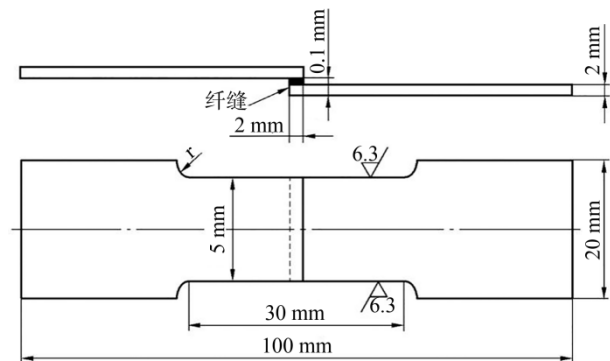


图 1 剪切试样尺寸示意

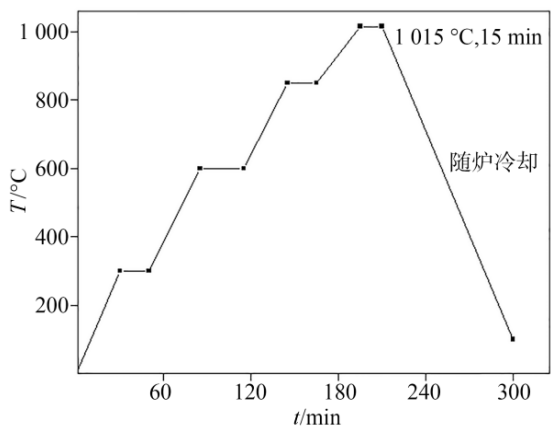
Fig. 1 Schematic of shear specimen dimensions

1.2 试验方案

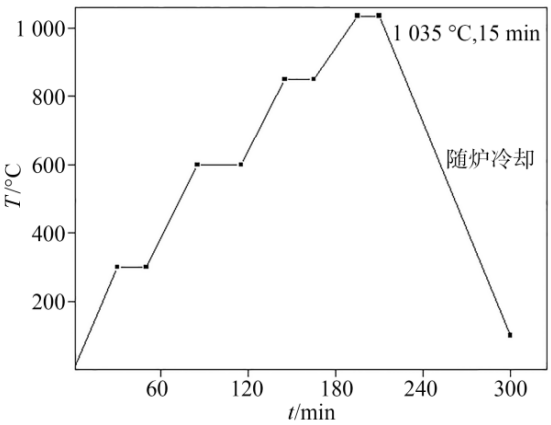
试验在高真空钎焊炉中开展,炉内真空度维持在 5×10^{-3} Pa 以下,杜绝钎焊过程氧化缺陷。设置两组控制变量工艺(固定保温时长 15 min,梯度调控钎焊温度),具体升温曲线如图 2 所示。

钎焊完成后,分别测试 BNi2 钎料在 Haynes 230、Inconel 617 母材表面的润湿面积,每组工艺、每种母材设置 3 组平行试样,记录原始数据并计算均值,量化润湿铺展能力。剪切力学性能测试将钎焊接头加工为标准剪切试样,分别开展室温剪切与 750 ℃高温剪切试验,加载速率 0.5 mm/min;高温测试前试样在 750 ℃恒温保温 10 min,保证温度均匀,模拟实际高温服役工况。每组条件设置 5 组平行试样,获取原始强度数据。

润湿试样将母材加工为 20 mm×20 mm×2 mm 片状,钎料剪成 4 mm×4 mm 片状,入炉前将片状钎料置于润湿试样中心位置,钎焊后分析钎料对母材润湿面积。将母材加工为 110 mm×60 mm×2 mm 板状,钎料剪成 110 mm×10 mm 条状,入炉前将钎料置于两母材搭接间隙中,钎焊后加工成剪切试样,如图 1 所示。剪切试样参照 GB/T 11363—2008《钎焊接头强度试验办法》取样^[15]。试样钎焊前采用 400#~1200#砂纸逐级打磨钎焊界面,去除氧化皮与加工缺陷;无水乙醇超声清洗 15 min,烘干除尘后密封备用,避免表面二次氧化污染。



(a) 1 015 ℃保温 15 min



(b) 1 035 ℃保温 15 min

图 2 钎焊升温曲线

Fig. 2 Heating curves for brazing

重点
专利
—
高强
钢优
质高
效焊
接

2 试验结果与数据分析

2.1 钎料润湿性能分析

润湿面积是表征钎料流动性和界面适配性的核心指标,直接决定钎焊界面致密性与结合质量。两组工艺下 BNi2 钎料在两种母材表面的 3 组平行润湿面积原始数据及统计结果如表 2 所示。

表 2 不同工艺下钎料润湿面积试验数据

Table 2 Wetting area test data of filler metal under different brazing conditions

钎焊工艺	母材类型	conditions			
		平行试样 1 /mm ²	平行试样 2 /mm ²	平行试样 3 /mm ²	平均 /mm ²
1 015 °C× 15 min	Inconel 617	15.93	16.86	18.62	17.14
1 035 °C× 15 min	Inconel 617	17.57	13.76	18.59	16.64
1 015 °C× 15 min	Haynes 230	15.52	22.13	26.76	21.47
1 035 °C× 15 min	Haynes 230	45.83	52.28	51.92	50.01

由表 2 可知,相同工艺条件下,BNi2 钎料在 Haynes 230 合金表面的润湿面积显著大于 Inconel 617 合金,表明 BNi2 钎料与 Haynes 230 的界面适配性更优。对于 Inconel 617 母材,升温对润湿性能无明显提升,1 015 °C 与 1 035 °C 下平均润湿面积基本持平(17.14 mm², 16.64 mm²),仅数据离散性略有差异,高温下少量试样润湿面积波动增大,主要源于高温液相钎料流动性的随机性提升。Inconel 617 母材表面润湿形貌如图 3 所示。

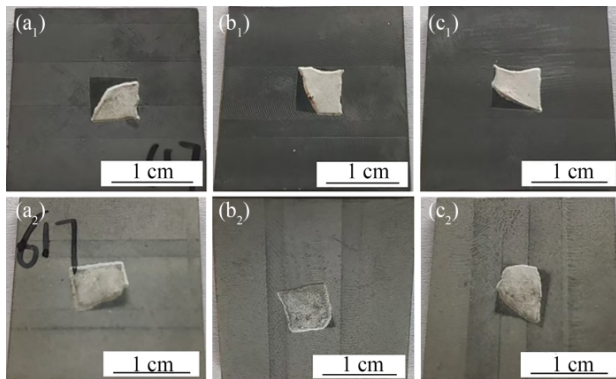


图 3 BNi2 钎料在 Inconel 617 表面的润湿形貌:(a1-c1) 1 015 °C 保温 15 min;(a2-c2) 1 035 °C 保温 15 min

Fig. 3 Wetting morphologies of BNi2 filler metal on Inconel 617: (a1-c1) 1 015 °C/15 min; (a2-c2) 1 035 °C/15 min

对于 Haynes 230 母材,钎焊温度的提升对润湿性能改善效果极为显著:1 035 °C 工艺下平均润湿面积达 50.01 mm²,较 1 015 °C 工艺(21.47 mm²)提高 132.9%。提升钎焊温度可降低 BNi2 液相钎料粘度,增强钎料原子活性与界面吸附扩散能力,彻底改善钎料在 Haynes 230 表面的铺展效果,消除低温下润湿不充分、铺展不均匀的缺陷。综合可以看出,1 035 °C/15 min 工艺的整体润湿成形质量显著优于低温工艺, Haynes 230 母材表面润湿如图 4 所示。

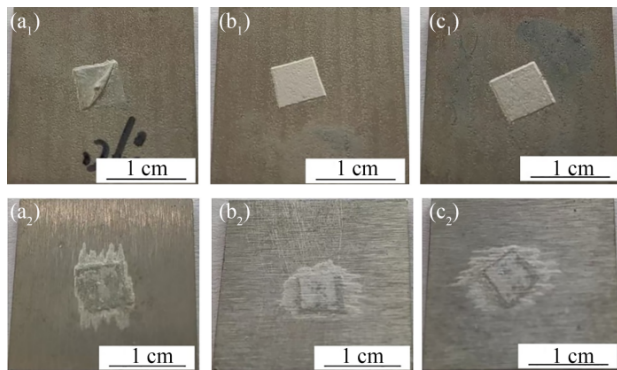


图 4 BNi2 钎料在 Haynes 230 表面的润湿形貌:(a1-c1) 1 015 °C 保温 15 min;(a2-c2) 1 035 °C 保温 15 min

Fig. 4 Wetting morphologies of BNi2 filler metal on Haynes 230: (a1-c1) 1 015 °C/15 min; (a2-c2) 1 035 °C/15 min

2.2 接头室温剪切力学性能

对两组工艺下异种钎焊接头开展室温剪切试验,获取 5 组平行原始数据,统计结果如表 3 所示。

表 3 接头室温剪切强度试验数据及统计结果

Table 3 Room-temperature shear strength test data and statistical results of brazed joints

钎焊工艺	试样 1 /MPa	试样 2 /MPa	试样 3 /MPa	试样 4 /MPa	试样 5 /MPa	均值 /MPa
1015 °C× 15 min	160.7	159.7	240.8	235.3	238.3	206.96
1035 °C× 15 min	136.8	134.2	225.4	193.0	225.6	183

数据分析可知,1 015 °C/15 min 工艺接头室温平均剪切强度为 206.96 MPa,1 035 °C/15 min 工艺为 183 MPa。剪切曲线及剪切强度如图 5、图 6 所示,低温工艺室温强度略高,性能更稳定。

1 015 °C 接近 BNi2 钎料液相线温度,15 min 保温时长使钎料熔融平缓、界面元素互扩散充分,Ni、Cr 等基体元素与两侧母材形成连续、致密、无缺陷的冶金结合层,界面残余应力小,室温承载能力优



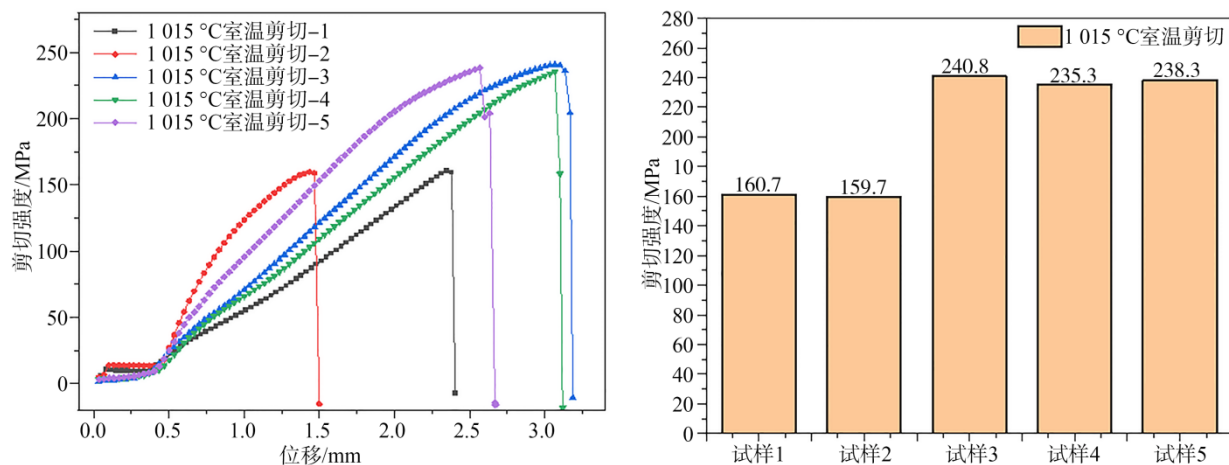


图5 1 015 °C钎焊条件下Haynes 230/Inconel 617钎焊接头室温剪切断裂曲线及剪切强度

Fig. 5 Room-temperature shear fracture curves and shear strength of Haynes 230/Inconel 617 brazed joints under the 1 015 °C brazing condition

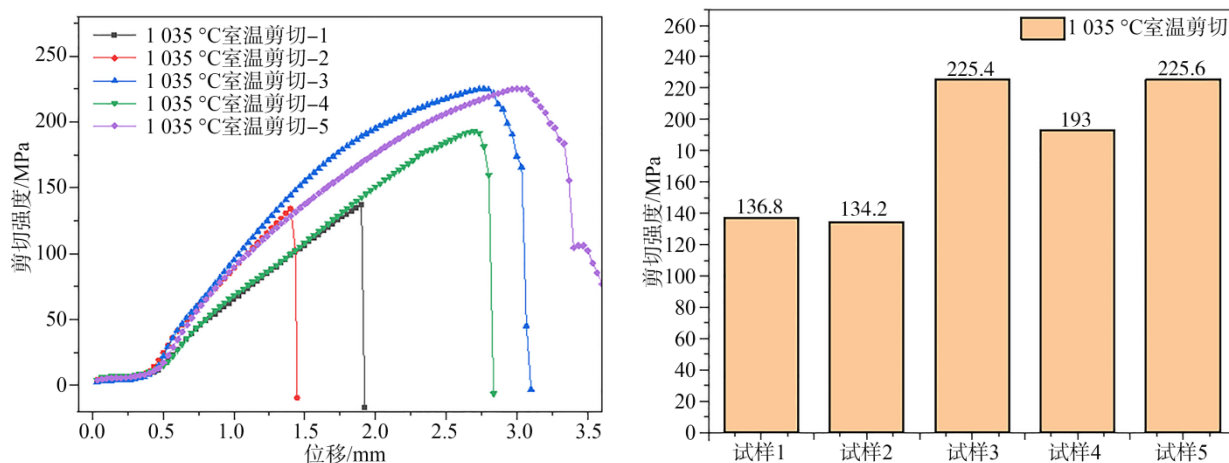


图6 1 035 °C钎焊条件下Haynes 230/Inconel 617钎焊接头室温剪切断裂曲线及剪切强度

Fig. 6 Room-temperature shear fracture curves and shear strength of Haynes 230/Inconel 617 brazed joints under the 1 035 °C brazing condition

异。1 035 °C高温条件下,虽然钎料润湿铺展效果更好,但过高温度会诱发界面过度扩散形成较宽扩散层,或造成微量脆性硼硅金属间化合物快速形核,导致接头室温韧性下降,强度低于低温工艺。

2.3 接头750 °C高温剪切力学性能

750 °C高温剪切性能直接表征接头高温服役可靠性,两组工艺高温剪切原始数据统计结果见表4。

由表4可知,与室温性能规律一致,低温长时工艺展现出更优异的高温力学性能。1 015 °C/15 min工艺接头750 °C平均剪切强度达126.88 MPa,性能稳定性良好;1 035 °C/15 min工艺平均高温剪切强度为113.04 MPa,较低温工艺下降10.9%,具体剪切曲线及剪切强度如图7、图8所示。

在高温服役条件下,接头性能主要取决于界面

表4 接头750 °C高温剪切强度试验数据及统计结果

Table 4 Shear strength test data and statistical results of brazed joints at 750 °C

钎焊工艺	试样1 /MPa	试样2 /MPa	试样3 /MPa	试样4 /MPa	试样5 /MPa	均值 /MPa
1 015 °C× 15 min	114.5	139.6	137.3	121.1	121.9	126.88
1 035 °C× 15 min	100.0	104.1	155.5	93.0	112.6	113.04

组织热稳定性与脆性相形态。1 035 °C高温保温过程中,界面硼、硅非金属元素持续扩散富集,易生成连续分布的Ni-B、Ni-Si脆性金属间化合物,这类脆性相在750 °C高温剪切载荷下极易产生应力集中,降低接头高温抗变形和抗断裂能力。而1 015 °C低温保温工艺界面反应温和,扩散层更窄,无连续脆



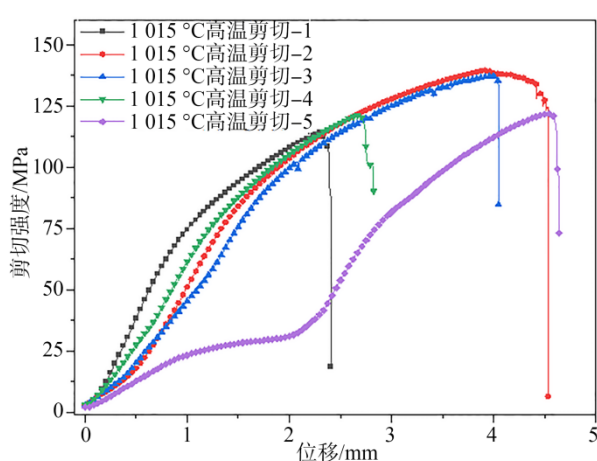


图7 1 015 °C钎焊条件下 Haynes 230/Inconel 617 钎焊接头 750 °C高温剪切断裂曲线及剪切强度

Fig. 7 Shear fracture curves and shear strength of Haynes 230/Inconel 617 brazed joints at 750 °C under the 1015 °C brazing condition

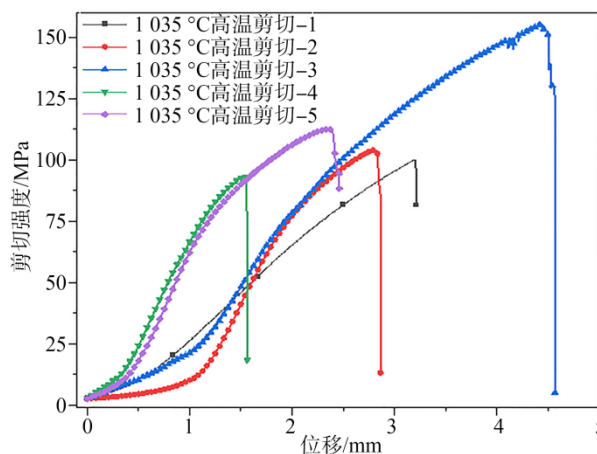


图8 1 035 °C钎焊条件下 Haynes 230/Inconel 617 钎焊接头 750 °C高温剪切断裂曲线及剪切强度

Fig. 8 Shear fracture curves and shear strength of Haynes 230/Inconel 617 brazed joints at 750 °C under the 1035 °C brazing condition

性层生成,基体韧性固溶体占比高,高温下可有效阻碍裂纹扩展,维持较高的高温承载强度与组织稳定性。

3 讨论

结合本次润湿性能与力学性能试验数据,依托镍基高温合金真空钎焊冶金机理,可明确不同钎焊温度下接头界面组织演变规律及性能差异化机制。不同温度条件下钎焊接头组织形貌如图9所示。

在室温服役条件下,1 015 °C低温钎焊温度接近BNi2钎料液相线,15 min保温时长可实现钎料与两侧母材充分的元素互扩散,界面扩散层约15 μm,界面形成连续、致密、缺陷极少的镍基固溶体冶金

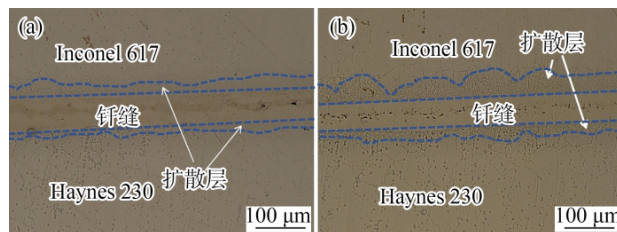
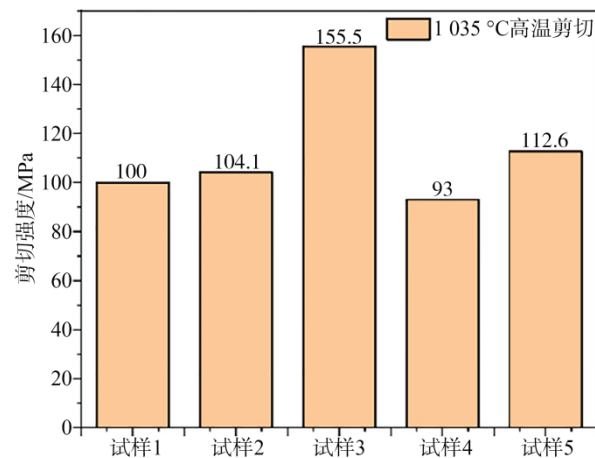
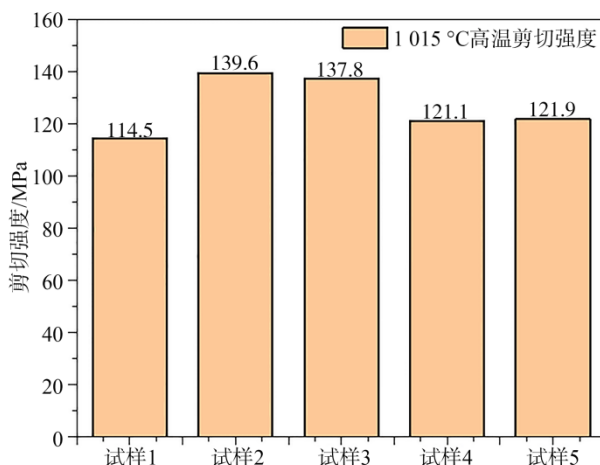


图9 Haynes 230/Inconel 617 钎焊接头组织形貌:

(a)1 015 °C保温 15 min; (b)1 035 °C保温 15 min

Fig. 9 Microstructures of Haynes 230/Inconel 617 brazed joints: (a) holding at 1 015 °C for 15 min; (b) holding at 1 035 °C for 15 min

结合层。界面反应温和,硼、硅等脆性元素仅发生轻微析出,无粗大、连续的金属间化合物聚集,界面强韧性匹配良好,因此接头室温剪切强度高。

相较之下,1 035 °C高温钎焊工艺虽大幅改善了钎料在 Haynes 230 表面的润湿铺展效果,但过高

的钎焊温度加速了界面非金属元素的扩散与富集,界面扩散层宽度增至约22 μm 。界面元素过度扩散、扩散层显著宽化,大幅提升Ni、Cr、Mo、W等基体元素与B、Si钎料元素的扩散动力学系数,在相同15 min保温时长下,元素扩散距离大幅增加,最终形成宽度远大于1 015 $^{\circ}\text{C}$ 工艺的扩散过渡层^[16-18]。过宽的扩散层会造成界面成分梯度弥散、基体强化元素大量流失,界面区域固溶强化效果显著弱化。同时,过度扩散会加剧界面成分不均匀性,诱发微观成分偏析,导致界面力学性能不均,应力集中敏感性提升,最终使得1 035 $^{\circ}\text{C}$ 工艺接头室温剪切强度低于1 015 $^{\circ}\text{C}$ 工艺。

在750 $^{\circ}\text{C}$ 高温剪切服役条件下,扩散层厚度差异带来的性能分化更为显著。1 035 $^{\circ}\text{C}$ 工艺形成的较宽扩散层在高温载荷下极易成为高温变形的薄弱区域,造成接头高温承载能力大幅衰减。但是1 015 $^{\circ}\text{C}$ 工艺适度扩散的界面结构保留了完整的基体强化体系与界面力学梯度稳定性,高温下扩散层可有效抵抗高温剪切载荷作用,因此高低温综合力学性能更优异。结合润湿性能来看,1 035 $^{\circ}\text{C}$ 高温虽能显著提升钎料在Haynes 230表面的润湿铺展能力,但过度扩散带来的界面较宽扩散层、残余应力增大、力学稳定性下降是其接头整体强度偏低的根本原因。

综合润湿性能与力学性能结果,1 015 $^{\circ}\text{C}/15\text{ min}$ 工艺可实现“润湿成形+界面适度扩散+力学性能最优”的匹配效果,适配常温与高温复合服役工况;1 035 $^{\circ}\text{C}/15\text{ min}$ 工艺仅界面润湿成形效果优异,但过度扩散导致力学性能短板显著,仅适用于无高温承载、低应力服役场景^[19-20]。

4 结论

(1)钎焊温度对BNi2非晶钎料润湿性能具有显著的母材差异化影响。同等保温15 min条件下,温度提升对Inconel 617表面润湿效果无明显改变,但可使Haynes 230表面平均润湿面积由21.47 mm^2 提升至50.01 mm^2 ,提升132.9%,其本质在于高温降低了液相钎料粘度并增强了界面扩散驱动力。

(2)1 015 $^{\circ}\text{C}/15\text{ min}$ 工艺钎焊接头综合力学性

能优于1 035 $^{\circ}\text{C}/15\text{ min}$ 工艺。室温条件下,前者平均剪切强度为206.96 MPa,后者为183 MPa;750 $^{\circ}\text{C}$ 高温条件下,前者平均剪切强度为126.88 MPa,后者为113.04 MPa(降幅10.9%)。低温钎焊工艺通过抑制界面过度扩散和脆性相生成,保持了界面组织的热稳定性,是保障异种接头高低温力学性能的关键因素。

(3)对于兼顾常温承载与高温服役的Haynes 230/Inconel 617异种钎焊构件,应优先选用1 015 $^{\circ}\text{C}/15\text{ min}$ 真空钎焊工艺;仅对构件表面润湿成形质量要求极高且无高温承载需求的场景,可选用1 035 $^{\circ}\text{C}/15\text{ min}$ 工艺。

参考文献:

- [1] 邓波,韩光炜,冯涤.低膨胀高温合金的发展及在航空航天业的应用[J].航空材料学报,2003,23(z1):244-249.
DENG B, HAN G W, FENG D. Development and application of low expansion superalloys in aerospace industry[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003, 23(z1):244-249.
- [2] 刘雅辉,余慧澎,张珺芸,等.航空发动机高温合金铸件质量智能控制[J].铸造,2025(7):12-19.
LIU Y H, YU H P, ZHANG J H, et al. Intelligent quality control of aeroengine superalloy castings[J]. Foundry, 2025(7):12-19.
- [3] 罗锐,崔树刚,陈乐利,等.核电用高温合金Inconel 617B高温变形本构模型[J].机械工程学报,2021,57(22):218-225.
LUO R, CUI S G, CHEN L L, et al. Constitutive model for high-temperature deformation of Inconel 617B superalloy used in nuclear power[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(22):218-225.
- [4] 谢锦丽,徐斌,程懿歆,等.航空发动机高温合金数据系统的设计与管理[J].钢铁研究学报,2026,38(3):423-431.
XIE J L, XU B, CHENG Y X, et al. Design and management of superalloy data system on aeroengine[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2026, 38(3):423-431.
- [5] 张远辉,郑庭.不同热应变对Inconel 718高温合金再结晶行为及织构变化规律的影响[J].材料热处理学报,2025,46(6):90-98.
ZHANG Y H, ZHENG T. Effect of different thermal strains on recrystallization behavior and texture evolu-



- tion of Inconel 718 superalloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2025, 46(6): 90-98.
- [6] 程昊, 周炼刚, 刘健, 等. 热输入对 Inconel 617 镍基高温合金激光焊接接头显微组织与力学性能的影响[J]. 材料工程, 2023, 51(1): 113-121.
- CHENG H, ZHOU L G, LIU J, et al. Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of laser welded joints of Inconel 617 nickel-based superalloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(1): 113-121.
- [7] 薛鹏鹏, 司晓庆, 杨博, 等. Cf/C 复合材料与哈氏 230 合金热适配钎焊及接头热力协同强化[J]. 焊接学报, 2025, 46(11): 44-52.
- XUE P P, SI X Q, YANG B, et al. Thermally compatible brazing of Cf/C composites and Haynes 230 alloy and thermo-mechanical synergistic strengthening of joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2025, 46(11): 44-52.
- [8] 王诗洋, 刘士伟, 武震东, 等. 钎焊热循环对 GH4169 合金组织与力学性能的影响[J]. 材料工程, 2026, 54(3): 113-121.
- WANG S Y, LIU S W, WU Z D, et al. Effect of brazing thermal cycle on microstructure and mechanical properties of GH4169 alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2026, 54(3): 113-121.
- [9] 刘晓芳, 常云峰, 秦建, 等. 镍基高温合金焊接工艺研究进展[J]. 焊接, 2024(12): 47-55.
- LIU X F, CHANG Y F, QIN J, et al. Review on welding process of nickel-based superalloy[J]. Welding & Joining, 2024(12): 47-55.
- [10] 李云月, 栗卓新, 李红, 等. 耐腐蚀性镍基箔带钎料钎焊不锈钢接头性能[J]. 焊接学报, 2019, 40(9): 30-38.
- LI Y Y, LI Z X, LI H, et al. Properties of 316L stainless steel joints brazed with corrosion resistant nickel-based filler metal[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(9): 30-38.
- [11] WANG K, LV J, CHEN S, et al. Effect of process parameters on residual stress and thermal deformation in vacuum brazing of Inconel 617 plate core structures[J]. Thermal Science, 2025, 29(6B): 4651-4662.
- [12] Du Z, Chen F, Li R, et al. Hot deformation behavior and microstructure evolution of Inconel 617 alloy[J]. Journal of Materials Research, 2026, 41(10): 1558-1573.
- [13] SINGARAVEL T, MAHADEV R, KANNAN T D B, et al. Influence of filler wire chemistry on solidification microstructure and mechanical properties of spin-arc MIG welded Inconel 617[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2026: 1-19.
- [14] YANG W, ZOU J, LI S, et al. Microstructure-dependent volatilization of Haynes 230 alloy in ultrahigh vacuum at high temperatures[J]. Corrosion Science, 2026, 265: 113821.
- [15] GB/T 11363—2008. 钎焊接头强度试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [16] WU T, ZHANG Q, LU H, et al. Diffusion brazing of GH536 polycrystalline superalloy with IC10 single crystal superalloy using BNi-2 interlayer[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 9850-9865.
- [17] DONG H, JIANG Y, XU Y, et al. Effect of Cr content in Ni-based amorphous filler on microstructure and shear strength of K4169 nickel-based alloy brazed joint[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 290: 116975.
- [18] BEHESHTI R, MOKHTARI M A, JAHANBAKHS M, et al. Wide gap brazing of NIMONIC 105 superalloy using BNi-2 filler and the effect of post-braze heat treatment on joint properties[J]. Welding in the World, 2023, 67(5): 1325-1336.
- [19] 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.
- SONG X Y, QIN J, ZHONG S J, et al. Research status of brazing connection of nickel-based superalloy GH4099[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(8): 122-130.
- [20] 乔瑞林, 龙伟民, 秦建, 等. YG8/GH4169 异种材料钎焊接头残余应力的数值模拟[J]. 焊接学报, 2024, 45(3): 68-74.
- QIAO R L, LONG W M, QIN J, et al. Numerical simulation of residual stress in YG8/GH4169 dissimilar material brazed joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2024, 45(3): 68-74.