● 试验研究 Experimental Research ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.5075

GH4099 和 GH3128 异质高温合金 TLP 扩散焊接头组织与性能演化

刘晓芸[1,2],郝　定[1,2],巴　特[3],熊江涛[1,2],李京龙[1,2]

(1. 西北工业大学 凝固技术全国重点实验室，陕西 西安 710072；2. 西北工业大学 摩擦焊接技术陕西省重点实验室，陕西 西安 710072；3. 中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司，黑龙江 哈尔滨 150028)

摘　要：针对航空、航天等领域对异质镍基高温合金高可靠性连接的迫切需求，开展了异质镍基高温合金 GH4099 和 GH3128 的瞬时液相扩散焊(transient liquid phase diffusion welding, TLP)研究，系统研究了焊接温度对接头显微组织与力学性能的影响规律，为异质材料的焊接提供理论指导。采用 BNi-2 为中间层，通过 EBSD、EPMA、SEM 等手段对接头微观结构进行表征，并结合拉伸性能测试分析其力学行为。结果表明，随焊接温度升高，等温凝固区(ISZ)晶粒逐渐长大，扩散影响区(DAZ)晶界硼化物由连续状向断续状转变；焊接温度 1 120 ℃时接头力学性能最优，抗拉强度达到 953 MPa，为 GH3128 母材的 117.1%。

关键词：高温合金；BNi-2；TLP；界面组织演变；力学性能

中图分类号：TG453.9　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-8365(2026)01-0039-11

Microstructural and Mechanical Property Evolution of GH4099 and GH3128 Dissimilar Superalloy Joints by TLP Diffusion Bonding

LIU Xiaoyun[1,2], HAO Ding[1,2], BA Te[3], XIONG Jiangtao[1,2], LI Jinglong[1,2]

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xian 710072, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Friction Welding Technologies, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 3. Harbin Welding Institute Co., Ltd., China Machinery Industry Group, Harbin 150028, China)

Abstract: In response to the urgent demand for highly reliable joining of heterogeneous nickel-based superalloys in aerospace applications, transient liquid phase diffusion welding (TLP) of dissimilar nickel-based superalloys GH4099 and GH3128 was studied. The influence of the bonding temperature on the microstructure and mechanical properties of the joints was systematically investigated, providing theoretical guidance for welding dissimilar materials. BNi-2 was used as an interlayer, and the joint microstructures were characterized via EBSD, EPMA, and SEM. Tensile tests were performed to evaluate the mechanical properties. The results indicate that with increasing bonding temperature, grain growth gradually occurs in the isothermal solidification zone (ISZ) and that the borides along the grain boundaries in the diffusion-affected zone (DAZ) change from a continuous to a discontinuous morphology. The joint bonded at 1 120 ℃ exhibits the best mechanical performance, with an ultimate tensile strength of 953 MPa, equivalent to 117.1% of the GH3128 base metal.

Key words: superalloys; BNi-2; TLP; interface microstructure evolution; mechanical properties

高温合金作为航空发动机和燃气轮机的核心材料，直接影响发动机的推重比和效率[1-3]。镍基高温合金是涡轮发动机和燃气轮机中的重要结构材料[4-5]，在航空发动机中的用量超过 40%[6]，其对静态、疲劳和蠕变具有显著抗力，能在 800 ℃以上温度长期稳定工作，被称为“航空发动机基石”[7]。

收稿日期：2025-04-25

基金项目：国家自然科学基金面上项目(52475404)；陕西省稀有金属装备制造共性技术研发平台(2024ZG-GXPT-02)

作者简介：刘晓芸，2001 年生，硕士生. 研究方向为材料加工工程. Email: 3351159379@qq.com

通信作者：李京龙，1964 年生，博士，教授. 研究方向为材料加工工程. Email: lijinglg@nwpu.edu.cn

熊江涛，1974 年生，博士，教授. 研究方向为材料加工工程. Email: xiongjiangtao@nwpu.edu.cn

引用格式：刘晓芸，郝定，巴特，熊江涛，李京龙. GH4099 和 GH3128 异质高温合金 TLP 扩散焊接头组织与性能演化[J]. 铸造技术，2026, 47(1): 39-49.

LIU X Y, HAO D, BA T, XIONG J T, LI J L. Microstructural and mechanical property evolution of GH4099 and GH3128 eissimilar superalloy joints by TLP diffusion bonding[J]. Foundry Technology, 2026, 47(1): 39-49.

中国知网　https://www.cnki.net

GH4099 是一种镍铬基沉淀强化型高温合金，广泛应用于航空航天发动机的高温部件，如涡轮叶片、燃烧室等[8-10]；GH3128 是一种镍基固溶强化型高温合金，常用于制造航空发动机的高温部件，如在高温燃气环境下工作的涡轮盘等部件[11]。为满足新一代航空发动机更高推重比的设计要求，双金属双性能整体叶盘结构分别采用不同型号的高温合金材料[12]。同种或异质高温合金之间的可靠连接一直是高端产品制造中的关键核心问题，但常规熔焊仅适用于 Al+Ti 总量≤4%(质量分数)的镍基高温合金[13]，大部分镍基高温合金被认为是使用常规熔焊“不可焊的材料”[14-15]。瞬时液相扩散焊[16](transient liquid phase diffusion welding, TLP)与传统熔焊相比，不易产生裂纹、变形较小，与传统扩散焊相比，所需压力和温度较小，与钎焊相比，焊缝组织均匀，保证高温强度，在焊接高温合金时具有其他焊接方法不可替代的优势[17]。但异质高温合金焊接接头存在合金元素偏析、易形成低熔点相或杂质相及第二相种类复杂难调控等问题，使其性能降低[18]。因此，深入研究GH4099 和 GH3128 的 TLP 扩散焊，可以为航空航天发动机等关键部件的制造提供可靠焊接技术支持。

国内外学者已对同种或异种金属连接工艺进行了诸多方面的研究。朱源等[19]研究发现，直接扩散焊接 GH4099 高温合金接头中存在大量未焊合孔洞及颗粒状碳化物，焊合率仅为 69.3%，无共生晶粒，接头连接质量不佳，严重影响力学性能。郑医等[20]研究发现 BNi-2 对钎焊间隙敏感，小间隙(<50 μm)下钎缝的金相组织转变为均匀的固溶体组织，可显著改善钎缝的综合力学性能，而大间隙会导致形成共晶脆性层。BNi-2 具有熔化温度较低、熔化温度间隔小，具有良好的流动性[21]等优异特性，是作为钎料的不错选择。Zhang 等[22]使用 BNi-2 对 IC10 单晶和 GH3039 进行 TLP 焊接，发现可以通过调整焊接温度控制接头硼化物和脆性化合物的存在形式，进而优化接头力学性能；唐一峰等[23]使用 45 um 箔片状 BNi-2作中间层对 GH4169 TLP 扩散焊工艺参数进行优化，研究表明焊接压力为 5 MPa 的升温降压扩散工艺的焊接接头扩散区析出物主要为硼化物和铬化物；李铎等[24]采用 BNi-2 钎料对 GH3128 合金接头进行真空高温钎焊实验，结果表明随着钎焊温度(1 020~1 140 ℃)的升高和保温时间的延长，接头强度先增大而后逐渐降低。这是因为当温度高于 1 050 ℃时，CrB 金属间化合物重新溶解于钎缝中，但过高的温度加速了 B 和 Si 等间隙原子向母材的扩散，从而导致接头处固溶强化作用的减弱，强度降低；Li 等[25]使用 BNi-2 中间层对 DD5 和 GH4169 进行瞬态液相键合，研究发现扩散影响区(diffusion-affected zone, DAZ)和等温凝固区(isothermal solidification zone, ISZ)的宽度随着键合温度和时间的增加而增加；硼在 GH4169 的 DAZ 中的晶界处聚集，该区域中的晶粒尺寸随着键合温度和时间的增加而增加，在保温 120 min 时机械性能最佳。

综上所述，使用 BNi-2 的 TLP 接头由等温凝固区和扩散影响区组成，避免了传统钎焊中因 Si 偏析形成的脆性相，使接头韧性与母材相当[26]。因此，本文选择 BNi-2 作为 GH4099 和 GH3128 高温合金 TLP 扩散焊实验的中间层材料，研究不同焊接温度对接头组织及性能的影响规律，进一步揭示接头的成形机制，为异质材料的焊接提供理论指导。

1 实验材料与方法

实验材料为 GH4099 与 GH3128 两种镍基高温合金和厚度为 30 μm 的 BNi-2 箔片。GH4099 与 GH3128 焊前显微组织分布如图 1 所示，GH4099、GH3128 与 BNi-2 的化学成分如表 1 所示。由图 1a可知，GH4099 焊前母材的基体为 γ 相，平均晶粒尺寸在 40 μm 左右，晶粒内部分布有镍基高温合金中常见的孪晶，抗拉强度为 1 160 MPa。此外，个别大块状的颗粒相为一次碳化物 MC，而沿晶界处呈断续分布状态的小颗粒析出相是二次碳化物 $M_{23}C_6$[27]。

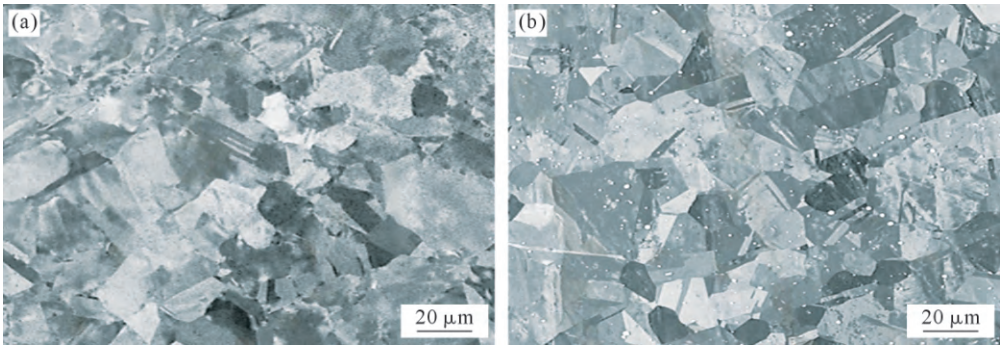

图 1 焊前母材显微组织：(a) GH4099; (b) GH3128
Fig.1 Microstructures of the base materials before welding: (a) GH4099; (b) GH3128

中国知网 https://www.cnki.net

表1 实验材料的化学成分
Tab.1 Chemical composition of the experimental materials

(mass fraction/%)

Material	Ni	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Mn	Si	Fe	C	B
GH4099	Bal.	18.32	6.67	8.23	2.93	1.05	1.42	0.51	0.85	0.32	0.080	-
GH3128	Bal.	21.25	-	8.36	8.27	0.69	0.63	0.45	0.78	0.12	0.005	0.005
BNi-2	Bal.	7.06	-	-	-	-	-	-	4.54	3.00	0.010	2.850

图 1b 为 GH3128 焊前显微组织形貌图,GH3128 是一种单相奥氏体高温合金，平均晶粒尺寸在 20 μm左右，其组织中含有少量的析出相，如 TiN、M_6C、μ 相、$M_{23}C_6$ 等[27],抗拉强度为 814 MPa。特别地,当合金在 700~1 100 ℃范围内长时间服役时，沿晶界会析出 M_6C 和 $M_{23}C_6$ 等碳化物,而晶内则可能出现 μ 相的析出和生长[28]。

BNi-2 的固液相线分别为 970 和 1 000 ℃。其中含大量降熔元素,如 B 和 Si,当降熔元素被引入合金中时,可以降低 Ni、Cr 或 Co 基体的熔化温度。GH4099 合金在 1 040 ℃固溶处理条件下,γ′强化相完全溶解于奥氏体基体中,形成均匀的固溶体组织[29];900 ℃时,GH3128 的屈服强度降低,但高温下的稳定性仍然较好[28]。因此选取1 040、1 080、1 120 和 1 160 ℃为焊接温度，研究温度的变化对接头组织性能的影响。为满足 GH4099 与 GH3128 扩散焊接头的精密性要求,控制变形量在 3%左右,选取焊接压力为 5 MPa。根据元素扩散情况,选取保温时间为 60 min。

实验采用课题组与陕西智拓固相增材制造技术有限公司合作开发的 ZTF2-150 真空扩散焊机,外观及内部式样布局如图 2 所示。

实验前使用 160#~2 000# 的砂纸对两种母材待焊表面进行逐级磨光，磨光后将母材及 BNi-2 中间层放入无水乙醇中进行超声清洗，用吹风机吹干之后开始进行焊接实验,根据 GB 6397-86,拉伸试样如图 3 所示。焊接完成后使用线切割机将试样切成拉伸试样，将切割后的拉伸试样使用 160#~1 500# 的砂纸进行逐级打磨，将金相试样采用 160#~3 000# 的砂纸进行逐级磨光，然后对试样先进行手动抛光,采用四氯合铜酸溶液(20 mL 浓盐酸+4 g 硫酸铜+20 mL 水)腐蚀 6 s,再采用 225 mL 无水乙醇+25 mL 高氯酸的电解液进行电解抛制备 EBSD试样,电解电压为 10 V,电解时间为 5 s。

采用 ZEISS Gemini 500 和 TESCAN Clara GMH 场发射扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)对试样的显微组织及断口形貌进行表征分析。使用电子探针显微分析(electron probe micro-ana-

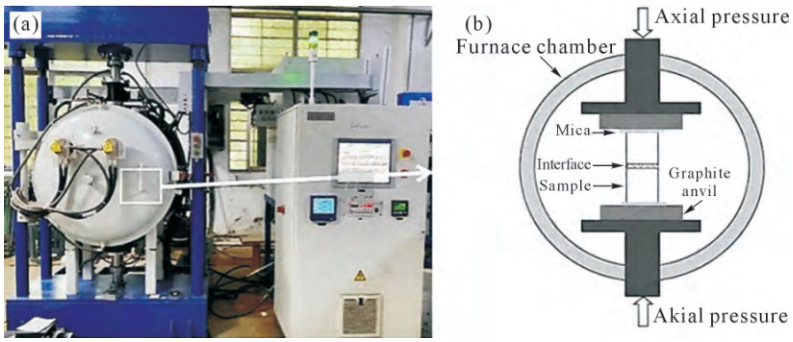

图 2 扩散焊设备外观及内部试样布局:(a) 扩散焊设备外观;(b) 内部试样布局
Fig.2 Appearance of the diffusion welding equipment and internal sample layout: (a) appearance of the diffusion welding equipment; (b) internal sample layout

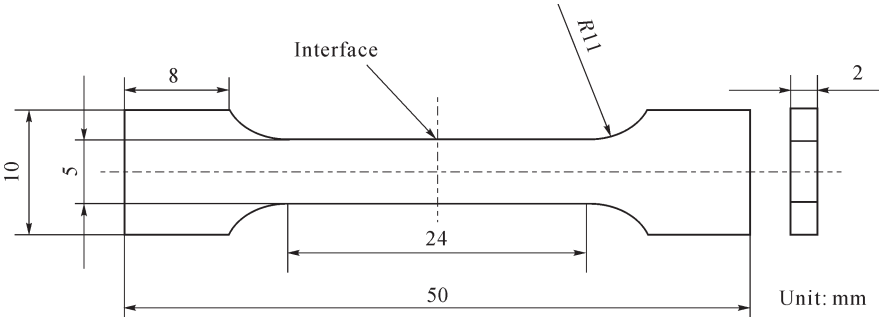

图 3 焊接装配及拉伸式样示意图
Fig.3 Schematic diagram of the welding assembly and tensile sample

中国知网　https://www.cnki.net

lyzer, EPMA)对试样组织形貌中的析出相进行定量和定性分析。采用 INSTRON 3382 电子万能试验机进行拉伸实验。试验机压头移动速度设置为 0.5 mm/min，记录压头移动过程中的位移–载荷曲线，将得到的三组接头拉伸强度 R_m 的结果取平均值作为接头拉伸强度。完成拉伸试验之后，使用 ZEISS Sigma 300 场发射扫描电镜对拉伸试样的断口的形貌进行观察，进而分析接头断裂行为及其强化机理。

2　实验结果及讨论

2.1　接头典型组织形貌特征

异质高温合金 GH4099 和 GH3128 的 TLP 扩散焊焊接过程中，存在典型的形貌特征，如图 4 所示。接头典型组织可以分成 3 个区域，即等温凝固区、扩散影响区、母材(base metal, BM)[30]。等温凝固区在焊接接头的中心区域，其边界光滑、整齐，组织结构均匀，且析出物的数量相对较少；靠近 GH3128 侧扩散影响区析出了大量颗粒状硼化物，在 GH3128 母材区有少量大块状碳化物沿晶界析出，相较于 GH3128 侧，GH4099 侧扩散影响区的硼化物较少，主要因为 GH3128 缺乏强硼化物形成元素，B 元素不易在其中形成稳定化合物，从而更容易保持高扩散活性；而在 GH4099 中，B 易与 Ti、Mo、W 等元素形成稳定硼化物，导致其在该侧被快速捕获、迁移受限。

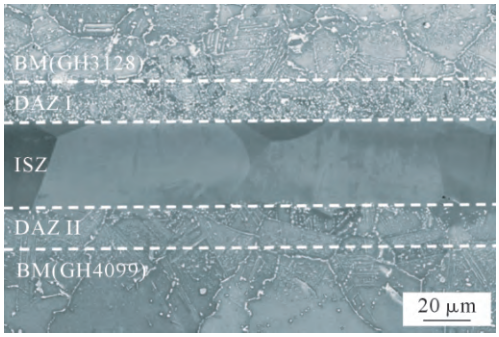

图 4　GH4099/GH3128 在 1 120 ℃-60 min 下获得的 TLP 扩散焊接头形貌

Fig.4　The morphology of the TLP diffusion welded joint obtained with GH4099/GH3128 at 1 120 ℃ for 60 min

为进一步了解硼化物的元素组成，对其进行电子探针显微分析，如图 5 所示。从中可以看出在GH3128 中硼化物主要含 Mo、W 元素。如图 6 所示，GH4099 侧硼化物也是以 Mo、W 元素为主。Mo 和 W 元素之所以优先与 B 形成硼化物，是因为它们具有较强的化学亲和力和更稳定的硼化物生成热力学优势；而 Ni、Co、Cr 等元素与 B 的反应驱动力不足，因而未参与形成可见的第二相。

2.2　焊接温度对接头组织的影响

接头组织随焊接温度变化如图 7 所示。随着焊

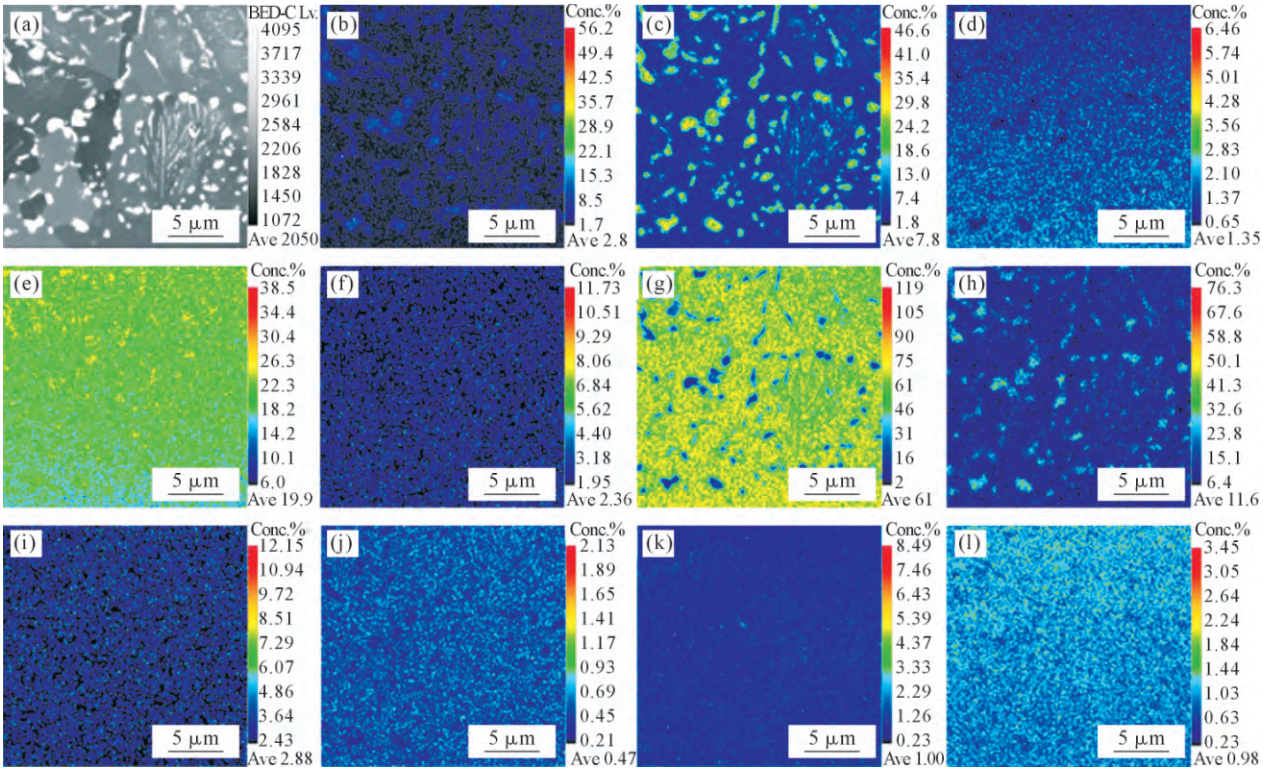

图 5　在 1 120 ℃-60 min 下获得的 TLP 扩散焊接头 GH3128 侧界面成分分布：(a) 背散射成分图；(b~l) 元素分别为 B、Mo、Si、Cr、Co、Ni、W、Mn、Al、C、Ti

Fig.5　Distribution of the interfacial composition on the GH3128 side of the TLP diffusion welded joint obtained at 1 120 ℃ for 60 min: (a) backscattered component image; (b~l) elemental distributions of B, Mo, Si, Cr, Co, Ni, W, Mn, Al, C, and Ti

中国知网　https://www.cnki.net

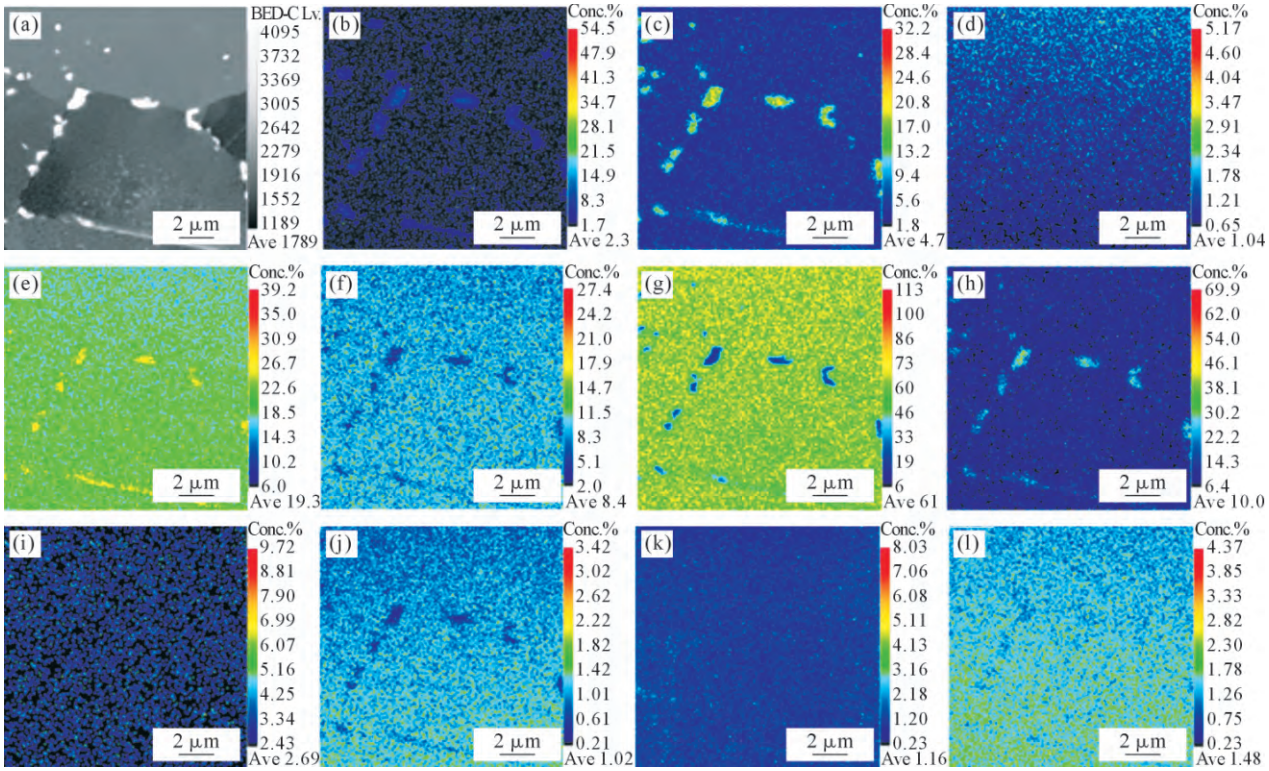

图 6　在 1 120 ℃-60 min 下获得的 TLP 扩散焊接头 GH4099 侧界面成分分布：(a) 背散射成分图；(b~l) 元素分别为 B、Mo、Si、Cr、Co、Ni、W、Mn、Al、C、Ti

Fig.6　Distribution of the interfacial composition on the GH4099 side of the TLP diffusion welded joint obtained at 1 120 ℃ for 60 min: (a) backscattered component image; (b~l) elemental distributions of B, Mo, Si, Cr, Co, Ni, W, Mn, Al, C, and Ti

接温度的升高，ISZ 的宽度逐渐增宽，图 7a 中 ISZ 宽度大约 30 μm；随着温度升高至 1 160 ℃，ISZ 宽度增宽至 50 μm，如图 7d 所示。ISZ 变宽主要是由于随着温度升高，原子扩散速率增加，B、Si 等熔点降低元素快速向母材中扩散，液相迅速贫化并被固化，从而使等温固化前沿 ISZ 向母材扩散，导致区域变宽。同时，随着温度升高两侧 DAZ 的宽度均减小，由于高温下母材对 B 等活性元素的固溶能力增强，

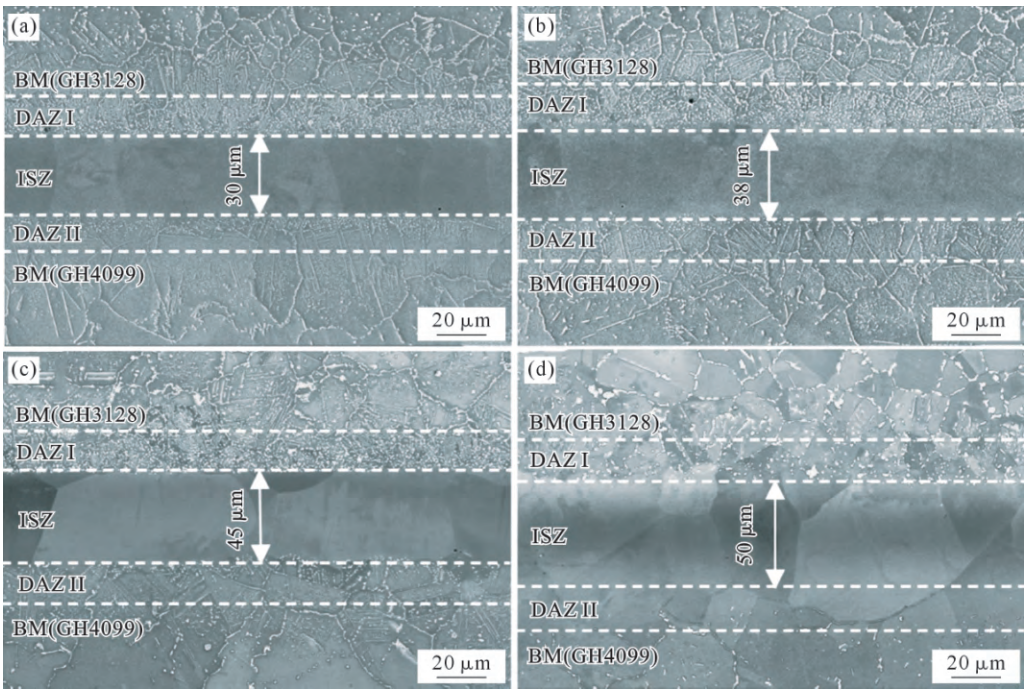

图 7　在不同温度焊接获得的 TLP 扩散焊接头界面微观组织形貌：(a) 1 040 ℃；(b) 1 080 ℃；(c) 1 120 ℃；(d) 1 160 ℃

Fig.7　Microstructural features at the joint interface of the TLP diffusion bonded samples at various welding temperatures: (a) 1 040 ℃; (b) 1 080 ℃; (c) 1 120 ℃; (d) 1 160 ℃

中国知网　https://www.cnki.net

第二相析出减少，DAZ 变窄。

图 8 为焊接温度为 1 160 ℃时接头界面的电子背散射图像及对应的元素线扫结果。从图中可以看出，BNi-2 中间层区域的 Ni 元素含量明显高于两侧母材，但其在整个接头区域呈梯度下降分布，表明 Ni 元素发生了由中间层向母材两侧的扩散，扩散行为明显。Cr 和 W 元素在 GH4099 一侧含量较高，并表现出从母材向中间层的扩散趋势，在中心区域浓度有所提升，说明扩散较充分。Co 元素仅存在于 GH4099 一侧，在靠近中间层一侧略有升高，推测为少量 Co 由 GH4099 向接头中心扩散所致。B 元素向母材扩散的同时，其在 GH4099 一侧的 Mo、W 等元素富集区域形成了硼化物析出相，表现为界面明暗对比显著变化。这些现象表明，焊接过程中元素发生了复杂的互扩散行为，并伴随界面化合物形成。

如图 9 所示，随着焊接温度的升高，GH3128 侧链状硼化物向断续状转变，晶界的硼化物明显长大，晶内硼化物数量明显减少，导致晶界链状硼化物演变为粗大的断续状析出。同时，高温条件下成核速率降低、长大速率加快，进一步促进晶界硼化物粗化，抑制晶内新相形成，致使晶内硼化物数量显著减少。这一变化反映了界面反应动力学与晶界偏聚行为对硼化物形貌和分布的协同控制效应。

GH4099 合金中的 γ′相($Ni_3(Al, Ti)$)是其主要的强化相，具有有序 $L1_2$ 结构，以细小、弥散的颗粒形式沉淀于 γ 相基体中，有效阻碍位错运动，能显著提高合金的屈服强度和蠕变抗力[28]。图 10 为不同焊接温度下 γ′相的组织形貌，图 11 为 γ′相尺寸随焊接温度的变化规律，γ′相尺寸明显增大，主要由于奥斯特瓦尔德熟化机制和扩散速率的提升。该过程

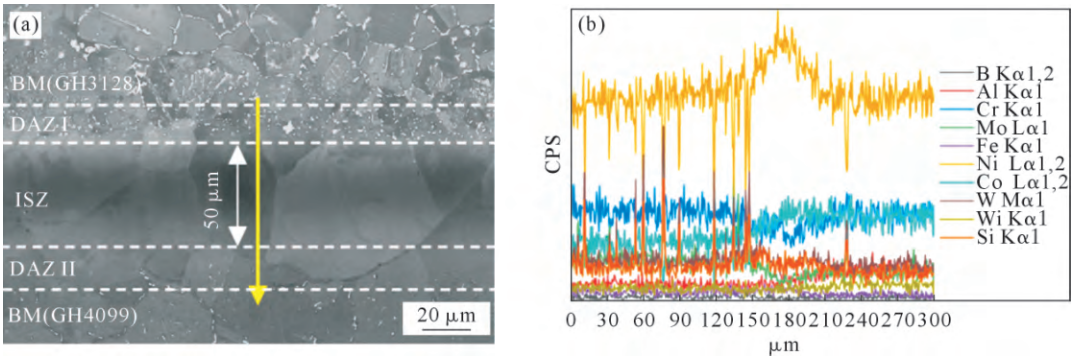

图 8 在 1 160 ℃下获得的接头组织及对应焊缝线扫描曲线：(a) 接头组织；(b) 对应焊缝线扫描曲线

Fig.8 The joint microstructure and corresponding weld line scan curve obtained at 1 160 ℃: (a) joint microstructure; (b) corresponding weld line scan curve

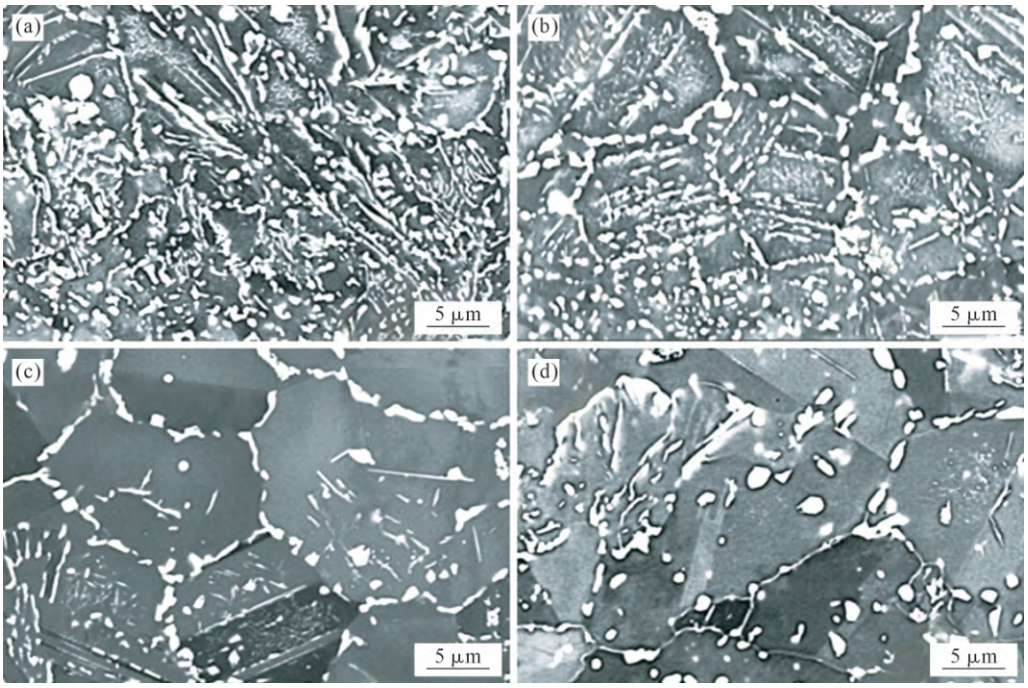

图 9 GH3128 在不同温度焊接获得的微观组织形貌：(a) 1 040 ℃; (b) 1 080 ℃; (c) 1 120 ℃; (d) 1 160 ℃

Fig.9 Microstructures of the GH3128 joints produced at various welding temperatures: (a) 1 040 ℃; (b) 1 080 ℃; (c) 1 120 ℃; (d) 1 160 ℃

中国知网 https://www.cnki.net

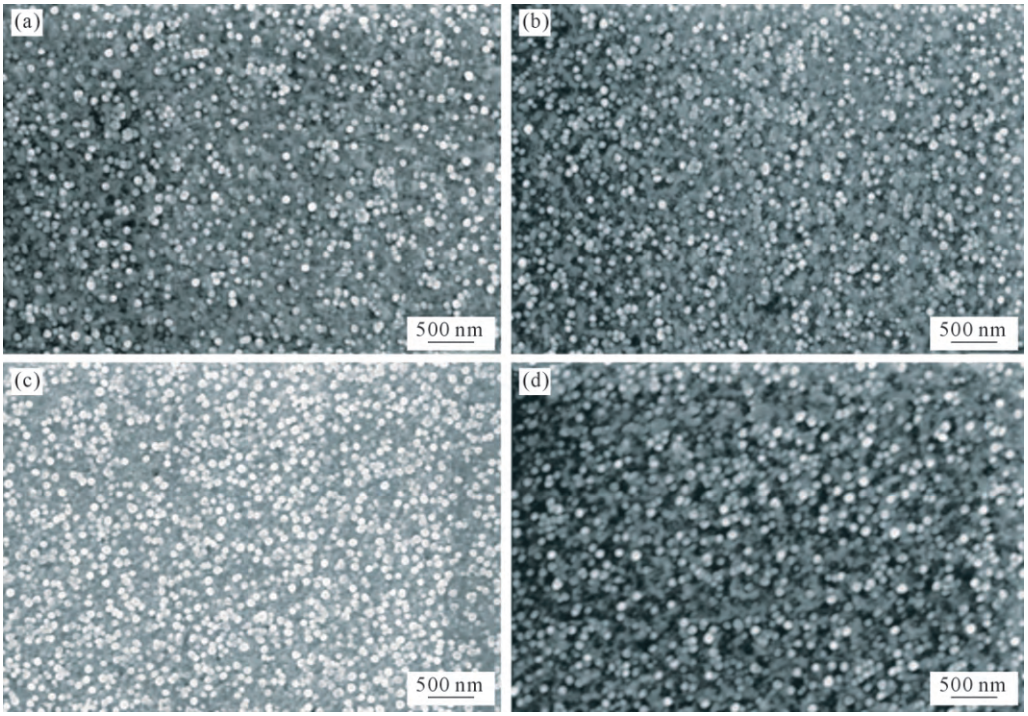

图 10　GH4099 在不同焊接温度下 γ′相的组织形貌：(a) 1 040 ℃; (b) 1 080 ℃; (c) 1 120 ℃; (d) 1 160 ℃

Fig.10　Microstructural morphology of the γ′ phase in the GH4099 alloy at various welding temperatures: (a) 1 040 ℃; (b) 1 080 ℃; (c) 1 120 ℃; (d) 1 160 ℃

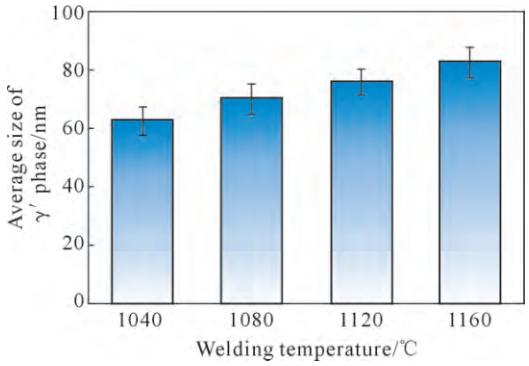

图 11　不同焊接温度下 γ′相平均尺寸

Fig.11　Average size of the γ′ phase at different welding temperatures

导致 γ′相由弥散细小向粗大转变，显著削弱其对位错运动和晶界迁移的钉扎作用，进而引发强度下降等性能问题。因此，γ′相的稳定性与粗化控制是影响高温合金长期服役性能的关键因素。

图 12 显示了在不同键合温度的 TLP 接头的 EBSD 结果。根据晶粒尺寸的差异，可以区分 ISZ 和两个 DAZ。如图 12a 和 b 所示在 1 040 和 1 080 ℃下，ISZ 晶粒较小，呈等轴状，因为此阶段尚处于初始扩散和过渡界面形成期，晶粒生长受限。图 12c 显示在 1 120 ℃时，ISZ 晶粒尺寸增大，晶界迁移与再结晶活动增强，晶粒趋于等轴化。图 12d 显示在 1 160 ℃时，ISZ 晶粒显著长大，部分晶粒跨区生长，高温下晶界迁移现象更加明显。此外，在靠近 GH3128 母材一侧的 DAZ，析出大量细小晶粒，推测与硼化物析出相关。这些析出物在晶界处形成“钉扎效应”，有效阻碍晶界迁移，从而在高温保持阶段抑制过度晶粒长大。上述研究表明焊接温度对 TLP 接头微观组织演化具有重要影响，合理控制焊接温度可以实现 ISZ 区组织均匀化，进而提升接头的力学性能。

2.3　焊接温度对接头力学性能的影响

图 13 为在不同焊接温度下保温 60 min 的接头抗拉强度和伸长率变化曲线，接头的抗拉强度以及伸长率都呈现出先上升后下降的趋势，在焊接温度 1 120 ℃时抗拉强度和伸长率达到最大值分别为 953 MPa 和 15.8%，接头强度达到 GH3128 母材强度的 117.1%。

图 14 展示了焊接温度对接头断口形貌的影响规律。在 1 040 ℃时断口表现为典型的塑性断裂特征(图 14a)，1 080 ℃时呈脆性断裂特征，大部分区域呈现沿晶断裂特征，部分区域出现出明显的解理面。随着温度升高至 1 120 ℃，断口形貌中出现浅而均匀的韧窝，接头呈韧性断裂特征，接头质量良好。当温度达到 1 160 ℃时，接头表现为混合断裂特征，韧窝数量较 1 120 ℃时减少，部分区域呈现沿晶断裂形貌。

断裂行为的变化与接头组织和力学性能变化呈现出高度一致性。1 120 ℃时接头的组织最为均匀，ISZ 区晶粒尺寸适中，DAZ 区硼化物由连续链状向

中国知网　https://www.cnki.net

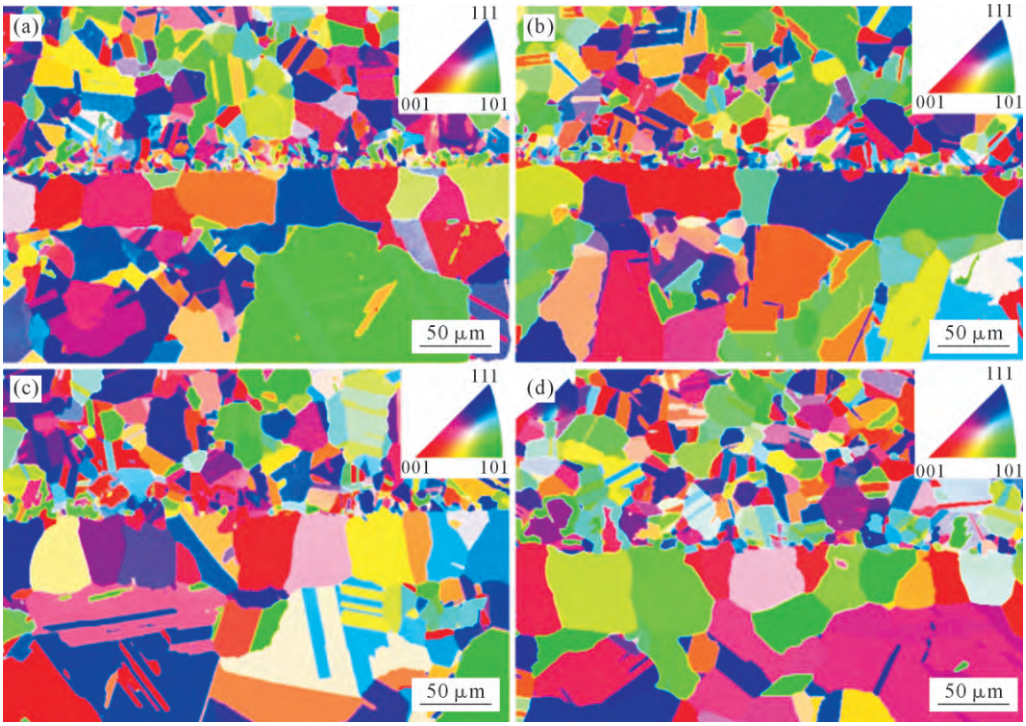

图 12 添加 BNi-2 的 TLP 扩散焊接头在不同温度下的 EBSD 扫描结果:(a) 1 040 ℃; (b) 1 080 ℃; (c) 1 120 ℃; (d) 1 160 ℃
Fig.12 EBSD scan results of TLP diffusion welded heads with added BNi-2 at different temperatures: (a) 1 040 ℃; (b) 1 080 ℃; (c) 1 120 ℃; (d) 1 160 ℃

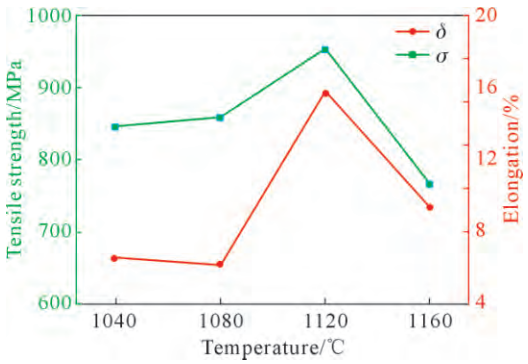

图 13 接头力学性能随焊接温度的变化规律
Fig.13 Variation in the joint mechanical properties with respect to the welding temperature

断续状过渡,有效降低了应力集中并提升了裂纹扩展阻力,γ′强化相分布均匀,接头强度和伸长率达到最大值。在 1 040 和 1 080 ℃,晶界硼化物连续分布易引发脆性断裂。而 1 160 ℃下, 硼化物和 γ′相粗化,晶界钉扎效应减弱,组织趋于脆化,导致混合断裂特征显现。因此,焊接温度通过调控组织形貌、析出相与强化相行为, 直接影响断裂机制与性能,进一步明确了焊接组织与力学性能之间的关系。

3 结论

(1)随着焊接温度升高,ISZ 区晶粒尺寸逐渐增大, 组织趋于等轴化,DAZ 区析出相形貌由连续链状向断续状过渡,接头组织稳定性增强。

(2)B、Si 等降熔元素由中间层向母材扩散,形成以 Mo、W 为主的硼化物析出相,尤其在 GH3128 侧析出大量细小晶粒,在晶界处形成“钉扎效应”,有效阻碍晶界迁移,抑制晶界迁移,延缓晶粒粗化,有效提升了接头组织稳定性。

(3)接头抗拉强度和伸长率随焊接温度呈先升高后降低的趋势。在 1 120 ℃时 γ′相析出充分、组织均匀,达到最大抗拉强度值 953 MPa,在 1 160 ℃时因硼化物和 γ′相粗化转变为混合断裂模式,接头组织显著影响接头的力学性能与断裂机制。

参考文献:

[1] 陈金宾. 新型长寿命第二代镍基单晶高温合金成分设计与组织性能研究[D]. 北京:北京科技大学,2022.
CHEN J B. Composition design, microstructure an properties of novel long-life second generation nickel-based single crystal superalloys[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022.

[2] 曹将栋. 提高镍基高温合金抗氧化腐蚀性能的实验及理论研究[D]. 镇江:江苏大学,2018.
CAO J D. Experimental and theoretical research on the improvement of oxidation crrosion resistance of Ni-based superalloy[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.

[3] 雷景富,郑勇,余俊,吕学鹏,杜娜. 镍基粉末高温合金的研究进展[J]. 宇航材料工艺,2011, 41(6): 18-22.
LEI J F, ZHENG Y, YU J, LYU X P, DU N. P/M nickel-based superalloy[J]. Aerospace Materials & Technology, 2011, 41(6):

中国知网 https://www.cnki.net

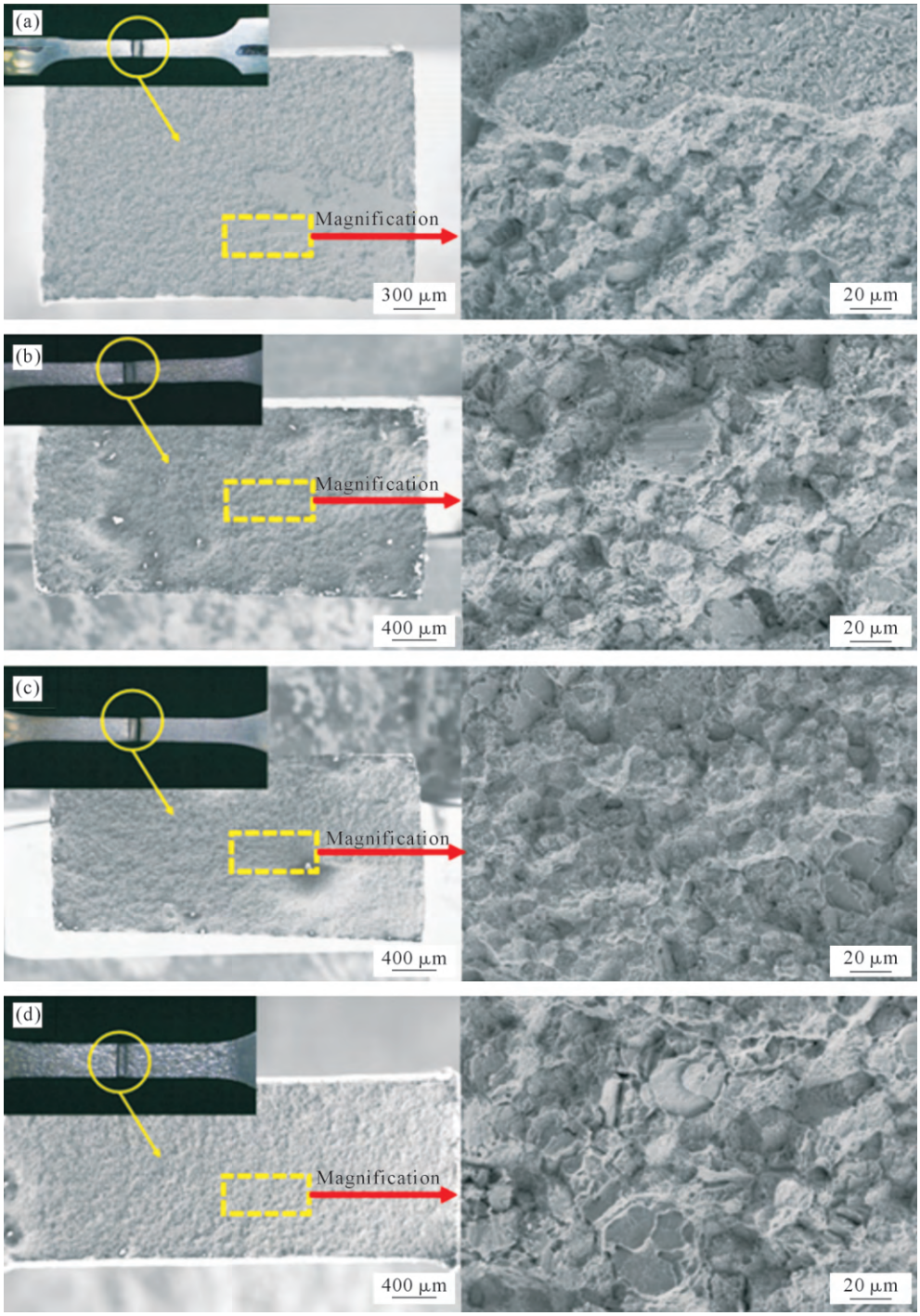

图 14　不同温度获得的焊接接头断口形貌：(a) 1 040 ℃; (b) 1 080 ℃; (c) 1 120 ℃; (d) 1 160 ℃

Fig.14　Fracture surface morphology of joints obtained at various welding temperatures: (a) 1 040 ℃; (b) 1 080 ℃; (c) 1 120 ℃; (d) 1 160 ℃

18-22.

[4] **赵云松，张迈，郭小童，郭媛媛，赵昊，刘砚飞，姜华，张剑，骆宇时. 航空发动机涡轮叶片超温服役损伤的研究进展**[J]. **材料工程**，2020, 48(9): 24-33.
ZHAO Y S, ZHANG M, GUO X T, GUO Y Y, ZHAO H, LIU Y F, JIANG H, ZHANG J, LUO Y S. Recent progress inservice induced degradation of turbine blades of aeroengine due to overheating[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(9): 24-33.

[5] **黄云，李少川，肖贵坚，陈本强，张友栋，贺毅，宋康康. 航空发动机叶片材料及抗疲劳磨削技术现状**[J]. **航空材料学报**，2021, 41(4): 17-35.
HUANG Y, LI S C, XIAO G J, CHEN B Q, ZHANG Y D, HE Y, SONG K K. Research progress of aero-engine blade materials and anti-fatigue grinding technology[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2021, 41(4): 17-35.

[6] **钱虎虓，梁啸宇，李阳，阚文斌，林峰. 电子束粉床熔融制备镍基高温合金构件的研究进展**[J]. **航空材料学报**，2024, 44(1): 46-58.
QIAN H X, LIANG X Y, LI Y, KAN W B, LIN F. Research progress in fabrication of nickel-based superalloy components by electron beam powder bed fusion[J]. Journal of Aerospace Materials, 2024, 44(1): 46-58.

[7] **师昌绪，仲增墉. 我国高温合金的发展与创新**[J]. **金属学报**，2010,

中国知网　https://www.cnki.net

46(11): 1281-1288.
SHI C X, ZHONG Z Y. Development and innovation of superalloy in China[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(11): 1281-1288.

[8] LI W Q, HU S P, LEI Y Z, LEI Y, SONG X G, FENG J C. Interfacial microstructure and mechanical properties of GH99 superalloy and Nb brazed joint using Cu75Pt25 filler[J]. Transactions of the Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(10): 2724-2736.

[9] LIU D, SONG Y Y, SHI B, ZHANG Q, SONG X G, NIU H W, FENG J C. Vacuum brazing of GH99 superalloy using graphene reinforced BNi-2 composite filler[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(10): 1843-1850.

[10] LI H X, WEI H M, HE P, LIN T S, FENG J C, HUANG Y D. Effects of alloying elements in GH99 superalloy on microstructure evolution of reactive brazing TiAl/GH99 joints[J]. Intermetallics, 2013, 34: 69-74.

[11] 傅宏镇,陈玉平,魏育环,崔永发,张树征. 碳、钨、钼和铁对GH128合金显微组织和性能的影响[J]. 钢铁研究总院学报, 1985(1): 75-82.
FU H Z, CHEN Y P, WEI Y H, CUI Y F, ZHANG S Z. Influence of C, W, Mo and Fe on the microstructure and properties of alloy GH128[J]. Central Iron and Steel Research Institute Technical Bulletin, 1985(1): 75-82.

[12] 王鸣翔. GH4169/FGH96 异种镍基高温合金线性摩擦焊接头组织性能表征[D]. 济南:山东大学,2023.
WANG M X. Microstructures and peoperties of linear friction welded joint of GH4169/FGH96 Dissimilar superalloys[D]. Jinan: Shandong University, 2023.

[13] 王楠,李金国,刘纪德,徐伟. 选区激光熔化镍基高温合金组织及缺陷研究进展[J]. 稀有金属材料与工程,2024, 53(1): 257-269.
WANG N, LI J G, LIU J D, XU W. A review of research of microstructure and defects in Ni-based superalloys fabricated by selective laser melting[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53(1): 257-268.

[14] GENG P H, QIN G L, MA H, ZHOU J, MA N S. Linear friction welding of dissimilar Ni-based superalloys: Microstructure evolution and thermo-mechanical interaction[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 11: 633-649.

[15] HUANG Z W, LI H Y, PREUSS M, KARADGE M, BOWEN P, BRAY S, BAXTER G. Inertia friction welding dissimilar nickel-based superalloys alloy 720Li to IN718[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2007, 38: 1608-1620.

[16] 张贵锋,张建勋,王士元,邱凤翔. 瞬间液相扩散焊与钎焊主要特点之异同[J]. 焊接学报,2002, 23(6): 92-96, 0.
ZHANG G F, ZHANG J X, WANG S Y, QIU F X. Similarities and differences inmain characteristics between transient liquid phase bonding and brazing process[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2002, 23(6): 92-96, 0.

[17] 刘晓芳,常云峰,秦建,沈元勋,钟素娟. 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, SHEN Y X, ZHONG S J. Review on welding process of nickel-based superalloy[J]. Welding and Joining of Non-ferrous Metal, 2024(12): 47-54.

[18] 蔡华淋. 异种高温合金 IC10/GH4169 电子束焊接接头组织与性能研究[D]. 赣州:江西理工大学,2025.
CAI H L. Study on the microstructure and properties of electron beam welded joints of dissimilar superalloy IC10/GH4169[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2025.

[19] 朱源,张昊,程晓瞳,李京龙,熊江涛,张赋升. 镍箔中间层厚度对 GH4099 合金固相扩散焊质量的影响[J]. 焊接学报,2018, 39(4): 93-98, 133.
ZHU Y, ZHANG H, CHEN X T, LI J L, XIONG J T, ZHANG F S. Effect of nickel interlayer thickness on solid-state diffusion bonding quality of superalloy GH4099[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(4): 93-98, 133.

[20] 郑医,张宇慧,陈玉宝. BNi-2 和 BNi71CrSi 钎料钎焊 K405 合金接头组织与性能比较[J]. 电焊机,2019, 49(6): 37-40.
ZHENG Y, ZHANG Y H, CHEN Y B. Comparative study about microstructure and property of K405 alloy brazing joint by using BNi-2 and Bni71CrSi filler metals[J]. Electric Welding Machine, 2019, 49(6): 37-40.

[21] 李铎,白洁,蔺晓超,马瑞,杨于银. 采用 BNi82CrSiB 钎焊GH3128的接头组织及性能研究[A]. 中国航天第三专业信息网第三十九届技术交流会暨第三届空天动力联合会议论文集——S06材料、工艺与制造技术[C]. 北京:北京动力机械研究所,2018. 60-65.
LI Y, BAI J, LIN X C, MA R, YANG Y Y. Study on the joint structure and properties of BNi82CrSiB brazing GH3128 [A]. Proceedings of the 39th Technical Exchange Conference and the 3rd Joint Conference on Aerospace Power——S06 Materials, Process and Manufacturing Technology[C]. Beijing: Beijing Power Machinery Institute, 2018. 60-65.

[22] ZHANG X, LI K S, YAO N, SHI J M, LU T W, NIE W R, WANG R Z, ZHANG X C, TU S T. Transient liquid phase bonding of DD5 single crystal and GH4169 superalloy using BNi-2 interlayer: From microstructural evolutions to mechanical properties[J]. Materials Science and Engineering: A, 2025, 923: 147723.

[23] 唐一峰. GH4169 高温合金 TLP 扩散焊接头组织性能研究[D]. 济南:山东大学,2017.
TANG Y F. Microstructure and properties of GH4169 superalloy TLP bonding joints[D]. Jinan: Shandong University, 2017.

[24] 王学刚,严黔,李辛庚. 20 钢管高温钎焊与瞬时液相扩散焊接组织与性能[J]. 焊接学报,2005(5): 56-61.
WANG X G, YAN Q, LI X G. Microstructure and properties of 20 steel pipe joints by transient liquid phase bonding and high temperature brazing[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005(5): 56-61.

[25] XIONG J T, YUAN L, ZHU Y, ZHANG H, LI J L. Diffusion bonding of nickel-based superalloy GH4099 with pure nickel interlayer [J]. Journal of Materials Science, 2019, 54(8): 6552-6564.

[26] FAN L H, LI D, JIA S D, TAO F, CHEN J S. Microstructure and mechanical properties of rhenium and GH3128 superalloy dissimilar welded joints by electron beam welding[J]. Materials Research Express, 2021, 8(5): 056512.

[27] EL-BAGOURY N, NOFAL A. Microstructure of an experimental Ni base superalloy under various casting conditions[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(29-30): 7793-7800.

[28] 袁振飞,蒋劲,程智伟,杜欣,祁百鑫,武强,杨顺华,肖荣诗. 光纤激光 GH3128 搭接接头高温力学性能研究[J]. 中国激光,2022,

中国知网 https://www.cnki.net

49(21): 170-178.
YUAN Z F, JIANG J, CHENG Z W, DU X, QI B X, WU Q, YANG S H, XIAO R S. High-temperature mechanical properties of fiber laser welding GH3128 overlap joints[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(21): 170-178.

[29] YANG M, WANG Y, DING R, GUO Q Y, LIU C X, LIU Y C. Precipitates evolution and fracture mechanism of the isothermally solidified TLP bonding joints between 316LN stainless steel and IN718 Ni-based alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 881: 145440.

[30] NIE Z H, GUO Q Y, CHAI J, CHEN Z T, LI J W, DONG H K, DING R, LIU C X, MA Z Q, TIAN X Z, CHEN H, LIU Y C. Initial γ′ phase formation mechanism in a GH4099 precipitation strengthened nickel-based superalloy[J]. Scripta Materialia, 2025, 264: 116702.

(责任编辑:宫文婧)

中国知网　https://www.cnki.net