

引用格式: 王浩, 丁宁, 翟智梁, 等. 钎焊间隙对 K465 高温合金接头微观组织与拉伸性能的影响[J]. 航空材料学报, 2026, 46(4): 99-107.

WANG Hao, DING Ning, ZHAI Zhiliang, et al. Effect of brazing gap on microstructures and tensile properties of K465 superalloy joint [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2026, 46(4): 99-107.

钎焊间隙对 K465 高温合金接头微观组织 与拉伸性能的影响

王浩^{1*}, 丁宁², 翟智梁¹, 任新宇¹, 陈波¹

(1. 中国航发北京航空材料研究院 焊接与塑性成形研究所, 北京 100095; 2. 空军装备部驻北京地区第六军事代表室, 北京 100013)

摘要: 为了提高 K465 高温合金叶片服役裂纹钎焊修复接头的高温性能, 采用新型 Co-Cr-Ni-W-Al-Ti-Ta-B 钎料, 在 1220 °C/15 min 条件下分别对 0.05 mm 和 0.2 mm 两种间隙 K465 高温合金钎焊连接进行研究, 分析两种接头微观组织、元素分布规律和高温拉伸性能。结果表明, 钎料对母材有优异的冶金相容性, 钎焊过程中发生明显元素互扩散。0.05 mm 间隙接头由 γ/γ' 双相基体和 (W, Cr)B、富 Ti 硼化物、NiAl 等化合物相组成; 对于 0.2 mm 间隙接头, 由于引入高温合金粉末填充材料, 化合物相弥散分布、尺寸细化, 但相种类未发生改变。两种间隙接头 1000 °C 高温拉伸性能相当, 0.05 mm 和 0.2 mm 间隙钎焊接头抗拉强度分别为 383 MPa 和 396 MPa, 约为 K465 合金母材的 70%。由于钎料与母材之间良好的冶金相容性以及 B2 有序 NiAl 相的强化作用, 两种间隙钎焊接头均表现出优异的高温拉伸性能。

关键词: K465 高温合金; 钎焊修复; 钎焊间隙; 接头微观组织; 高温抗拉强度

doi: 10.11868/j.issn.1005-5053.2025.000224

CSTR: 32420.14.j.issn.1005-5053.2025.000224

中图分类号: TG44; V252

文献标识码: A

文章编号: 1005-5053(2026)04-0099-09

Effect of brazing gap on microstructures and tensile properties of K465 superalloy joint

WANG Hao^{1*}, DING Ning², ZHAI Zhiliang¹, REN Xinyu¹, CHEN Bo¹

(1. Welding and Plastic Forming Division, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. The Sixth Military Representative Office of the Airborne Equipment Department in Beijing, Beijing 100013, China)

Abstract: To improve the high-temperature performance of brazed repair joints for service cracks in K465 superalloy blades, a novel Co-Cr-Ni-W-Al-Ti-Ta-B brazing filler metal is employed to braze K465 superalloy with gap widths of 0.05 mm and 0.2 mm under the condition of 1220 °C/15 min. The microstructure, elemental distribution, and high-temperature tensile properties of two joints are analyzed. The results show that the brazing filler metal exhibits excellent metallurgical compatibility with the base metal, with significant interdiffusion of elements occurring during the brazing process. The joint with a 0.05 mm gap consists of a γ/γ' dual phase matrix with dispersed γ' phase, as well as compound phases including (W, Cr)B, Ti-rich boride, and NiAl. For the joint with a 0.2 mm gap, the introduction of superalloy powder as a filler material results in dispersed and refined compound phases, while the phase types remain unchanged. The high-temperature tensile properties at 1000 °C of two joints are comparable: the tensile strength of the 0.05 mm and 0.2 mm gap joint is 383 MPa and 396 MPa, respectively, reaching approximately 70% of the K465 base metal. Due to the favorable metallurgical compatibility between the brazing filler metal and the base metal, as well as the strengthening effect of the B2-ordered NiAl phase, two kinds of brazed joints exhibit excellent high-temperature tensile properties.

Key words: K465 superalloy; brazing repair; brazing gap; joint microstructure; high-temperature tensile strength

K465 合金是典型的沉淀强化型等轴晶铸造镍基高温合金,因其优异的高温强度、良好的抗氧化性等综合性能,被广泛用于制造航空发动机涡轮叶片^[1]。作为发动机热端核心部件,涡轮叶片长期在高温、高压、高转速及复杂燃气的极端环境下工作,易受冷热疲劳、高温氧化等影响,产生裂纹、烧蚀等损伤。直接更换全新的叶片,不仅成本极其高昂,而且制造周期较长。因此,发展高效、高可靠的叶片修复再制造技术,对于延长发动机使用寿命意义重大^[2-8]。

在众多修复技术中,钎焊技术因修复区域冶金结合良好、对基体热影响小、适用于复杂裂纹和微小缺陷的修复等优点,被认为是高温合金叶片损伤修复最具潜力的技术途径之一^[9-12]。然而,由于钎料熔点通常低于待焊母材,钎焊接头在高温环境下的承载能力,特别是高温强度与耐温性能,成为制约钎焊技术在涡轮叶片等热端部件应用的关键因素。钎焊是利用毛细作用使熔化的钎料流入并停留在接头间隙内形成钎焊接头,一般要求装配间隙小于 0.15 mm,否则无法实现毛细作用,形成有效钎焊接头。目前涡轮叶片修复技术主要包括瞬态液相(transient liquid phase, TLP)扩散连接技术和大间隙钎焊(wide-gap brazing, WGB)技术,对于装配间隙大于 0.15 mm,常采用大间隙钎焊技术^[13]。为提升接头高温力学性能,现有研究多采用提高保温温度、延长保温时间或扩散热处理等工艺方法^[2-4, 14-17]。

近年来,国内研究人员围绕 K465 高温合金的钎焊接头组织和力学行为开展一系列研究。潘晖等^[18-19]分别采用 Ni-Co-Cr-Si-B 系镍基钎料和 Co-Ni-Cr-B 系钴基钎料对 K465 高温合金开展大间隙钎焊连接,研究发现镍基钎料接头性能随保温时间

延长而提高,而钴基钎料接头性能则随保温时间延长呈现先升高后降低的趋势,当镍基钎料保温时间为 16 h,接头在 975 °C/90 MPa 条件下持久寿命达到 54 h。梁海等^[20]选用含铝、钛等活性元素的镍基高温钎料对 K465 合金进行钎焊,采用在间隙内填充镍网的方法明显改善接头组织,减少接头内有害化合物相含量。王刚^[21]采用自制镍基钎料对 K465 高温合金电子束钎焊进行研究,发现束流和加热时间对接头强度影响显著,经过优化工艺参数,接头室温抗拉强度为 760 MPa。总的来说,现有 K465 高温合金钎焊研究^[18-25]多聚焦于钎焊工艺参数对接头组织演变规律及性能的影响,普遍采用延长保温时间、调整高温合金粉末与钎料配比等方式改善接头组织,获得的接头通常由 γ 固溶体、 $(\gamma+\gamma')$ 共晶及硼化物或硅化物相组成,目前鲜有对该合金钎焊接头在 1000 °C 以上高温性能的报道。

基于上述背景,本工作选用新型 Co-Cr-Ni-W-Al-Ti-Ta-B 钎料,系统研究采用 15 min 短时保温工艺,不同间隙尺寸下 K465 高温合金钎焊接头的微观组织与力学性能,重点分析 0.05 mm 与 0.2 mm 两种间隙接头的组织特征、元素分布规律以及 1000 °C 下高温拉伸性能,并进一步探讨钎焊间隙对高温力学行为的影响机制。

1 实验材料与方法

实验用铸态母材 K465 高温合金成分见表 1,微观组织形貌如图 1 所示。K465 高温合金主要由 γ 固溶体、 γ' 相、MC 型、 $M_{23}C_6$ 型、 M_6C 型碳化物相和少量 TCP 相组成,1000 °C 抗拉强度为 555 MPa^[1],1050 °C 下能够长期稳定服役,用于制造涡轮叶片、导向器等极端环境部件。

表 1 K465 高温合金和 Ni 基高温合金粉末化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of K465 superalloy and Ni-based superalloy powder (mass fraction/%)

Superalloy	Co	Cr	Mo	W	Al	Ti	Nb	Zr	C	B	Ni
K465	9.0-10.5	8.0-9.5	1.2-2.4	9.5-11.0	5.1-6.0	2.0-2.9	0.8-1.2		0.13-0.20		Bal.
Powder	7.0-9.0	12.0-14.0	3.3-3.7	3.3-3.7	3.3-3.7	2.3-2.7	3.3-3.7	0.03-0.07	0.04-0.09	0.006-0.015	Bal.

本工作选用的 Co-Cr-Ni-W-Al-Ti-Ta-B 钎料以 B 为降熔元素,熔化温度区间为 1148~1180 °C。采用对接接头形式对 K465 高温合金进行真空钎焊

实验,所用试样尺寸为 25 mm×15 mm×2 mm。将待焊表面磨削光亮后,分别在待焊表面垫厚为 0.05 mm 和 0.2 mm 的间隙片。0.05 mm 间隙试

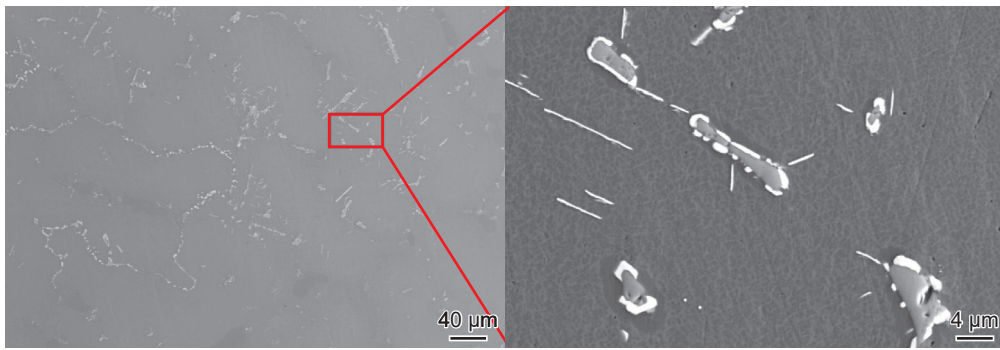


图1 K465 高温合金微观组织形貌及其局部放大图

Fig. 1 Microscopic structure morphology of K465 superalloy and its local magnification

样直接在待焊部位添加钎料, 0.2 mm 间隙试样采用在间隙内预填 Ni-Cr-Co-Al-Ti-Nb-W-Mo 系高温合金粉末的大间隙钎焊方法, 其化学成分如表 1 所示。焊接工艺参数设定为 1220 °C, 保温 15 min, 钎焊过程中真空压强保持低于 5×10^{-2} Pa。

采用配备能量色散谱 (energy dispersive spectrometer, EDS) 仪的 Sigma300 型扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 和 Talos F200X G2 型透射电子显微镜 (transmission electron microscope, TEM) 对钎焊接头进行微观组织和物相表征, 并在 5982 型电子万能试验机上进行 1000 °C 高温拉伸性能测试。

2 结果与分析

2.1 小间隙钎焊接头典型微观组织

采用 Co-Cr-Ni-W-Al-Ti-Ta-B 钎料获得的 0.05 mm 间隙钎焊接头微观组织形貌如图 2 所示。虚线标注区域为钎焊缝区域, 两侧为 K465 高温合金母材。由图 2(a) 可知, 钎料饱满填充在接头间隙内, 钎焊区域组织致密, 未见明显缺陷。结合图 2(b)~(d) 钎焊缝区域局部放大分析结果, 观察到钎焊缝内部物相分布较为均匀, 接头内以 γ/γ' 双相为基体, 其内部主要分布白色骨架状、灰白色块

状、黑色块状、白色条块等相。

图 2(b) 中各微区能谱分析结果如表 2 所示。微区 2 和微区 5 中 Cr 含量较高, 同时含有 Ni、W、Co、Mo 元素, 推测其为富 Cr 硼化物相^[26-27]。微区 3 呈黑色块状相, Al 含量较高, 为 22.4% (原子分数, 下同), 该相主要由 Ni、Co、Cr 元素组成, 根据能谱结果推测其为 Ni-Al 系化合物, 微区 4 和微区 6 分别分布在焊缝界面和母材近缝区, Ti 含量高达 61.9%~66.4%, 推测其为富 Ti 硼化物相^[28]。

0.05 mm 间隙钎焊接头元素分布情况如图 3 所示。K465 合金为镍基高温合金, Ni 元素在母材区域均匀分布。Co、Cr 元素作为钎料的主要元素集中分布于钎焊缝内部, 钎料与母材发生明显的冶金扩散反应。W、Mo、Ta 元素分布规律较为一致, 主要分布在钎缝的硼化物相中, 而且钎料中 Ta 元素向母材发生明显元素扩散并富集于近缝区母材碳化物中。Ti、Nb 元素分布规律相近, 主要富集在母材碳化物相中, 母材中 Nb 元素少量进入钎焊缝中心区域的富 Ti 硼化物相中, Al 元素则富集在 Ni-Al 系化合物。

为进一步确定接头物相, 对接头界面进行高分辨透射电镜表征分析, 白色骨架状和黑色块状两种物相的高角环形暗场扫描电子显微镜 (high-angle annular dark-field scanning transmission electron

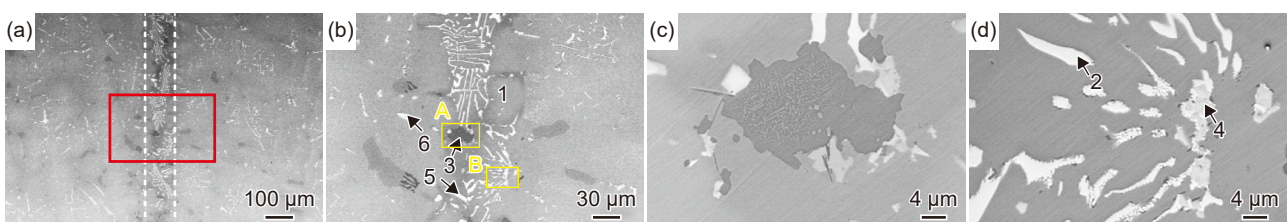


图2 0.05 mm 间隙钎焊接头微观组织 (a) 接头组织; (b) 图(a)中局部放大; (c) 图(b)中 A 区局部放大; (d) 图(b)中 B 区局部放大

Fig. 2 Microstructures of the 0.05 mm gap brazed joint (a) microstructure of the joint; (b) local magnification in Fig. (a); (c) local magnification of area A in Fig. (b); (d) local magnification of area B in Fig. (b)

表2 接头区域各微区能谱分析
Table 2 EDS analysis for microzones in the joint area

Micro-zone	Atomic fraction/%									Morphology	Deduced phase
	Ni	Co	Cr	W	Al	Ti	Ta	Nb	Mo		
1	37.1	28.4	18.9	2.7	9.8	3.1	—	—	—	Gray matrix	γ/γ'
2	18.6	15.4	33.1	15.9	3.7	6.6	—	—	6.7	White skeleton	Cr-rich boride
3	37.3	21.8	8.0	—	22.4	10.5	—	—	—	Black blocky	NiAl
4	—	2.2	1.2	3.4	—	66.4	23.9	2.9	—	Gray-white blocky	Ti-rich boride
5	3.5	4.9	54.8	26.3	—	2.8	—	—	7.7	White strip	Cr-rich boride
6	—	—	1.6	5.6	—	61.9	23.3	7.6	—	Gray-white blocky	Ti-rich boride
7	25.7	32.9	27.7	1.3	3.3	1.5	6.6	0.2	0.8	White network	γ -(NiCoCr)
8	51.7	20.7	3.1	0.3	8.6	7.9	7.0	0.4	0.3	Black spheroidal	γ' -(Ni, Co) ₃ (Al, Ti, Ta)
9	37.9	27.1	21.2	2.0	8.8	3.0	—	—	—	Gray matrix	γ/γ'
10	34.6	30.8	20.6	0.7	5.8	7.5	—	—	—	Superalloy powder particle	γ/γ'
11	7.2	6.9	5.6	2.7	14.6	48.8	10.4	3.8	—	Gray-white blocky	Ti-rich boride
12	42.0	20.8	9.6	0.4	21.3	5.9	—	—	—	Black blocky	NiAl
13	7.9	9.2	42.6	23.0	2.2	6.8	—	—	8.3	White skeleton	(W, Cr)B
14	4.3	7.4	50.8	12.2	—	9.8	2.0	2.2	11.3	White blocky	(W, Cr)B

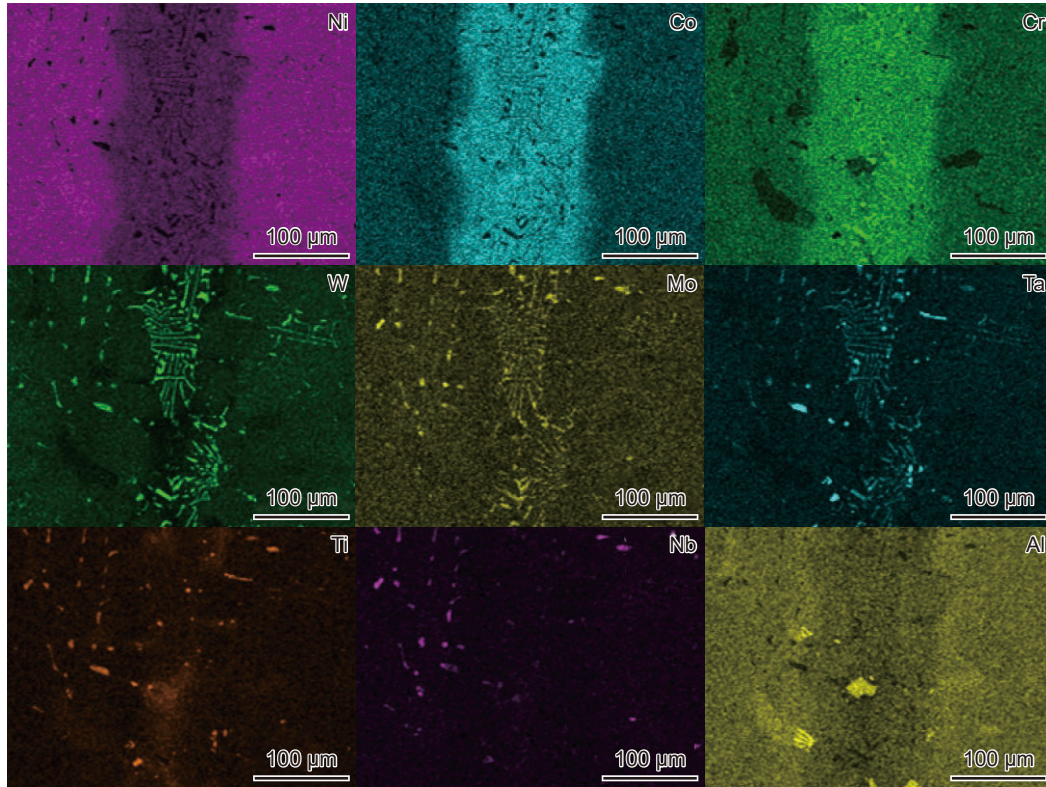


图3 0.05 mm 间隙钎焊接头元素分布

Fig. 3 Elemental mapping in the 0.05 mm gap brazed joint

microscopy, HAADF-STEM) 图像、元素分布情况和选区电子衍射 (selected area electron diffraction,

SAED) 图像如图 4 所示。由图 4 可知, 接头中白色骨架状相主要由 W、Cr、B 元素组成, 结合 SAED

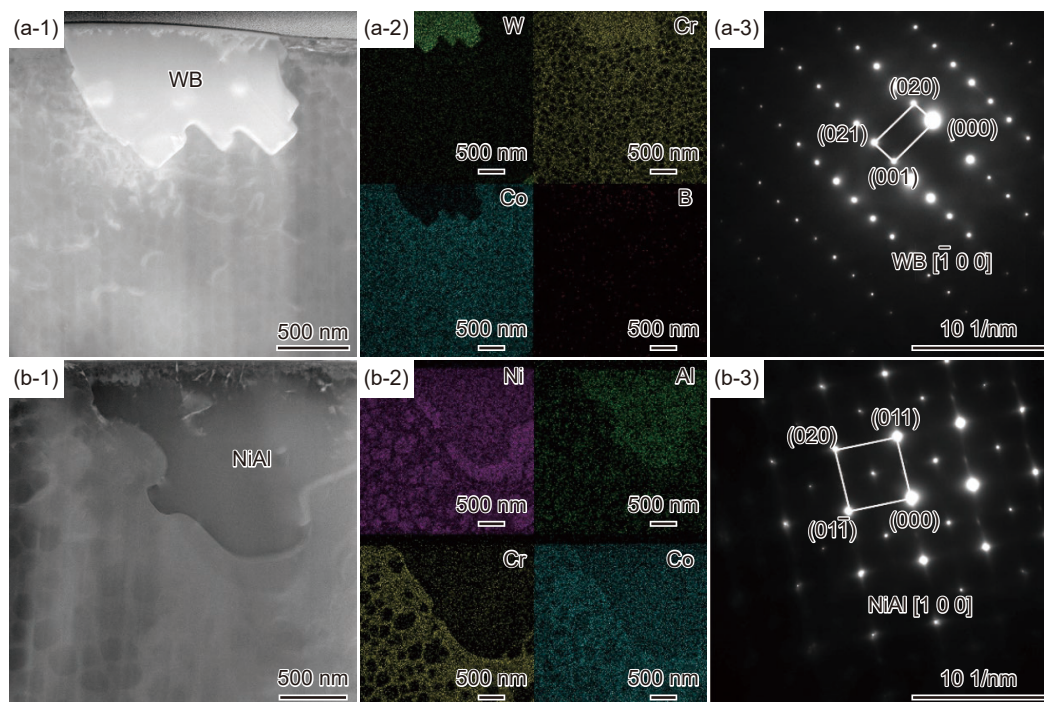


图4 白色骨架状(a)和黑色块状(b)两种物相透射电子显微镜测试结果 (1)高角环形暗场扫描电子显微镜图; (2)元素分布; (3)选区电子衍射图

Fig. 4 TEM test results of the white skeleton phase (a) and the black blocky phase (b) (1) HAADF-STEM images; (2) elemental distribution; (3) SAED images

图像标定确认为 WB 晶体结构, 推测白色骨架状相为 (W, Cr)B 相。黑色块状相则主要包含 Ni、Al、Co 元素, 根据其 SAED 图像标定结果, 推测该物相为 B2 有序结构的 NiAl 相。这种 B2 有序 NiAl 相点阵常数和晶体结构与体心立方晶体基体相十分接近, 不易被位错剪切, 具有优异的强韧化效果, 对接头强度具有一定强化作用^[29]。

图5为钎焊接头基体的 HAADF-STEM 图及相应元素分布结果, 由图可见接头基体由白色网格相和黑色球状相组成, 其中 Co、Cr 元素富集在白色网格相中, Ni、Al、Ti 元素则富集在黑色球状相中。

各微区能谱分析结果见表2, 微区7 主要包含 Ni、Co、Cr 元素, 推测其为 γ -(NiCoCr) 固溶体, 微区8 以 Ni、Co、Al、Ti、Ta 元素为主, 且 (Ni+Co) 元素与 (Al+Ti+Ta) 元素原子比接近 3:1, 符合 γ' -(Ni, Co)₃(Al, Ti, Ta) 相的成分特征。与传统钎料组织相比, 本工作采用 Co-Cr-Ni-W-Al-Ti-Ta-B 钎料, 并未形成单一的 γ 固溶体基体, 而是获得由 γ/γ' 两相构成的基体组织, γ' 相以近似球状形态弥散分布, 粒径约为 100 nm。此类 γ/γ' 双相组织常见于典型的沉淀强化型高温合金^[30], 有助于增强接头在高温下的力学性能。

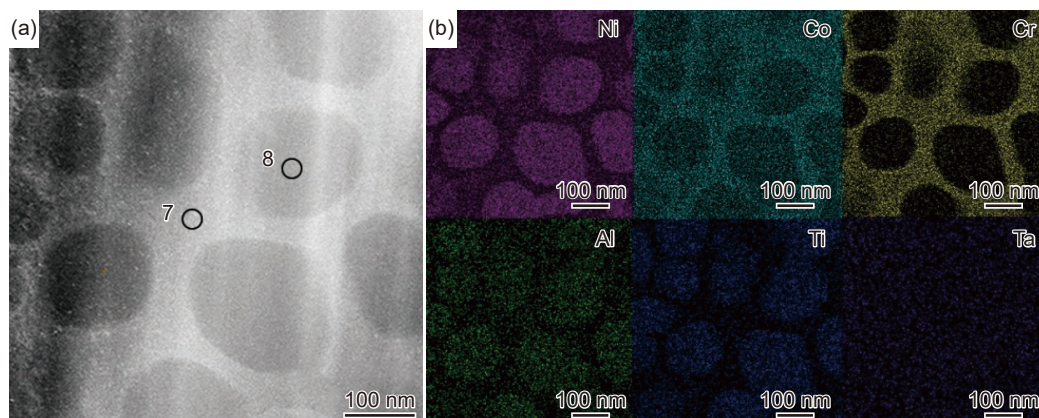


图5 接头基体高角环形暗场扫描电子显微镜图(a)和元素分布(b)

Fig. 5 HAADF-STEM image (a) and elemental distribution (b) of the joint matrix

2.2 大间隙钎焊接头典型微观组织

采用Co-Cr-Ni-W-Al-Ti-Ta-B钎料获得的0.2 mm间隙钎焊接头微观组织形貌如图6所示。虚线标注区域为钎焊缝区域,两侧为K465高温合金母材。由图6(a)可知,高温合金粉末均匀分布在钎焊间隙内,钎料填充在母材及高温合金颗粒之间的间隙内,钎焊区域组织致密无明显缺陷。图6(b)表明,化合物相在高温合金颗粒间隙内弥散分布,相较于0.05 mm间隙接头,0.2 mm间隙接头内化合物相总量减少,尺寸显著细化。钎焊接头由高温合金粉末颗粒、 γ/γ' 双相基体、白色骨架状相、黑

色块状相及白色块状相组成。

图6(b)中各微区能谱分析结果如表2所示。除高温合金粉末颗粒外,接头中所含化合物相种类与0.05 mm间隙钎焊接头基本一致。微区9、微区10中高温合金粉末为 γ/γ' 双相,微区11的富Ti硼化物相和微区12的NiAl相含量减少,微区11与微区12化合物相含量减少可能与Al、Ti元素向粉末颗粒扩散有关。微区10粉末颗粒的元素组成与高温合金粉末颗粒相比,Al、Ti含量分别提高至5.8%和7.5%。接头中化合物相仍以微区13和微区14为代表的(W, Cr)B相为主。

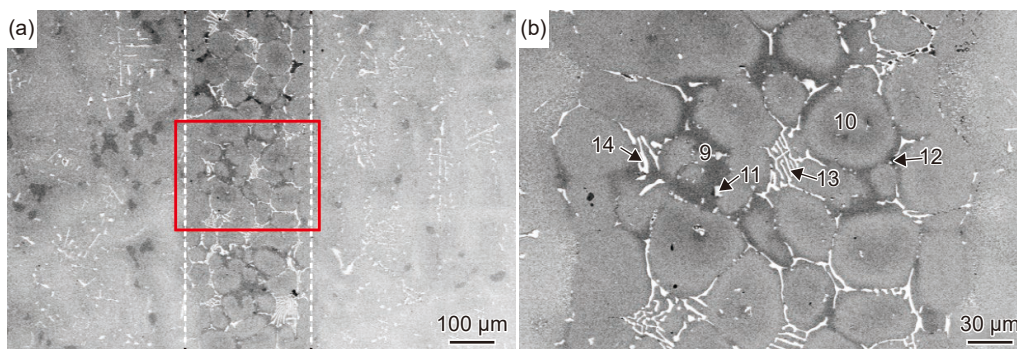


图6 0.2 mm间隙钎焊接头微观组织 (a)接头组织; (b)图(a)中局部放大

Fig. 6 Microstructures of the 0.2 mm gap brazed joint (a) microstructure of the joint; (b) local magnification in Fig. (a)

0.2 mm间隙钎焊接头元素分布情况如图7所示。由于添加高温合金粉末颗粒,接头内Ni元素含量明显提升。钎料中Co、Cr主要元素分布在钎焊缝内部,分布特征与0.05 mm间隙接头类似,钎焊接头界面弯曲,说明该间隙下钎料与母材发生明显的冶金反应。W、Mo、Ta元素分布基本一致,主要富集在钎焊缝硼化物相和母材碳化物中。焊缝内富Ti硼化物相和NiAl相含量明显降低,与之对应Ti、Al元素在钎焊接头内无明显富集现象。

2.3 钎焊间隙对接头高温拉伸性能的影响

K465高温合金钎焊接头1000℃下高温抗拉强度见表3。结果表明,0.05 mm和0.2 mm间隙接头高温抗拉强度分别为383 MPa和396 MPa,二者抗拉强度相当,约为K465高温合金母材的70%。

在钎焊接头中,气孔、未焊合等微观缺陷以及焊缝物相分布不均匀是常见问题。特别对于高温合金钎焊,目前多采用以Si或B为主要元素的钎料,可以降低熔点,这类钎料易在接头内部形成脆性化合物相,导致接头性能数据波动较大。表3中间隙为0.05 mm的钎焊接头的高温抗拉强度出现一个较低值,这可能与试样接头中存在的微观缺陷,或

者局部区域(W, Cr)B相呈连续分布有关。通过优化钎料体系,或者改善钎焊工艺与钎料之间的匹配性,以抑制接头中微观缺陷及脆性化合物的形成,提升接头组织的均匀性,增强接头性能的稳定性的。

两种间隙高温拉伸断口形貌如图8所示,由此可知,两种接头断裂路径呈现曲折特征,且断裂位置均发生在焊缝区域,断口表现为脆性断裂为主的混合断裂模式。0.05 mm间隙接头断裂主要沿(W, Cr)B白色骨架状相与基体界面扩展,说明白色骨架状相为接头的薄弱区。进一步观察发现,(W, Cr)B相内部存在脆性裂纹,而NiAl相未出现明显开裂。在图8(a)A区中,断裂路径甚至出现“绕开”NiAl相的现象,这与前文所述B2有序NiAl相难以被位错剪切的推断相吻合。

0.2 mm间隙接头断裂路径相对复杂,断裂位置主要发生在接头内部高温合金粉末颗粒与(W, Cr)B骨架状相的界面处,开裂路径沿粉末颗粒之间扩展延伸。通过在接头内预填高温合金粉末,粉末颗粒作为填充材料占据大部分间隙,使化合物相呈小尺寸且弥散分布。在高温拉伸过程中,化合物相在应力作用下失稳开裂,随着应力增大,裂纹进一步扩展。接头中高温合金粉末颗粒类似于多个

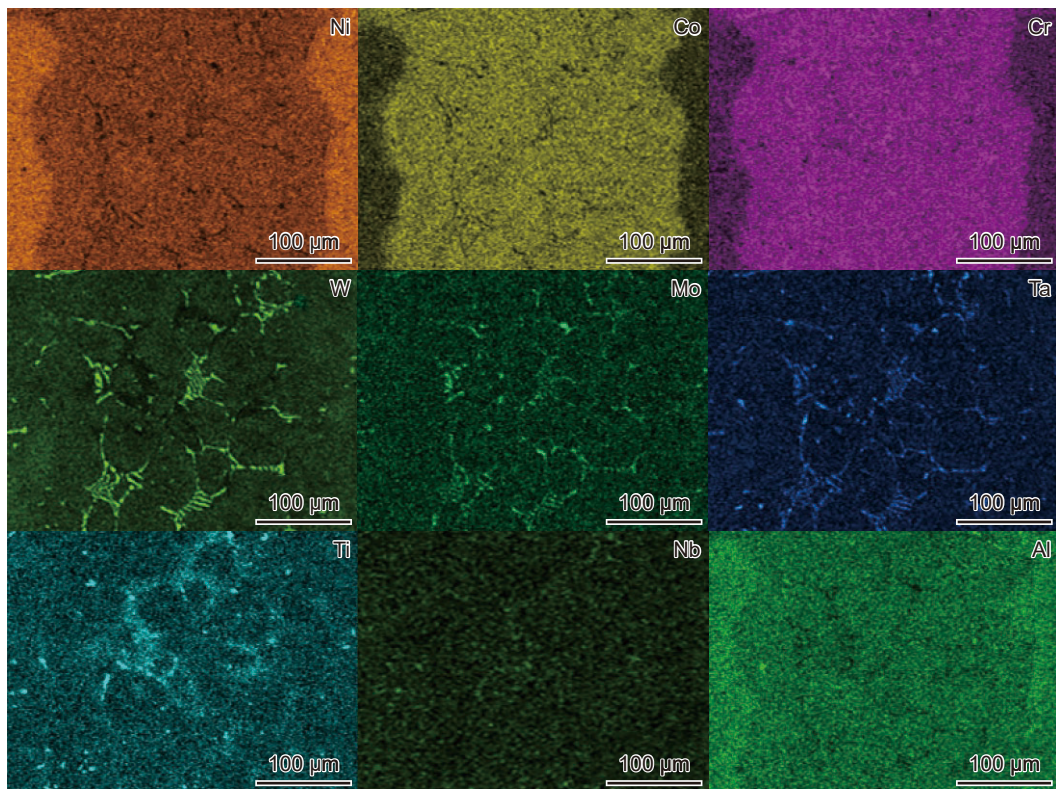


图 7 0.2 mm 间隙钎焊接头元素分布

Fig. 7 Elemental distribution in the 0.2 mm gap brazed joint

表 3 K465 高温合金钎焊接头 1000 °C 下高温抗拉强度
Table 3 Tensile strength of K465 superalloy brazed joint at 1000 °C

Gap/mm	Tensile strength/MPa	Average value/MPa
0.05	422	383
	304	
	422	
0.2	393	396
	402	
	393	

“隔离岛”，对裂纹起到显著的阻碍作用，可有效抑制裂纹进一步扩展^[17]。相较于纯钎料获得的 0.05 mm 间隙接头，由于高温合金粉末颗粒的存在，化合物相难以聚集或连续分布，0.2 mm 间隙接头表现出更稳定的高温拉伸性能。

本工作中，Co-Cr-Ni-W-Al-Ti-Ta-B 钎料与母材优异的冶金相容性，一方面归因于接头中生成高强度 γ/γ' 相弥散分布的 γ/γ' 双相基体组织，另一方面由于焊缝中存在 B2 有序 NiAl 相。在高温拉伸过程中，(W, Cr)B 骨架状相作为薄弱区优先萌生细小裂纹。随着应力增大，在 γ/γ' 双相基体与 NiAl 相共同作用下，有效阻碍裂纹进一步扩展，从而显著提升

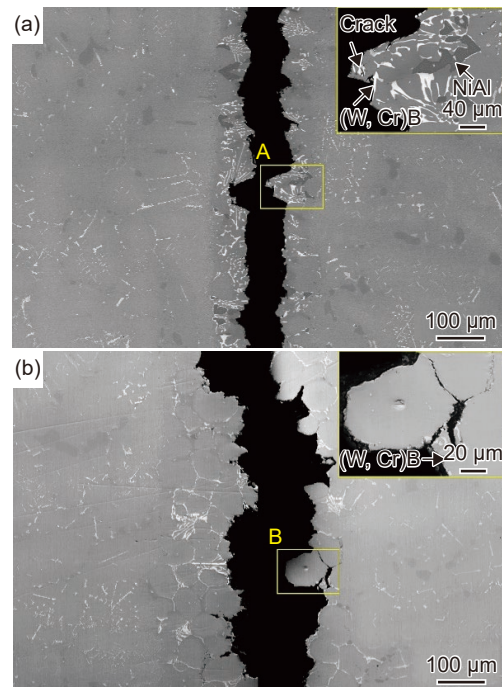


图 8 不同间隙钎焊接头高温拉伸断口形貌
(a) 0.05 mm; (b) 0.2 mm

Fig. 8 Fracture morphologies of different gap brazed joints after high-temperature tension (a) 0.05 mm; (b) 0.2 mm

接头的承载能力。因此，两种间隙钎焊接头均具有良好的高温拉伸性能。

3 结论

(1)对于 0.05 mm 小间隙钎焊接头,钎料与母材发生明显的冶金反应,形成由 γ/γ' 双相基体及多种化合物相构成的接头组织,化合物相主要包括 (W, Cr)B 相、富 Ti 硼化物相和 B2 有序 NiAl 相。

(2)对于 0.2 mm 大间隙钎焊接头,通过引入高温合金粉末颗粒作为填充材料,获得由合金粉末颗粒、 γ/γ' 双相和化合物相组成的接头组织,钎焊缝中化合物相呈弥散分布,尺寸明显细化。

(3)钎焊接头 1000 °C 下高温拉伸性能测试结果表明,0.05 mm 和 0.2 mm 间隙钎焊接头抗拉强度分别为 383 MPa 和 396 MPa,约为 K465 高温合金母材的 70%。这主要归因于钎料与母材之间良好的冶金相容性,以及 B2 有序 NiAl 相的强化作用,使得两种间隙钎焊接头均表现出优异的高温拉伸性能。

参考文献:

- [1] 中国金属学会高温材料分会. 中国高温合金手册(下卷)[M]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
High Temperature Materials Division, China Society for Metals. China superalloys handbook (Vol. 2) [M]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [2] 李鹏涛, 左洪福, 肖文, 等. 航空发动机叶片损伤及其修复技术研究及展望[J]. 航空学报, 2024, 45(15): 132-159.
LI P T, ZUO H F, XIAO W, et al. Research and prospect of aero engine blade damage and its repair technology[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(15): 132-159.
- [3] 李金祺, 高振桓, 王天剑, 等. 大间隙钎焊在燃气轮机热端部件修复领域的应用和发展[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(2): 246-250.
LI J Q, GAO Z H, WANG T J, et al. Application and progress in wide gap braze repair of gas turbine vanes[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2021, 41(2): 246-250.
- [4] 王志成, 秦海龙, 周海晶, 等. 高温合金涡轮叶片损伤修复技术研究进展[J]. 钢铁研究学报, 2025, 37(3): 269-282.
WANG Z C, QIN H L, ZHOU H J, et al. Research progress on service damage repair technology of superalloy turbine blades[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2025, 37(3): 269-282.
- [5] 秦仁耀, 曲致奇, 陈冰清, 等. 航空发动机单晶高温合金涡轮转子叶片增材修复技术研究进展[J]. 材料工程, 2024, 52(12): 1-14.
QIN R Y, QU Z Q, CHEN B Q, et al. Research progress in additive manufacturing for repair technology of single crystal superalloy turbine rotor blades for aero-engine[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2024, 52(12): 1-14.
- [6] LIU D J, LIPPOLD J C, LI J, et al. Laser engineered net shape (LENS) technology for the repair of Ni-base superalloy turbine components[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2014, 45(10): 4454-4469.
- [7] 李小强, 程淮, 邱昊, 等. 镍基高温合金焊接修复技术的研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(增刊 1): 541-545.
LI X Q, CHENG Z, QIU H, et al. Research progress on welding repair technology of nickel-based superalloy[J]. *Materials Reports*, 2017, 31(Suppl 1): 541-545.
- [8] 张高, 刘梅军, 韩嘉琪, 等. 压气机整体叶盘修复再制造的研究进展[J]. 航空材料学报, 2024, 44(3): 65-81.
ZHANG G, LIU M J, HAN J Q, et al. Research progress in repair and remanufacture of compressor blisk[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2024, 44(3): 65-81.
- [9] HUANG X, MIGLIETTI W. Wide gap braze repair of gas turbine blades and vanes: a review[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2012, 134: 010801.
- [10] 卓义民, 陈远航, 杨春利. 航空发动机叶片焊接修复技术的研究现状及展望[J]. 航空制造技术, 2021, 64(8): 22-28.
ZHUO Y M, CHEN Y H, YANG C L. Research status and prospect of welding repair technology for aero-engine blades[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2021, 64(8): 22-28.
- [11] FARZADI A, ESMAEILI H, MIRSALEHI S E. Transient liquid phase bonding of Inconel 617 superalloy: effect of filler metal type and bonding time[J]. *Welding in the World*, 2019, 63(1): 191-200.
- [12] REKER D W, SOWA R, SCHWALBE C, et al. Novel alloying strategy to improve brazing properties on nickel-based superalloys for aircrafts turbine application[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2025, 147(8): 081003.
- [13] 张学军. 航空钎焊技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2008.
ZHANG X J. Aviation brazing technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2008.
- [14] YAN G X, BHOWMIK A, NAGARAJAN B, et al. Post-bond heat treatment effects on the wide gap transient liquid phase bonding of Inconel 718 with BNi-2 paste filler metal[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 766: 138267.
- [15] HAWK C, LIU S, KOTTILINGAM S. Effect of process-

- ing parameters on the microstructure and mechanical properties of wide-gap braze repairs on nickel-superalloy René 108[J]. *Welding in the World*, 2017, 61(2): 391-404.
- [16] PARKS C M, KUIPERS J, PHILLION A B. Effect of time and temperature on the microstructural evolution of wide-gap brazed MAR-M247 nickel superalloy using BNi-9 braze alloy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2024, 55(11): 4408-4422.
- [17] 王浩, 吴欣, 程耀永, 等. K480 镍基高温合金钎焊接头组织与性能[J]. *焊接*, 2022(4): 37-42.
WANG H, WU X, CHENG Y Y, et al. Microstructure and mechanical properties of K480 nickel-based superalloy brazed joint[J]. *Welding & Joining*, 2022(4): 37-42.
- [18] 潘暉, 赵海生. 镍基钎料钎焊 K465 高温合金大间隙接头组织与性能研究[J]. *材料工程*, 2017, 45(5): 86-93.
PAN H, ZHAO H S. Research on microstructure and mechanical properties of wide-gap brazed joints of K465 superalloy using nickel-base brazing filler metal[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2017, 45(5): 86-93.
- [19] 潘暉, 赵海生. 钴基钎料钎焊 K465 合金大间隙接头组织与性能[J]. *航空材料学报*, 2017, 37(3): 50-55.
PAN H, ZHAO H S. Microstructure and mechanical properties of wide-gap brazed joints of K465 alloy using cobalt-base brazing alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2017, 37(3): 50-55.
- [20] 梁海, 毛唯, 孙计生. K465 铸造高温合金高温钎焊接头的显微组织[J]. *材料工程*, 2005(9): 7-10.
LIANG H, MAO W, SUN J S. Microstructures of high temperature brazed joints of cast superalloy K465[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2005(9): 7-10.
- [21] 王刚. K465 镍基合金叶片电子束钎焊修复及裂纹控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
WANG G. Investigation on the electron beam brazing repair of K465 Ni-base superalloy blades and the crack control technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [22] 李思思, 静永娟, 程耀永, 等. K465 镍基铸造高温合金钎焊及其在修复中的应用[J]. *电焊机*, 2020, 50(11): 37-42.
LI S S, JING Y J, CHENG Y Y, et al. Brazing of casted K465 nickel-based superalloy and the related applications for repair[J]. *Electric Welding Machine*, 2020, 50(11): 37-42.
- [23] LIU Y C, PAN H, ZHAO H S, et al. The microstructures and mechanical properties of K465 superalloy joints, brazed with different clearances[J]. *Welding in the World*, 2016, 60(1): 93-98.
- [24] 韩峰, 王斌, 孔庆吉, 等. K465 合金及 K465 与 GH3039 异种合金的钎焊[J]. *焊接技术*, 2011, 40(5): 26-29.
HAN F, WANG B, KONG Q J, et al. Brazing of K465 alloy K465 and GH3039 dissimilar alloy[J]. *Welding Technology*, 2011, 40(5): 26-29.
- [25] 毛唯, 周媛, 叶雷, 等. 不同钎料钎焊 K465 高温合金接头的组织和性能[J]. *电焊机*, 2008, 38(9): 65-68.
MAO W, ZHOU Y, YE L, et al. Microstructures and properties of K465 superalloy joints brazed with different filler metals[J]. *Electric Welding Machine*, 2008, 38(9): 65-68.
- [26] 李文文, 李思思, 陈波, 等. Ni₃Al 基高温合金 IC10 钎焊接头组织及性能[J]. *材料工程*, 2024, 52(12): 37-43.
LI W W, LI S S, CHEN B, et al. Microstructure and property of Ni₃Al-based superalloy IC10 brazed joint[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2024, 52(12): 37-43.
- [27] GHASEMI A, POURANVARI M. Intermetallic phase formation during brazing of a nickel alloy using a Ni-Cr-Si-Fe-B quinary filler alloy[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2019, 24(4): 342-351.
- [28] 何鹏, 李海新, 林铁松, 等. TiAl 基合金与 Ni 基合金钎焊连接接头界面组织及性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2013, 42(11): 2248-2252.
HE P, LI H X, LIN T S, et al. Interfacial microstructure and properties of brazing joints of TiAl/Ni-based alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42(11): 2248-2252.
- [29] WANG F, SONG M, ELKOT M N, et al. Shearing brittle intermetallics enhances cryogenic strength and ductility of steels[J]. *Science*, 2024, 384(6699): 1017-1022.
- [30] RAYNOR D, SILCOCK J M. Strengthening mechanisms in γ' precipitating alloys[J]. *Metal Science*, 1970, 4(1): 121-130.

收稿日期: 2025-11-24; 录用日期: 2026-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(52201050)

通讯作者: 王浩(1995—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为钎焊与扩散焊, 联系地址: 北京 81 号信箱 20 分箱(100095), E-mail: wanghao6278@163.com

(本文责编: 陈 卉)