

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.10.03

原位生成Mo-Ni-Si提升Mo-Re合金/AlN陶瓷 钎焊接头力学性能

傅孟春, 林盼盼*, 林铁松, 何 鹏

哈尔滨工业大学 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘 要: 随着现代电力电子技术的飞速发展, 关键领域的高密度散热需求对封装材料提出严苛要求, 钼铼合金与氮化铝陶瓷的高可靠连接组件可有效应对高温与极端复杂工况的需求。本研究采用镍基多主元钎料成功实现了钼铼合金与氮化铝的钎焊连接, 探究了保温时间对接头微观结构演变及力学性能的影响。得益于接头内原位形成的Mo-Ni-Si三元相, 有效缓解接头残余应力, 在1 100 °C/45 min工艺参数下, 接头室温剪切强度为111 MPa, 1000 °C高温剪切强度为62 MPa。本研究为钼铼合金与氮化铝陶瓷的高可靠高质量连接提供了新思路, 优异高温力学特性接头有望拓展极端环境电子封装领域的应用。

关键词: 钼铼合金; 氮化铝陶瓷; 钎焊; Mo-Ni-Si相; 力学性能; 有限元模拟

中图分类号: TG453+.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)10-0022-07

In-Situ Generated Mo-Ni-Si Phase Strengthens the Mechanical Properties of Mo-Re Alloy/AlN Ceramic Brazed Joints

FU Mengchun, LIN Panpan*, LIN Tiesong, HE Peng

Harbin Institute of Technology, State Key Laboratory of Precision Welding & Joining of Materials and Structures, Harbin 150001, China

Abstract: With the rapid advancement of modern electronics technology, high-density heat dissipation demands in critical applications impose stringent requirements on packaging materials. High-reliability joint components made from Mo-Re alloy and AlN ceramic can effectively meet the needs of high-temperature and extremely complex working conditions. In this study, the joining of Mo-Re alloy and AlN ceramic was successfully achieved using a Ni-based multi-principal element brazing filler. The effects of holding time on microstructural evolution and mechanical properties of the joint were investigated. Benefiting from the in-situ formed Mo-Ni-Si ternary phase within the joint, residual stresses were effectively relieved. Under the process parameters of 1100 °C/45 min, the room-temperature shear strength of the joint reached 111 MPa, and the high-temperature shear strength at 1000 °C was 62 MPa, respectively. This study provides a novel approach for achieving high-reliability, high-quality connections between Mo-Re and AlN, and the joints with excellent high-temperature mechanical properties are expected to expand the applications in extreme-environment electronic packaging..

Keywords: molybdenum-rhenium alloy; aluminum nitride; brazing; Mo-Ni-Si phase; mechanical properties; finite element analysis

引用格式: 傅孟春, 林盼盼, 林铁松, 等. 原位生成Mo-Ni-Si提升Mo-Re合金/AlN陶瓷钎焊接头力学性能[J]. 电焊机, 2025, 55(10): 22-28.

Citation: FU Mengchun, LIN Panpan, LIN Tiesong, et al. In-Situ Generated Mo-Ni-Si Phase Strengthens the Mechanical Properties of Mo-Re Alloy/AlN Ceramic Brazed Joints[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(10): 22-28.

收稿日期: 2025-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(52175302, U21A20128, U22A20185和52305353); 黑龙江省自然科学基金项目(YQ2024E020)

作者简介: 傅孟春(1997—), 女, 博士研究生, 主要从事新材料与异种材料连接的研究。E-mail: fumengchun97@163.com。

通讯作者: 林盼盼, E-mail: pplin@hit.edu.cn。

0 引言

钼铼合金(Mo-Re)与氮化铝(AlN)连接组件因高导热系数、高机械强度及较强的热稳定性等卓越特性,在航空航天工程等极端环境电子系统中具有广阔的散热应用潜力^[1-3]。随着极端环境复杂工况下的高可靠散热需求的持续增长,实现 Mo-Re 合金与 AlN 陶瓷二者的异质集成连接愈发关键。

由于金属与陶瓷物理与化学性能上存在显著差异,往往难以实现高强结合^[4-5]。活性钎焊是陶瓷与金属相互键合最广泛的方法,目前未有 Mo-Re 与 AlN 钎焊连接的相关研究。对于具有热膨胀系数等物性差异的金属/陶瓷异质连接,采用添加低热膨胀系数(CTE)^[5-6]或高模量^[7-8]第二相的复合钎料或叠层结构,通常是一种有效的方法。Li 等^[8]在 AgCuTi 钎料中添加高熵颗粒,连接制备了 AlN/Cu 散热基板,得益于钎缝内第二相强化作用,接头强度显著提升。Zhang 等^[9]则采用 AgCuTi/Cu/AgCuTi 复合钎料优化接头内金属间化合物分布,从而协调接头残余应力并提升强度 117%。然而,上述复合钎料体系均无法满足 1 000 °C 高温散热需求,针对面向高温场景应用的 Mo-Re 与 AlN 连接的高温钎料体系研究仍为空白。

在本研究中,提出了一种镍基多元合金钎料用于连接 Mo-Re 合金与 AlN 陶瓷,设计接头内原位形成 Mo-Ni-Si 三元相作为增强相,以满足高温应用需求。分析了不同保温时间下的钎焊接头的微观结构及力学性能演变规律,并采用有限元模拟探讨了钎缝中原位形成的 Mo-Ni-Si 相对于 Mo-Re/

AlN 接头的强化机制。

1 材料及试验方法

实验所用 AlN 陶瓷购自苏州珂玛科技有限公司,Mo-Re 合金的化学成分为 Mo~14wt%Re。在连接前,使用水磨性砂纸将母材待焊表面打磨至 3000 目,紧接着在丙酮溶液中进行超声波清洗 15 min 以去除油污,随后加以干燥。本研究使用机械合金化制备的 Ni-7.2wt.%, Cr-4.8wt.%, Ti-0.95wt.%, Fe-4.2wt.%, Si-0.5wt.% B 多元钎料(以下简称为 NiCrTiFeSiB),将其与松油醇混合制成焊膏,并通过丝网印刷技术涂覆于材料待焊表面,按如图 1a 所示的叠放顺序组装待焊三明治试样,送入真空钎焊炉。钎焊过程中以 10 °C/min 的加热速率升温至目标钎焊温度并保温,然后以 5 °C/min 的冷却速率进行降温。

通过扫描电子显微镜(SEM, SU5000)对钎焊试样的微观结构和相组成进行了分析。在室温和 1000 °C 下,钎焊接头的剪切强度通过电子万能试验机(AGXplus 5kN)进行表征,加载速率为 0.5 mm/min,室温与 1 000 °C 高温剪切示意图分别如图 1b、1c 所示。在相同条件下,以三个钎焊接头的平均剪切强度用于代表接头的力学性能。

2 试验结果与分析

2.1 接头典型组织

采用 NiCrTiFeSiB 多元钎料在 1 100 °C/30 min

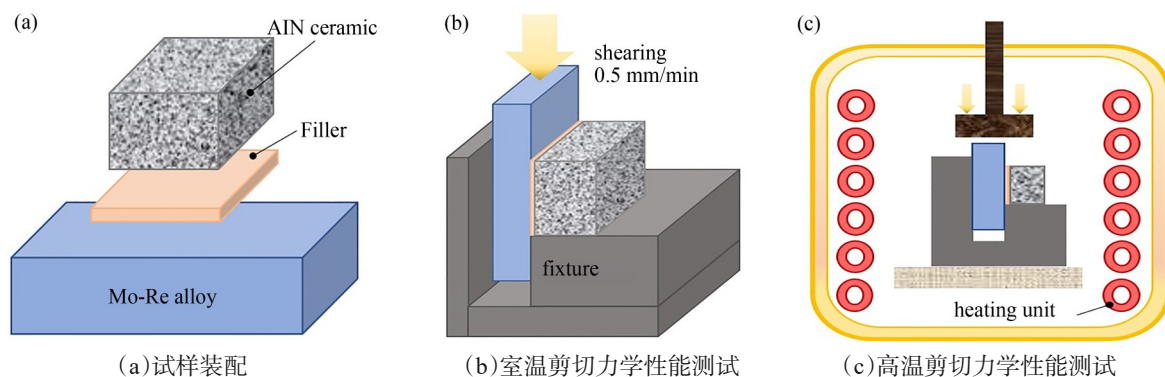


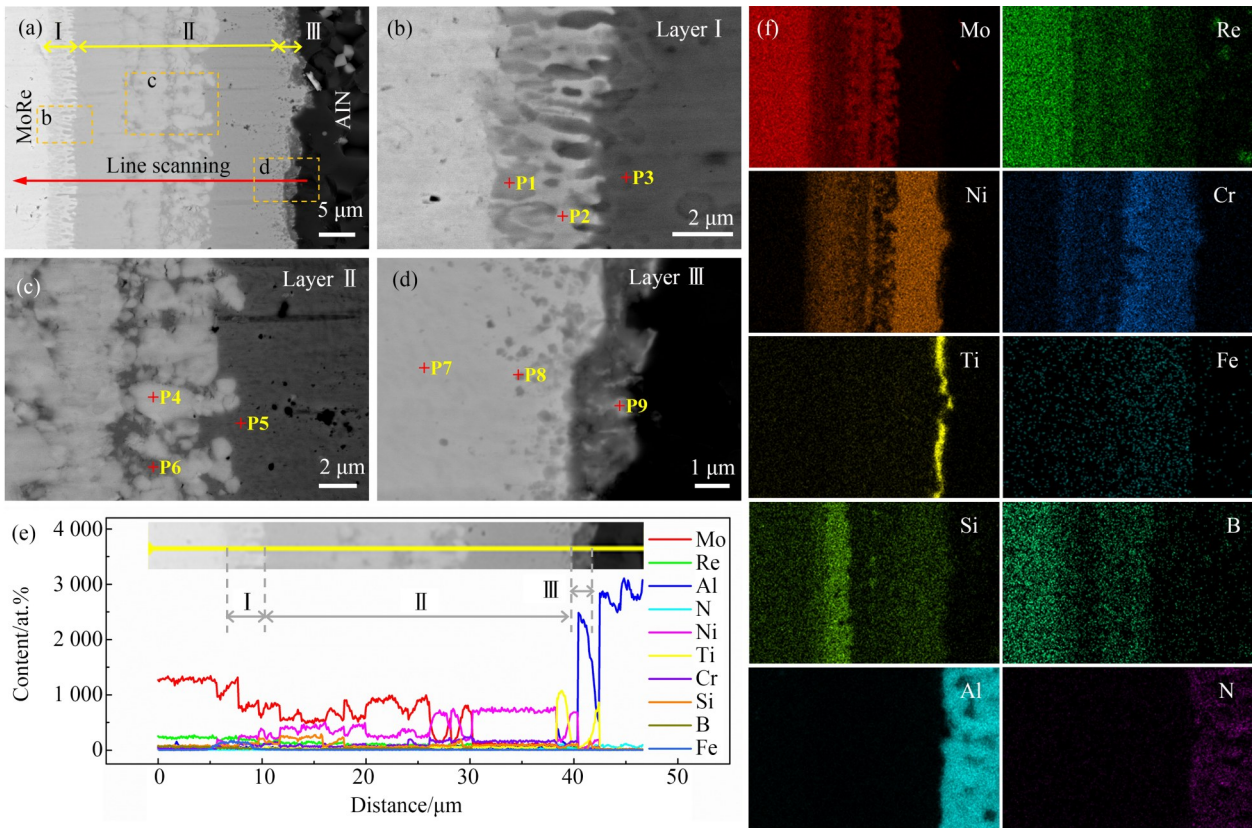
图 1 试验过程示意

Fig. 1 Schematic diagram of testing

连接工艺下获得的Mo-Re/AlN接头典型组织如图2所示,接头可分为三个典型区域:靠近Mo-Re合金侧的扩散区I、中心钎缝区II以及近AlN陶瓷侧反应区III,图2b~2d分别显示了三个区域的放大图。图2f元素面扫显示,钎料中的活性元素Ti在AlN侧有明显的富集,这反映了Ti与AlN之间存在强烈的化学亲和力,导致陶瓷分解。与此同时,Mo和Re元素表现出显著的扩散并溶解到钎缝中,这从亮灰色的

相分布中可以看出。同时,在Mo-Re合金侧观察到Si的富集,表明多主元钎料中的Si具有较强的扩散性。图2相应的EDS分析结果如表1所示。其中,轻量B由于含量较低,难以准确测量。

根据EDS与Mo-Ni-Si三元相图^[10-11],合金扩散区I内的柱状晶体被推断为MoNi与 $\lambda(\text{Mo}_2\text{Ni}_3\text{Si})$ 组成的混合结构。中心钎缝区II由灰色基体与层状的亮白色相组成:其中灰色基体为固溶Cr、Fe等合



(a) 钎缝整体形貌; (b~d) 区域I-III放大图像; (e) 钎缝元素线扫描; (f) 不同元素分布

图2 1 100 °C/30 min 参数下所得 Mo-Re/AlN 接头微观组织与元素分布

Fig. 2 Microstructure and elemental distribution of Mo-Re/AlN joint brazed at 1 100 °C/30 min

表1 图2的EDS结果(原子分数, %)

Table 1 EDS chemical composition in Fig. 2 (at. %)

	B	N	Al	Si	Mo	Ti	Cr	Fe	Ni	Re	Possible phase
P1	0.00	0.00	0.00	7.48	37.76	0.00	2.30	0.29	44.39	7.78	MoNi+ λ phase ($\text{Mo}_2\text{Ni}_3\text{Si}$)
P2	0.00	0.00	0.00	2.93	42.73	0.14	1.62	0.25	45.24	7.09	MoNi
P3	0.00	0.00	0.25	8.42	31.91	1.07	7.66	1.86	45.58	3.25	λ phase ($\text{Mo}_2\text{Ni}_3\text{Si}$)
P4	0.00	0.00	0.03	3.95	43.78	3.76	6.02	2.35	37.98	2.13	R phase ($\text{Mo}_{55}\text{Ni}_{42}\text{Si}_3$)
P5	0.00	0.00	0.39	4.75	15.18	0.31	6.65	0.32	69.16	3.24	Ni(s, s)
P6	0.00	0.00	0.07	3.80	9.36	2.18	8.31	0.71	73.95	1.62	Ni(s, s)
P7	0.00	0.00	2.27	4.21	7.90	1.14	6.41	1.14	75.36	1.57	Ni(s, s)
P8	0.00	0.00	31.82	2.19	2.50	2.61	3.78	1.82	53.64	1.64	Al_3Ni_5
P9	0.00	38.75	8.83	1.24	1.16	34.43	2.15	0.19	13.07	0.18	TiN

金元素的镍基固溶体 $\text{Ni}(s, s)$; 亮白色层状相则由两种组分的 Mo-Ni-Si 相组成, 即富 Ni 的 $\lambda(\text{Mo}_2\text{Ni}_3\text{Si})$ (对应 P3) 与富 Mo 的 $\text{R}(\text{Mo}_{55}\text{Ni}_{42}\text{Si}_3)$ (对应 P4), 研究表明这两种 Mo-Ni-Si 三元相处于平衡状态^[12]。陶瓷反应区 III 中 AlN 表面连续分布灰黑色反应层, 因其 Ti 与 N 原子比为 1:1, 推测为 TiN; 且在 TiN 附近发现黑色细小相 (P9)。其主要元素为 Ni 和 Al, 比例约为 5:3, 推测其为 Al_3Ni_5 。

综上, 采用 NiCrTiFeSiB 多主元钎料在 $1\ 100\ ^\circ\text{C}/30\ \text{min}$ 工艺参数下获得的接头典型界面微观结构为 Mo-Re/MoNi+ $\lambda(\text{Mo}_2\text{Ni}_3\text{Si})/\lambda(\text{Mo}_2\text{Ni}_3\text{Si})/\text{Ni}(s, s)+\lambda(\text{Mo}_2\text{Ni}_3\text{Si})+\text{R}(\text{Mo}_{55}\text{Ni}_{42}\text{Si}_3)/\text{TiN}/\text{AlN}$ 。

2.2 保温时间对接头微观组织的影响

采用 NiCrTiFeSiB 多主元钎料在 $1\ 100\ ^\circ\text{C}$ 下保

温不同时间, Mo-Re/AlN 接头微观组织如图 3 所示。随着保温时间的延长, Mo-Re 合金不断发生溶解, 与 Ni 基钎料之间的互扩散距离增加, 接头内组织分布状态发生变化。

在保温时间较短的 15 min 内, Mo-Re 合金发生短时扩散, 钎缝近 Mo-Re 合金母材侧形成较为密集的 Mo-Ni-Si 层状聚集。随着保温时间延长至 30 min, 层状 Mo-Ni-Si 在钎缝中的占比增大, 并且在该层状相向钎缝及 AlN 陶瓷扩散的前端呈现较为分散的云朵状。当保温时间延长至 45 min, 随着层状组织不断向陶瓷侧推进, 大量浅灰色 Mo-Ni-Si 相在 AlN 陶瓷表面扩散聚集, 含 R 相较高的层状结构此时在钎缝中呈现 S 形, 而含 λ 较高的层状仍紧贴 Mo-Re 侧。

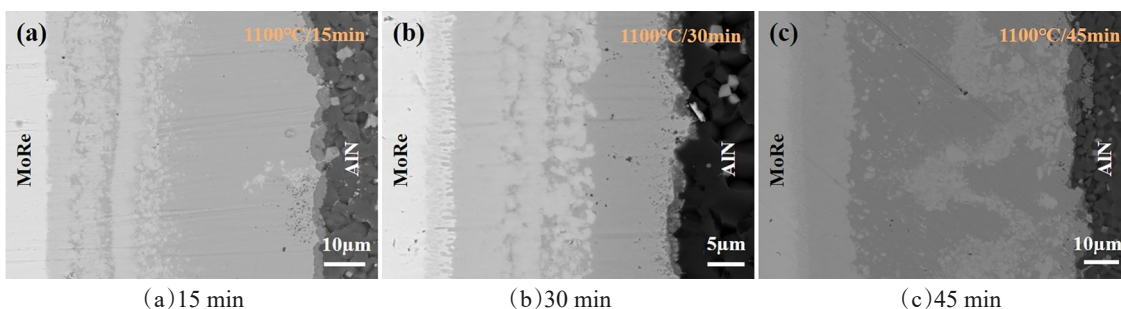


图 3 $1\ 100\ ^\circ\text{C}$ 保温不同时间的接头微观组织

Fig. 3 Interfacial microstructure of joints brazed at $1\ 100\ ^\circ\text{C}$ for distinct holding time

2.3 接头力学性能

不同保温时间下的 Mo-Re/AlN 钎焊接头的剪切强度如图 4 所示, 随着保温时间的延长, 室温剪切与 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 高温剪切均呈现增长趋势, 当保温时间为

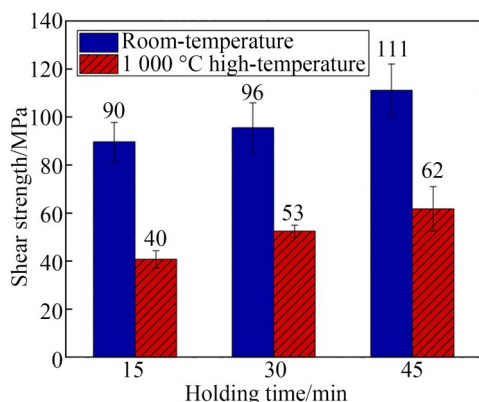


图 4 接头室温与 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 高温剪切强度

Fig. 4 Room-temperature and $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ high-temperature shear strength of the joints

45 min 时, 室温剪切强度为 111 MPa, 此时 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 高温剪切强度为 62 MPa。

进一步对断口形貌进行表征, 如图 5 所示。断口呈现出明显的 AlN 断裂痕迹, 证实了主要失效发生在陶瓷侧。除 AlN 陶瓷断裂外, 断裂界面处 TiN 相的存在及残留 $\text{Ni}(s, s)$ 进一步表明, 裂纹起源于陶瓷基体并向 TiN 反应层扩展。

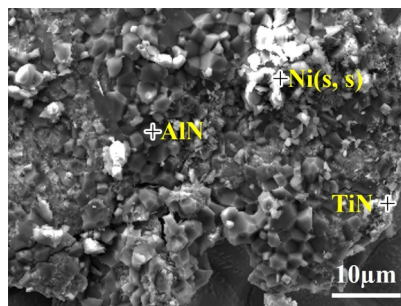


图 5 接头断裂形貌

Fig. 5 Fracture surface characterization

陶瓷侧的断裂归因于接头中存在的显著残余热应力,该应力源自母材与钎料间的热膨胀系数差异。值得注意的是,AlN陶瓷的高脆性和低塑性阻碍了陶瓷侧残余应力的有效释放^[5],这成为促进AlN基体裂纹萌生的关键因素。而钎缝由高模量Mo-Ni-Si相与塑性镍基固溶体(Ni(s,s))中组成,这种混合结构可通过变形协调缓解接头残余应力,进而强化接头强度。

2.4 接头强化机制

为了评估Mo-Ni-Si相对钎焊接头热膨胀系数(CTE)及接头界面残余应力的影响,采用Turner模型^[13]进行CTE计算,并利用Abaqus软件对残余应力进行有限元分析(FEA)。基于Turner模型对颗粒复合材料的分析:

$$\alpha_c = \frac{\sum \alpha_i V_i K_i}{\sum V_i K_i} \quad (1)$$

式中 V_i 表示体积分数, α_i 和 K_i 分别表示 i 组分的热膨胀系数(CTE)和体积模量。而含有增强相的基体材料的弹性模量可表示为^[14]:

$$E_c = \frac{E_p E_m}{E_p (1 - V_p) + E_m E_p} \quad (2)$$

式中 E_c 为颗粒复合材料的模量; E_p 为颗粒的模量; E_m 为基体的模量; V_p 为颗粒体积分数。

图6为钎焊接头中Mo-Ni-Si相体积分数变化时等效应力分布情况。随着Mo-Ni-Si相含量的增加,接头中的应力集中范围逐渐扩大,而等效应力峰值则从0 vol.%时的244 MPa逐渐降低至50 vol.%时的240 MPa。

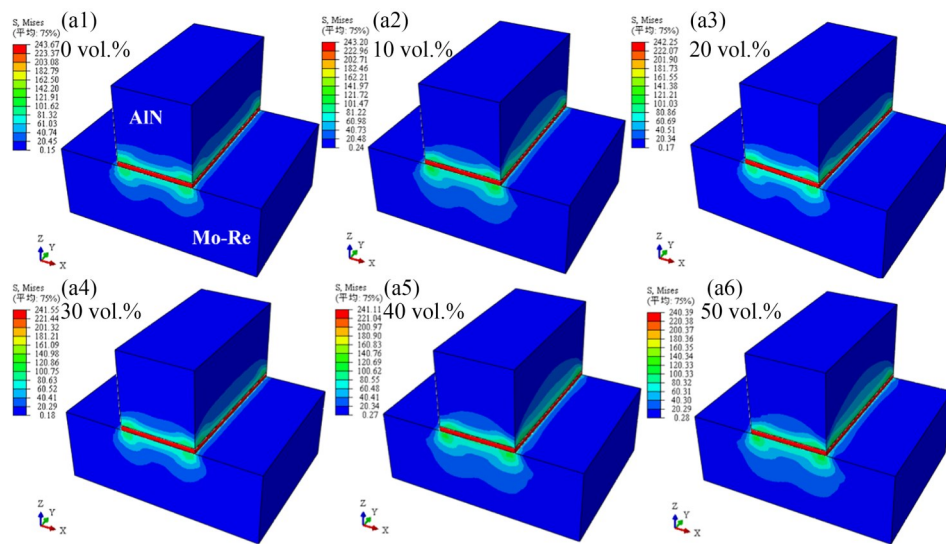


图6 钎焊接头中Mo-Ni-Si相体积分数变化时等效应力分布

Fig. 6 Distribution of equivalent stress with varying volume fractions of Mo-Ni-Si phases in the brazed joint

图7a为钎焊接头截面沿Z方向的等效应力分布(路径1),图7b则显示了陶瓷侧沿X方向的等效应力分布(路径2)。观察发现,钎缝内的等效应力随Mo-Ni-Si含量增加也呈现下降趋势。值得注意的是,应力集中倾向于在陶瓷侧与钎缝的界面处发生,这与实验观察结果一致,即AlN陶瓷更容易发生断裂。陶瓷侧的等效应力在Mo-Ni-Si含量达到30 vol.%时先降低后升高,表明虽然Mo-Ni-Si相降低了钎缝的热膨胀系数,但也提高了其弹性模量。这一现象表明,在特定范围内,调整Mo-Ni-Si含量可有效降低残余应力并缓解应力集中。总体而言,

有限元分析结果表明,Mo-Ni-Si相通过降低接头界面处的应力,有助于提升接头的力学性能。

3 结论

本研究成功实现了Mo-Re合金与AlN陶瓷的可靠连接,首次采用含镍基多主元钎料,系统研究了保温时间对接头微观结构演变及力学性能的影响。得出以下结论:

(1)在1 100 °C/30 min参数下,接头中形成典型的界面微观结构:Mo-Re合金/MoNi+λ(Mo₂Ni₃Si)/λ

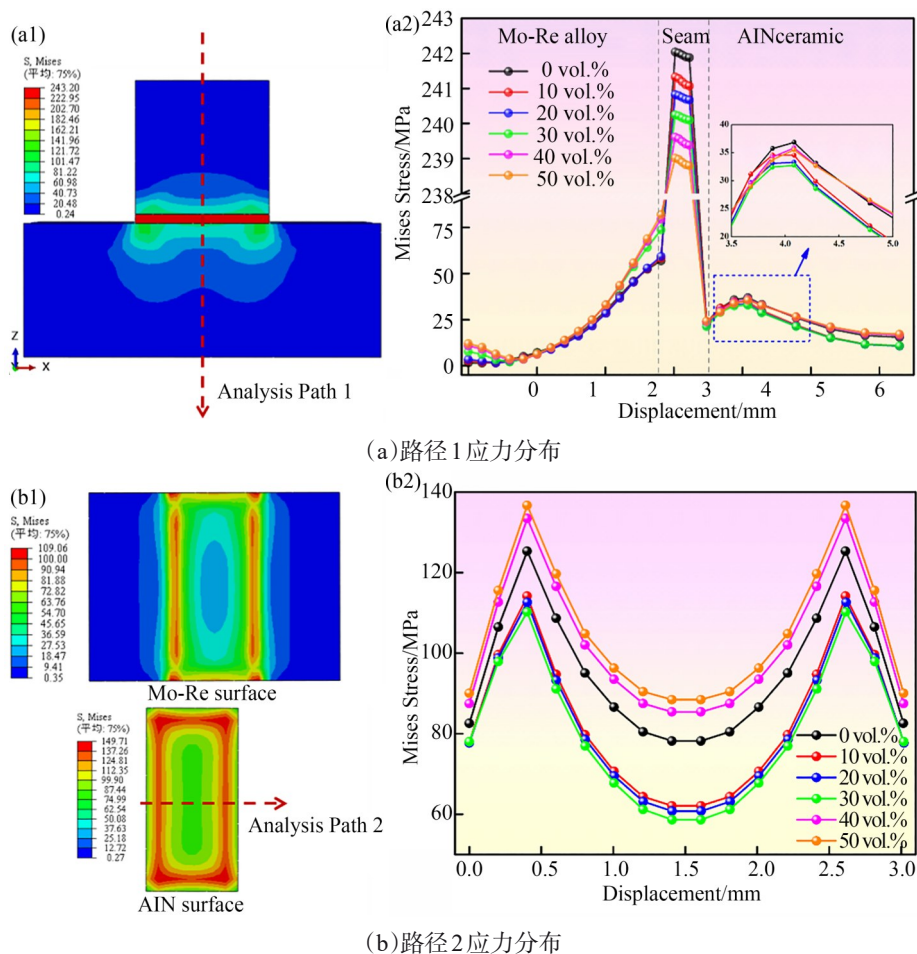


图 7 有限元应力分布结果

Fig. 7 Stress distribution from FEA

$(\text{Mo}_2\text{Ni}_3\text{Si})/\text{Ni}(\text{s}, \text{s}) + \lambda(\text{Mo}_2\text{Ni}_3\text{Si}) + \text{R}(\text{Mo}_{55}\text{Ni}_{42}\text{Si}_3)/\text{TiN}/\text{AlN}$ 陶瓷。

(2) 随着保温时间延长, 接头内 Mo-Ni-Si 相含量逐渐增加, 通过有限元模拟验证了该硬质相与具有延展性的 Ni 基固溶体基体结合可缓解接头残余应力, 有效提升接头力学性能。

(3) 在 $1\,100\,^{\circ}\text{C}/45\,\text{min}$ 工艺参数下, 室温剪切强度达 $111\,\text{MPa}$, $1\,000\,^{\circ}\text{C}$ 高温剪切强度为 $62\,\text{MPa}$, 强度高温保持率为 56% 。

参考文献:

- [1] CHENG L, LIU S, JIANG B, et al. A review on the wettability and residual stress of AMB AlN/metal joints [J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2024, 174: 108181.
- [2] SIVAPRAHASAM D, SUJITHA T, GOWTHAM U, et al. Microstructure and heat transfer characteristics of ac-

tive brazed Ceramic-Metal joints [J]. Ceramics International, 2021, 47(11): 16133-16140.

- [3] 郭鹏, 马佳, 鲍丽, 等. 钼及钼合金与石墨焊接研究进展 [J]. 电焊机, 2023, 53(4): 73-80.

GUO P, MA J, BAO L, et al. Research Progress in Welding of TZM Alloy and Graphite [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(4): 73-80.

- [4] 贺佳伊, 玉昆, 潘朋, 等. 锡基钎料和银基钎料对石墨和无氧铜钎焊接头组织及性能的影响研究 [J]. 电焊机, 2025, 55(3): 103-109.

HE J Y, YU K, PAN P, et al. Study on the Influence of Tin-based and Silver-based Brazing Materials on the Microstructure and Properties of Graphite and Oxygen Free Copper Brazing Joints [J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(3): 103-109.

- [5] LV J, HUANG Y, FU R, et al. AlN/Cu composite ceramic substrate fabricated using a novel TiN/AgCuTi composite brazing alloy [J]. Journal of the European

- Ceramic Society, 2020, 40(15): 5332–5338.
- [6] JIANG H, LI C, MAO X, et al. Vacuum brazing of AlON and Ti_2AlNb with LiAlSiO_4 enhanced Ag–Cu–Ti composite fillers: Microstructure, mechanical properties and measurement of residual stress [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 846: 143277.
- [7] YANG Z, FANG M, YONG Z, et al. Enhanced properties in $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}$ AMB joints through regulating interfacial reaction modes induced by Mo–particle additives [J]. *Ceramics International*, 2024, 50 (21C): 43969–43978.
- [8] LI Y, NIE J, ZHOU J, et al. Microstructure and mechanical properties of high-quality AlN/Cu joints brazed by a novel AgCuTi + AlCoCrFeNi_{2.1} composite brazing alloy [J]. *Materials Letters*, 2024, 373: 137152.
- [9] ZHANG J, XU J, HUANG J, et al. High shear strength Kovar/AlN joints brazed with AgCuTi/Cu/AgCuTi sandwich composite filler [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 862: 144435.
- [10] YAQOOB K, JOUBERT J M. Experimental investigation of the Mo–Ni–Re system [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 559: 101–111.
- [11] GUPTA K P. The Mo–Ni–Re (Molybdenum–Nickel–Rhenium) System [J]. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 2010, 31(6): 564–568.
- [12] GUPTA K P. The Mo–Ni–Si (Molybdenum–Nickel–Silicon) system [J]. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 2005, 26(4): 379–384.
- [13] ELOMARI S, SKIBO M D, SUNDARRAJAN A, et al. Thermal expansion behavior of particulate metal–matrix composites [J]. *Composites Science and Technology*, 1998, 58(3): 369–376.
- [14] FU S Y, XU G, MAI Y W. On the elastic modulus of hybrid particle/short-fiber/polymer composites [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2002, 33(4): 291–299.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>

☞ 上接第 21 页

- tential of lightweight intermetallic TiAl components [J]. *Intermetallics*, 2011, 19(6): 787–792.
- [3] Xia Z W, Shan C W, Zhang M H, et al. Machinability of c–TiAl: A review [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(7): 40–75.
- [4] Liu X, Liu H G, Shi S J, et al. On Revealing the Mechanisms Involved in Brittle-to-ductile Transition of Fracture Behaviors for γ -TiAl alloy under dynamic conditions [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2025, 1010: 177614.
- [5] Tian S W, He A R, Liu J H, et al. Oxidation Resistance of TiAl alloy improved by hot-pack rolling and cyclic heat treatment [J]. *Materials Characterization*, 2021, 178: 111196.
- [6] 任海水, 熊华平, 吴欣, 等. 钛铝系合金与镍基高温合金异种连接技术研究进展 [J]. *机械工程学报*, 2017, 53(4): 1–10.
- REN H S, XIONG H P, WU X, et al. Research Advances on the Dissimilar Joining of Titanium Aluminides and Nickel-based Superalloys [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(4): 1–10.
- [7] Kokabi D, Kafrou A, Gholamipour R, et al. Microstructural evaluation during dissimilar transient liquid phase bonding of TiAl/Ni-based superalloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 825: 153999.
- [8] He K, Gao Q, Zhang L Q. Pulse current diffusion bonding of high niobium β - γ TiAl alloy to In718 superalloy by introducing pure ni interlayer [J]. *Intermetallics*, 2024, 169: 108303.
- [9] Li P, Wang Y C, Zhang L L, et al. High strength diffusion bonding of Ti_2AlNb to GH4169 with (TiZrHfNb) 95Al5 high entropy interlayer [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 902: 146558.
- [10] Li S, Liu Z Y, Xia Y Q, et al. Vacuum brazing TiAl intermetallics to GH3030 alloy with a multi-component Ti-based filler metal [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 70: 484–493.
- [11] Jiang C Y, Li X Q, Wan B, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of TiAl/GH536 joints vacuum brazed with Ti–Zr–V–Ni filler metal [J]. *Intermetallics*, 2022, 142: 107468.
- [12] Tang Y, Wang R X, Xiao B, et al. A review on the dynamic-mechanical behaviors of high-entropy alloys [J]. *Progress in Materials Science*, 2023, 135: 101090.
- [13] Li W D, Xie D, Li D Y, et al. Mechanical behavior of high-entropy alloys [J]. *Progress in Materials Science*, 2021, 118: 100777.
- [14] Dong K W, Kong J, Peng Y, et al. A new strategy for high-strength joining of dissimilar materials [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, 283: 116724.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>