

# NiCrSiB 焊膏真空钎焊 Mo-14Re 合金接头组织性能研究

魏亚馨<sup>1,2</sup> 操齐高<sup>2</sup> 杨晓红<sup>1</sup> 汪小钰<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学材料科学与工程学院, 西安 710048; 2. 西北有色金属研究院, 西安 710016)

**摘要** 使用Ni-Cr-Si-B焊膏对Mo-14Re合金进行真空钎焊,探究了工艺参数对接头显微组织与力学性能的影响。通过扫描电镜(SEM)、能谱分析(EDS)结合X射线衍射(XRD)确定接头微观组织以及物相组成。结果发现,随着钎焊温度升高,钎缝中的Mo基固溶体与Ni基固溶体含量上升,钎缝与母材连接处会出现裂纹;随着保温时间延长,Mo基固溶体的含量先增加后减小,CrB含量逐渐增加并大量聚集在焊缝中间。随着保温时间和钎焊温度增加,焊接接头剪切强度均先升高后降低。钎焊工艺参数为1 180℃×20 min时,接头剪切强度最高,为84.76 MPa,剪切断裂发生在母材上,断裂方式为解理断裂。

**关键词** Mo-14Re合金;Ni-Cr-Si-B焊膏;真空钎焊;界面组织;力学性能

**中图分类号** TG454;TG44;TG146.1<sup>+</sup>4

**文献标志码** A

**DOI**:10.15980/j.tzzz.T20240513

## Microstructure and Properties of Mo-14Re Alloy Joint Vacuum Brazed with NiCrSiB Solder Paste

WEI Yaxin<sup>1,2</sup>, CAO Qigao<sup>2</sup>, YANG Xiaohong<sup>1</sup>, WANG Xiaoyu<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048; 2. Northwest Institute for Non-ferrous Metal Research, Xi'an 710016)

**Abstract:** The influence of different process parameters on microstructure and mechanical properties of Mo-14Re alloy joint brazed by Ni-Cr-Si-B solder paste was investigated. The microstructure and phase composition of the joint were determined by scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS) and X-ray diffraction (XRD). The results indicate that the content of Mo- and Ni-matrix solid solution in brazing seam is increased with brazing temperature increasing, and cracks occur at the joint between brazing joint and base metal. With the increase of preservation, the content of Mo-matrix solid solution is firstly increased and then decreased, and CrB content is gradually increased, gathering in the center of weld. With the increase of preservation and brazing temperature, the shearing strength of welded joints is increased firstly and then decreased. Under the brazing process parameter of 1 180℃×20 min, the shearing strength of the joint reaches the maximum of 84.76 MPa, and the shear fracture is characterized by cleavage fracture, which occurs on the base metal.

**Key Words:** Mo-14Re Alloy, Ni-Cr-Si-B Solder Paste, Vacuum Brazing, Interfacial Microstructure, Mechanical Property

难熔金属钼及钼合金是重要的战略资源<sup>[1]</sup>,其中, Mo-Re合金因具有高温强度好<sup>[2]</sup>、力学性能好、热膨胀

收稿日期:2024-12-09;修订日期:2025-02-10

基金项目:稀贵金属高纯净高均质快速熔炼制备关键技术开发资助项目(2024ZY-JCYJ-04-13);陕西省先进动力专项资助项目(YK22C-8)

第一作者简介:魏亚馨,女,1998年出生,硕士研究生,E-mail:wei123weiyx@163.com

通信作者:操齐高,男,1982年出生,正高级工程师,E-mail:caoqigao@c-nin.com

引用格式:魏亚馨,操齐高,杨晓红,等. NiCrSiB焊膏真空钎焊Mo-14Re合金接头组织性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(10):1 550-1 556.

WEI Y X, CAO Q G, YANG X H, et al. Microstructure and properties of Mo-14Re alloy joint vacuum brazed with NiCrSiB solder paste[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(10):1 550-1 556.

- [12] 梁含雪,肖冬梅,甘曼莹,等. 新型磷酸盐粘结剂的制备及型砂性能初探[J]. 铸造技术, 2017, 38(2):388-391.
- [13] 程楠,陈群. 无机粘结剂混制湿态砂在热芯盒成型工艺中的应用研究[J]. 铸造技术, 2019, 40(9):946-951.
- [14] 宋峰. 磷酸盐无机粘结剂的制备工艺[D]. 辽宁大连:大连交通大学, 2020.
- [15] 李潇咏,廖欢,莫友彬,等. 磷硅酸铝高温粘结剂的制备及耐高温性能研究[J]. 化工技术与开发, 2021, 50(9): 44-49.
- [16] 赵雨珊,任雯晓,熊鹰,等. 铸造用自硬磷酸镁粘结剂砂性能的研究[J]. 铸造, 2022, 71(1):48-51.

- [17] 贾鑫. 一种自硬磷酸盐铸造粘结剂改性工艺及机理[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2023.
- [18] 徐昕. 基于磷酸铝无机粘结剂的3D打印陶瓷反应器构筑及催化性能研究[D]. 新疆石河子:石河子大学, 2024.
- [19] 殷亚军,文艺贝,祁雨阳,等. 微硅粉对硅酸盐无机粘结剂砂抗吸湿性的影响[J]. 现代铸铁, 2022, 42(4):48-52.
- [20] 程楠,续康杰,张海生,等. 陶瓷砂循环工艺在耐磨铸件上的应用[J]. 铸造工程, 2022, 46(1):31-35.

(编辑:张正贺)

系数高及导热性好等特点<sup>[3]</sup>,而广泛应用于航空航天、核工业、新能源等领域。近年来,随着航空航天、核电领域的高速发展,需要在高温下工作的高强度模具、夹具以及防护材料。因此,如何实现钼合金的连接,获得综合性能优异的焊接接头亟需解决。

Mo-Re 合金与 O、N 等元素较易发生反应,在焊接过程中产生晶界偏析和本征脆性<sup>[4]</sup>,使接头塑韧性较差且容易产生裂纹。同时,Mo-Re 合金熔焊时会产生气体<sup>[5]</sup>,导致接头处产生气孔,使接头的性能显著下降。目前,钎焊钼合金时多使用 Ti 基钎料<sup>[6-7]</sup>和 Ag 基钎料,而采用 Ni 基钎料对 Mo-14Re 合金的钎焊鲜有报道。XIA C Z 等<sup>[8]</sup>用 Ni 基钎料真空钎焊 Mo-50Re 合金,发现结合界面光滑,无明显气孔和裂纹,形成了良好的结合面。母材向钎缝中伸出排列紧密的柱状晶,但并未对焊接接头的力学性能进行研究。路全彬等<sup>[9]</sup>采用 Ni-Ti 基钎料对 TZM 合金进行钎焊,发现母材中的 Mo 会与 Ni 结合形成 MoNi 相,形成冶金结合,从而提高焊接接头强度。采用 Ni-13Ti 作为钎料时,剪切强度高达 193 MPa。故选用 Ni 基钎料钎焊 Mo-14Re 合金获得可靠接头具有较大可行性,对于核电以及航空航天领域具有积极意义。

本研究采用适用于钎焊复杂结构件的 Ni-Cr-Si-B 膏状钎料对 Mo-14Re 合金真空钎焊,对其界面组织和成分进行分析,研究保温时间和钎焊温度对焊接接头组织和力学性能的影响,确定断裂方式和断裂位置,为获得高性能的 Mo-Re 合金的钎焊接头提供参考。

1 试验材料及方案

1.1 钎料的微观组织及熔化特性

采用自制的 Ni-Cr-Si-B 粉末钎料,其化学成分和形貌分别见表 1 和见图 1。钎料粒径分布较为均匀,

表 1 试验用钎料化学成分

| Tab.1 Chemical composition of solder for experiment % |       |     |     |     |    |
|-------------------------------------------------------|-------|-----|-----|-----|----|
| $w_B$                                                 |       |     |     |     |    |
| Co                                                    | Cr    | Si  | B   | Fe  | Ni |
| 5~6                                                   | 12~14 | 3~5 | 2~3 | 4~5 | 余量 |

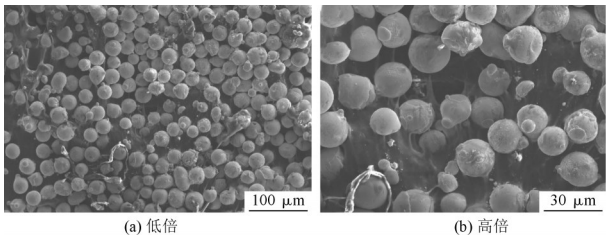


图 1 Ni-Cr-Si-B 钎料粉末形貌

Fig.1 Morphologies of Ni-Cr-Si-B solder powders

为 50~70 μm,大部分颗粒都具有良好球形度。图 2 为钎料的熔化特性曲线(DSC)和钎焊工艺曲线。

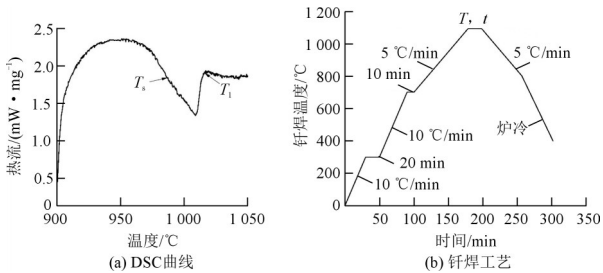


图 2 Ni-Cr-Si-B 钎料的 DSC 曲线和钎焊工艺

Fig.2 DSC curves and brazing process of Ni-Cr-Si-B solder

1.2 试验方法

采用 Mo-14Re 合金板材,厚度为 3 mm。钎料采用 Ni-Cr-Si-B 膏状钎料,熔化温度为 980~1 020 °C,将 Mo-14Re 板材分别切割成 10 mm×2 mm×2 mm 和 10 mm×30 mm×10 mm 两种尺寸。随后对母材进行表面处理,除去表面的氧化膜、油污以及其他杂质后,将其浸入丙酮溶液中,使用 JP-080S 超声清洗仪对其表面进行清洗 10~20 min,最后烘干。处理好母材的一个待焊面上涂抹膏状钎料进行贴合,见图 3,确保膏状钎料填满焊缝。随后,将贴合好的试样放入 DHG-9023A-T 烘箱中于 60 °C 保温 2 h;最后将试样放入 L123II-15/2M 真空钎焊炉中,在设定好的程序下进行钎焊试验,钎焊时真空度在 2.5 kPa 以下。通过 JSM-6700F 扫描电镜(SEM)、Oxford INCA-Penta FET-X3 能谱仪(EDS)以及 PW1700X 射线衍射分析(XRD)确定焊接接头中可能存在的物相,使用 Instron 5967 万能试验机对剪切试样进行测试,压头的加载速率为 1 mm/min。

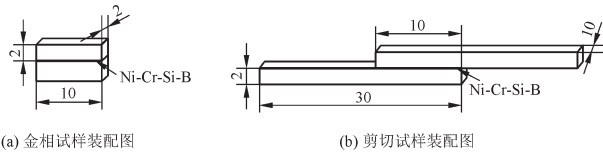


图 3 钎焊接头装配图

Fig.3 Assembling diagram of brazing joints

2 试验结果与讨论

2.1 焊接接头微观组织及物相分析

选取钎焊温度为 1 090 °C,保温时间为 20 min 的条件下得到的 Mo-14Re/Ni-Cr-Si-B/Mo-14Re 接头界面微观组织进行分析。将其分为 3 个区域:区域 I 为靠近 Mo-14Re 母材的区域,是钎料中的元素向母材扩散形成的反应层,厚度约为 20 μm;区域 II 为等

温凝固区,是钎焊保温过程中熔点抑制元素向母材中扩散致使液相线升高后发生等温凝固,厚度约为 100  $\mu\text{m}$ ;区域Ⅲ为非等温凝固区,是保温过后冷却时形成,厚度约为 100  $\mu\text{m}$ 。等温凝固区的组织为单一物相且均匀,非等温凝固区由多种不同且形状不规则的物相组成。

图 4 为 Ni-Cr-Si-B 钎料钎焊 Mo-14Re 合金接头处区域面扫描结果。可以看出,钎料中的 Ni、Si、B 和 Fe 元素在 Mo-14Re 母材中发生了明显扩散,同时 Mo 和 Ni 元素<sup>[10]</sup>大量分布于钎料与母材的界面处。焊缝内 Ni 与 Si 元素在界面处的分布区域基本处于同一位置,因此这些位置可能形成 Ni-Si 脆性化合物。

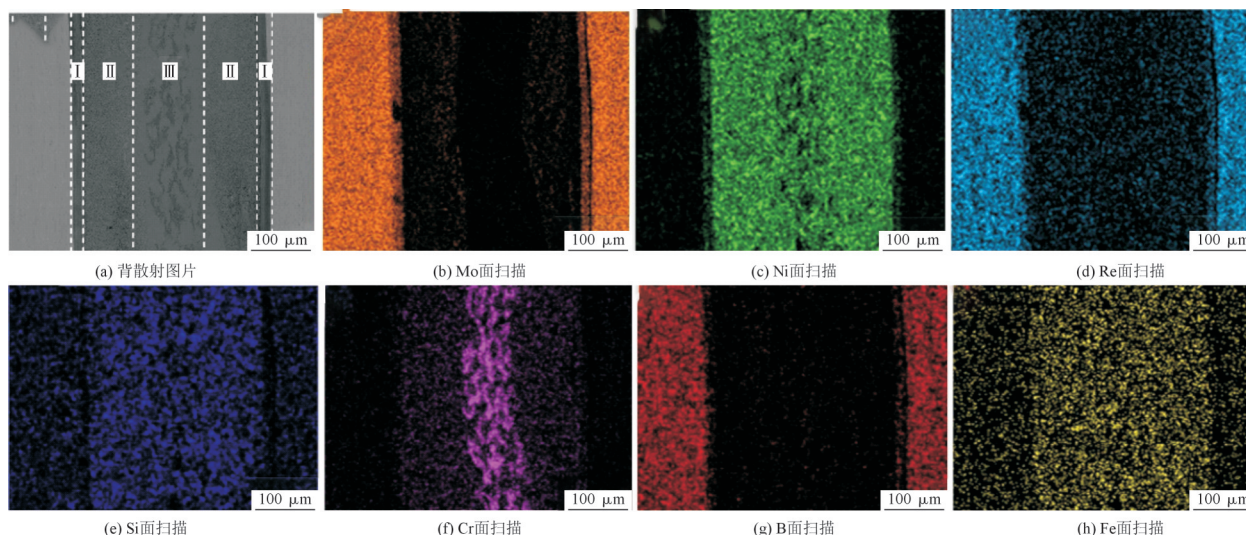


图 4 Mo-14Re/Ni-Cr-Si-B/Mo-14Re 焊缝区域面扫描结果

Fig.4 Surface scanning results of Mo-14Re/Ni-Cr-Si-B/Mo-14Re at welding region

## 2.2 保温时间对接头界面组织的影响

图 5 为 1 180  $^{\circ}\text{C}$  下不同保温时间的焊缝组织形貌,表 2 为图 5 中各点 EDS 分析结果。由图 5 可知,延长保温时间,钎缝的宽度逐渐变小<sup>[11]</sup>。推测一方面可能是由于钎料高温加热铺展在母材上,并且对其施加压力,钎料溢出,最终导致焊缝宽度减小;另一方面可能是由于保温时间或者钎焊温度增加,液态钎料与母材充分

反应并且沿晶界渗透进 Mo-14Re 母材中使焊缝宽度减小。此外,改变保温时间对接头的形貌有较大的影响,当保温时间较短时,接头处可以分为 2 个区域。随保温时间延长,加剧了焊缝中的元素扩散,接头处变为 3 个区域。随钎焊温度升高,促进了母材与钎料之间的反应,反应层厚度增加。当保温时间增加到 30 min 时,区域Ⅱ厚度增加,表明适当延长保温时间可促进母材与钎料之间的反应。

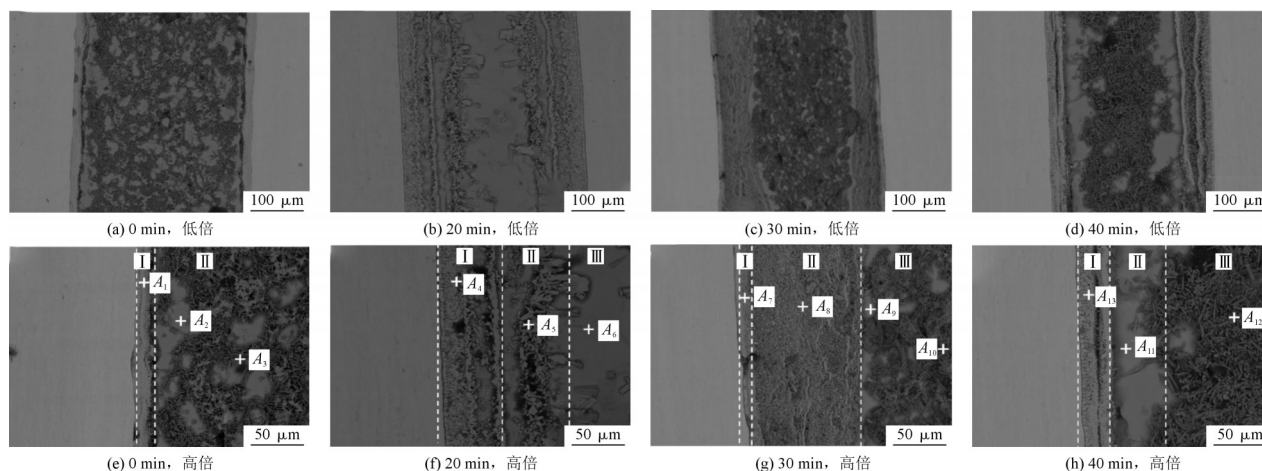


图 5 保温时间对接头组织的影响(1 180  $^{\circ}\text{C}$ )

Fig.5 Effects of holding time on microstructure of brazed joints

结合图 5 与表 2 可知,当保温时间为 0 min 时,呈小岛状的 Ni(s,s)及 NiCr 脆性化合物<sup>[12]</sup>大量存在并均匀

分布在焊缝中;当保温时间为 30 min 时,在焊缝中间形成小岛状的 Ni(s,s)及短条状 NiCr 脆性化合物。图 6

表2 图5各点EDS分析结果  
Tab.2 EDS results of each point in Fig.3

| 位置              | $w_B/\%$ |       |       |      |       |      |      | 可能相     |
|-----------------|----------|-------|-------|------|-------|------|------|---------|
|                 | Mo       | Cr    | Ni    | Re   | Si    | Fe   | Co   |         |
| A <sub>1</sub>  | 72.20    | 1.98  | 20.19 | 5.63 | —     | —    | —    | Mo(s,s) |
| A <sub>2</sub>  | 1.21     | 7.63  | 81.21 | —    | 3.18  | 5.72 | 1.05 | Ni(s,s) |
| A <sub>3</sub>  | —        | 40.22 | 46.87 | —    | 10.12 | 2.79 | —    | NiCr    |
| A <sub>4</sub>  | 70.60    | 2.14  | 21.73 | 5.53 | —     | —    | —    | Mo(s,s) |
| A <sub>5</sub>  | 42.13    | 37.61 | 12.52 | 5.59 | —     | 2.15 | —    | MoCr    |
| A <sub>6</sub>  | 1.43     | 10.63 | 79.18 | —    | 3.45  | 5.31 | —    | Ni(s,s) |
| A <sub>7</sub>  | 76.02    | 1.22  | 16.32 | 4.76 | 1.68  | —    | —    | Mo(s,s) |
| A <sub>8</sub>  | 55.55    | 4.75  | 24.65 | 7.27 | 6.38  | 0.48 | 0.91 | MoNi,Mo |
| A <sub>9</sub>  | 0.99     | 8.45  | 80.22 | —    | 3.76  | 5.41 | 1.16 | Ni(s,s) |
| A <sub>10</sub> | —        | 42.02 | 45.67 | —    | 9.08  | 3.23 | —    | NiCr    |
| A <sub>11</sub> | 65.18    | 2.79  | 25.08 | 5.38 | —     | 0.98 | 0.59 | Mo(s,s) |
| A <sub>12</sub> | 1.61     | 11.80 | 76.01 | —    | 3.17  | 6.39 | 1.02 | Ni(s,s) |
| A <sub>13</sub> | 1.55     | 95.82 | 1.34  | —    | 0.53  | 0.75 | —    | CrB     |

为1 180 ℃×40 min接头断口XRD分析。可以看出,当保温时间为40 min时,保温时间的延长加剧Cr元素向

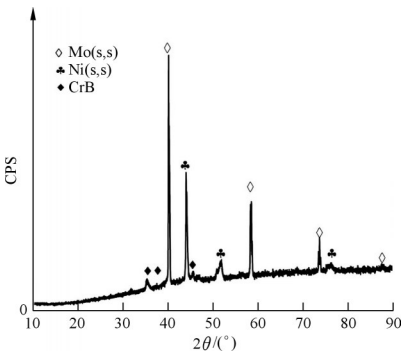


图6 1 180 ℃×40 min接头断口XRD分析

Fig.6 XRD patterns of fracture for joint brazed at 1 180 ℃ for 40 min

焊缝中间聚集,形成较多CrB<sup>[13]</sup>,原本位于焊缝中间的Ni(s,s)分布在焊缝两侧。图7为不同保温时间下的接头组织示意图。可以看出不同保温时间下的接头组织变化过程。

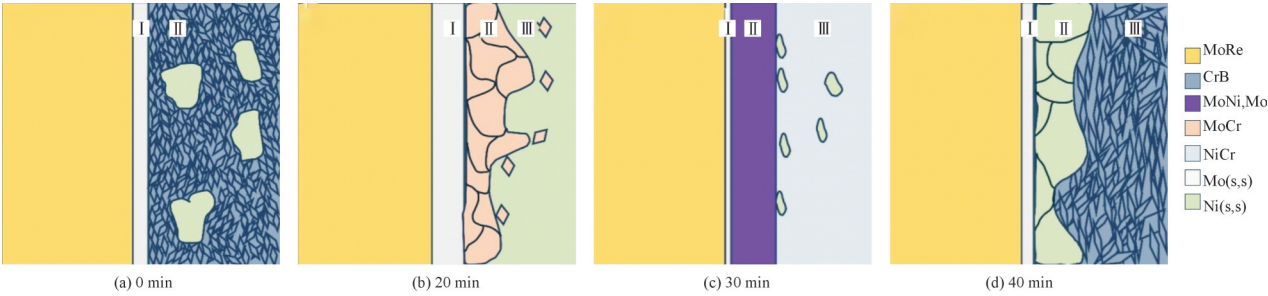


图7 不同保温时间下的接头组织示意图

Fig.7 Schematic diagram of joint structure at different holding time

2.3 保温时间对接头力学性能的影响

图8为1 180 ℃×10 min时接头断口的XRD分析结果。结果表明,断口处仅存在Mo与MoRe相。图9为不同钎焊温度下接头的剪切强度。可以看出,延长保温时间,接头的剪切强度均先升高后降低,当保温时间为20 min时,剪切强度最大,达到了84.76 MPa。结合图9与表2可知,当保温时间为0 min时,钎缝中生成大量的NiCr脆性化合物,导致焊接接头的力学性能下

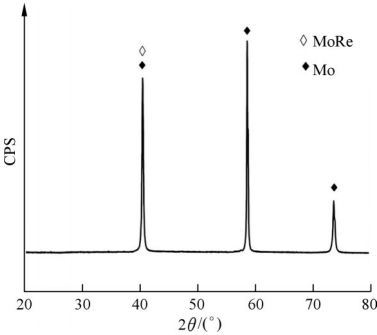


图8 1 180 ℃×10 min接头断口XRD分析

Fig.8 XRD patterns of fracture for joint brazed at 1 180 ℃ for 10 min

降;保温时间为20 min时,焊缝仅存在少量的Mo-Cr固溶体<sup>[14]</sup>。由于硼化物具有高硬度并且作为裂纹的潜在来源,会导致接头强度降低,而保温20 min时焊缝中并未生成硼化物。结合图5与图9可知,保温20 min时,焊缝结构发生明显变化,组织明显均匀化。同时,由于延长保温时间,焊缝中的元素扩散较好,焊缝中的脆性化合物大量减少,故保温20 min时焊接接头的剪切强度最大;当保温时间为30 min和40 min,焊缝结构发生较大改变,反应层变薄,焊缝整体组织复杂化。同时,

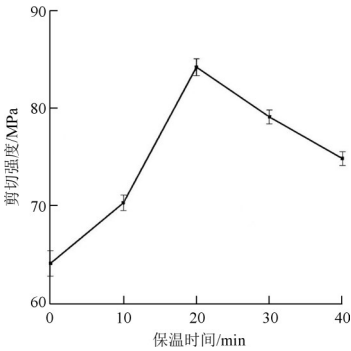


图9 保温时间对钎焊接头剪切强度的影响(1 180 ℃)

Fig.9 Effects of holding time on shear strength of brazed joints

焊缝中生成较多化合物,致使接头的剪切强度进一步降低<sup>[15]</sup>。综上,延长保温时间,接头的剪切强度先升高后降低。

钎焊接头处的断口形貌见图 10。可以看出,断口处呈河流状花样,故断裂方式为脆性断裂。表 3 为图 10 中各点 EDS 分析结果。由表 3 可知,断口处仅检测到母材元素,并未发现钎料元素。结合断口处 XRD,可知断裂发生在母材上。

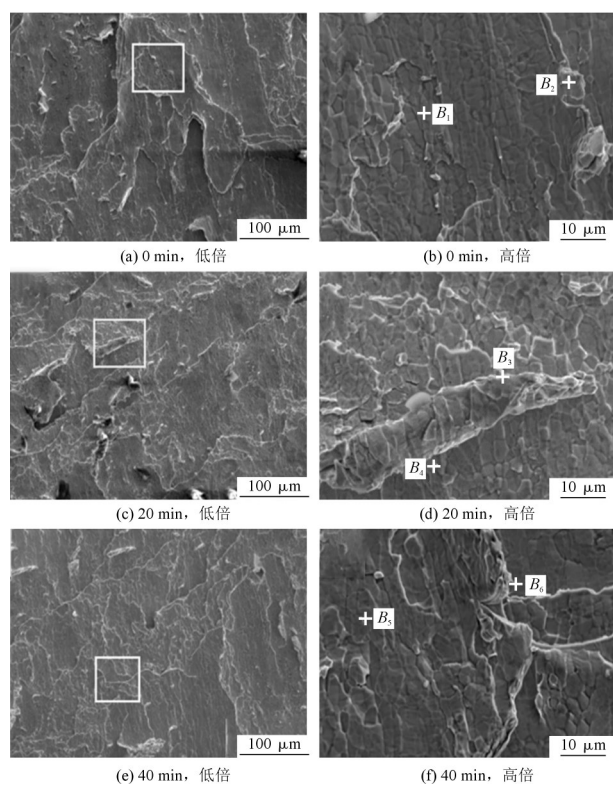


图 10 Mo-14Re 钎焊接头断口形貌

Fig.10 Fracture morphologies of Mo-14Re brazed joint

表 3 图 10 各点 EDS 分析结果

%

Tab. 3 EDS results of each point in Fig.10

| 位置    | $w_B$ |       |
|-------|-------|-------|
|       | Mo    | Re    |
| $B_1$ | 84.30 | 15.70 |
| $B_2$ | 82.60 | 17.40 |
| $B_3$ | 76.60 | 23.40 |
| $B_4$ | 75.49 | 24.51 |
| $B_5$ | 86.21 | 13.79 |
| $B_6$ | 85.33 | 14.67 |

## 2.4 钎焊温度对接头界面组织的影响

图 11 为保温 20 min 时不同钎焊温度下的焊缝组织形貌。可以看出,随钎焊温度变化,焊缝始终都是 3 个区域,故钎焊温度升高对焊缝组织的影响较小。区域 I 的组织厚度随钎焊温度升高发生明显变化。表明钎焊温度升高,促进了母材与钎料元素的反应。表 4 为图

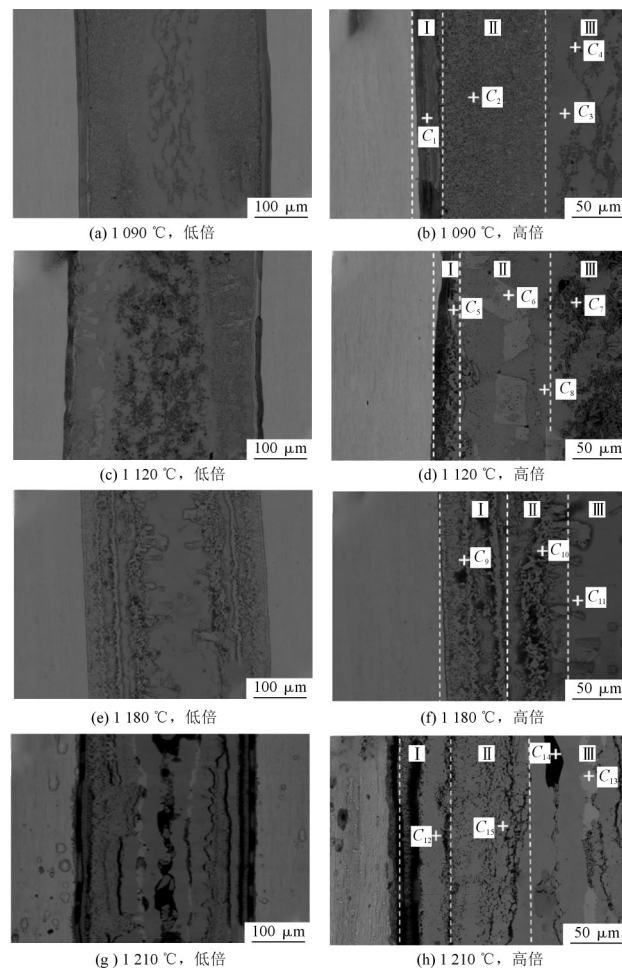


图 11 钎焊温度对接头组织的影响(20 min)

Fig.11 Effects of brazing temperature on microstructure of brazed joints

11 各点 EDS 分析结果。结合图 11 与表 4 可知,钎焊温度升高加剧了母材元素向焊缝中的扩散,焊缝中的 Mo

表 4 图 11 各点 EDS 分析结果

Tab. 4 EDS results of each point in Fig.11

| 位置       | $w_B/\%$ |      |       |       |      |      |       | 可能相      |
|----------|----------|------|-------|-------|------|------|-------|----------|
|          | Mo       | Re   | Ni    | Cr    | Si   | Fe   | B     |          |
| $C_1$    | 64.40    | 7.55 | 24.11 | 2.27  | 0.93 | 0.74 | —     | Mo(s,s)  |
| $C_2$    | 4.63     | 0.87 | 77.95 | 8.43  | 3.26 | 4.86 | —     | Ni(s,s)  |
| $C_3$    | 0.43     | —    | 80.24 | 9.91  | 3.36 | 6.06 | —     | Ni(s,s)  |
| $C_4$    | 1.16     | —    | 12.45 | 84.00 | 0.61 | 1.78 | —     | CrB      |
| $C_5$    | 33.04    | 4.69 | 51.98 | 6.16  | 1.22 | 2.92 | —     | $Ni_2Mo$ |
| $C_6$    | 35.87    | 5.87 | 10.42 | 37.37 | —    | 1.94 | 8.53  | Mo-Cr    |
| $C_7$    | —        | —    | 80.91 | 10.25 | 3.27 | 5.57 | —     | Ni(s,s)  |
| $C_8$    | 2.50     | —    | 10.41 | 72.86 | 0.68 | 1.21 | 12.35 | CrB      |
| $C_9$    | 70.6     | 5.53 | 21.73 | 2.14  | —    | —    | —     | Mo(s,s)  |
| $C_{10}$ | 42.13    | 5.59 | 12.52 | 37.61 | —    | 2.15 | —     | Mo-Cr    |
| $C_{11}$ | 1.43     | —    | 79.18 | 10.63 | 3.45 | 5.31 | —     | Ni(s,s)  |
| $C_{12}$ | 3.37     | 3.15 | 75.82 | 9.98  | 3.14 | 4.54 | —     | Ni(s,s)  |
| $C_{13}$ | 61.26    | —    | 11.09 | 25.70 | —    | 1.95 | —     | (Mo,Cr)B |
| $C_{14}$ | 89.49    | —    | 7.98  | 1.78  | —    | 0.75 | —     | Mo(s,s)  |
| $C_{15}$ | 2.43     | 0.49 | 75.56 | 12.99 | 3.33 | 5.21 | —     | Ni(s,s)  |

含量增加,当钎焊温度为 1 090 ℃时, $C_1$ 点处 Mo 含量为 64.40%,主要形成 Mo(s,s);当 1 210 ℃时, $C_{14}$ 点处 Mo 含量为 89.49%,形成了 Mo(s,s),表明钎焊温度升高会促进 Mo 原子向钎料中扩散,随钎焊温度升高越来越多 Mo 原子进入液态钎料中,并在其中形成 Mo(s,s)。当

钎焊温度较低时,Cr 元素大量聚集在焊缝中央,形成大量化合物。提高钎焊温度,当 1 180 ℃时,Cr 元素向焊缝两侧扩散,焊缝中央的化合物消失。图 12 为不同钎焊温度下的接头组织示意图。从图中可以看出不同钎焊温度下的接头组织变化过程。

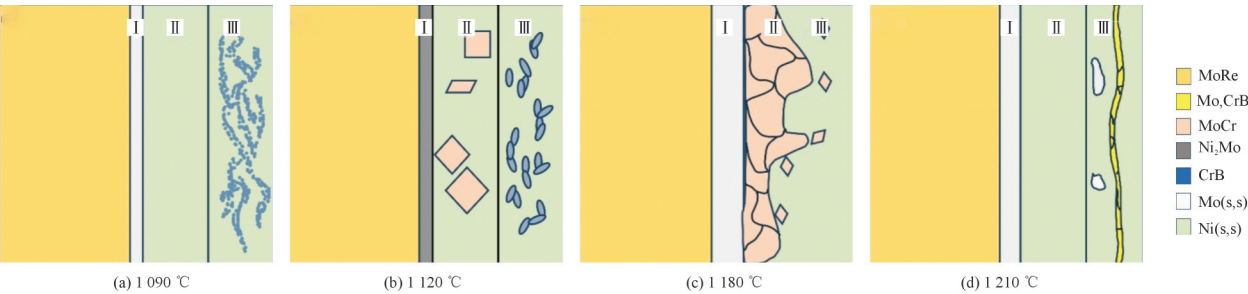


图 12 不同钎焊温度下的接头组织示意图

Fig.12 Schematic diagram of joint structure under different brazing temperatures

2.5 钎焊温度对接头力学性能的影响

图 13 为不同钎焊温度下保温 20 min 的焊接接头剪切强度。可以看出,焊接接头的剪切强度随钎焊温度的升高先上升后下降;1 180 ℃时剪切强度最高,为 84.76 MPa。图 14 为不同钎焊温度下保温 20 min 的焊接接头的断口形貌。表 5 为图 14 中各点 EDS 分析结果。由图 14 和表 5 可知,断口处均只检测到母材元素,故试样均在母材处发生断裂,断裂位置并未发生改变。当 1 210 ℃时,钎缝与母材连接界面处产生裂纹,致使接头力学性能降低。结合图 11、图 13 与表 4 可知,当钎焊温度为 1 180 ℃时,焊缝中间不存在硼化物,且在此钎焊温度下的焊缝组织结构最为均匀,因此剪切强度最佳。当钎焊温度为 1 120 ℃时,焊缝中存在较多 CrB,故接头处的剪切强度相对较低<sup>[15]</sup>。继续增加钎焊温度至 1 210 ℃时,钎料对母材的溶蚀增加,且焊缝中再次生成化合物,从而导致焊接接头力学性能下降。综上,接头的剪切性能随钎焊温度升高先增加后减小。

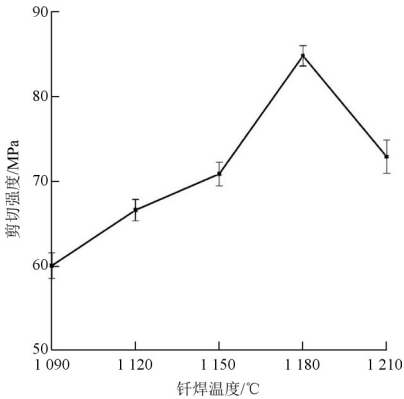


图 13 钎焊温度对钎焊接头剪切强度的影响(20 min)

Fig.13 Effects of brazing temperature on shear strength of brazed joints

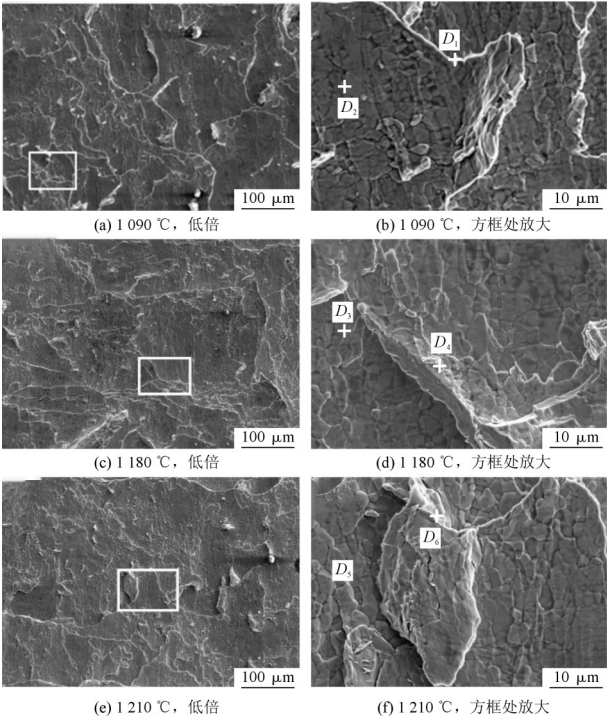


图 14 不同钎焊温度下 Mo-14Re 钎焊接头断口形貌( $t=20\text{ min}$ )

Fig.14 Fracture morphologies of Mo-14Re brazed joint at different brazing temperature

表 5 图 14 各点 EDS 分析结果 %

| 位置    | $w_B$ |       |
|-------|-------|-------|
|       | Mo    | Re    |
| $D_1$ | 88.33 | 11.67 |
| $D_2$ | 83.73 | 16.27 |
| $D_3$ | 87.22 | 12.78 |
| $D_4$ | 86.97 | 13.03 |
| $D_5$ | 83.96 | 16.04 |
| $D_6$ | 84.83 | 15.17 |

结合图 14 可知,试样均在母材处发生断裂,断裂位置并未随钎焊温度升高而发生改变。母材断裂韧度较

差,焊缝强度较高,故断裂位置在母材上,断裂方式为解理断裂。当钎焊温度为1 210℃时,钎料对母材的影响范围增加,溶蚀加剧,导致接头力学性能降低。

### 3 结 论

(1)采用Ni-Cr-Si-B焊膏对Mo-14Re合金实现了真空钎焊连接,获得的接头焊缝与母材结合良好,同时组织结构较为致密,无明显缺陷。

(2)提高钎焊温度,焊缝中的Mo(s,s)与Ni(s,s)含量增加,同时Mo(s,s)中的Mo含量增加,钎料对母材的溶蚀增加,导致裂纹萌生长大,强度下降;随保温时间的延长,Mo(s,s)的含量先增加后减小,NiCr脆性化合物逐渐增加并富集在焊缝中央处,导致接头力学性能下降。

(3)伴随保温时间的延长和钎焊温度的提高,焊接接头剪切强度均是先升高后降低,且断裂均发生在母材上,断裂方式为解理断裂。1 180℃×20 min时接头处的剪切强度最大,达到84.76 MPa。

### 参 考 文 献

- [1] SONG X G, TIAN X, ZHAO H Y, et al. Interfacial microstructure and joining properties of titanium-zirconium-molybdenum alloy joints brazed using Ti-28Ni eutectic brazing alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2016, A653: 115-121.
- [2] LI B, MO A Y, LI H J, et al. Thermodynamic stability, electronic structure and mechanical properties of Mo-Re binary alloys: A first-principles calculations [J]. Nuclear Materials and Energy, 2024, 39: 101 670.
- [3] GU Q, WANG Y, LENG E G, et al. First-principles study of the stability and mechanical properties for binary Mo-Re alloys [J]. Physica, 2024, B693: 416 401.
- [4] MORITO F, CHAKIN V P, DANYLENKO M I, et al. Radiation-induced strengthening in EB welds of Mo-Re alloys during high temperature neutron irradiation [J]. Journal of Nuclear Materials, 2011, 417(1-3): 976-979.
- [5] 陈国财, 程东海, 王德, 等. 镁/镍/钛激光熔钎焊接头组织性能研究 [J]. 稀有金属, 2024, 48(1): 35-42.
- [6] CHANG C T, SHIUE R K. Infrared brazing Ti-6Al-4V and Mo using the Ti-15Cu-15Ni braze alloy [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2005, 23(3): 161-170.
- [7] LIN C C, CHEN C, SHIUE R K, et al. Vacuum brazing Mo using Ti-Ni-Nb braze alloys [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2011, 29(5): 641-644.
- [8] XIA C Z, WU L, XU X P, et al. Phase constitution and fracture analysis of vacuum brazed joint of 50Mo-50Re refractory alloys [J]. Vacuum, 2017, 136: 97-100.
- [9] 路全彬, 钟素娟, 李胜男, 等. Ni-Ti钎料高温钎焊TZM合金的晶间渗入行为 [J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(8): 2 418-2 423.
- [10] LIN J M, YANG Z W, WEI H H, et al. An investigation on diffusion bonding of TZM alloy and Nb-Zr alloy using Ni foil as an inter-

layer [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 743: 780-788.

- [11] YANG Z W, SUN K B, LIN J M, et al. Microstructure and mechanical properties of contact-reactive brazed TZM/Nb-Zr joints with Ni interlayer [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 57: 817-827.
- [12] WANG S, XIAO B, XIAO H, et al. Microstructure and mechanical properties of the diamond/1045 steel joint brazed using Ni-Cr + Mo composite filler [J]. Diamond and Related Materials, 2023, 133: 109 691.
- [13] MIN M, MAO Y W, DENG Q R, et al. Vacuum brazing of Mo to 316L stainless steel using BNi-2 paste and Cu interlayer [J]. Vacuum, 2020, 175: 109 282.
- [14] LIU X Q, ZHANG Y X, WANG X R, et al. Microstructure and corrosion properties of  $\text{AlCr}_x\text{NiCu}_{0.5}\text{Mo}$  ( $x=0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ ) high entropy alloy coatings on Q235 steel by electrospray-Computer numerical control deposition [J]. Materials Letters, 2021, 292: 129 642.
- [15] ALINAGHIAN H, FARZADI A, MARASHI P, et al. Wide gap brazing using Ni-B-Si and Ni-B-Si-Cr-Fe filler metals: Microstructure and high-temperature mechanical properties [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23: 2 329-2 342.

(编辑:刘晨辉)

### 《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国60年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然科学期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺1001大厦10楼

邮编:430019

电话:027-85358206, 85486024,

85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

