

温度和时间对 7050 铝合金扩散连接界面愈合与性能影响

吴进凯¹ 徐大召¹ 孟令刚^{1,2} 刘运峰² 李 晴² 张兴国^{1,2}

(1. 大连理工大学材料科学与工程学院, 大连 116024; 2. 大连理工大学宁波研究院, 宁波 315016)

摘 要 为实现大尺寸铝合金构筑成形, 对 7050 高强铝合金在不同温度 and 不同保温时间下进行真空热压扩散连接试验, 研究界面扩散结合行为和愈合机理。分别在 440、450、460、470 和 480 °C 下进行扩散连接试验, 保温时间为 3 h, 控制变形量为 30%, 随后在 480 °C 的基础上将保温时间延长到 6 h 和 9 h。结果表明, 随着扩散连接温度升高, 氧化膜破裂分解, 界面逐渐愈合, 连接强度提高, 适当延长保温时间也有利于界面愈合。在 480 °C、保温 6 h 时, 界面抗拉强度达到 200 MPa, 为基体的 74.6%, 剪切强度达到 165 MPa, 为基体的 84.2%, 界面处硬度也与两侧基体相当。

关键词 7050 铝合金; 扩散连接; 界面愈合; 再结晶

中图分类号 TG146.21; TG113.25

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240382

Influence of Temperature and Holding Time on Healing and Properties of Diffusion Bonding Interface of 7050 Aluminum Alloy

WU Jinkai¹, XU Dazhao¹, MENG Linggang^{1,2}, LIU Yunfeng², LI Qing², ZHANG Xingguo^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024; 2. Ningbo Institute of Dalian University of Technology, Ningbo 315016)

Abstract: To achieve the construction and forming of large-sized aluminum alloys, vacuum hot pressing diffusion bonding tests were conducted on 7050 high-strength aluminum alloy at different temperatures and holding time to investigate the interfacial diffusion bonding behavior and healing mechanism. Diffusion bonding tests were carried out at 440, 450, 460, 470, and 480 °C, with holding time of 3 h and deformation of 30%. Subsequently, the holding time was increased to 6 h and 9 h at 480 °C. The results indicate that the oxide film is ruptured and decomposed as the diffusion bonding temperature rises, and the interface is gradually healed with increasing connection strength. Appropriate extension of holding time is also beneficial to interface healing. Under the conditions of 480 °C and 6 h, the tensile strength and shear strength of interface reach 200 MPa and 165 MPa, which is 74.6% and 84.2% of the matrix, respectively, and the hardness at the interface is also comparable to that of the lateral matrices.

Key Words: 7050 Aluminum Alloy, Diffusion Bonding, Interface Healing, Recrystallization

7050 铝合金属于 Al-Zn-Mg-Cu 系可热处理的高强铝合金, 具有强度高、断裂韧度高、抗应力腐蚀性能好等特点, 被广泛用于航空航天、军工国防、轨道交通和造船等领域^[1-2]。7050 铝合金具有低淬火敏感性, 常用于制造大尺寸厚板、型材和锻件等。由于大断面铝合金铸锭的凝固时间长、冷却速度慢, 且合金元素含量高, 大型铸锭在铸造过程中, 易产生宏观偏析、缩孔、疏松、气孔及裂纹等缺陷, 严重影响铸件及其构件的品质, 导致大尺寸铝合金构件的成品率及合格率较低^[3-5]。

针对这一难题, 有研究者提出了金属构筑成形技术^[6-8], 利用可批量生产的高品质小型均质化铸件作为

基元, 经过表面清洁和真空封装后, 在一定温度下施加压力使其变形并保温, 得到与母材组织性能相当的大型锻件。该技术基于扩散连接理论, 可避免大铸件由于尺寸效应产生的缺陷, 且金属损耗较少, 能显著提高生产率和成品率, 完成了 110 t 水轮机主轴与核电用 ϕ 15.6 m 不锈钢支承环等构件的大型钢锻件的开发, 证实了金属构筑成形技术的适用性和可靠性^[9]。陈旭等^[10]采用真空扩散连接的方法焊接 6063 铝合金均温板, 研究了扩散温度、压力和时间等参数对接头显微组织与性能的影响, 发现最佳扩散连接工艺参数是焊接温度为 550 °C、焊接压力为 3 MPa、保温时间为 2 h, 此

收稿日期: 2024-09-22; 修订日期: 2024-11-19

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFA0702900)

第一作者简介: 吴进凯, 男, 2000 年出生, 硕士研究生, E-mail: 2483694870@qq.com

通信作者: 张兴国, 男, 1960 年出生, 教授, E-mail: zxgwj@dlut.edu.cn

引用格式: 吴进凯, 徐大召, 孟令刚, 等. 温度和时间对 7050 铝合金扩散连接界面愈合与性能影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(9): 1394-1399.

WU J K, XU D Z, MENG L G, et al. Influence of temperature and holding time on healing and properties of diffusion bonding interface of 7050 aluminum alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(9): 1394-1399.

时剪切强度达到 71.3 MPa,界面结合率较高,断口呈现韧性断裂特征,满足设计要求。江海洋等^[11]对 7075 铝合金进行了热变形连接试验,发现随保温时间延长,界面再结晶晶粒跨越界面,界面氧化物逐渐消失,当连接温度为 460 ℃,保温时间为 24 h 时,界面处已经没有氧化物的偏聚,合金抗拉强度达到 444 MPa。VATNALMATH M 等^[12]对 2219 铝合金进行非真空固态扩散焊研究,发现随着焊接温度升高,焊接接头的硬度逐渐升高,在 500 ℃下界面实现愈合,界面处没有发现空隙和氧化物,结合界面硬度(HV)提高到 112.14。VENUGOPAL S 等^[13]研究了工艺参数对 5083 铝合金结合强度的影响,发现温度和压力升高促进了界面中微观组分的扩散,使材料的结合强度和剪切强度增加。将温度从 490 ℃提高到 520 ℃,结合压力从 5 MPa 提高到 15 MPa,界面处产生了更多更细的再结晶晶粒,同时二次相颗粒更加分散,界面连接性能大大提升。

铝合金界面结合受致密氧化膜和界面再结晶缓慢的影响,很难完全愈合^[14-20]。7050 铝合金作为 Al-Zn-Mg-Cu 系可热处理高强铝合金的代表,合金元素含量高,第二相多,主要有 η -MgZn₂、S-Al₂MgZn、 β -Mg₂Si 相等,这些第二相主要分布在晶界处,由共晶相和金属间化合物组成,造成枝晶偏析,进而影响界面愈合效果。本研究基于扩散连接理论,在真空下探究不同扩散连接温度 and 不同保温时间对 7050 铝合金扩散连接界面的影响,分析界面处再结晶行为以及界面处第二相和氧化物对连接性能的影响,探究界面愈合机理,旨在为其构筑成形应用提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

采用均质态 7050 铝合金,其化学成分见表 1。原始试样组织为均匀的等轴晶组织,见图 1。基材原

表 1 7050 铝合金的化学成分

Tab.1 Chemical compositions of 7050 Al alloy %

w_B								
Zn	Cu	Mg	Zr	Fe	Mn	Ti	Si	Al
6.29	2.21	1.62	0.097	0.089	0.012	0.043	0.13	余量

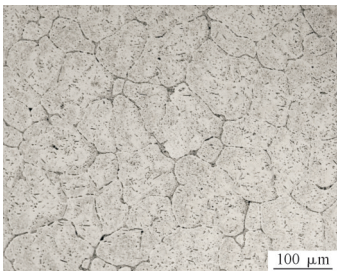


图 1 7050 铝合金原始材料显微组织

Fig.1 Microstructure of raw materials of 7050 aluminum alloy

始抗拉强度为 268 MPa,剪切强度为 196 MPa,显微硬度(HV)为 124。扩散连接试样直径为 50 mm,厚度为 20 mm。

1.2 试验方法

采用 XG-100 型真空热压设备进行扩散连接试验,图 2 为铝合金扩散连接试验装置示意图和工艺流程图,设备使用硅碳棒进行环绕加热,保证加热均匀。扩散连接试验前需去除试样表面氧化膜,以利于试样连接。用 400 目砂纸打磨后,在无水乙醇中进行超声清洗,用吹风机干燥后,立即进行真空热压试验。温度选择 440、450、460、470 和 480 ℃,保温时间选择 3、6 和 9 h,通过改变压力控制压头位移以控制试样变形量为 30%。试验结束后试样随炉冷却。

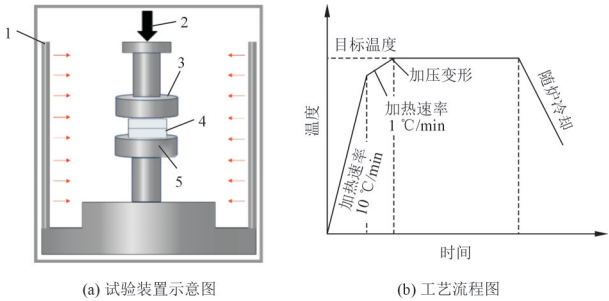


图 2 试验装置示意图和工艺流程图

Fig.2 Schematic diagram of experimental device and flow chart of process

1. 碳硅棒 2. 压力 3. 石墨垫片 4. 热电偶 5. 7050 铝合金

1.3 观察与检测

利用线切割沿着连接界面长度方向取试样中心部位样品,金相腐蚀液使用体积分数为 0.5% 的 HF 溶液腐蚀为 5~10 s,使用 Leica MEF-4 金相显微镜、配有 Ultim Max 能谱分析仪 SU5000 场发射扫描电镜对试样表面进行微观形貌以及微区成分分析。根据 GB/T 228.1-2021 和 GB/T 34487-2017 在 MUT-E 万能试验机上对试样连接界面进行室温拉伸和剪切强度试验,图 3 为拉伸试样尺寸和剪切试验示意图。为防止模具因摩擦力影响测量精度以及出现卡模,剪切强度试验选用强度较高的模具钢进行表面与内部抛光处理,剪切试样尺寸为 28 mm×10 mm×5 mm,应变速率为 1 mm/min,同

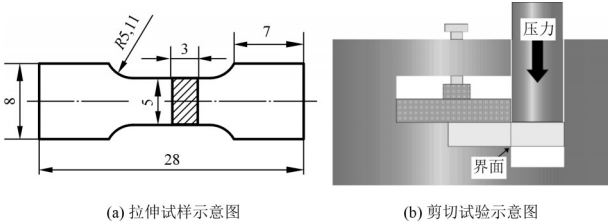


图 3 拉伸试样和剪切试验示意图

Fig.3 Schematic diagram of tensile specimen and shear test

种工艺下的试样至少进行3次,结果取其平均值。

2 试验结果与分析

2.1 扩散连接温度对界面愈合的影响

图4为不同温度下7050铝合金扩散连接界面处微观组织形貌。可以看出,扩散连接温度为440℃时,界面在压力的作用下变形弯曲,但依旧明显连续,见图4a;提高扩散连接温度为450℃时界面变细,界面开始愈合,见图4b;进一步提高温度到460℃时,界面弯曲不连续,界面两侧出现细小的再结晶晶粒,见图4c;温度到470℃时,界面处再结晶晶粒变大,界面不明显,见图

4d;温度到480℃时,界面基本愈合,见图4e。结果表明,随着扩散连接温度提高,界面处出现再结晶晶粒并长大,界面逐渐愈合。

结合图4,对440、460和480℃下7050铝合金扩散连接界面进行EDS面扫描,结果见图5。可以看出,随着温度升高,晶界处第二相减少,最终在480℃时不再有粗大的晶界析出相。同时,440℃时界面上O元素明显,呈连续分布,即氧化膜未发生破裂;460℃时氧化膜不再连续,氧化膜破裂分解,氧元素向两侧基体扩散;而当温度达到480℃时,可以观察到O元素较为均匀地扩散至基体中。另外,观察到O元素除存在基体外,还

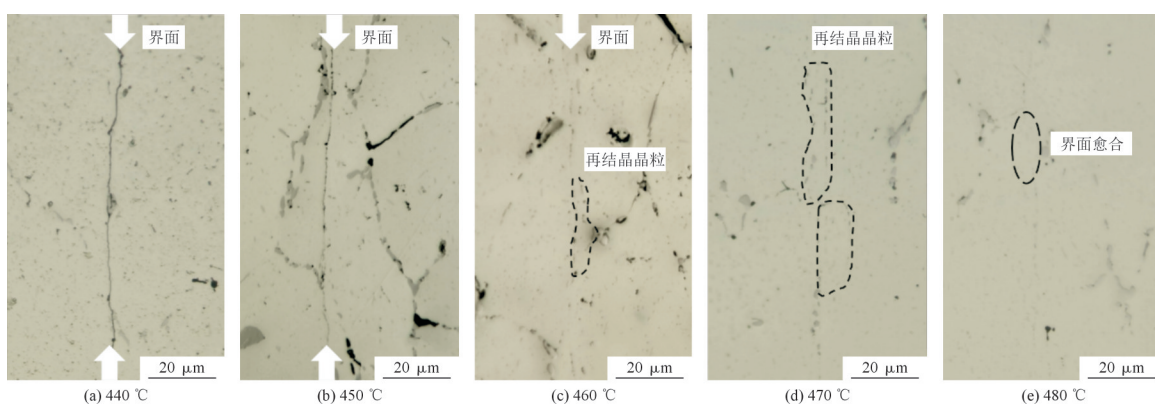


图4 不同温度下扩散连接界面处微观组织形貌图

Fig.4 Microstructure of diffusion bonding interface at different temperatures

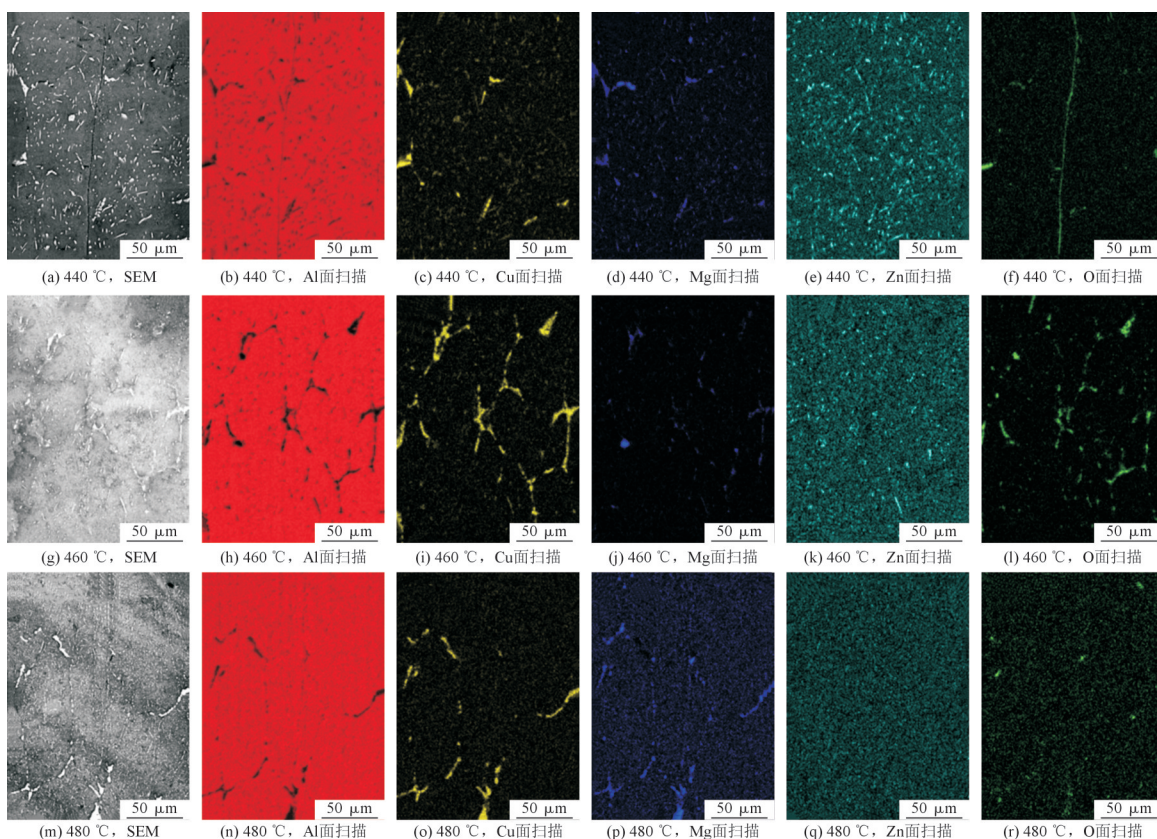


图5 不同温度下保温3 h后扩散连接界面处EDS图

Fig.5 EDS results of diffusion bonding interface holding for 3 h at different temperatures

在含 Mg 的第二相周围富集。这是因为氧化物颗粒与晶界处的 Mg 发生了置换反应^[21]：



$$-\Delta G = -\Delta G_{\text{M}} + 4/3\Delta G_{\text{A}} - RT \ln a_{\text{Mg}} \quad (2)$$

式中, ΔG_{A} 为 Al_2O_3 的标准生成吉布斯自由能; ΔG_{M} 为 Al_2MgO_4 的标准生成吉布斯自由能; a_{Mg} 为 7050 铝合金中 Mg 的活度比; R 为热力学常数; T 为温度。式(1)反应在 480°C 下能够进行, Mg 与界面氧化物反应, 利于界面愈合。这表明, 扩散连接温度较低时, 连接处存在明显的界面。此时的连接主要是压力使界面微区的物理变形破碎氧化膜, 通过物理粘合实现连接, 此时界面的结合程度低。随着扩散连接温度提高, 在塑性变形致氧化膜破碎的基础上, 原子扩散加快, 界面出现再结晶晶粒, 氧化膜分解, 氧元素向两侧基体扩散, 从而实现界面愈合。

2.2 保温时间对界面愈合的影响

在最佳扩散温度 480°C 下探究保温时间对界面愈合的影响。图 6 是扩散连接温度为 480°C 、不同保温时间下连接界面处微观组织形貌。可以看出, 保温 3 h 时还有界面痕迹, 界面周围分布着细小的再结晶晶粒, 见图 6a; 保温 6 h 时, 界面处再结晶晶粒长大, 界面基本愈合, 见图 6b; 保温 9 h 时, 界面处再结晶晶粒继续长大, 同时随着保温时间的延长, 有第二相在晶界、界面周围析出, 见图 6c。结果表明, 增加保温时间可以促使界面处形成再结晶晶粒并生长, 有利于界面结合, 但过度延长保温时间, 再结晶晶粒长大的同时使第二相粗化^[22], 反而会降低界面愈合连接效果。

图 7 是扩散连接温度为 480°C 、保温时间分别为 3、6 和 9 h 的连接界面处 EDS 面扫描结果。结果表明, 延

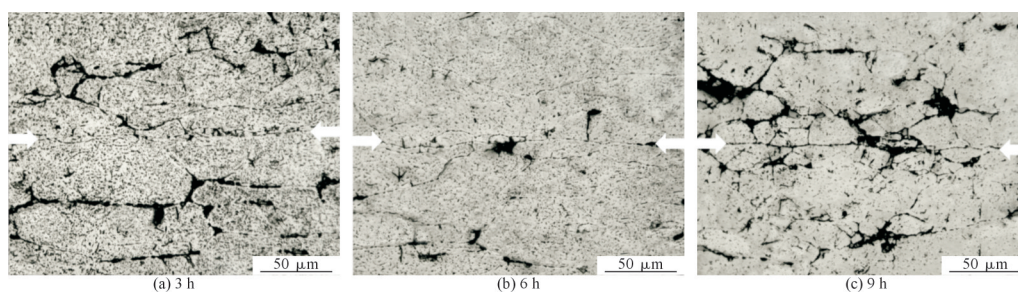


图 6 480°C 不同保温时间下连接界面处微观组织形貌

Fig.6 Micro morphologies of diffusion bonding interface at 480°C for different heat preservations

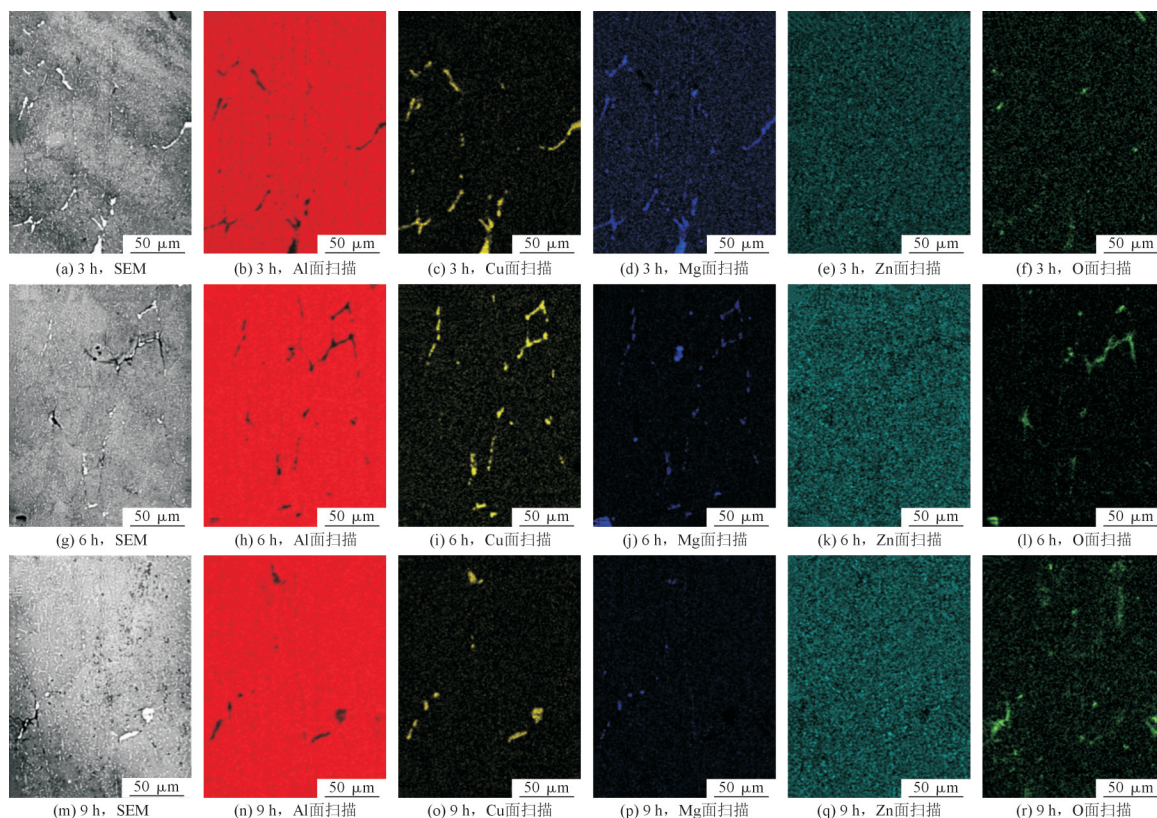


图 7 480°C 不同保温时间下扩散连接界面处 EDS 图

Fig.7 EDS results of diffusion bonding interface at 480°C for different heat preservations

长扩散时间,界面O元素可以向两侧基体更远处扩散。而且,保温6 h时界面处仅有断续的第二相颗粒;继续延长保温时间到9 h时,晶粒过度长大,第二相粗化,在晶界及界面处偏聚,进而影响界面结合效果。

2.3 界面力学性能分析

图8为不同工艺参数下7050铝合金连接界面强度测试结果。从图8a可以看出,扩散连接温度为440℃时,界面连接强度低,连接效果差,界面抗拉强度为33.8 MPa,剪切强度为55 MPa。随着扩散温度提高,界面连接强度逐渐改善,与界面微观形貌对应,氧化膜破裂、分解,界面逐渐愈合,见图4。扩散连接温度为480℃时界面强度最高,抗拉强度为196 MPa,剪切强度为150 MPa。由图8b可以看出,在扩散连接温度为480℃时,延长保温时间,界面连接强度呈现先上升后下降的变化,这与保温时间过长致使晶粒过度生长有关,见图6c。保温时间为6 h的界面愈合效果最佳,连接强度最高,抗拉强度为200 MPa,达到原始基体的74.6%,剪切强度为165 MPa,达到原始基体的84.2%(基体抗拉强度为268 MPa,剪切强度为196 MPa)。

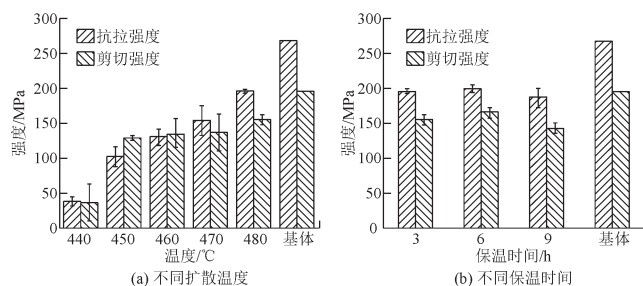


图8 不同工艺参数下连接界面抗拉强度和剪切强度

Fig.8 Tensile strength and shear strength of diffusion bonding interface under different process parameters

图9为不同工艺参数下7050铝合金连接界面区域显微硬度分布情况,其中材料原始显微硬度(HV)为124。从图9a可以看出,扩散温度较低时,界面处硬度低于两侧基体,此时界面明显连续,氧化膜未分解;提高扩散温度,界面逐渐愈合,扩散温度为480℃时,界面

处硬度与两侧基体硬度相当,此时界面愈合良好。在此基础上,延长保温时间,从图9b可以看出,界面区域整体硬度先上升后下降,保温时间为6 h时最好,这是因为界面处再结晶区域晶粒得以生长,氧化物颗粒分解,界面进一步愈合,硬度提高,后因晶粒过度生长,晶粒粗大同时析出相粗化,导致硬度和强度下降。

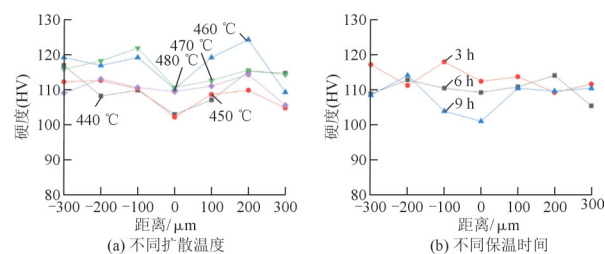


图9 不同工艺参数下连接界面显微硬度分布

Fig.9 Microhardness distribution of bonding interface under different process parameters

2.4 界面愈合机理分析

在已有的扩散连接理论^[23]的基础上,结合试验结果,提出界面愈合机理,见图10。可以看出,7050铝合金固相扩散连接过程可分为3个阶段:第1阶段为开始阶段,铝合金表面在微观尺度上不光滑,两界面在凸起处相互接触,在温度和压力作用下,铝合金发生塑性变形,由于表面氧化膜和内部金属的收缩膨胀系数不同,氧化膜破裂,界面两侧基体和第二相相互接触,开始初步连接,见图10a;第2阶段为保温保压阶段,界面处发生再结晶,形成新晶粒,破碎的氧化膜受挤压进一步破碎并被分解成氧化物颗粒,界面处元素扩散并开始愈合,见图10b;第3阶段为界面愈合阶段,界面两侧再结晶晶粒随保温时间延长而长大,氧化物颗粒分解,形成成分、晶粒均匀的再结晶区域,此时界面实现完全愈合,见图10c。整个过程均在高温和一定压力下进行,界面上原子得以更快地向两侧扩散,同时界面处的晶界、空位等缺陷为再结晶提供了条件和驱动力,晶界处富集的Mg等合金元素也参与了界面氧化膜的分解,这使得界面两侧能够出现成分、晶粒均匀的再结晶区域。

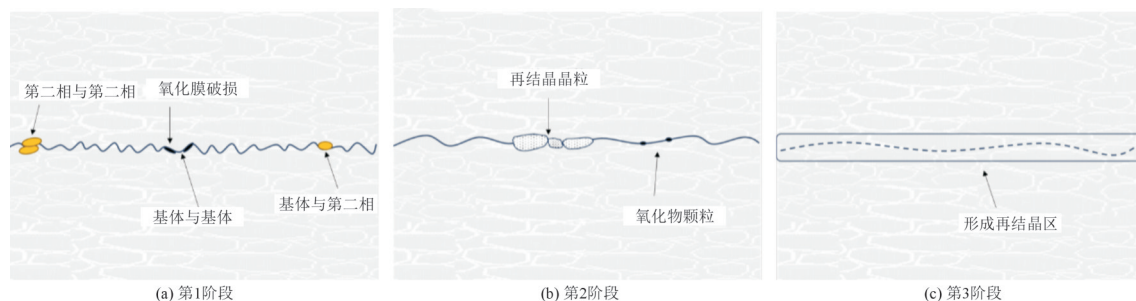


图10 扩散界面愈合机理

Fig.10 Healing mechanism of diffusion interface

3 结 论

(1)提高扩散连接温度,界面处原子向两侧扩散加快,可以有效提高 7050 铝合金界面结合效果。扩散温度低于 450 ℃时,界面连接主要靠压力使界面发生塑性变形,通过物理粘合实现连接。提高扩散连接温度,氧化膜开始分解,氧元素向两侧基体扩散,界面处形成再结晶晶粒,当扩散温度为 480 ℃时,界面基本愈合。

(2)延长扩散连接保温时间,界面区域再结晶晶粒得以生长,氧元素可以向两侧基体更远处扩散,成分更加均匀,但保温时间过长,导致晶粒生长过大,第二相粗化,力学性能下降,不利于界面愈合。当扩散温度为 480 ℃、保温时间为 6 h 时,7050 铝合金界面结合最好,抗拉强度达到 200 MPa,剪切强度达到 165 MPa,分别达到原始基体的 74.6% 和 84.2%,界面处硬度也与两侧基体相当。

(3)扩散界面愈合过程分为 3 个阶段:开始阶段,压力使铝合金发生塑性变形,界面只是机械结合;保温加压阶段,破损的氧化膜进一步破碎并分解成氧化物颗粒,氧元素向两侧基体扩散,界面两侧出现再结晶晶粒,界面开始愈合;界面愈合阶段,界面两侧再结晶晶粒随保温时间延长而长大,氧化物颗粒分解,形成成分、晶粒均匀的再结晶区域,此时界面实现完全愈合。

参 考 文 献

- [1] 王国军,王祝堂. 铝合金在中国民用航空器上的应用[J]. 轻合金加工技术, 2017, 45(11): 1-11.
- [2] 陈小明,宋仁国,李杰. 7xxx 系铝合金的研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2009, 23(3): 67-70.
- [3] 樊振中,王端志,张东,等. 铸造温度、速度对大规格 7085 铸锭凝固组织和性能的影响[J]. 铸造, 2022, 71(8): 969-977.
- [4] 芦川译,李瑞卿,钟贞涛,等. 超声场对大规格 2219 铝合金铸锭微观缺陷的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(11): 1 269-1 273.
- [5] 吴镇宇,熊新国,黄霄,等. 浅谈 DC 铸造大规格铝合金铸锭宏观偏析的成因与控制方法[J]. 大众科技, 2023, 25(7): 85-88.
- [6] XIE B J, SUN M Y, XU B, et al. Evolution of interfacial characteristics and mechanical properties for 316LN stainless steel joints manufactured by hot-compression bonding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 283: 116 733.
- [7] LIU W F, ZHANG J Y, SUN M Y, et al. A hot-compression bonding method for manufacturing large high-speed homogeneous steels[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 17: 507-520.
- [8] ZHOU L Y, CHEN W X, FENG S B, et al. Dynamic recrystallization behavior and interfacial bonding mechanism of 14Cr ferrite steel during hot deformation bonding[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 43: 92-103.
- [9] 孙明月,徐斌,谢碧君,等. 大锻件均质化构筑成形研究进展[J]. 科学通报, 2020, 65(27): 3 044-3 058.
- [10] 陈旭,马平义,金诚,等. 铝合金均温板扩散连接工艺研究[J]. 模具技术, 2022(5): 6-11.
- [11] 江海洋,孙明月,吴铭方,等. 7075 铝合金热变形连接接头的组织与性能[J]. 金属热处理, 2020, 45(2): 46-50.
- [12] VATNALMATH M, AURADI V, BHARATH V, et al. Microstructural evolution in nonvacuum solid-state diffusion bonded joints of AA2219[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2023, 31: 256 491 833.
- [13] VENUGOPAL S, SEEMAN M, SEETHARAMAN R, et al. The effect of bonding process parameters on the microstructure and mechanical properties of AA5083 diffusion-bonded joints[J]. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture, 2022, 5(4): 555-563.
- [14] 刘宇,杨鑫鑫,郝瑞. 扩散焊工艺对 6063 铝合金焊接接头性能的影响[J]. 焊接, 2019(7): 31-33.
- [15] 娜日松,黄明辉. 改性铝合金的扩散连接机理[J]. 机械工程材料, 2002, 26(11): 27-29.
- [16] 张长日,孟令刚,徐大召,等. 温度对 2A12 铝合金扩散连接中的界面愈合与性能影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(7): 875-880.
- [17] VENUGOPAL S, MAHENDRAN G. Effect of operation parameters on diffusion bonded AA5083, AA6082 and AA7075 aluminum alloys[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2018, 71(9): 2 185-2 198.
- [18] BEN-HAROUSH M, MITTELMAN B, SHNECK R, et al. The influence of time, atmosphere and surface roughness on the interface strength and microstructure of AA6061-AA1050 diffusion bonded components[J]. Materials, 2023, 16(2): 769-770.
- [19] 程喆,钱东升,邓加东. 2219 铝合金构筑成形工艺试验与界面愈合规律[J]. 锻压技术, 2020, 45(12): 171-177.
- [20] 颜景润,任玉灿,吴伟静,等. 扩散焊工艺对 7075 铝合金焊接接头性能的影响[J]. 热加工工艺, 2014, 43(9): 219-220.
- [21] 牛济泰,王慕珍,刘黎明,等. 扩散焊条件下 Al_2O_3 /6061Al 复合材料中氧化膜的行为[J]. 材料研究学报, 2000(3): 244-248.
- [22] 杨金龙,邓运来,祁小红,等. 过饱和 7050 铝合金固溶体中第二相粒子的析出动力学[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(7): 2 528-2 533.
- [23] 郭伟,赵熹华,宋敏霞. 扩散连接界面理论的现状与发展[J]. 航天制造技术, 2004(5): 36-39.

(编辑:栗万仲)

上新版网站,下全彩文章

2024 年起,《特种铸造及有色合金》杂志采用黑白印刷,电子版文章为彩色版本。自 2024 年 5 月 1 日起,特种铸造及有色合金杂志新版网站正式上线,期刊论文彩色版本均可在网站免费在线阅读或下载 pdf 文件,并可体验 AI 导读功能,网址:www.special-cast.com,欢迎访问!