

引用格式:张鹏,丁云龙,马雨寒,等. 退火温度对 Mg/Al 轧制复合层组织和性能影响[J]. 有色设备,2024,38(3):37-44.

ZHANG Peng, DING Yunlong, MA Yuhan, et al. Effect of annealing temperature on microstructure and properties of Mg/Al rolle-bonding layer[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(3):37-44.

退火温度对 Mg/Al 轧制复合层组织和性能影响

张鹏^{1,2}, 丁云龙^{1,2*}, 马雨寒³, 应骏^{1,2}, 韩冰^{1,2}

(1. 辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051;

2. 辽宁省复杂工件表面特种加工重点实验室, 辽宁 鞍山 114051;

3. 山东泰开隔离开关有限公司, 山东 泰安 271000)

[摘要] 采用扫描电镜(SEM)、光学显微镜(OM)、拉伸实验机、X射线衍射仪(XRD)等研究了退火温度(220~380℃)对 MgAZ31 和 Al(1A99)轧制复合层的微观组织结构、力学性能、拉伸断口的形貌及物相成分影响。结果表明:随着退火温度的升高,镁、铝原子逐渐进行扩散迁移,扩散层厚度增加,从220℃时的1.80 μm 逐渐增加到380℃时的45.10 μm,且扩散层的生长速率逐渐增大;当退火温度达到300℃时,断口处出现密集的韧窝,镁基体的断裂形式向塑性断裂转变,镁基体的塑性增强,断口的物相为 Mg₂Al₃相,抗拉强度达到最大,为272.35 MPa,此时试件的综合力学性能达到最佳,故300℃为最佳退火温度。

[关键词] 退火温度; 轧制复合层; 扩散; 微观组织; 力学性能; 镁铝复合材料

[中图分类号] TG113.12

[文献标志码] A

[文章编号] 1003-8884(2024)03-0037-08

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.03.006

0 引言

镁和铝这两种轻质有色金属具有密度低、易回收、可重复利用,且同时兼具较高的比强度和比刚度,有较好的加工性能,但镁在常温条件下的变形能力差、易被腐蚀的特性,限制了其应用^[1-4]。铝及其合金具有良好的耐腐蚀性能,可以有效地弥补镁及其合金的应用短板,成为复合材料的首选。将镁、铝两种轻质金属复合,改善镁耐腐蚀性差缺点的同时保存镁、铝金属各自的优点,使复合后的材料发挥镁铝金属各自的性能优势,减轻结构质量实现轻量化的同时,拓宽镁的应用领域,可以达到兼顾两者优点的同时改善缺点的目的,因此大量的研究人员致力于镁铝异种金属层状金属的复合材料或接头的

制备^[5-9]。

目前,国内外学者研究主要集中在对镁铝合金复合板材在不同退火工艺下的微观组织和力学性能方面。许多学者研究发现,经过退火处理后,晶粒尺寸的变化与退火温度有关,随退火时间和时间的增加,界面层厚度也会增加,然而并未进一步探究复合界面退火组织的演变规律^[10-15]。一部分学者采用普通平辊热轧技术制备了镁/铝复合板。研究发现,随着退火温度升高,金属间化合物厚度增加,且抗拉强度也会变化,但是未对退火组织的详细演变规律进行分析^[16-19]。文献表明镁铝轧制过程中的轧制工艺参数以及后续退火温度的选取,对其表面形貌特征、组织缺陷和力学性能均具有较深影响,然而对退火组织的最佳工艺参数以及退火组织的演变规律的相关研究较少,且试验成本高。故本文通过改变退火温度,确定两道次往复热轧 MgAZ31/Al(1A99)复合板的最佳退火温度,通过控制退火温度,探究复合界面退火组织的演变规律及其对复合材料的力学性能及断裂机制的影响。

1 试验材料和方法

本试验选用的基体材料为1.5 mm厚的

[收稿日期] 2024-03-26

[第一作者] 张鹏(1998—),男,辽宁大连人,硕士研究生,主要研究方向为磁粒研磨光整加工、异种焊接。

[通信作者] 丁云龙(1988—),男,吉林农安人,副教授,博士,主要研究方向为磁粒研磨光整加工、异种焊接。

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(51775258);辽宁省科技厅博士启动经费(2021-BS-241)。

MgAZ31 板材和 1 mm 厚 Al(1A99) 板材,化学成分详见表 1 及表 2。通过线切割剪裁尺寸至 300 mm × 80 mm,复合之前用砂纸对板材待复合面进行打磨处理。

表 1 MgAZ31 的化学成分

Table 1 Chemical composition of MgAZ31 %

元素	Mg	Al	Zn	Mn	Ca	Si	Cu
含量	余量	2.5 ~ 3.5	0.6 ~ 1.4	0.2 ~ 1.0	0.04	0.1	0.01

表 2 Al(1A99) 的化学成分

Table 2 Chemical composition of Al(1A99) %

元素	Al	Ca	Zn	Mn	Fe	Si	Cu
含量	余量	—	—	—	0.003	0.003	0.003

轧制前对母材进行铝镁顺序的组胚,用加热炉对待复合板材进行 200 °C,45 min 的预热处理,然后在 270 °C 的轧制温度下,采用两道次往复热轧工艺进行 MgAZ31/Al(1A99) 轧制复合。对复合后的板材进行不同温度条件的退火处理,图 1 为退火工艺曲线,分别在 220 °C、260 °C、300 °C、340 °C、380 °C 条件下保温 60 min 后随炉冷却。通过扫描电子显微镜及 EDS 能谱检测复合层及拉伸断口的微观组织及成分,并利用拉伸机进行力学性能测试。

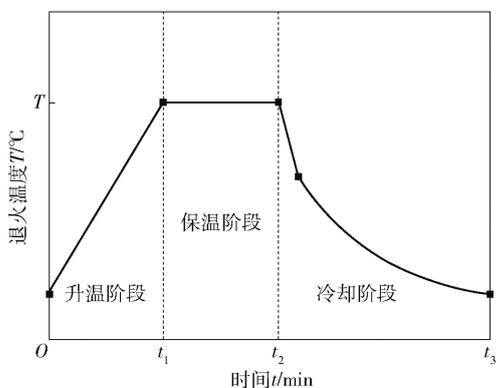


图 1 退火工艺曲线

Fig. 1 Annealing process curve

2 结果与讨论

2.1 退火温度对复合层组织的影响

保温时间为 60 min 时,不同退火温度处理后的复合界面形貌图如图 2 所示。从图 2(a)可以看出,轧制态的复合界面没有明显的扩散现象,界面呈现

一条清晰的分界线。经 220 °C 退火处理后,复合界面出现了细小、不连续、厚度不均的扩散组织,如图 2(b)所示。此时的退火温度相对较低,复合界面的镁、铝原子未能获得足够的能量进行充分的扩散迁移,此时复合界面处的金属间化合物仍处在“孕育期”,所以图 2(b)中的扩散层并不明显。经 260 °C 退火处理后,复合界面出现了明显的扩散层,且演化为连续态的双层结构,如图 2(c)所示。经 300 °C 退火处理后,复合界面的扩散组织更均匀,厚度明显增大,说明在 300 °C 条件下的镁铝原子可以获得足够的能量进行扩散迁移。当退火温度继续升高,达到 340 °C 时,复合界面的化合物沿界面法向继续生长,随温度的升高迅速变厚,此时的扩散层表现为铝基体侧平直,镁基体侧呈锯齿状向基体蔓延,如图 2(e)所示。退火温度达到 380 °C 时,由图 2(f)可知,镁基体侧的扩散层呈更明显的锯齿状向基体内部蔓延,且扩散层层数变为 3 层。

图 3 是沿着图 2 中的扫描线进行的复合界面线扫描能谱分析结果。通过线扫描能谱分析图可以直观观察到复合界面化学成分变化情况。异种金属轧制复合界面的线扫描结果通常有“X”型和“H”型两类,“X”型线扫描结果表示两侧基体原子在复合界面处发生了交叉扩散;“H”型线扫描结果表示两侧基体原子在复合界面处的扩散已经达到饱和,并有一定的金属间化合物生成,在复合界面发生了相变转化。轧制态的线扫描结果如图 3(a)所示,此时“X”型的线扫描结果两条交叉线重叠部分较多,横向尺寸较小,此时复合界面两侧的镁铝原子已经发生扩散,扩散尺寸约为 6.70 μm,MgAZ31/Al(1A99) 复合板为热轧扩散态复合板。结合线扫描结果图 3(b)可知,220 °C 退火后“X”型较轧制态的横向尺寸增大,表明经此退火条件处理后受激活原子数量进一步增加,镁铝原子在复合面进一步扩散。图 3(c)中,经 260 °C、60 min 退火条件处理后的线扫描结果与 220 °C、60 min 退火条件处理后的线扫描结果出现明显差别,2 条交叉线的重合部分减少为一点,横向尺寸进一步增大,变为标准“X”,扩散尺寸和扩散层的厚度分别约为 7.80 μm 和 4.30 μm。300 °C 退火处理后的线扫描结果如图 3(d)所示,可知此时的扩散尺寸约为 15.70 μm,线扫描结果已经完成了“X”型向“H”型的转化,此时扩散层的厚度进一步增大,约为 15 μm。由温度 340 °C、380 °C 时的线扫

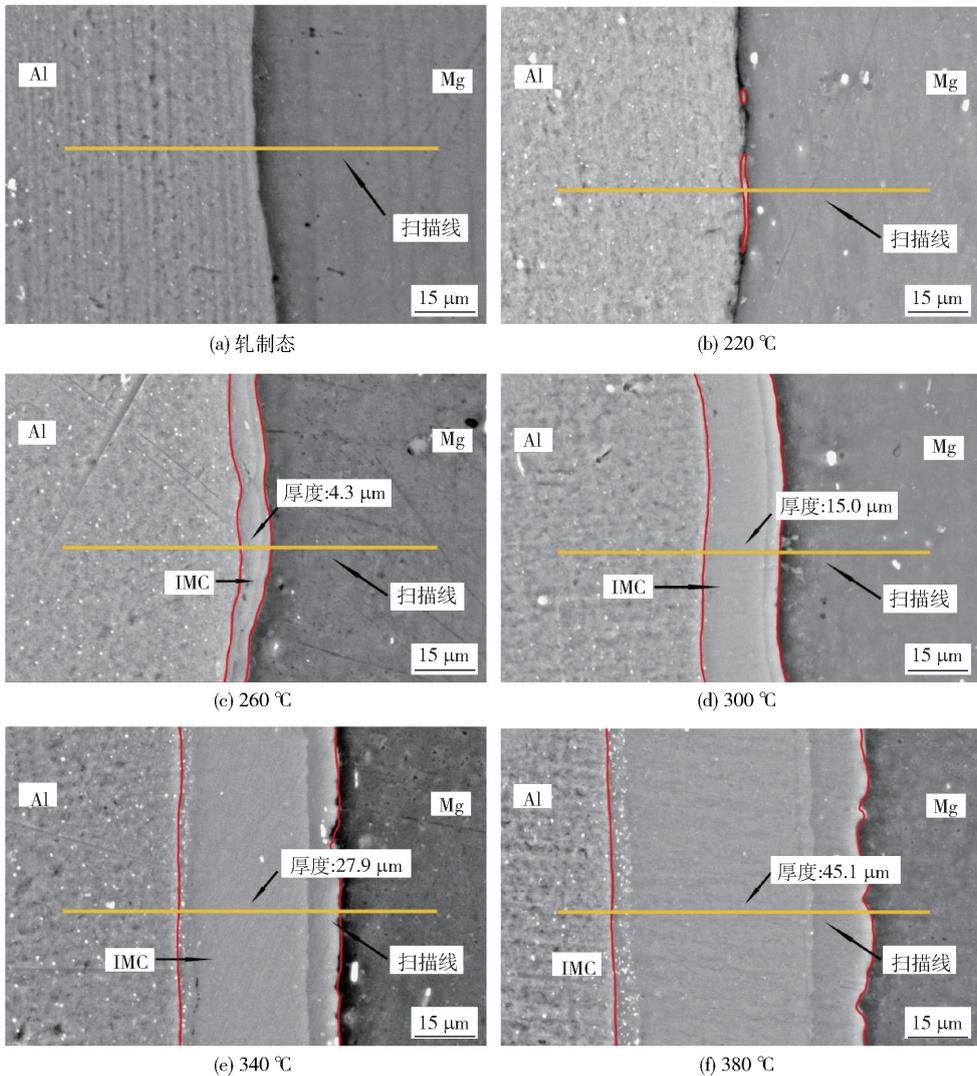


图 2 轧制复合层微观组织结构

Fig. 2 Microstructure of roll-bonding layer

描结果图 3(e)、图 3(f) 可知,此时的扩散尺寸分别约为 $31.90\ \mu\text{m}$ 、 $50.05\ \mu\text{m}$,扩散层的厚度分别约为 $27.90\ \mu\text{m}$ 、 $45.10\ \mu\text{m}$ 。由线扫描结果可以清晰地看出温度对复合界面组织的影响,即退火温度是决定复合面扩散组织能否生成的关键因素,并且随着退火温度由 $220\ ^\circ\text{C}$ 升高至 $380\ ^\circ\text{C}$,扩散层的厚度也在不断增加。

图 4 为 $220\sim 380\ ^\circ\text{C}$ 退火过程中扩散层厚度变化曲线,扩散层厚度呈抛物线增长,可以观察到扩散层厚度从 $1.80\ \mu\text{m}$ 逐渐增加到 $45.10\ \mu\text{m}$,且随着退火温度的增加,扩散层的生长速率逐渐增大。这是由于随退火温度升高,复合界面处镁、铝原子获得的能量逐渐增多,受激活的原子数量更多,原子的运动

更剧烈,运动半径更长。由此也验证了复合板在轧后退火过程中基体两侧原子会不断向另一侧扩散迁移,发生反应生成新相从而实现第二次连接,最终表现为扩散层的厚度随退火温度升高不断增加。这与不同退火温度条件下轧制复合界面组织特征相吻合。

2.2 退火温度对复合材料力学性能影响

将不同退火温度下的拉伸试样通过万能力学试验机进行拉伸测试,试样保温时间为 $60\ \text{min}$,退火温度分别为 $220\ ^\circ\text{C}$ 、 $260\ ^\circ\text{C}$ 、 $300\ ^\circ\text{C}$ 、 $340\ ^\circ\text{C}$ 及 $380\ ^\circ\text{C}$,对每种条件下的试样取 3 组进行测试,然后取其平均值,试验结果如图 5 所示。MgAZ31/Al(1A99) 轧制复合板的拉伸性能与不同退火温度下轧制复合界面

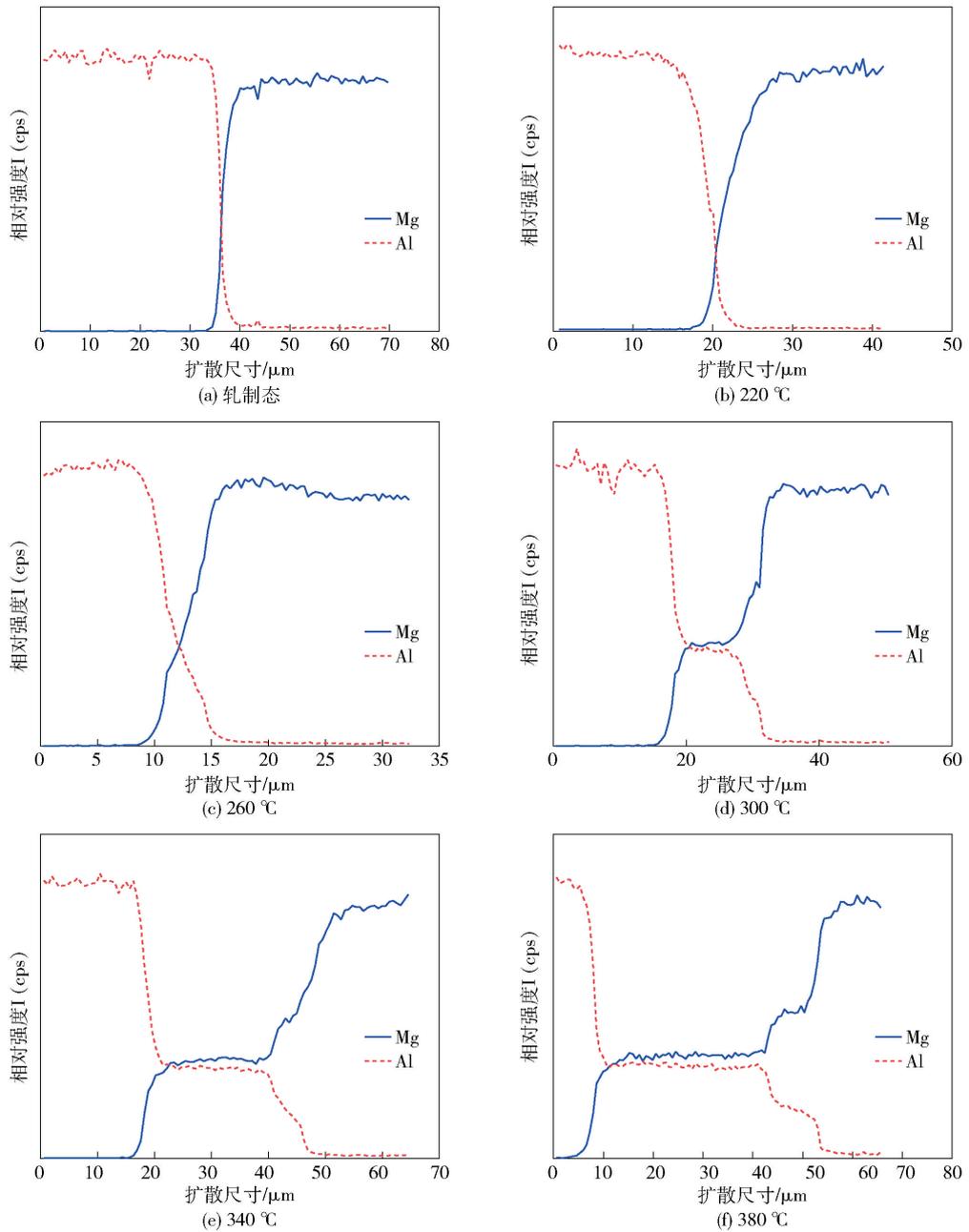


图3 不同退火条件下轧制复合面 EDS 线扫描结果

Fig.3 EDS line scanning results of rolle-bonding layer under different annealing conditions

的扩散组织之间存在紧密的联系,由图 5 可知,试件的变形量随退火温度的升高先变大后减小。经 220 °C 退火后,试件的最大抗拉强度为 203.24 MPa,应变为 0.034;经 260 °C 退火后,试件可承受的最大抗拉强度约为 184.35 MPa,应变为 0.046,表明试件的加工硬化进一步减小,塑性较之前得到了进一步提高。当退火温度升高到 300 °C 时,试件可承受的最大抗拉强度为 272.35 MPa,应变为 0.059,此

时试件的综合力学性能达到最佳,故选 300 °C 为最佳退火温度。退火温度为 340 °C 时,有较多的镁铝间脆性化合物堆积在复合界面,这对试件的拉伸性能造成了不利影响,使得试件可承受的最大抗拉强度下降到 133.42 MPa,应变为 0.008。当退火温度为 380 °C 时,试件可承受的最大抗拉强度减小为 149.77 MPa,应变为 0.030。

综上所述,当退火温度低于 300 °C 时,即复合界

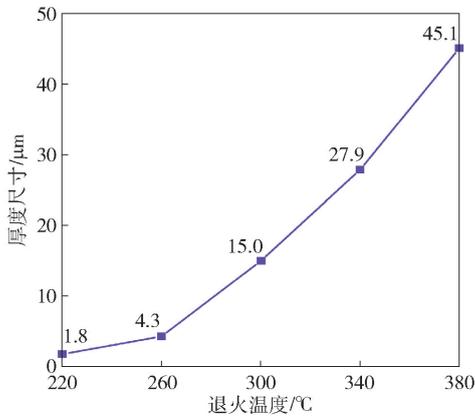


图4 不同退火条件下扩散层厚度变化曲线

Fig. 4 Variation curve of diffusion layer thickness under different annealing conditions

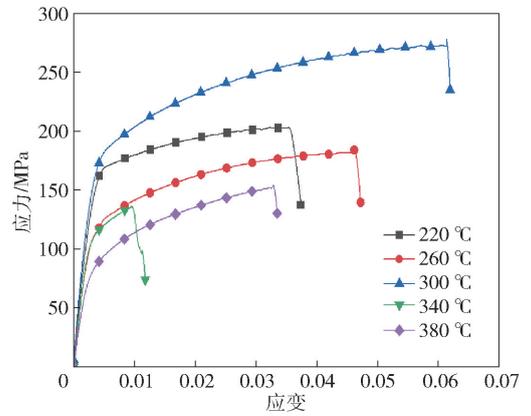


图5 不同退火条件下复合材料应力-应变曲线图

Fig. 5 Stress-strain curves of composites under different annealing conditions

面扩散层厚度尺寸小于 $15\ \mu\text{m}$ 时,加工硬化消失导致的试件强度下降是试件拉伸应力变小的主要原因,但当退火温度升高到 $300\ ^\circ\text{C}$ 之后,即扩散层厚度大于等于 $15\ \mu\text{m}$ 时,脆性化合物的堆积是导致试件最大抗拉强度变小的主要原因^[20]。

2.3 退火温度对断口组织形貌影响分析

图6为不同退火温度下制备的拉伸试样在拉伸试验结束后镁基体侧拉伸断口形貌。在上述拉伸试验中,镁基体在不同负荷时均存在断裂现象,故利用

SEM对镁基体断口形貌进行观测。由相关研究^[21-25]可知,由于轧制后复合板材内存在大量的残余应力,以及过度的加工硬化会导致材料的脆性增加,使得基体的断裂形式会更加倾向于脆性断裂。

由图6(a)所示,退火温度为 $220\ ^\circ\text{C}$ 时,断口表面较为平整,此时镁基体的断裂倾向于脆性断裂,这与拉伸试验中 $220\ ^\circ\text{C}$ 时试件的塑性较差的试验结果一致。退火温度为 $260\ ^\circ\text{C}$ 时,镁基体的断口形貌依旧较为平整,但出现了河流状纹理和极少量韧窝的

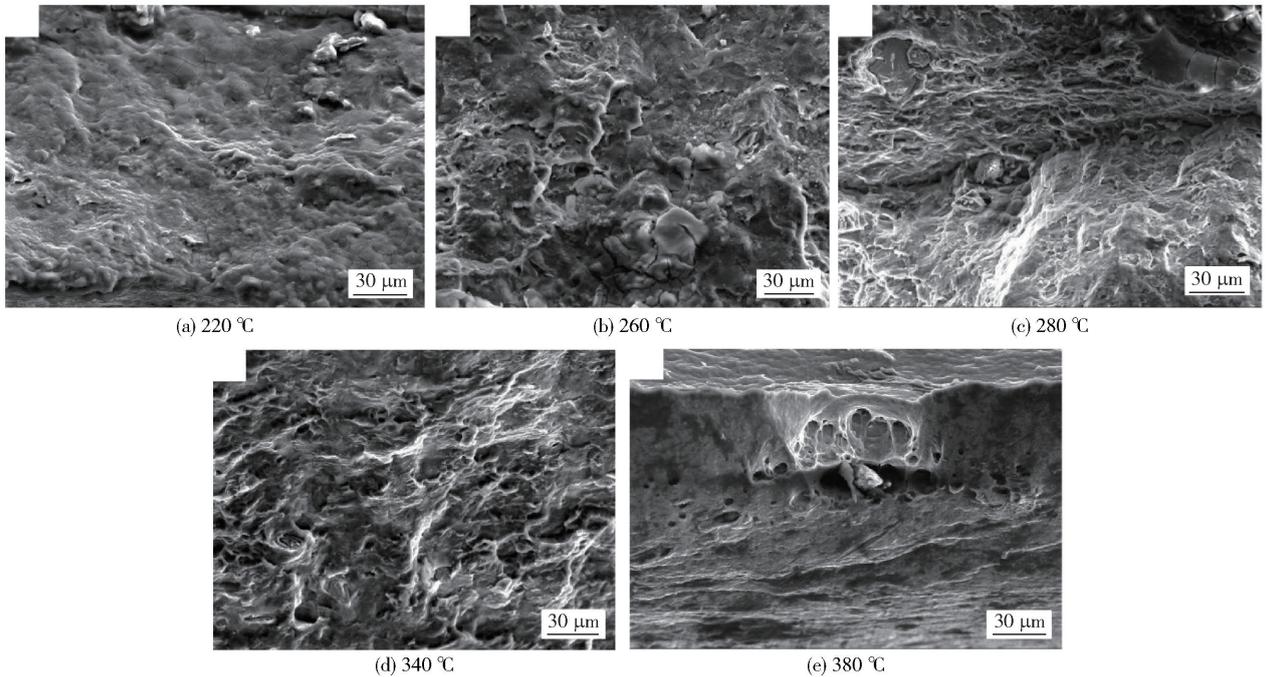


图6 不同退火温度下镁基体侧断口显微组织

Fig. 6 Microstructure of fracture on magnesium matrix side at different annealing temperatures

断口形貌,试件的镁基体表现出解理断裂的形式。当退火温度为 300 ℃时,断口处出现密集的韧窝,说明镁基体的断裂形式向塑性断裂转变,镁基体的塑性较之前得到增强。当退火温度升到 340 ℃时,韧窝数量较之前又有增加,且韧窝形状也更圆润,表明镁基体的塑性较之前又有提高。退火温度为 380 ℃时,断口表面处除了小韧窝,还出现了大而深的窝

坑。在断裂条件相同时,韧窝尺寸越大,表示材料的塑性越好,表明在此条件下的镁基体塑性得到了进一步提高^[26-28]。

为分析拉伸试验中复合板材因镁铝基体变形率差异而导致复合界面剥离现象,对剥离界面的组织形貌进行分析,图 7 为镁侧剥离界面形貌图,表 3 为图 7 剥离界面特征区域 EDS 点扫描检测结果。

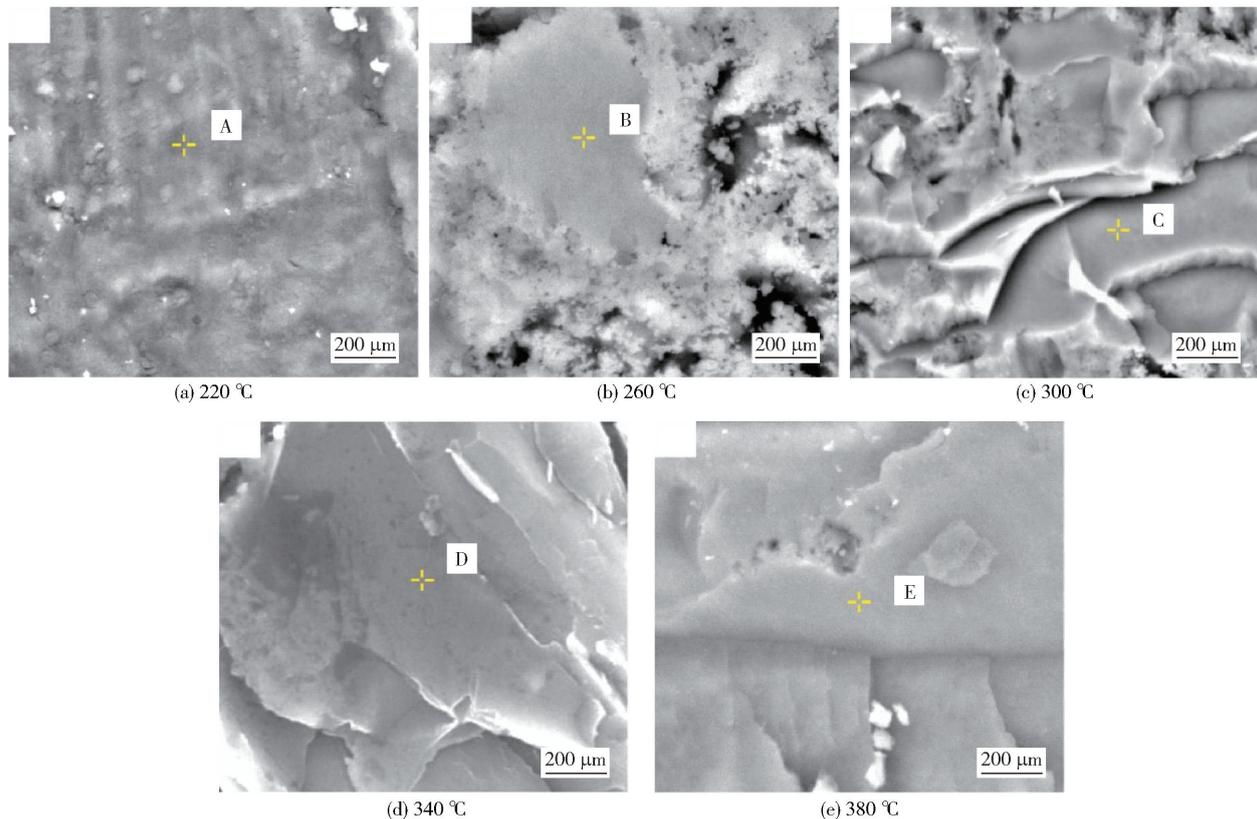


图 7 不同退火温度下镁侧剥离面形貌

Fig. 7 Morphology of magnesium side peel surface at different annealing temperatures

表 3 断口不同位置处的元素成分

Table 3 Elemental composition at different positions of the fracture

位置	物质的量分数/%	
	Mg	Al
A	92.4	7.6
B	42.3	57.7
C	41.72	58.28
D	40.7	59.3
E	32.5	67.5

220 ℃退火的试件拉伸后镁侧剥离界面形貌如

图 7(a) 所示,结合镁侧剥离面组织形貌图和 EDS 点扫描结果可知,在 220 ℃较低退火温度下复合界面没有生成连续的镁铝间化合物。由图 7(b)可知,镁侧剥离面形貌变为平整的岛屿状和不连续的絮状组织,结合 EDS 点扫描结果,此时镁侧剥离面处 Mg、Al 元素分别约为 42.3% 和 57.7%。结合图 7(b) 中点 B 的物相成分和 2.1 的试验结果可知,此时镁侧剥离面物相为 Mg_2Al_3 相。300 ℃退火条件下镁侧剥离面的形貌如图 7(c) 所示,断口上分布着较多撕裂脊和微小的韧窝,表明复合面的断裂形式为准解理断裂,表 3 的 EDS 检测结果表明,剥离面上点 C 由 41.72% 的 Mg 和 58.28% 的 Al 组成,表明 300 ℃时断口的物相为 Mg_2Al_3 相,上述结果表明此

时断裂发生在靠近铝基体一侧的 Mg_2Al_3 层。当退火温度升高到 340 °C 时, 剥离面的整体形貌变得更加光滑平整, 不存在凹坑, 撕裂脊的数量也减少, 断裂形式已完全演化为脆性断裂, 结合表 3, 断口处物相组成仍为 Mg_2Al_3 相, 此时试件的抗拉强度减小的主要因为镁铝间脆性化合物的堆积。当退火温度为 380 °C 时, 镁侧剥离界面的形貌变为平整光洁的平面, 呈现出典型的脆性断裂形貌, 此时点 E 的 EDS 点扫描结果为 32.5% 的 Mg 和 67.5% 的 Al, 即此时剥离界面的物相成分仍为 Mg_2Al_3 相, 结合拉伸试验结果, 此条件下的抗拉强度较其他退火条件进一步减小。

3 结论

1) 验证了退火温度是决定复合面扩散组织能否生成的关键因素, 并且随着退火温度由 220 °C 升高至 380 °C, 扩散层的厚度也在不断增加, 形貌变得均匀。

2) 在低于 300 °C 的退火温度下, 复合界面扩散层厚度小于 15 μm 时, 加工硬化消失导致试件强度下降, 从而使试件的拉伸应力减小; 而当退火温度升高到 300 °C 以上, 扩散层厚度大于等于 15 μm 时, 脆性化合物的堆积成为导致试件抗拉强度减小的主要原因。

3) 在 220 ~ 300 °C 温度范围内, 退火温度越高, 镁基体断口的韧窝数量越多, 镁基体塑性越好。

[参考文献]

- [1] 许风光, 刘焱, 马文江, 等. 退火工艺对 Zn/AZ31/Zn 复合板材界面微观结构及力学性能的影响[J]. 材料工程, 2020, 48(8): 142 - 148.
- [2] 郑小平, 李亚岚, 禹鑫磊, 等. 退火工艺对轧制半固态坯料组织性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(9): 3451 - 3458.
- [3] Yang, Xiaojie, Chang, et al. Effect of Fast Multiple Rotation Rolling on Microstructure and Properties of Ti6Al4V Alloy [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2021, 28(2): 1 - 6.
- [4] 裴梦雨, 孙有平, 何江美, 等. 退火时间对轧制 Mg-Al-Ca-Mn-Zn 镁合金组织及阻尼性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2024, 45(1): 78 - 86.
- [5] 方德俊, 孙有平, 何江美, 等. 退火工艺对轧制态 Mg-Al-Ca-Mn-Zn 合金组织和力学性能影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(4): 488 - 493.
- [6] 张冠星, 龙伟民, 沈元勋, 等. 梯度三明治银基钎料复合界面组织及生长动力学研究[J]. 材料科学与工艺, 2022, 30(3): 28 - 35.
- [7] B. T, P. P. B. Superior strength-ductility synergy of a cost-effective AlCrFe₂Ni₂ high entropy alloy with heterogeneous microstructure processed by moderate cryo-rolling and annealing[J]. Materials Letters, 2022, 326.
- [8] Sebastian S, Dan G S, Satheesh S K, et al. Effect of rolling and annealing temperature on the mechanical properties of CrMnFeCoNi high-entropy alloy [J]. Materials Chemistry and Physics, 2021, 270.
- [9] 方德俊, 孙有平, 何江美, 等. 退火工艺对轧制态 Mg-Al-Ca-Mn-Zn 合金组织和力学性能影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(4): 488 - 493.
- [10] 熊桑, 尚郑平, 高欢, 等. 退火工艺对铜/铝轧制复合板组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51(12): 56 - 60.
- [11] 梅瑞斌, 史现利, 包立, 等. 多道次热辊轧制 Al/Mg 层状复合板材结合面特性[J]. 复合材料学报, 2022, 39(7): 3485 - 3497.
- [12] Umar M B, 李莎, 刘志栋, 等. 热轧镁/铝复合板的组织演变与拉伸性能研究[J]. 热加工工艺, 2023, 52(14): 71 - 75.
- [13] 郑小平, 李亚岚, 禹鑫磊, 等. 退火工艺对轧制半固态坯料组织性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(9): 3451 - 3458.
- [14] 范文杰, 朱绍珍, 周龙海, 等. 轧制和退火对爆炸焊接 Ag/Ti 复合板组织和力学性能的影响[J]. 贵金属, 2023, 44(4): 69 - 73, 84.
- [15] 李小兵, 祖国胤, 王平. 退火温度对异步轧制铜/铝复合板界面组织及力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(5): 64 - 66.
- [16] 李眉娟, 刘晓龙, 刘蕴韬, 等. 累积叠轧 Mg/Al 多层复合板材的组织演变及力学性能[J]. 金属学报, 2016, 52(4): 463 - 472.
- [17] XU Fengguang, LIU Yao, MA Wenjiang, et al. Effect of annealing process on interfacial microstructure and mechanical properties of Zn/AZ31/Zn clad sheets. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(8): 142 - 148.
- [18] Zhang Y, Lai F, Qu S, et al. Effect of ultrasonic surface rolling on microstructure and rolling contact fatigue behavior of 17Cr₂Ni₂MoVNb steel [J]. Surface Coatings Technology, 2019, 366: 321 - 330.
- [19] Qiong L, Yaozha L, Chi Z, et al. Microstructure evolution and tensile properties of as-rolled Ti-Mo-Si composite [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 901.

- [20] Sasan F, Behzad S B, Sugrib S K, et al. Effect of split sleeve cold expansion on fatigue and fracture of rolled AZ31B magnesium alloy [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023, 123.
- [21] Wang H, Pan Y, Jiang H, et al. La-Doped Mg-Al Composite Oxides: Efficient Catalysts for the synthesis of Diethyl Carbonate via Transesterification of Ethylene Carbonate with Ethanol [J]. *Chemistry Select*, 2024, 9.
- [22] Xin A Z, Feng L, Tao W N, et al. Optimization mechanism of matrix microstructure evolution on strength-plasticity of Mg/Al composite plate during hard-plate accumulative roll bonding [J]. *Journal of Central South University*, 2024, 31 (2): 369 – 383.
- [23] Wangtao L, Qiancheng Z, Huayu Z, et al. Gold/Mg-Al mixed oxides catalysts for oxidative esterification of methacrolein: effects of support size and composition on gold loading [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2023, 64: 128 – 138.
- [24] 李敬, 杨跃辉, 张晓娟, 等. 退火温度对温轧高锰钢组织性能的影响 [J]. *材料热处理学报*, 2024, 45 (1): 131 – 137.
- [25] Fengqin G, Ligu W, Yan C, et al. Efficient synthesis of ethylene carbonate via transesterification of ethylene glycol with dimethyl carbonate over Mg₂Al_{1-x}Ce_xO composite oxide [J]. *Applied Catalysis A, General*, 2023, 662.
- [26] 梁鲁清. 大规格高镁铝合金扁锭熔铸关键技术与实践 [J]. *有色冶金节能*, 2017, 33 (6): 10 – 15.
- [27] 任晋. Ca(II)-Mg(II)-Glu²⁻-CO₃²⁻-H₂O 体系热力学平衡分析 [J]. *湿法冶金*, 2020, 39 (3): 241 – 244.
- [28] 吴炳南, 高立华, 高松华. 退火处理对 P 型 ZnO 薄膜光电性能影响的研究 [J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2014 (6): 15 – 17.

Effect of annealing temperature on microstructure and properties of Mg/Al rolle-bonding layer

ZHANG Peng^{1,2}, DING Yunlong^{1,2*}, MA Yuhan³, YING Jun^{1,2}, HAN Bing^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China;

2. Liaoning Key Laboratory of Special Machining for Complex Work Piece Surface, Anshan 114051, China;

3. Shandong TaiKai Discnector CO., LTD., Tai An 271000, China)

Abstract: The effects of annealing temperature (220 ~ 380 °C) on microstructure, mechanical properties, tensile fracture morphology and phase composition of MgAZ31 and Al (1A99) rolle-bonding layers were studied by scanning electron microscopy (SEM), optical microscopy (OM), tensile testing machine and X-ray diffraction (XRD). The results show that with the increase of annealing temperatures, magnesium and aluminum atoms gradually diffuse and migrate, and the thickness of diffusion layer increases, from 1.80 μm at 220 °C to 45.10 μm at 380 °C, the growth rate of diffusion layer increases gradually. When the annealing temperature reaches 300 °C, dense dimples appear at the fracture, and the fracture type of magnesium matrix changes to plastic fracture. The plasticity of the magnesium matrix is enhanced. The phase at the fracture surface is Mg₂Al₃ phase, and the tensile strength reaches a maximum of 272.35 MPa, At this time, the comprehensive mechanical properties of the specimen reach the best, therefore, 300 °C is the best annealing temperature.

Key words: annealing temperature; rolle-bonding layer; diffusion; microstructure; mechanical properties; magnesium-aluminum composite

