

不同轧制压下率铝/钢复合板界面及断裂分析

邱 谨¹ 苗 鹏¹ 李元东^{1,2} 周宏伟^{1,2} 曹 驰^{1,3} 毕广利^{1,2}

(1.兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室; 2.兰州理工大学有色金属合金及加工教育部重点实验室; 3.兰州理工大学温州泵阀工程研究院)

摘 要 对液-固双辊铸轧法制备的铝/低碳钢复合板经 450 °C 退火 1.5 h 后进行三道次轧制处理,每道次轧制处理后复合板压下率分别为 25%、35% 和 45%。利用 SEM 和 EDS 观察界面组织并分析元素分布,通过原位拉伸试验观察复合板失效过程,测试其抗拉强度和伸长率。结果发现,退火态复合板界面处存在连续的扩散层,轧制态复合界面处扩散层在压力作用下破碎成块状,且压下率越大,扩散层厚度及其破碎的块状尺寸越小。25% 和 35% 压下率复合板界面处存在明显裂纹及孔洞,45% 压下率复合板界面处裂纹消失。退火态复合板 A356 铝合金侧主裂纹源于共晶 Si 颗粒和偏析共晶 Si 颗粒处,45% 压下率复合板的主裂纹是由铝基体处的小裂纹迅速扩展而形成。45% 压下率复合板具有最好的界面结合品质、良好的协调变形能力,抗拉强度达 441 MPa,且伸长率为 3.03%。

关键词 铝/钢复合板; 压下率; 界面组织; 力学性能

中图分类号 TG339; TG146.21; TG146.1⁺1

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.06.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Interface and Fracture Analysis of Al/steel Clad Plate under Different Reduction Rates

Qiu Jin¹, Miao Peng¹, Li Yuandong^{1,2}, Zhou Hongwei^{1,2}, Cao Chi^{1,3}, Bi Guangli^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology; 2.Key Laboratory of Nonferrous Metal Alloys and Processing, Ministry of Education, Lanzhou University of Technology; 3.Wenzhou Pump and Valve Engineering Research Institute of Lanzhou University of Technology)

Abstract: The aluminum/low carbon steel clad plate were fabricated by liquid-solid twin-roll casting, after annealing at 450 °C for 1.5 h and rolled for three passes. After each pass rolling treatment, the reduction rate of the clad plates reaches 25%, 35% and 45%, respectively. The microstructure was observed and the element distribution of the interface was analyzed by SEM and EDS. The failure process of the clad plates was observed by in-situ tension, and the tensile strength and elongation were tested. The results indicate that there exists a continuous diffusion layer at the interface of the annealed clad plates, and the diffusion layer is broken into blocks under the pressure of the twin roll. Moreover, the greater the reduction rate is, the thinner the diffusion layer is, and the smaller the blocks is. Obvious gaps and holes are observed at the interface with the reduction rate of 25% and 35%, which disappear when reduction rate reaches 45%. The main cracks on the A356 side of annealed clad plates are originated from eutectic silicon particles and segregated eutectic silicon particles, and that of clad plates with reduction rate of 45% are formed by the rapid propagation of small cracks in the aluminum matrix. The clad plates with reduction rate of 45% exhibit the optimal bonding strength of interface and desirable ability of coordinated deformation, where the tensile strength reaches 441 MPa, and the elongation is 3.03%.

Key Words: Aluminum/steel Clad Plates, Reduction Rate, Interface Microstructure, Mechanical Properties

双金属复合板是由两种具有不同物理及力学性能的金属组成的复合材料^[1]。与单金属板相比,双金属复合板综合了两种金属的优点,在航空、航天等领域有着

广泛的应用^[1~4]。低碳钢作为常用的钢材,具有综合性能好、应用范围广以及碳含量适中等特点,但耐腐蚀性差、密度大等缺点限制了其进一步应用^[5]。铝合金具有良

收稿日期:2022-02-11

基金项目:甘肃省重点研发计划基金资助项目(17YF1GA021)

第一作者简介:邱谨,男,1988 年出生,博士研究生,兰州(730050),E-mail:649389807@qq.com

通信作者:李元东,男,1971 年出生,教授,兰州(730050),E-mail:liy_d_lut@163.com

引用格式:邱谨,苗鹏,李元东,等. 不同轧制压下率铝/钢复合板界面及断裂分析[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(6):688-694.

QIU J, MIAO P, LI Y D, et al. Interface and fracture analysis of Al/steel clad plate under different reduction rates[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(6):688-694.

好的耐腐蚀性、较高的导热性和较低的密度,但其强度和耐磨性较差。将这两种材料通过一定的工艺组合成复合板,可以综合两种材料的优点,克服其单一使用存在的缺点,扩大材料的使用范围,满足特殊的工作条件。

目前,制造复合板的技术包括铸造^[6]、搅拌摩擦焊接^[7]、爆炸焊接^[8]、轧制^[9]和双辊铸造^[10~12],其中轧制应用最为广泛。与传统轧制技术不同,液-固双辊铸轧技术可以直接利用熔体生产复合板,成本较低、能耗少,对生产空间的要求大幅减少,且由于界面处为液态-固态或液态-半固态反应过程,有利于获得良好的界面品质^[10,13]。MYKHAILO S等^[9]研究表明,扩散层厚度、材料表面粗糙度、钢带预处理以及后续热处理都会对复合带材的性能产生影响,并制备出力学性能最佳的 EN AW-1070 铝/奥氏体不锈钢复合带材,其抗拉强度为 228 MPa,屈服强度为 86 MPa,伸长率可达 48%,疲劳强度为 51 MPa。TRYDIN O 等^[10]采用双辊铸轧法将奥氏体不锈钢带和纯铝结合起来,发现铸轧态复合板界面处存在 3 μm 厚的扩散层,随后进行拉深和轧制处理,发现材料间不会发生分层现象,表明复合板层间结合强度足够高。CHEN G 等^[11]采用水平双辊铸轧工艺成功制备了 409L 不锈钢/AA1100 铝复合板,经 450 $^{\circ}\text{C}$ 下退火 1.5 h 再轧制压下率为 40% 后,其结合强度显著提高,剥离强度达到最大为 28 N/mm。

迄今,运用液-固双辊铸轧技术制备铝/钢复合板时大多采用不锈钢作为基板,对于不同压下率复合板的微观组织、失效机理和力学性能的影响报道较少。本课题选用 A356 铝合金和表面预处理的 Q235 低碳钢板,通过液-固双辊铸轧技术成功制备出铝/低碳钢复合板,然后对复合板进行退火及 3 道次轧制处理,最终复合板压下率达到 45%。借助扫描电镜对不同状态下复合板界面微观形貌及断口形貌进行观察,通过 EDS 定性分析界面成分,进而分析不同状态下复合板的微观结构与力学性能之间的关系,为铝/钢复合板的应用提供借鉴。

1 试验材料与方法

试验材料为 A356 铝合金及 1 mm 厚的 Q235 冷轧钢板。在 Q235 钢板表面进行热浸镀铝-锌层^[14],并切割成 100 mm $\times$ 100 mm $\times$ 1 mm,另外,将 A356 铝锭切成小块待用,化学成分见表 1。

在液-固双辊铸轧前,将热浸镀铝-锌处理后的 Q235 钢板置于 380 $^{\circ}\text{C}$ 的电炉中预热 15 min;将 A356 铝锭小块置于 SG2-7.5-10 井式电阻炉中熔化。温度达到 740 $^{\circ}\text{C}$ 时,用 1% (质量分数) 的 C_2Cl_6 进行精炼、除杂后静置,调整温度至 710 $^{\circ}\text{C}$ 。首先将铝液定量浇覆于预

表 1 Q235 低碳钢板与 A356 铝锭的化学成分
Tab.1 Chemical composition of the Q235 steel plates and

A356 aluminum alloy ingots								%
材料	w_B							
	Si	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	C	Al
Q235	0.35	—	余量	1.40	—	0.30	0.22	—
A356	7.5	0.45	0.2	0.1	0.2	0.2	—	余量

热后的 Q235 基板上,将其一并送入两辊之间,进行液-固铸轧,空冷,液-固双辊铸轧原理见图 1。轧制速度为 6 r/min,两辊间距为 3 mm,辊径为 180 mm,最大轧制压力为 420 kN。铸轧后,将复合板切成 50 mm $\times$ 50 mm 的小块置于马弗炉中,在 450 $^{\circ}\text{C}$ 下退火 1.5 h。随后对退火态复合板进行 3 道次轧制处理,轧制前将复合板在 350 $^{\circ}\text{C}$ 下预热 10 min,每道次轧制后复合板的压下率分别达到 25%、35% 和 45%。

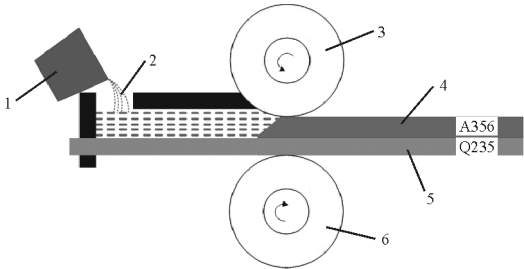


图 1 液-固双辊铸轧过程示意图
Fig.1 Schematic diagram of liquid-solid twin-roll casting process

1. 浇包 2. A356 铝液 3. 上轧辊 4. 复合板 5. Q235 钢板 6. 下轧辊

以轧制方向和复合板的法向所构成的平面作为金相分析的取样面,试样经研磨抛光后,用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀。采用 FEG-450 场发射扫描电镜 (SEM) 和能谱仪 (EDS) 对试样结合界面的微观形貌和元素分布进行观察和分析,并利用 SEM 所装配的原位拉伸仪对不同条件下的复合板进行原位拉伸观察和分析。拉伸试样采用线切割沿复合板的轧制方向截取,经打磨和抛光后使得铝层和低碳钢层厚度相同 (即 0.4 mm),见图 2。使用体积分数为 10% 的高氯酸酒精溶液进行电解腐蚀,腐蚀电压为 18 V,腐蚀时间为 15 s。

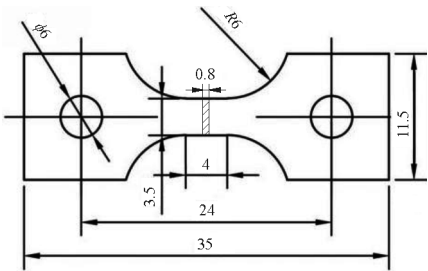


图 2 SEM 原位拉伸试样尺寸图
Fig.2 Dimensions of specimens for SEM in-situ tensile test

2 试验结果与讨论

2.1 A356/Q235 复合板界面元素分析

图 3 为 A356/Q235 复合板界面区 BSED 图像及成分分析结果。从图 3a 看出,退火处理后,在 Q235 钢与 A356 铝合金之间形成了一层比较均匀,宽约 $8.1\ \mu\text{m}$ 的结合层,相比于未退火处理的 ($4.1\ \mu\text{m}$) 增加了 4.0

μm ^[14]。对退火态复合板进行轧制处理,在 25%、35%、45% 压下率时结合层厚度分别为 5.9 、 4.8 、 $3.0\ \mu\text{m}$,发现随着压下率增加,结合层厚度逐渐减小(见图 3b~图 3d),且在轧制过程中金属间化合物出现明显的裂纹。LIU N 等^[6]通过复合铸造与轧制技术结合制备 Al-Mg 复合材料,在不同道次轧制过程中,发现随着轧制道次的增加,Al/Mg 金属间化合物变薄、金属间化合物破碎,经 12 道次轧制,硬脆的金属间化合物层消失。

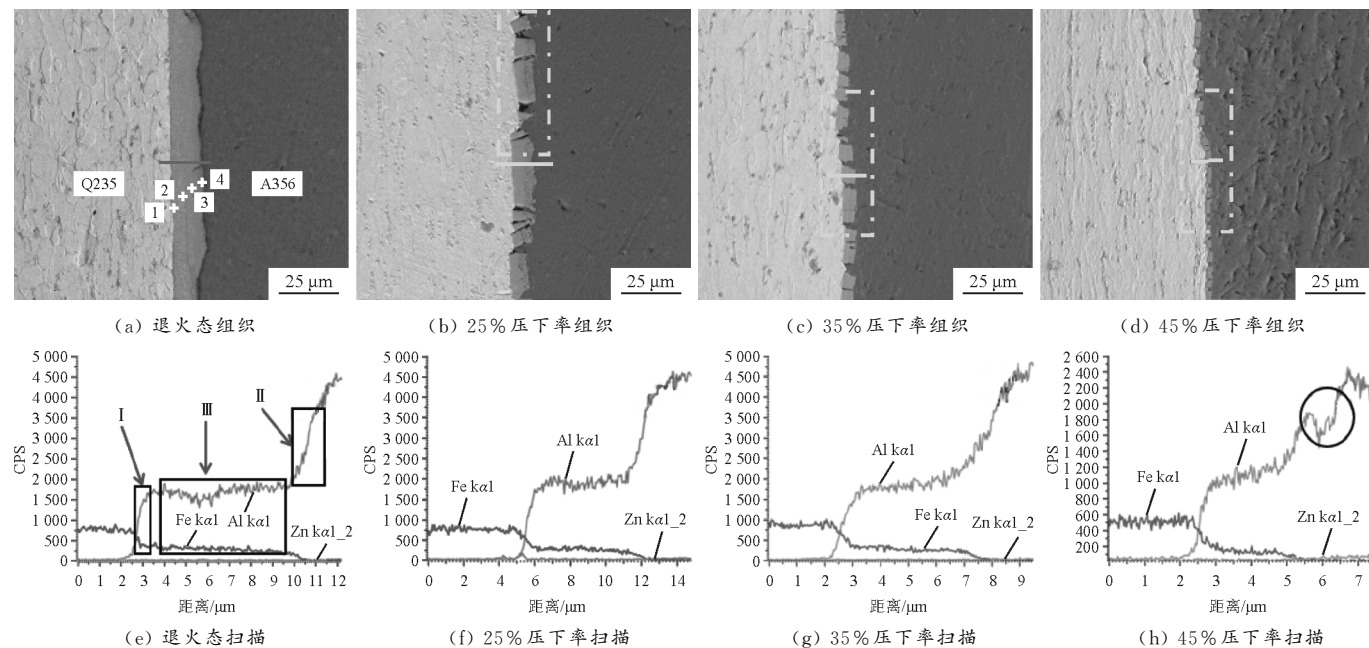


图 3 不同状态下复合板界面区微观组织及线扫描分析结果

Fig.3 Microstructures and linear scanning results of interfacial region in clad plates under different conditions

此外,不同状态下铝/钢复合板界面区 Al、Fe 分布曲线中间段都呈现出台阶状,在 Q235 钢一侧 Fe 含量高,在 A356 铝合金一侧 Al 含量高,见图 3e。在界面附近,Fe 和 Al 含量呈相反的梯度变化,并在对方一侧形成了含量的过渡变化,说明 Fe 和 Al 在合金中发生了互扩散,形成冶金结合。但由于 Fe、Al 互溶度很低^[15],所以 Al 含量迅速从 Q235 基体过渡到扩散层形成一段台阶后又迅速过渡到铝基体(见图 3e 中 I、II、III 区),CHEN G 等^[11]的研究中也存在此现象。扩散层元素分布曲线稳定台阶的形成,表明扩散层内形成了一些稳定的金属间化合物。通过线扫描观察可知,成分在界面处变化可分为 3 个区,Ⅰ区为 Al 含量迅速增加区,Ⅱ区为 Al 与 Fe 在一段距离内成一定比例区,Ⅲ区为 Al 含量快速增加区。随着压下率的增加,各个区发生了不同的改变,Ⅰ区、Ⅲ区的斜率下降,即成分变化速率降低,Ⅱ区距离变短,Ⅲ区的斜率下降要比Ⅰ区快,尤其当压下率为 35%、45% 时更加明显。这是因为在轧制过程中复合板受到轧制力时发生延展,界面金属间化合物塑性差,发生破碎,基体被挤入破碎的间隙位置^[6,16],界面结合形式转变为机械结合与冶金结合的复合形式;350 ℃

预热条件下,Al 侧硬度低、塑性大,在轧制过程中基体 Al 更多地进入破碎的金属间化合物层中,使得在检测过程中出现Ⅲ区斜率下降大于Ⅰ区的现象;另外可能有部分微细的破碎金属间化合物进入 Al 基体,因此图 3h 中圆圈处出现 Al 含量下降,这也是金属间化合物变薄的一种形式。

根据 KOBAYASHI S 等^[17]和 NEWCOMB S B 等^[18]研究可知,铝/钢复合板界面处冶金结合时会形成 Fe_xAl_y 型金属间化合物,通常为 Fe_3Al 、 FeAl 、 FeAl_2 、 Fe_2Al_5 和 FeAl_3 等 5 种相。由于 Al、Fe 的扩散激活能及扩散因子都较高(见表 2),因此在直接接触过程中就会互扩散形成金属间化合物,然而 FeAl 和 Fe_3Al 相在 $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ 以上才可能形成、生长^[17]。试验中的铸轧、退火过程中都未达到此高温,铸轧后退火及每道次轧制前的低温预处理均不会形成 FeAl 和 Fe_3Al 相,即在退火

表 2 Fe、Al 元素扩散因子 D_0 和扩散激活能 Q

Tab.2 Diffusion factors D_0 and activity energy Q of Fe and Al elements

元素	$D_0/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$Q/(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$
Al	1.7×10^{-4}	1.42×10^5
Fe	4.8×10^{-5}	2.50×10^5

及轧制时复合板扩散层中最有可能形成 FeAl_2 、 Fe_2Al_5 和 FeAl_3 相。张先满等^[19] 总结 Al/Fe 界面反应发现, Al、Fe 原子相互扩散, 形成 Fe_2Al_5 (η 相, 临近基体) 和少量的针状 FeAl_3 ($\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$, θ 相, 临近 Al 层), 这主要是因为 FeAl_3 、 Fe_2Al_5 形成的热力学自由能较小, Fe_2Al_5 沿 c 轴方向有 30% 的空位使得 Al 原子可以快速地扩散到界面前沿, 因此 Fe_2Al_5 成为扩散层主要金

属间化合物。对图 3a 中的点 1、2、3、4 位置进行 EDS 点扫描分析, 检测结果见图 4。点 2、3 的 Al、Fe 摩尔比接近 Fe_2Al_5 化合物的 Al、Fe 摩尔比 (71.4 : 28.6), 因此可知扩散层主要为 Fe_2Al_5 金属间化合物, 点 1 接近钢侧, 因此 Fe 含量增加, 点 4 接近 Al 侧, 所以 Al 含量增加, 这主要是由于点 1、4 临近基体, 在检测时其成分受两侧基体影响所致。

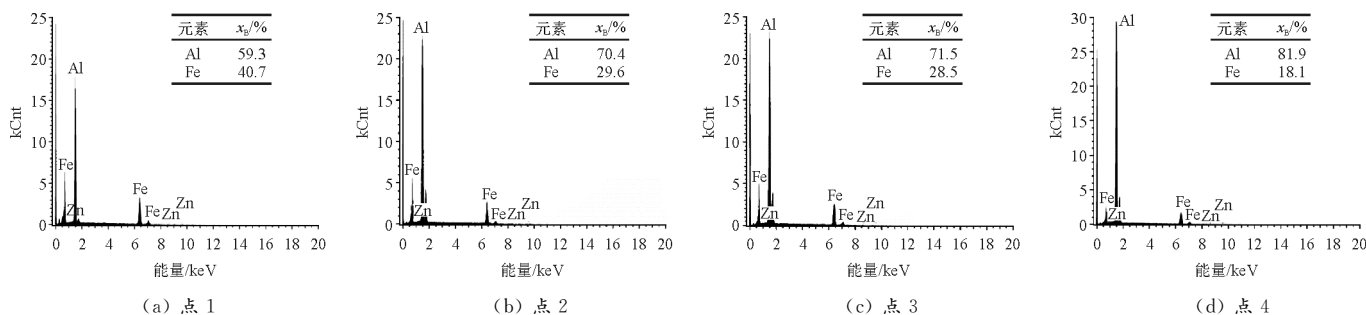


图 4 A356/Q235 复合板退火态扩散层点扫描结果

Fig.4 Point scanning results of diffusion layer in annealed A356/Q235 clad plates

2.2 A356/Q235 复合板界面形貌

图 5 为图 3b~图 3d 的局部放大和金属间化合物长度统计。可以看出, 在轧制力作用下连续的扩散层被轧碎成块状, 随着压下率增加, 扩散层由长条状块体变成细小的颗粒, 且棱角钝化。这是由于金属间化合物硬度高、脆性大、塑性差, 在轧制力的作用下不易延展变形, 容易断裂破碎^[12], 形成局部脆性断口。当压下率为 25% 时 (见图 5a), 扩散层颗粒平均长度为 $14.3\ \mu\text{m}$, 颗粒间有明显的裂纹, 仅有少量基体填充到裂纹处, 存在约 $3\ \mu\text{m}$ 的孔洞。这是因为初次轧制时连续

化合物破碎与基体的延展同时发生。基体连续延展, 金属间化合物塑性变形量较基体小, 以裂纹的形式进行延展, 且基体不能及时流动到裂纹处, 因此存在较大的孔洞性裂纹。当压下率达到 35% 时 (见图 5b), 扩散层进一步破碎, 其平均长度为 $8.6\ \mu\text{m}$, 在轧制过程中软基体大量填充到裂纹处, 孔洞尺寸减小到 $1\ \mu\text{m}$ 内。当压下率为 45% 时 (见图 5c), 结合层破碎成细小颗粒, 其平均长度为 $5.6\ \mu\text{m}$, 软基体将细小颗粒间的间隙完全填充, 形成软硬相间机械结合与冶金结合的复合结合形式, 无法观察到裂纹。

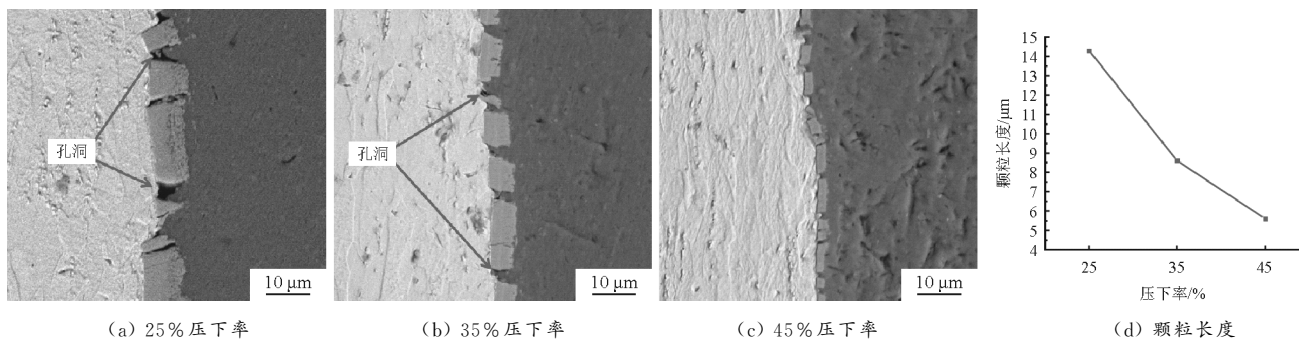


图 5 不同压下率复合板界面组织及颗粒长度

Fig.5 Interfacial microstructure and particle length of clad plates under different reduction rates

2.3 原位拉伸过程

图 6 为退火态复合板原位拉伸过程 A356 铝合金侧 SEM 形貌。在拉伸初期, 可看到较大的共晶 Si 破裂、较小的共晶 Si 颗粒发生相对移动、剪切带、微裂纹以及由塑性变形导致的“沟壑”, 见图 6a。随着拉伸进行, 剪切带更加明显可见, 位于共晶 Si 颗粒处的微裂纹延伸、扩展形成小裂纹, 小裂纹扩展、聚集形成较大的裂纹, 见图 6b。随后, 较大的裂纹进一步深化和扩展, 最

终发展成为主裂缝, 见图 6c。随着载荷的进一步作用, 主裂纹会与其扩展方向上的小微裂纹连接。而当主裂纹遇到塑性良好的铝基体时, 铝基体会起到松弛应力的作用阻碍主裂纹扩展, 即发生裂纹钝化现象, 在钝化区域前端形成剪切带, 见图 6d 和图 6e。在载荷的继续作用下, 剪切带深化、开裂, 主裂纹沿强度相对较低的 Al-Si 晶界扩展。随后, 主裂纹不断吞并在其扩展方向上的小微裂纹, 并最终贯穿整个试样, 见图 6f。此外, 该

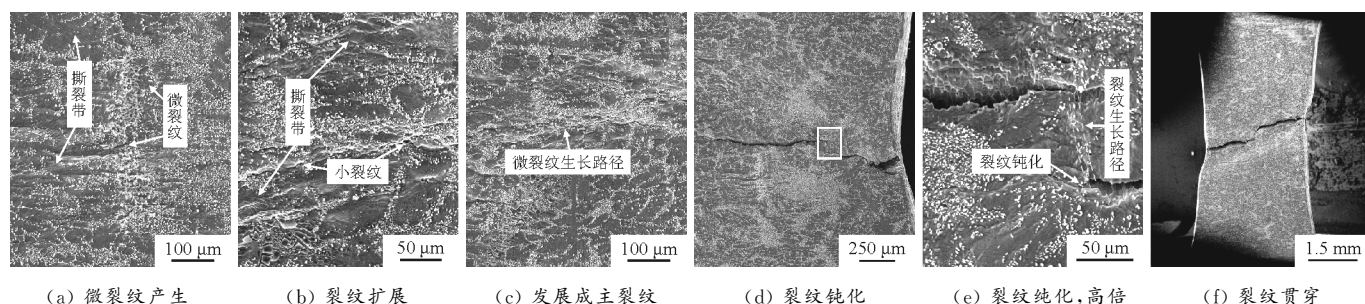


图 6 退火态复合板原位拉伸过程 A356 铝合金侧 SEM 形貌

Fig.6 SEM morphologies of annealed A356 alloy clad plates during in-situ tensile process

试样有明显的颈缩现象,表明退火态复合板具有一定的塑性变形能力。

图 7 为 45% 压下率复合板原位拉伸过程 A356 铝合金侧 SEM 形貌。45% 压下率复合板的内应力最大,在拉伸初始,偏析共晶 Si 颗粒及 Al 基体处出现较多小微裂纹,见图 7a 和图 7b。随着位移不断增加,当拉应力即将达到最大值时,许多小裂纹出现在铝基体上且穿过铝基体沿裂纹尖端方向迅速扩展,见图 7c;当拉应力

达到最大值时,位于铝基体上的小裂纹与其附近的小裂纹合并发展成为主裂纹,主裂纹迅速扩展,见图 7d;当拉应力开始由最大值下降时,主裂纹在一瞬间贯穿整个试样,A356 铝合金完全断开,见图 7e。观察断开的复合板,可见 A356 铝合金、Q235 钢两侧的断裂面在同一平面上,见图 7f,可知 45% 压下率时 A356 铝合金和 Q235 钢的性能有较好的匹配性,钢层能够在抗拉性能上对铝合金起到足够增强效果。

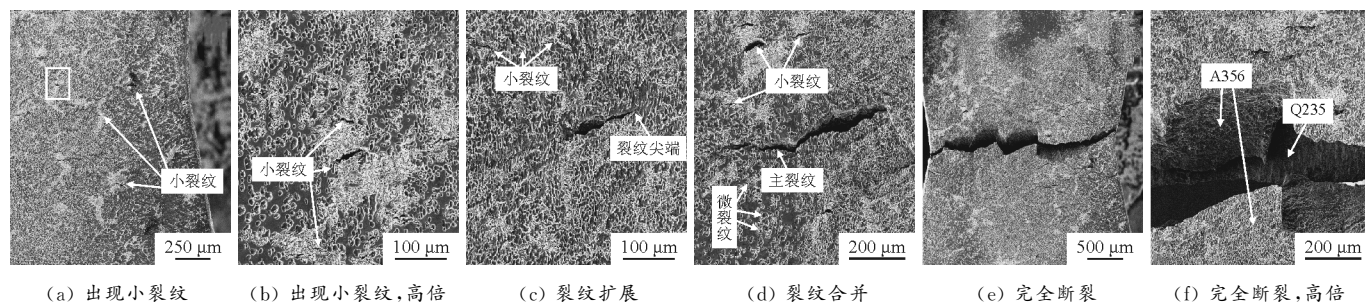


图 7 45% 压下率复合板原位拉伸过程 SEM 形貌

Fig.7 SEM morphologies of clad plates under 45% reduction rate during in-situ tensile process

2.4 力学性能及断口形貌

图 8 为不同状态下复合板的拉伸断口 Al/钢界面处 SEM 形貌。图 9 为不同状态下复合板的力学性能。可以看出,在退火态复合板拉伸断口 Q235 钢层可见解理面、撕裂棱和许多直径较小、深度较深的韧窝,A356

铝合金侧断口可见撕裂棱和大量不同直径的韧窝,两层材料的断裂方式都为韧性断裂和脆性断裂的混合断裂,见图 8a。退火态复合板伸长率较高,为 4.86%,抗拉强度较低,为 315.7 MPa,表明退火态复合板具有良好的协调变形能力,界面结合较好,但其抗拉强度较低。

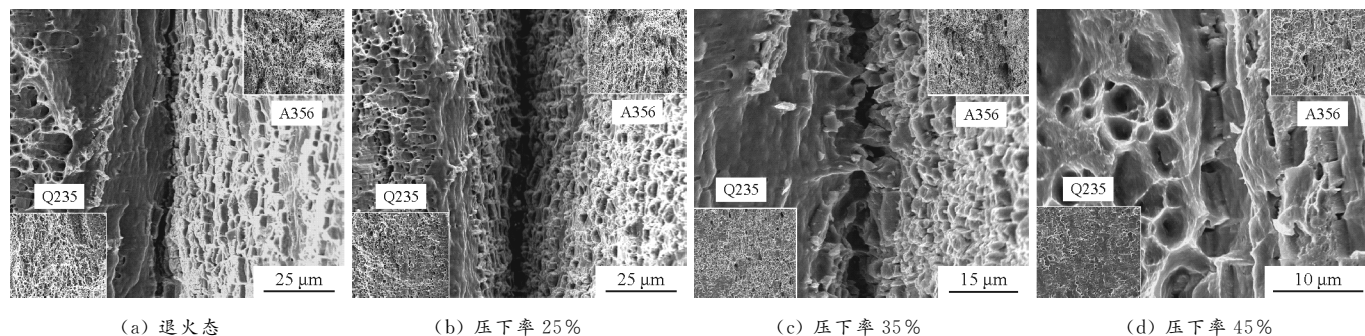


图 8 不同状态下复合板拉伸断口 Al/钢界面处 SEM 形貌

Fig.8 SEM morphologies of tensile fractures of clad plates at Al/steel interface under different conditions

25% 压下率复合板断口的界面结合区可见明显的层间分离现象,相较于退火态复合板,其两侧断口上的韧窝数量、深度和平均直径均有不同程度的减少,见图

8b。这主要是因为初道次轧制过程中结合层中形成大量裂纹及孔洞性缺陷,使得界面结合性能降低。在拉伸过程中裂纹直接沿着初始裂纹扩展,导致出现分层现

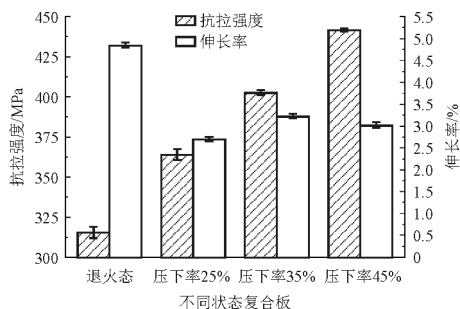


图9 不同状态复合板的极限抗拉强度和伸长率

Fig.9 Ultimate tensile strength and elongation of clad plates under different conditions

象,加工硬化效果使得复合板伸长率降低为 2.71%,抗拉强度增加到 362 MPa。

35%压下率复合板断口界面结合区可见明显的破碎状扩散层,相较于 25%压下率复合板,界面区两层间结合品质明显提升。虽然复合板两侧断口所含韧窝数量少、深度和平均直径进一步减小,见图 8c,但其伸长率却增加到 3.24%。这主要是因为第二道次轧制过程中硬脆的金属间化合物变得细小,软的基体填充到裂纹、孔洞处减少复合板缺陷,并在界面形成铝和钢的直接接触,结合界面呈现出一定的软硬相间的锯齿状形貌,在界面形成冶金结合与机械结合的复合结合层。锯齿状的界面有利于两种金属的机械咬合^[3,20],软硬相间的界面能够有效阻止裂纹扩展,使得复合板界面性能得到提高,因此在加工硬化的作用下伸长率相比 25%压下率反而增加,其抗拉强度进一步增加到 404 MPa。

45%压下率复合板断口的界面结合区几乎不存在间隙,破碎的小颗粒完全嵌入基体中,界面内不存在破碎的块状扩散层,铝、钢两层无缺陷结合,且断裂面在同一平面,见图 8d。Q235 钢层断口以解理面为主要特征,A356 铝合金层断口以撕裂棱为主要特征,所以两层材料以脆性断裂为主要断裂方式。45%压下率复合板的抗拉强度最高,为 441 MPa,相对 35%压下率的伸长率下降不多,为 3.03%。这可能是因为在每道次轧制前对复合材料进行预热处理相当于短时间退火,同时轧制过程产生热量,使得界面能够进行退火扩散修复且不生成新的金属间化合物,进而提高界面结合强度^[21]。分析得出,45%压下率复合板具有最优的界面结合品质、良好的协调变形能力及最高的抗拉强度。

3 结 论

(1)退火态 A356/Q235 钢复合板界面处可见厚度约为 8.3 μm 的连续状扩散层,扩散层厚度随压下率的增加而减小,45%压下率时厚度最薄,约为 3.3 μm 。

(2)退火态和轧制态 A356/Q235 复合板 Fe 和 Al

含量分布在界面附近呈相反的梯度变化,扩散层处存在稳定的台阶,形成金属间化合物,其主要为 Fe_2Al_5 。

(3)A356/Q235 钢复合板在轧制力的作用下连续的扩散层破碎成块状。压下率越大,块状颗粒尺寸越小,25%压下率时存在约 3 μm 的孔洞,35%压下率时存在约 1 μm 的孔洞,45%压下率时孔洞消失。

(4)25%压下率的 A356/Q235 钢复合板断口的界面结合区有明显的层间分离现象,35%压下率复合板断口的界面结合区可见明显的破碎状扩散层,45%压下率复合板断口的界面结合区几乎不存在间隙,铝、钢两层无缺陷地结合在一起。

(5)45%压下率的 A356/Q235 钢复合板具有最好的界面结合品质、良好的协调变形能力,抗拉强度达 441 MPa,且伸长率为 3.03%。

参 考 文 献

- [1] HOSSEINI M, MANESH H D. Bond strength optimization of Ti/Cu/Ti clad composites produced by roll-bonding[J]. Materials & Design, 2015, 81: 122-132.
- [2] 韩银娜,张小军,李龙,等. 铝基层状复合材料界面金属间化合物的研究现状[J].材料导报, 2019, A33(4): 1 198-1 205.
- [3] 陈宇强,张浩,黄浩,等. 基于高温扭转方法制备 6061 铝合金/304 不锈钢层状复合材料的组织及性能[J]. 材料导报, 2021, 35(6): 6 167-6 173.
- [4] 李嘉铭,李元东,杨世杰,等. Zn 中间层和浇注温度对 A356/2024 层状复合材料界面组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(12): 1 352-1 357.
- [5] LIU Y, BIAN X F, ZHANG K, et al. Interfacial microstructures and properties of aluminum alloys/galvanized low-carbon steel under high-pressure torsion[J]. Materials & Design, 2014, 64: 287-293.
- [6] LIU N, CHEN L, FU Y, et al. Interfacial characteristic of multi-pass caliber-rolled Mg/Al compound castings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 267: 196-204.
- [7] LI B, SHEN Y F, LUO L, et al. Effects of processing variables and heat treatments on Al/Ti-6Al-4V interface microstructure of bimetal clad-plate fabricated via a novel route employing friction stir lap welding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 658: 904-913.
- [8] YANG M, MA H H, SHEN Z W, et al. Application of colloid water covering on explosive welding of AA1060 foil to Q235 steel plate[J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2020, 45: 1-11.
- [9] MYKHAILO S, OLEXANDR G, MIRKO S. Manufacturing and characterization of twin-roll cast aluminum-steel clad strips[J]. Advanced Engineering Materials, 2018, 21(4): 1 800 454.
- [10] GRYDIN O, GERSTEIN G, NUERNBERGER F, et al. Twin-roll casting of aluminum-steel clad strips[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2013, 15(4): 501-507.
- [11] CHEN G, LI J T, YU H L, et al. Investigation on bonding strength of steel/aluminum clad sheet processed by horizontal twin-roll casting, annealing and cold rolling[J]. Materials & Design, 2016, 112: 263-274.
- [12] 谢敬佩,刘哲,王爱琴,等. 铸轧铜铝复合板界面演变规律研究[J]. 材料导报, 2019, 33(10): 111-114.
- [13] CHEN G, LI J R, XU G M. Bonding process and interfacial reaction in horizontal twin-roll casting of steel/aluminum clad sheet[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 246: 1-12.

外加粒子对镁合金组织细化的研究进展

王晓军¹ 魏帅虎¹ 施海龙¹ 邓坤坤² 胡小石¹ 徐超¹

(1.哈尔滨工业大学材料科学与工程学院; 2.太原理工大学材料科学与工程学院)

摘要 镁合金具有各种优异的性能,被广泛地应用于汽车、航天以及电子通讯等领域。然而,因其室温下的力学性能较差,限制了其进一步的发展与应用。通过晶粒细化的方法能够显著提高镁合金的各项性能,并有利于后续的机械加工。综述了近年来关于镁合金晶粒细化理论的发展及外加粒子对镁合金晶粒细化的影响。首先,阐述了近年来关于传统的镁合金晶粒细化理论的发展及问题;其次,总结了常用的外加微粒对镁合金晶粒细化的影响及机理;最后,探索了高含量纳米粒子在未来镁合金晶粒细化领域的潜力,并为进一步研究和开发新型高效的镁合金晶粒细化技术提供参考。

关键词 镁合金;晶粒细化;纳米粒子;细化理论

中图分类号 TG146.2;TB331

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.06.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress in Microstructure Refinement of Magnesium Alloys by External Particles

Wang Xiaojun¹, Wei Shuaihu¹, Shi Hailong¹, Deng Kunkun², Hu Xiaoshi¹, Xu Chao¹

(1.School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology;

2.School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology)

Abstract: Magnesium alloys are widely used in the fields of automobiles, aerospace, and electronic communications due to the various excellent properties. However, the further development and application are limited owing to the poor mechanical properties at room temperature. The performances of the magnesium alloy can be significantly improved by virtue of grain refinement, which is beneficial to subsequent machining. Therefore, the recent development of the grain refinement theory on magnesium alloys as well as the influence of external particles on the grain refinement of magnesium alloys were reviewed. Firstly, the development and problems of traditional magnesium alloy grain refinement theory were expounded. Secondly, the influence and mechanism of external particles commonly used on the grain refinement of magnesium alloy were summarized. Finally, the future potential of high-content nanoparticles in the field of magnesium alloy grain refinement were prospected, providing a reference for further research and development of new and efficient magnesium alloy grain refinement technology.

Key Words: Magnesium Alloys, Grain Refinement, Nanoparticles, Refinement Theory

收稿日期:2022-01-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51971078)

第一作者简介:王晓军,男,1981年出生,教授,哈尔滨(150001),E-mail: xjwang@hit.edu.cn

引用格式:王晓军,魏帅虎,施海龙,等. 外加粒子对镁合金组织细化的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(6): 694-699.

WANG X J, WEI S H, SHI H L, et al. Research progress in microstructure refinement of magnesium alloys by external particles[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(6): 694-699.

[14] 苗鹏,李元东,王慧,等. A356 浇覆温度对铝/钢复合板界面组织及力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(4): 728-738.

[15] 王兴庆. 反应烧结制取铁铝系金属间化合物的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2002.

[16] 吴永福,刘新华,谢建新. 连铸直接成形矩形断面铜包铝复合材料界面及其在轧制中的变化[J]. 中国有色金属学报, 2013, 239(1): 191-200.

[17] KOBAYASHI S, YAKOU T. Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment[J]. Materials Science & Engineering, 2002, A338(1-2): 44-53.

[18] NEWCOMB S B, VOORT G V. Smithells Metals Reference Book

[M]. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.

[19] 张先满,陈再雨,罗洪峰. 合金元素对 Fe/Al 界面反应影响的研究进展[J]. 材料导报, 2021, A35(7): 7 146-7 168.

[20] MENDES A, TIMOKHINA A, MOLOTNIKOV A, et al. Role of shear in interface formation of aluminium-steel multilayered composite sheets[J]. Materials Science & Engineering, 2017, A705: 142-152.

[21] AKRAMIFARD H R, MIRZADEH H, PARSA M H. Cladding of aluminum on AISI 304 L stainless Steels by cold roll bonding: Mechanism, microstructure, and mechanical properties[J]. Materials Science and Engineering, 2014, A613: 232-239.

(编辑:彭瑾)