

累积叠轧对层状 AX10/ZK60 镁合金复合材料 组织与力学性能的影响

石昊宇¹, 杨洪强², 潘军波³, 陈 明¹, 张万顺^{4,5,6}, 罗文博⁶, 赵红阳⁵, 李 昊⁵

(1. 辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051;

2. 新昌县科创自动化设备有限公司, 浙江 绍兴 312000; 3. 浙江富士精工科技有限公司, 浙江 绍兴 312000;

4. 省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室(武汉大学), 湖北 武汉 430000;

5. 辽宁科技大学 土木工程学院, 辽宁 鞍山 114051; 6. 华北电力大学 能源电力创新研究院, 北京 102206)

摘要:采用累积叠轧(Accumulative roll bonding, ARB)制备 AX10/ZK60 层状异构复合材料,研究累积叠轧道次对复合材料微观组织与力学性能的影响。结果表明:随着 ARB 道次的增加,抗拉强度和屈服强度逐渐上升,断裂总先上升后下降,但未发生明显下降。ARB 第 6 道次的力学性能达到最佳,抗拉强度、屈服强度和断裂总分别为 274 MPa、240 MPa 和 13.9%。材料强度的提高归因于细晶强化和第二相强化的协同作用,断裂总的提高是层间结构界面产生背应力引起的。硬度整体呈现升高趋势,这是因为 ARB 过程中产生的大量位错增强了材料硬度,但第 5、6 道次的硬度出现波动,这是由动态再结晶效应及大量亚结构的形成导致的。

关键词:累积叠轧;层状复合材料;背应力;动态再结晶;加工硬化

中图分类号:TG156.21; TG146.21 **文献标志码:**A **文章编号:**0254-6051(2025)07-0232-09

DOI:10.13251/j.issn.0254-6051.2025.07.033

Effect of accumulative roll bonding on microstructure and mechanical properties of laminated AX10/ZK60 magnesium alloy composites

Shi Haoyu¹, Yang Hongqiang², Pan Junbo³, Chen Ming¹, Zhang Wanshun^{4,5,6}, Luo Wenbo⁶, Zhao Hongyang⁵, Li Hao⁵

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

2. Xinchang Kechuang Automation Equipment Co., Ltd., Shaoxing Zhejiang 312000, China;

3. Zhejiang Fuji Seiko Technology Co., Ltd., Shaoxing Zhejiang 312000, China;

4. The State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy (Wuhan University of Science and Technology), Wuhan Hubei 430000, China;

5. School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning 114051, China;

6. Energy and Electric Power Innovation Institute, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: AX10/ZK60 layered heterogeneous composites were prepared by accumulative roll bonding (ARB), and the effect of cumulative rolling passes on microstructure and mechanical properties was studied. The results show that with the increase of ARB passes, the tensile strength and yield strength increase gradually, and the elongation increases first and then decreases, but no significant decrease occurs. The mechanical properties reach the best at the 6th pass, with the tensile strength, yield strength and elongation of 274 MPa, 240 MPa and 13.9%, respectively. The increase in the strength of the material is attributed to the synergistic effect of fine-grained strengthening and secondary phase strengthening. The increase in elongation is caused by the back stress at the laminated structural interface. The overall hardness shows an increasing trend, which is due to the large number of dislocations generated in the ARB process to enhance the hardness of the material, but the hardness at the 5th and 6th passes fluctuates, which is caused by the dynamic recrystallization effect and the formation of a large number of substructures.

Keywords: accumulative roll bonding; laminated composites; back stress; dynamic recrystallization; work hardening

收稿日期:2025-01-13 **修订日期:**2025-04-25

基金项目:省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室项目(G202408);辽宁省高校基本科研业务费专项(LJ212410146041);辽宁科技大学优秀博士基金(2023YQ05)

作者简介:石昊宇(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向为层状复合板材制备及性能研究,E-mail:2187159230@qq.com。通信作者:李 昊,讲师,硕士,E-mail:lh13904180780@163.com

引文格式:石昊宇,杨洪强,潘军波,等. 累积叠轧对层状 AX10/ZK60 镁合金复合材料组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2025, 50(7): 232-240.

Shi Haoyu, Yang Hongqiang, Pan Junbo, et al. Effect of accumulative roll bonding on microstructure and mechanical properties of laminated AX10/ZK60 magnesium alloy composites[J]. Heat Treatment of Metals, 2025, 50(7): 232-240.

镁合金作为最轻的金属材料,具备诸多优异特性,诸如比强度高、抗冲击载荷性能卓越、导热导电性良好、具有电磁屏蔽能力、无磁性且无毒等特点。在电子、汽车等行业备受瞩目^[1-2]。然而镁合金的广泛应用面临诸多阻碍:一方面,其生产成本相对高昂^[3];另一方面,由于镁合金具有密排六方晶体结构,室温下可启动的滑移系较少,在板材成型过程中存在诸多问题^[4-5],尤为突出的是其力学性能方面有强韧性失衡问题,严重制约了进一步推广应用。现阶段,镁合金的各向异性特征已成为相关研究热点,众多研究聚焦于微观组织演变对其力学性能的影响,并涌现出大量报道^[6-7]。

剧烈塑性变形(Severe plastic deformation, SPD)技术作为实现晶粒细化的有效途径之一,涵盖等通道转角挤压(Equal-channel angular extrusion, ECAP)、累积叠轧(Accumulative roll bonding, ARB)等多种工艺。此类工艺凭借能够显著细化晶粒,进而有效改善镁合金力学性能的优势,在变形镁合金研究领域得到广泛应用^[8]。由 Saito 等^[9]研发的 ARB 工艺因操作便捷且可依托常规轧机实施,在叠合板制造领域应用广泛,成为同种或异种金属复合加工的首选工艺之一^[10-11]。研究表明^[12-14],ARB 工艺对镁合金的晶粒细化效果显著,而细晶强化恰是提升金属强度的关键机制之一。但是 ARB 工艺实施过程中会催生大量位错缠结,阻碍位错滑移运动,诱发材料加工硬化,致使材料断裂总降低。

金属复合材料本质上是将两种或两种以上不同类型的合金复合,借助各组元间的优势互补,实现材料综合性能的提升^[15]。Luo 等^[16]在通过累积叠轧制备层状双峰结构与混合双峰结构并加以对比的研究中发现,层状双峰结构凭借层间应变梯度催生长程背应力,同时激活非基底滑移,进而显著提升材料断裂总。类似地, Wang 等^[17]构建 Cu/Ti₃SiC₂/C 类层状复合材料,深入探究双峰颗粒增强层状结构对复合材料力学性能的影响。Li 等^[18]制备 Cu-Ta 合金,研究双峰晶粒结构对 Cu 合金拉伸断裂总等力学性能的影响,均得出与之相符的结论。

鉴于镁合金密排六方结构所固有的滑移系稀缺特性,硬质层极易出现颈缩乃至断裂现象。此现象会导致硬质层将无法充分承载载荷,进而对材料整体力学性能产生负面影响。已有研究证实^[19],适度提高轧制温度并增加轧制中间退火处理,能够有效改善异质层由于变形抗力引起的塑性失稳状况。Zeng 等^[20]采用 ARB 结合中间退火工艺制备 Cu/Ta 纳米层多层片材,结果表明,高温退火工艺的运用可有效遏制边缘裂纹

与塑性不稳定性的形成。Du 等^[21]以及 Ning 等^[22]的研究亦得出类似论断。

Mg-Ca-Al 合金具备出色的导热性能,但其力学性能欠佳^[23],ZK60 镁合金则呈现出较高的力学性能^[24]。将这两种合金构建为复合材料,有望通过优势互补提高整体性能。本文选取 Mg-Ca-Al 和 ZK60 镁合金作为研究对象,通过 ARB 工艺制备层状异构复合材料,研究 ARB 工艺下微观组织对力学性能的影响机制。

1 试样制备与试验方法

1.1 材料制备

本研究选用的试验材料为铸态 AX10 合金(Mg-0.3Ca-1Al,质量分数)板材与挤压态 ZK60 合金(Mg-6Zn-0.6Zr,质量分数)板材,初始厚度分别为 4 mm 和 2 mm,且原料尺寸均裁剪为 80 mm × 100 mm。

在试验前期处理阶段,为优化铸态 AX10 板材的组织结构,将其置于隧道炉内进行 400 °C × 12 h 均质化处理。为确保后续试验中两种材料晶粒尺寸存在显著差异,挤压态 ZK60 板材亦在隧道炉中进行 400 °C × 2 h 均质化处理。将经均质化处理后的两种合金板材置于 400 °C 的环境中进行轧制,单道次压下量为 50%,各道次之间保温 10 min,通过多道次轧制使两种金属板材最终均达到 1 mm 的厚度。最后将两种板材同时放入 350 °C 的隧道炉中进行 2 h 的热处理,完成累积叠轧前的板材预处理流程。

在进行 ARB 前需对板材表面进行抛光处理,磨除表面附着的油脂及氧化层,确保在 ARB 过程中表面新鲜金属能够直接接触。将两种材料按特定顺序叠放在一起,并用铜钉进行固定,随后实施初步轧制。完成初步轧制后,将板材切成两块大小相同的试样并再次叠放在一起。各道次板材层间顺序呈现特定规律:1 道次为 ZK60/AX10 叠层,2 道次为 ZK60/AX10/ZK60/AX10 叠层,依此类推。ARB 的轧制温度为 350 °C,各道次之间保温 10 min,单道次压下量为 50%,共计叠轧 6 道次,各道次叠轧试样标记为 ARB-1 ~ ARB-6,具体 ARB 工艺流程如图 1 所示。

1.2 试验方法

利用光学显微镜(OM)对层合板的微观组织进行观察,研究晶粒变化规律。采用场发射扫描电镜(SEM)对层合板的层间形貌进行观察,研究界面结构以及第二相分布情况,微观组织观察面均在 RD-ND 面。采用 Image J 软件对晶粒和第二相尺寸及分布进行统计。硬度试验在显微硬度计上进行,加载载荷为 10 g,加载时间为 10 s。拉伸试验在室温下进行,拉伸

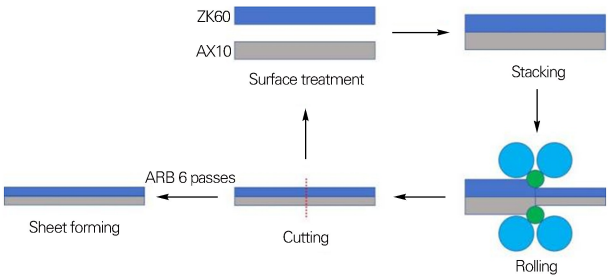


图 1 ARB 工艺流程图
Fig. 1 Accumulative roll bonding process flow diagram

应变速率为 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。

2 试验结果与讨论

2.1 微观组织演变

图 2 为经过 ARB 不同道次变形后层状复合材料 ZK60 层的组织演变(箭头所指的层间为 ZK60 层)。由图 2(a)可以看出,第 1 道次复合叠轧后的 ZK60 层由被拉长的粗晶粒和等轴晶的细晶粒组成,形成混晶组织。粗晶粒主要为原始晶粒,初始总压下量只有 50%,所以粗晶粒的尺寸偏大。细晶粒主要是因轧制温度在材料再结晶温度(ZK60 合金再结晶温度为 150 ~ 250 ℃,AX10 合金再结晶温度为 150 ~ 200 ℃)以上而生成的少量动态再结晶晶粒。由图 2(b ~ f)可以看出,高温轧制加中间退火工艺会给晶粒提供大量能量,晶粒出现长大迹象,同时大的塑性变形降低材料动态

再结晶温度,生成的细小动态再结晶晶粒会降低整体晶粒尺寸,因而前几道次叠轧的晶粒细化不明显。随着 ARB 的进行,第二相尺寸逐渐细化,数量增加,呈均匀分布。细小的第二相会钉扎晶界,阻碍晶粒长大,进而后几道叠轧的次晶粒细化明显。

图 3 为经过 ARB 不同道次变形后 ZK60 合金层的晶粒尺寸分布。由图 3 可知,整体上晶粒尺寸分布随着 ARB 道次增加向左偏移,即晶粒尺寸逐渐变小,其中第 4 道次叠轧后出现小于 $1 \mu\text{m}$ 的晶粒,且此类晶粒数量随着 ARB 道次的增加而增多(如图 3(d ~ f)所示)。平均晶粒尺寸随 ARB 道次的增加而减少,但减少的幅度不大。第 1 道次叠轧后的平均晶粒尺寸为 $2.73 \mu\text{m}$,第 6 道次叠轧后的平均晶粒尺寸为 $2.05 \mu\text{m}$,相比第 1 道次只减少了 25%。徐超等^[25]采用 ARB 技术在 300 ℃ 下制备纯 Mg/ZK60 合金多层复合材料时也出现了这个现象。这说明当晶粒细化到一定程度时再继续增加叠轧道次后细化效果不明显。

结合图 2(a)和图 3(a)可以清楚地看出,第 1 道次复合叠轧后的 ZK60 合金层的粗细晶粒尺寸差异较大,最大晶粒为 $25.46 \mu\text{m}$,最小晶粒只有 $1.19 \mu\text{m}$ 。随着 ARB 的进行,粗晶粒尺寸降低。第 6 道次的最大晶粒只有 $10.98 \mu\text{m}$ (如图 3(f)所示),比第一道次的最大晶粒尺寸降低了 57%。另外,第 1 道次的晶粒尺寸最大差异为 $24.27 \mu\text{m}$,而第 6 道次的晶粒尺寸最大差异为 $10.36 \mu\text{m}$,相比第 1 道次的尺寸差异减少了

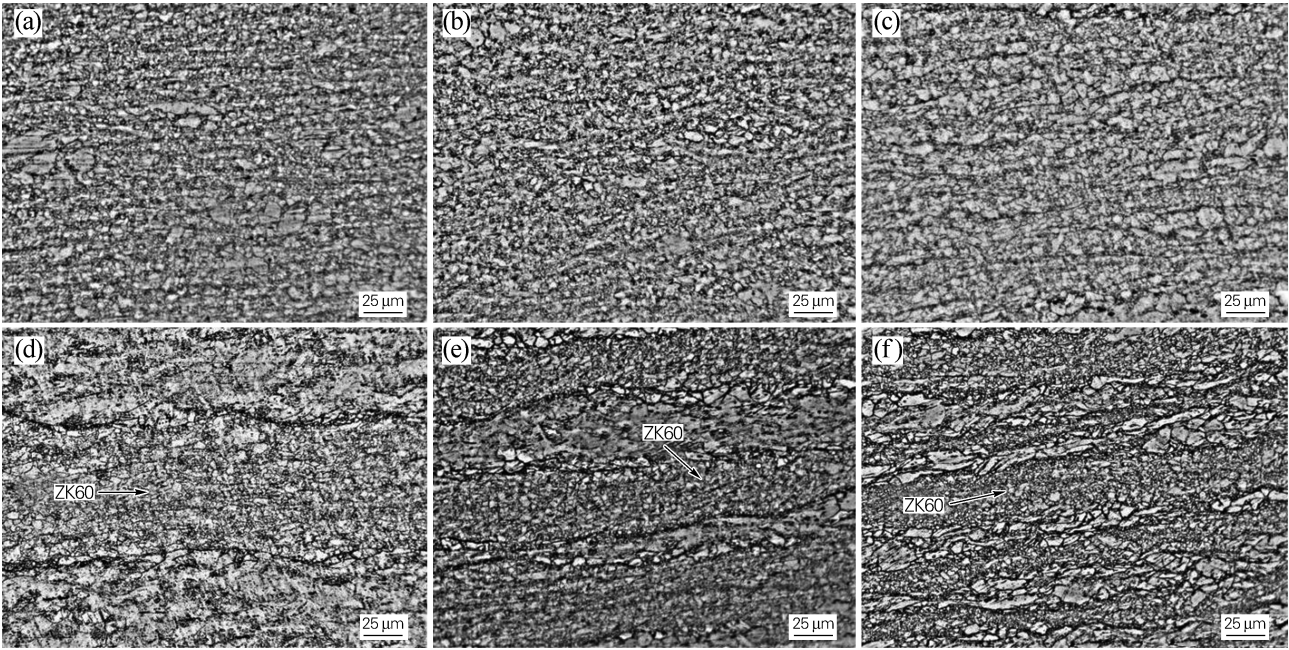


图 2 经 ARB 不同道次变形后 ZK60 合金层的 OM 图
Fig. 2 OM images of the ZK60 alloy layer after different passes of ARB
(a) ARB-1; (b) ARB-2; (c) ARB-3; (d) ARB-4; (e) ARB-5; (f) ARB-6

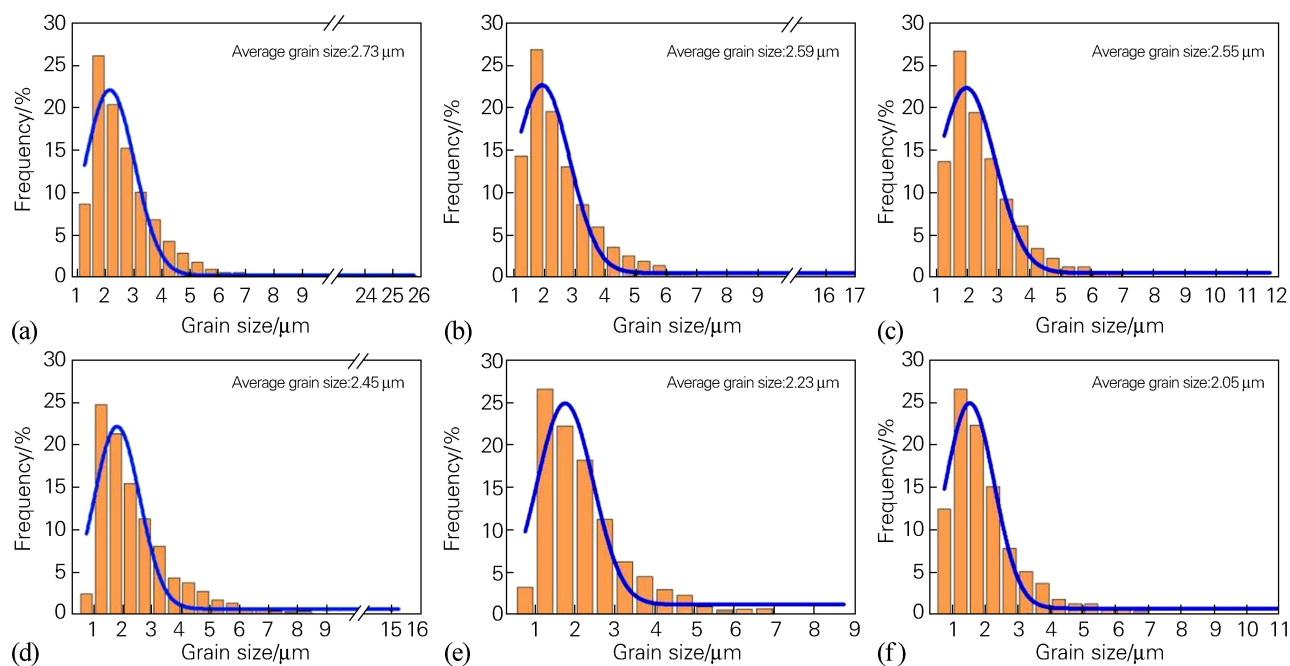


图 3 经 ARB 不同道次变形后 ZK60 合金层的晶粒尺寸分布

Fig. 3 Grain size distributions of the ZK60 alloy layer after different passes of ARB

(a) ARB-1; (b) ARB-2; (c) ARB-3; (d) ARB-4; (e) ARB-5; (f) ARB-6

57.3%。这是因为随着 ARB 道次的增加,粗晶粒尺寸逐渐减小,而大量细小第二相颗粒对晶界的钉扎作用有效抑制了晶粒的长大,导致晶粒尺寸差异减小,组织结构趋于均匀。Luo 等^[16]对层状双峰结构与混合双峰结构的研究中指出,相比较层状双峰结构,较大的晶

粒尺寸差异构成的混合双峰结构会对力学性能产生不利的影响。

图 4 为经过 ARB 不同道次变形后层状复合材料的界面结构微观形貌。从图 4 可以看出,各样品中 ZK60 层(衬度较浅)和 AX10 层(衬度较深)的界面处

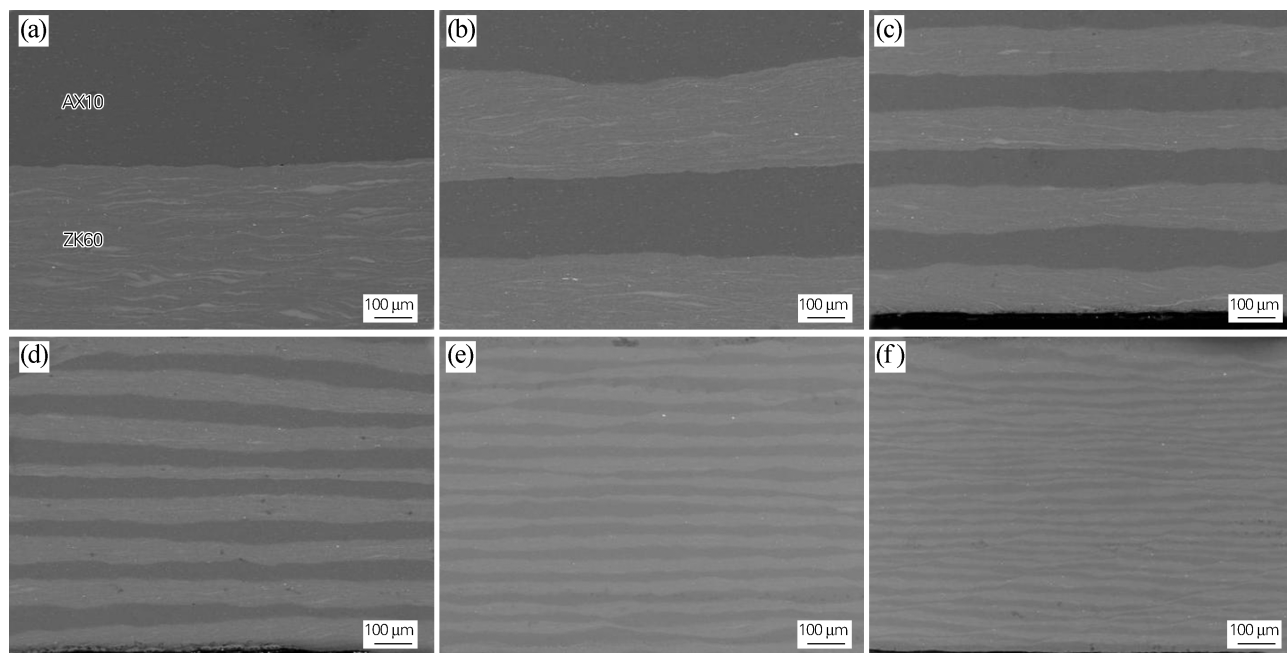


图 4 经 ARB 不同道次变形后 AX10/ZK60 界面的 SEM 图

Fig. 4 SEM images of the AX10/ZK60 interface after different passes of ARB

(a) ARB-1; (b) ARB-2; (c) ARB-3; (d) ARB-4; (e) ARB-5; (f) ARB-6

没有明显的裂纹和空隙,说明在 350 ℃ 轧制后层间界面结合良好,未发现明显的界面分离现象。随着 ARB 的进行,界面结合程度得到进一步改善。各道次皆没有明显的颈缩或层间断裂,层间界面沿 RD 方向皆未发现开口。说明在较高温度叠轧和中间退火可以改善界面结合效果,防止颈缩现象发生^[26]。Huang 等^[27]在估算复合材料较硬层的不稳定性时发现,只有施加的等效应变达到或超过某一特定值时才会出现塑性不稳定性。对于层状复合金属材料,提高温度对层间界面结合起着有利的作用。

图 5 为经过 ARB 不同道次变形后层状复合材料 ZK60 层和 AX10 层的厚度。可以看出,随着 ARB 道次的增加,RD-ND 截面上 ZK60 层和 AX10 层的厚度逐渐降低,厚度分别从第 1 道次的 692 μm 和 553 μm 降低到第 6 道次的 24.5 μm 和 11.7 μm。研究表明^[28],随着各层厚度的降低,层间间距也在逐渐缩小,层间间距的减小可以提高材料的力学性能。

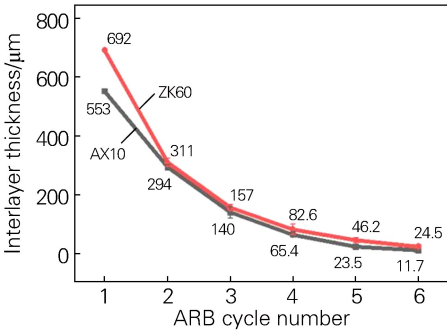


图 5 经 ARB 不同道次变形后 AX10/ZK60 层的厚度变化
Fig. 5 Thickness change of the AX10/ZK60 layer after different passes of ARB

规则混合定律 (ROM) 通常用于估算复合材料的强度,是指复合材料的拉伸屈服强度等于各层自身拉伸屈服强度与其体积分数乘积的和:

$$\sigma_{\text{ROM}} = \sigma_1 v_1 + \sigma_2 v_2 \tag{1}$$

式中: σ_{ROM} 为复合材料的强度; σ_1, σ_2 为各层材料的强度; v_1, v_2 为各层材料的体积分数。Meng 等^[29]研究 AZ31/GW103K 双金属复合棒的组织与力学性能时发现,界面会对拉伸屈服强度产生影响,界面越薄则拉伸屈服强度越接近 ROM 预测值。所以随着 ARB 的进行,界面的减薄提升了材料的强度。从图 4 可以看出,复合材料界面结合良好,并且随着 ARB 的进行,界面结合程度越来越高。界面结合程度越好,界面传递载荷的效率越高,进而强度增大。

另外,随着 ARB 道次的增加,复合材料各层的形状出现波动,同种材料各层厚度出现些微差异。这是轧制过程中外层和中间层受力不均的结果。因 ARB 工艺同层不同位置的材料在轧制过程中会分别放置在不同层上,导致轧制中受力大小不同,厚度出现差异化,这种差异随着 ARB 道次的增加而减小,同种材料各层厚度趋于均匀,整体上的厚度差异也在逐渐缩小。层间厚度差异的逐渐减小使得材料在承受外力时应力分布更加均匀,力学性能得到提升。

图 6 为经过 ARB 不同道次变形后层状复合材料 AX10/ZK60 界面的 SEM 图。图 7 为对应的第二相尺寸分布图。由图 6 和图 7 可知,第 1 道次的第二相数量较少,统计结果只有 133 个。随着 ARB 道次的增加,第二相数量显著上升,第 6 道次的统计结果有 289 个,为最大值,比第 1 道次增加了 117.3%。在 ARB 过程中,反复的塑性变形为第二相的形核和生长提供了充足的驱动力,促使更多的第二相粒子在基体中形成。

进一步考察第二相平均尺寸的变化规律可以发现,随着 ARB 道次的增加,第二相平均尺寸呈现出逐渐降低的趋势,由第 1 道次的 0.441 μm 减小至第 6 道次的 0.302 μm,减少了 31.5%。随着 ARB 的进行,一方面新生成的第二相数量增多,消耗了更多的能量,限制了单个第二相粒子的生长,另一方面持续的塑性变形使较大尺寸的第二相粒子发生破碎,细化为更小尺

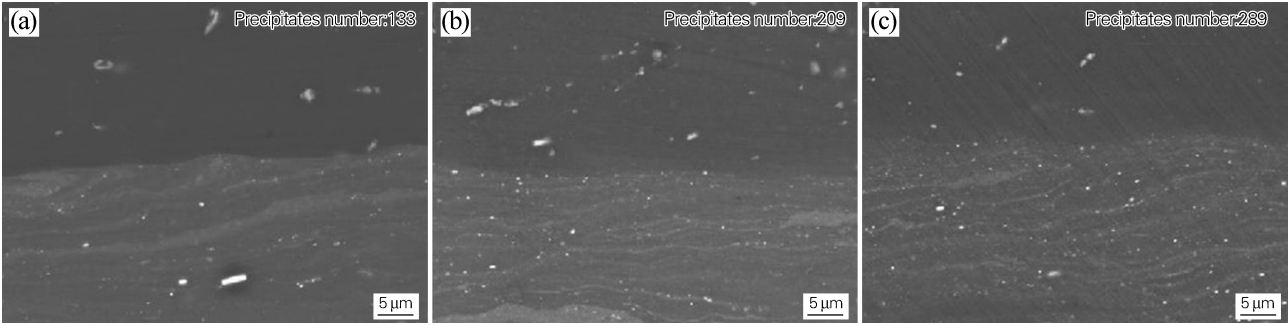


图 6 ARB 不同道次变形后 AX10/ZK60 界面的 SEM 图
Fig. 6 SEM images of the AX10/ZK60 interface after different passes of ARB
(a) ARB-1; (b) ARB-3; (c) ARB-6

寸的粒子,进而导致第二相平均尺寸逐渐减小。另外,随着 ARB 道次的增加,第二相尺寸差异也在逐渐减小,分布逐渐趋于均匀。

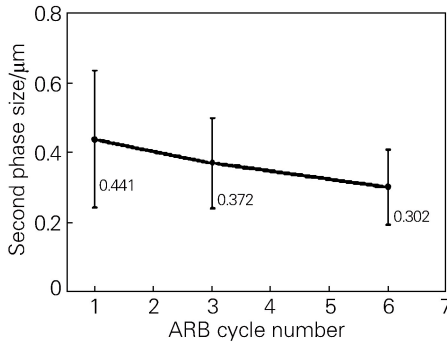


图 7 ARB 不同道次变形后 AX10/ZK60 复合材料第二相平均尺寸

Fig. 7 Average size of second phases in the AX10/ZK60 composite material after different passes of ARB

2.2 力学性能

图 8 所示为经过 ARB 不同道次变形后 AX10/ZK60 复合材料的拉伸应力-应变曲线和力学性能。由图 8(a)可以看出,随着 ARB 道次的增加,复合材料的抗拉强度与屈服强度呈增大趋势。值得注意的是,第 1 道次的拉伸曲线中,材料首次发生断裂后出现了一段具有明显“拖拽”特征的平台部分。这一现象表明,当材料在拉伸过程中发生断裂时,内部结构产生了分层现象,即 AX10 层和 ZK60 层并未同步发生断裂,而是 AX10 层先发生了断裂,ZK60 层继续进行拉伸测试,从而使得拉伸曲线呈现出该“拖拽”段。随着 ARB 道次的增加,拉伸时的分层现象消失。层间界面结合效果随 ARB 道次增加而逐步增强,因为每次轧制都会引入新的剪切变形,使界面处金属新鲜表面暴露,氧化层被反复破碎并分散。道次的增加导致界面微观粗糙度和机械咬合程度显著提升^[30]。

由图 8(b)可以看出,随着 ARB 道次的增加,材料的抗拉强度与屈服强度呈现增大趋势,断裂总延伸率先升高后降低趋势,但未发生明显下降。第 1 道次的抗拉强度、屈服强度和断裂总延伸率分别为 264 MPa、212 MPa 和 10.9%,第 6 道次的抗拉强度和屈服强度达到最高,分别为 274 MPa 和 240 MPa,相比第 1 道次分别提高了 3.8% 和 13.2%,而断裂总延伸率为 13.9%,相比第一道次提高了 27.5%。

研究表明^[31],抗拉强度的提升归因于加工硬化和细晶强化的影响。ARB 过程会产生大量的位错,增加了材料的位错密度。异质相界面是位错源之一,在晶界和相界面处会导致位错堆积^[32]。层间界面因位错堆

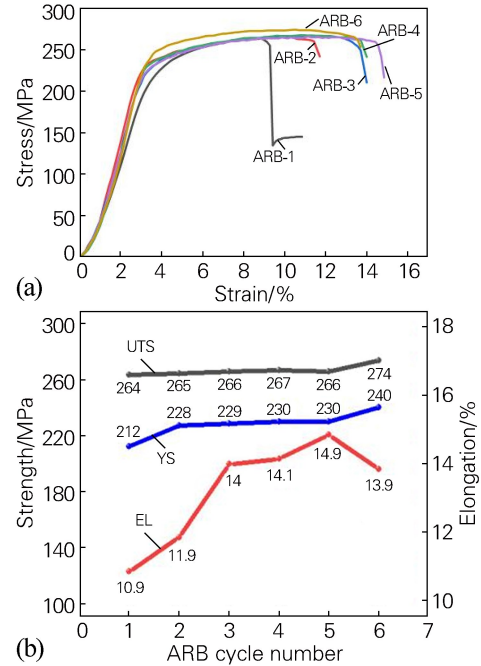


图 8 经过 ARB 不同道次变形后 AX10/ZK60 复合材料的拉伸应力-应变曲线(a)及力学性能(b)

Fig. 8 Tensile stress-strain curves (a) and mechanical properties (b) of the AX10/ZK60 composite material after different passes of ARB

积产生背应力,可以阻碍后续位错的运动,从而使材料得到强化。然而,随着 ARB 道次的增多,累积的塑性变形的增加会降低其再结晶温度^[30]。在动态再结晶温度之上轧制会导致位错缠结处发生动态再结晶。动态再结晶的大量生成会降低位错密度,进而降低加工硬化,具有软化板材的作用^[33]。由图 7 可见,第二相数量随 ARB 道次的增多而逐渐增加,较多的第二相有钉扎晶界的作用,从而阻碍位错运动,提高材料强度。而第二相尺寸的减小、分布更为密集使的位错在通过这些第二相时的阻碍增大,进而更有效的阻碍位错运动。

屈服强度与细晶强化和界面结合情况有关。由图 3 可见,AX10/ZK60 复合材料晶粒尺寸随 ARB 道次的增加而降低,晶粒尺寸的降低增加了晶界面积,增强对位错滑移的阻碍,提高了屈服强度^[34]。细晶强化对强度的贡献可用 Hall-Petch 公式^[35]描述:

$$\sigma_g = \sigma_0 + k d^{-1/2} \quad (2)$$

式中: σ_g 为考虑细晶强化后的屈服强度; σ_0 为纯金属初始晶粒组织的屈服强度; k 为 Hall-Petch 常数(镁合金为 $280 \sim 320 \text{ MPa} \cdot \mu\text{m}$); d 为晶粒平均尺寸。从式(2)可以看出,随着晶粒平均尺寸的降低,屈服强度提高。细晶强化作用下屈服强度呈现提高的趋势,所以屈服强度随晶粒尺寸的减小而增大。

断裂总延伸率的升高部分原因是动态再结晶的发生降低了 ARB 工艺产生的加工硬化,主要是出现软硬层结构。在拉伸变形时,软硬层产生的应变不同,但应变在层间界面是连续的,从而在界面产生长程背应力。这种背应力可以使其他位错反向运动,避免位错的过度集中发生位错缠结,使材料能够承受更大的变形,提高断裂总^[15]。另外,第 6 道次断裂总延伸率的降低可归因于大量位错胞和亚晶等亚结构的生成,这些亚结构阻碍位错运动,使材料加工硬化程度提高,材料难以通过位错滑移实现均匀塑性变形,断裂总延伸率降低。

图 9 为经过 ARB 不同道次变形后 AX10/ZK60 复合材料的拉伸断口形貌。由图 9(a~c)可见,第 1 道次的断口界面分层明显。随着 ARB 道次的增加,界面分离现象逐渐消失,而 AX10/ZK60 层的断口形貌基本一致,皆发现韧性断裂的韧窝以及脆性断裂的解理台阶,呈现出韧脆混合断裂特征。随着 ARB 道次的增加,韧窝逐渐变得大而深且数量增多,而解理台阶逐渐

减少,塑性持续增强。但第 6 道次的韧窝数量有所减少,大量解理台阶的出现导致塑性下降。断口形貌的变化与断裂总延伸率变化一致。

图 10 为经过 ARB 不同道次变形后 AX10/ZK60 复合材料的硬度。可以看出,AX10 层和 ZK60 层硬度的变化规律相同,均随 ARB 道次的增多而先增大后略有降低,在第 4 道次时分别达到最大值,且复合材料的平均硬度也最高,达到 72.5 HV0.01,相比第 1 道次提升了 26.5%。第 5 道次的硬度有所下降,较比第 4 道次降低了 6.9%,而第 6 道次硬度又有微量提升,为 69.0 HV0.01,相比第 5 道次只提升了 2.2%。对与镁合金的硬度而言,细晶强化和加工硬化是其主要强化机制。在轧制初期,较大的轧制力使材料内部产生大量位错。这些位错相互交织缠结,显著增大了位错运动的阻力,阻碍了晶体的塑性变形,使材料抵抗变形的能力增强,硬度升高。随着 ARB 工艺的持续进行,材料经过反复剧烈塑性变形,累积的应变能不断增加,为

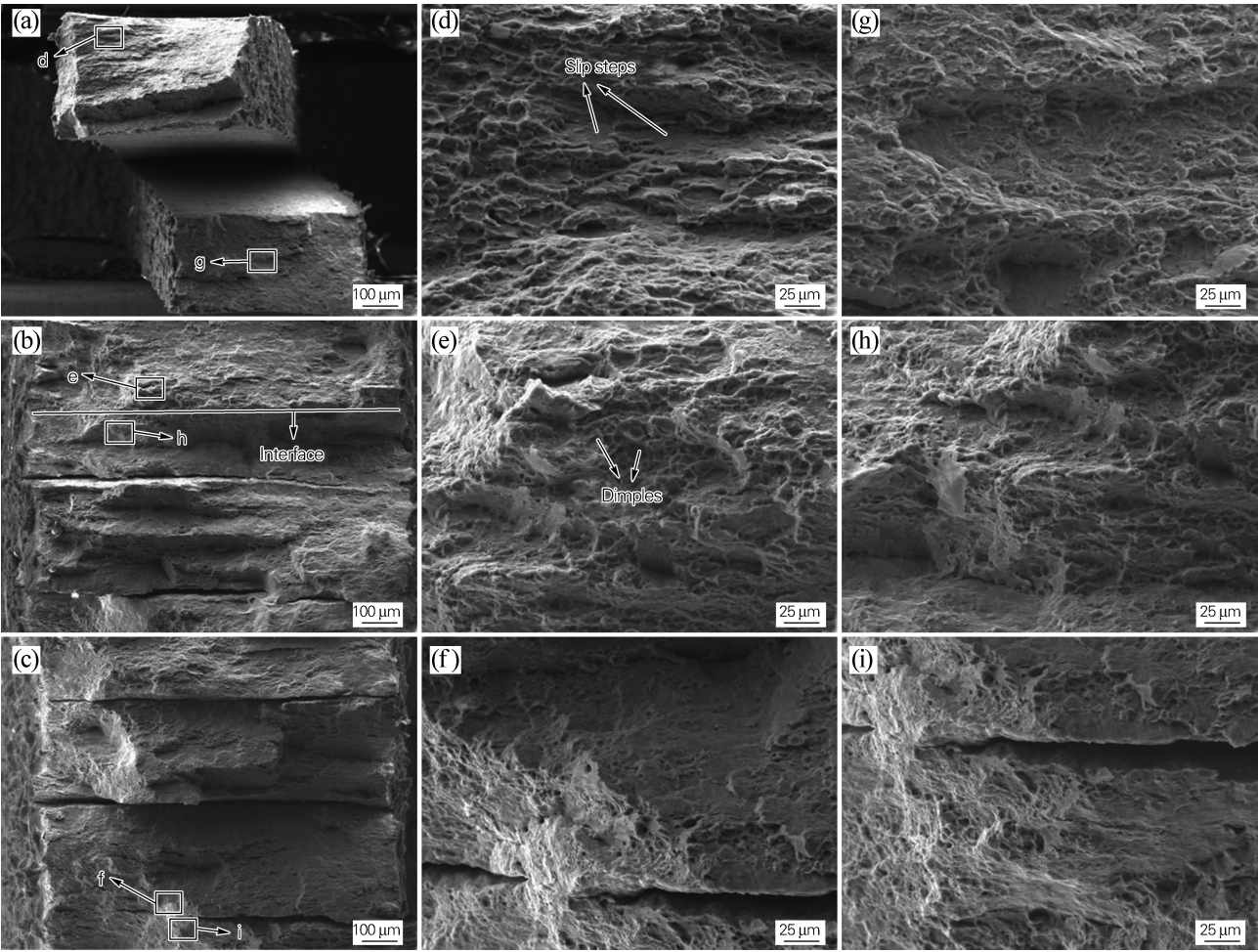


图 9 经过 ARB 不同道次变形后 AX10/ZK60 复合材料的拉伸断口形貌
Fig.9 Tensile fracture morphologies of the AX10/ZK60 composite material after different passes of ARB
(a,d,g) ARB-1; (b,e,h) ARB-5; (c,f,i) ARB-6

动态再结晶提供驱动力。大量动态再结晶的发生抵消了前期因位错密度增加导致的加工硬化效果。第5道次时因动态再结晶的发生,使材料的加工硬化程度逐渐降低,硬度值随之降低。而第6道次时大量位错胞和亚晶等亚结构的生成阻碍位错运动,又使材料加工硬化程度提高,因此硬度又有微量提升。

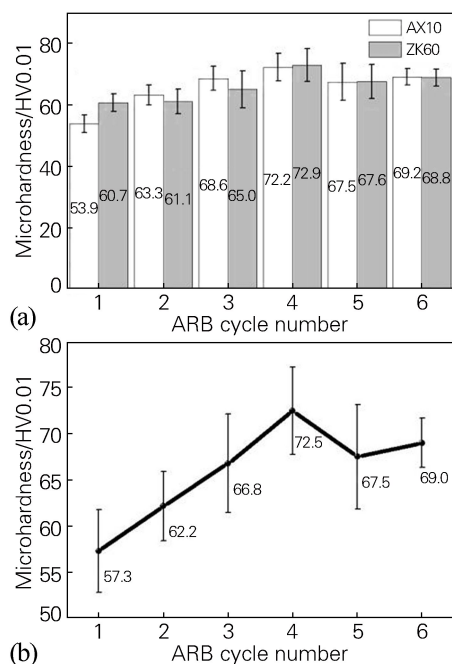


图10 经过 ARB 不同道次变形后 AX10/ZK60 复合材料的硬度(a)及每道次平均硬度(b)

Fig. 10 Hardness of the AX10/ZK60 composites after different passes of ARB deformation (a) and the average hardness of each pass (b)

3 结论

1) ARB 工艺可在一定程度上细化晶粒,但随着 ARB 道次的增加,晶粒细化效果减弱。AX10/ZK60 复合材料的晶粒尺寸从 ARB 第1道次的 $2.73\ \mu\text{m}$ 细化到第6道次的 $2.05\ \mu\text{m}$,相比第1道次减少了25%。

2) 随着 ARB 道次的增加,AX10/ZK60 层的厚度逐渐减小,ZK60 层厚度从第1道次的 $692\ \mu\text{m}$ 降低到第6道次的 $24.5\ \mu\text{m}$,降低了96.5%,同时 AX10 层厚度从 $553\ \mu\text{m}$ 降低到 $11.7\ \mu\text{m}$,降低了97.9%。AX10/ZK60 层厚度的逐渐缩小和厚度差异的逐渐减小使得复合材料在受外力作用时应力分布更均匀。

3) 随着 ARB 道次的增加,第二相尺寸减少,数量增多。第二相平均尺寸从第1道次的 $0.441\ \mu\text{m}$ 减小至 $0.302\ \mu\text{m}$,减少了31.5%。第6道次的第二相数量比第1道次增加了117.3%。

4) 随着 ARB 道次的增加,AX10/ZK60 复合材料

的力学性能逐渐提高。ARB 第6道次的力学性能最佳,抗拉强度、屈服强度、断裂总延伸率和硬度为 274 MPa、240 MPa、13.9% 和 69.0 HV0.01。强度和硬度的提高归因于细晶强化和第二相强化协调作用。断裂总延伸率的提升主要是因为层间界面产生的背应力引起的。硬度随着 ARB 道次的增加整体呈现升高趋势,但在第5和第6道次时出现波动,这是由动态再结晶效应及大量亚结构的形成导致的。

参考文献:

- [1] 张士卫. 阻尼镁合金的研究与应用综述[J]. 金属世界, 2019(4): 5-11.
Zhang Shiwei. Research and application summary of damping magnesium alloys[J]. Metal World, 2019(4): 5-11.
- [2] 郎强, 宋刚, 刘黎明. 坡口角度对 SK7 钢/AZ31B 镁合金搭接接头成形和力学性能的影响[J]. 机械工程学报, 2024, 60(23): 262-269.
Lang Qiang, Song Gang, Liu Liming. Effect of groove angles on forming and mechanical properties of SK7 steel/AZ31B magnesium alloy lap joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(23): 262-269.
- [3] Neh K, Ullmann M, Oswald M, et al. Twin roll casting and strip rolling of several magnesium alloys[J]. Materialstoday: Proceedings, 2015, 2(S1): 45-52.
- [4] 吴铮, 李全安, 陈晓亚, 等. 机器学习在镁合金应用中的研究进展[J]. 工程科学学报, 2024, 46(10): 1797-1811.
Wu Zheng, Li Quanan, Chen Xiaoya, et al. Applications of machine learning on magnesium alloys[J]. Chinese Journal of Engineering, 2024, 46(10): 1797-1811.
- [5] Wang Lijia, Zhan Sha, Ruan Yutao, et al. Influence of grain size on twinning behavior of WE43 magnesium alloy during room-temperature compression deformation[J]. Journal of Rare Earths, 2024, 42: 2285-2292.
- [6] 宋要斌, 李辉, 闫金顺, 等. Mg-8Al-4Sr-1Y 镁合金轧板 200 °C 拉伸性能研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(19): 167-169.
Song Yaobin, Li Hui, Yan Jinshun, et al. Research on 200 °C tensile properties of rolled Mg-8Al-4Sr-1Y magnesium alloy sheet[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(19): 167-169.
- [7] Xu Y, Hu L X, Sun Y. Dynamic recrystallization kinetics of as-cast AZ91D alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(6): 1683-1689.
- [8] 陈明, 孙贺, 赵红阳, 等. ME21 稀土镁合金薄板微观组织的多尺度研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52(10): 1571-1581.
Chen Ming, Sun He, Zhao Hongyang, et al. Multi-scale study on microstructure of ME21 rare-earth magnesium alloy sheet[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2022, 52(10): 1571-1581.
- [9] Saito Y, Ytsunomiya H, Tsuji N, et al. Novel ultra-high straining process for bulk materials—Development of the accumulative roll-bonding (ARB) process[J]. Acta Materialia, 1999, 47(2): 579-583.
- [10] 郝肖杰, 聂金凤, 伍玉立, 等. 累积叠轧制备层状铝基复合材料研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(6): 1707-1719.

- Hao Xiaojie, Nie Jinfeng, Wu Yuli, et al. Research progress of laminated aluminum matrix composites prepared by accumulative rolling bonding[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(6): 1707-1719.
- [11] Mo T Q, Chen Z J, Li B X, et al. Tailoring of interface structure and mechanical properties in ARBed 1100/7075 laminated composites by cold rolling[J]. Materials Science and Engineering A, 2019, 755(7): 97-105.
- [12] Guo J, Sun W, Xiang N, et al. Interfacial bonding and fracture behaviors of AZ63 magnesium alloy sheet processed by accumulative roll bonding[J]. Materials, 2023, 16(14): 4981.
- [13] Samiei S, Dini G, Ebrahimian-Hosseinabadi M, et al. Correlation between microstructure, mechanical properties, and corrosion characteristics of AZ31 Mg alloy processed by accumulative roll bonding process[J]. Metals and Materials International, 2023, 29(1): 192-203.
- [14] Li S, Jin J, Wang Y, et al. Experimental and simulation study on mechanical properties of ZK60 magnesium alloy after accumulative roll bonding[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2842: 012036.
- [15] 陈兴章. 层状金属复合材料技术创新及发展趋势综述[J]. 有色金属材料与工程, 2017, 38(2): 63-66.
- Chen Xingzhang. Review of laminar composite metal material manufacturing technique[J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2017, 38(2): 63-66.
- [16] Luo Xuan, Huang Tianlin, Wang Yuhui, et al. Strong and ductile AZ31 Mg alloy with a layered bimodal structure[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 5428.
- [17] Wang M, Jiang X, Sun H, et al. Synergistic reinforcement of Cu/Ti₃SiC₂/C laminated-like composites with the bimodal and highly oriented graphite flake and graphene nanoplatelets[J]. Ceramics International, 2024, 50(18): 33283-33297.
- [18] Li N, Chang Y, Li M, et al. Enhanced mechanical property by introducing bimodal grains structures in Cu-Ta alloys fabricated by mechanical alloying[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2024, 172: 104-112.
- [19] Mashhadi A, Atrian A, Ghalandari L, et al. Mechanical and microstructural investigation of Zn/Sn multilayered composites fabricated by accumulative roll bonding (ARB) process[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 727: 1314-1323.
- [20] Zeng L F, Gao R, Fang Q F, et al. High strength and thermal stability of bulk Cu/Ta nanolamellar multilayers fabricated by cross accumulative roll bonding[J]. Acta Materialia, 2016, 110: 341-351.
- [21] Du J, Li J, Feng Y, et al. Effect of layered heterogeneous microstructure design on the mechanical behavior of medium carbon steel[J]. Materials and Design, 2022, 221: 110953.
- [22] Ning H, Wang C, Gao Y, et al. Understanding the deformation behaviours of Mg alloys with dispersed non-basal grain-embedded orientation heterostructures[J]. Acta Materialia, 2024, 267: 119727.
- [23] 杜旭东. Mg-Al-Ca 系合金凝固行为及热裂机理研究[D]. 沈阳工业大学, 2023.
- [24] 杜宜卓, 郭恩宇. 挤压温度对 TC4_p/ZK60 复合材料组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(8): 1097-1103.
- Du Yizhuo, Guo Enyu. Influence of extrusion temperature on microstructure and properties of TC4_p/ZK60 composites[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2024, 44(8): 1097-1103.
- [25] 常海, 徐超, 胡小石. 累积叠轧纯 Mg/ZK60 镁合金层状金属复合材料的组织与性能[J]. 复合材料学报, 2019, 36(1): 178-185.
- Chang Hai, Xu Chao, Hu Xiaoshi. Microstructure evolution and mechanical properties of Mg/ZK60 laminated composite fabricated by accumulated roll-bonding[J]. Acta Materialia Compositae Sinica, 2019, 36(1): 178-185.
- [26] Zeng L F, Gao R, Fang Q F, et al. High strength and thermal stability of bulk Cu/Ta nanolamellar multilayers fabricated by cross accumulative roll bonding[J]. Acta Materialia, 2016, 110: 341-351.
- [27] Hwang Y M, Hsu H H, Lee H J. Analysis of plastic instability during sandwich sheet rolling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1996, 36(1): 47-62.
- [28] Ma X, Huang C, Moering J, et al. Mechanical properties of copper/bronze laminates: Role of interfaces[J]. Acta Materialia, 2016, 116: 43-52.
- [29] Meng Y, Zhang H, Lin B, et al. Microstructure and mechanical properties of the AZ31/GW103K bimetal composite rods fabricated by co-extrusion[J]. Materials Science and Engineering A, 2022, 833: 142578.
- [30] 唐意智, 何维均, 蒋斌. 累积叠轧 Mg/Ti 复合材料的微观组织与力学性能[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(10): 59-67.
- Tang Yizhi, He Weijun, Jiang Bin. Microstructure and mechanical properties of Mg/Ti laminated composites fabricated by accumulative roll bonding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(10): 59-67.
- [31] 杨然, 宋韶杰, 刘飞龙, 等. 累积叠轧焊 Cu/Nb 多层材料中的滑移传递研究[J]. 金属学报, 2024-12-18.
- Yang Ran, Song Shaojie, Liu Feilong, et al. Slip transfer in accumulative roll bonding Cu/Nb multilayer composites[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2024-12-18.
- [32] Alil A, Popović M, Radetić T, et al. Influence of an accumulative roll bonding (ARB) process on the properties of AA5083 Al-Mg alloy sheets[J]. Metallurgical and Materials Engineering, 2014, 20(4): 285-95.
- [33] 江鹏, 李骆宾, 张可, 等. 累积叠轧制备石墨烯/铝复合材料的组织与性能[J]. 热加工工艺, 2022, 51(22): 68-73.
- Jiang Peng, Li Luobin, Zhang Ke, et al. Microstructure and properties of graphene/aluminum composites prepared by accumulative roll bonding[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(22): 68-73.
- [34] 管笛, 曲美晶, 花福安. 累积叠轧温度对 AZ31 镁合金组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(11): 78-83.
- Guan Di, Qu Meijing, Hua Fuan. Effects of accumulative roll bonding temperature on microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(11): 78-83.
- [35] 贾少伟, 张郑, 王文, 等. 超细晶/纳米晶反 Hall-Petch 变形机制最新研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(23): 114-118.
- Jia Shaowei, Zhang Zheng, Wang Wen, et al. The current situation of deformation mechanism on inverse Hall-Petch in crystalline material[J]. Materials Reports, 2015, 29(23): 114-118.