

铝合金轧制成形组织性能调控技术研究进展

米娇娇, 李艳豪

中国重型机械研究院股份公司 陕西西安 710018

摘要: 铝合金作为关键的轻质结构材料, 广泛应用于航空航天、汽车制造及船舶等领域。轧制成形是铝合金成形的主要塑性成形方式之一, 通过控制其微观组织结构来实现性能的精确调控已是其研究的重点方向。基于此, 系统梳理了铝合金轧制成形组织性能调控技术的研究进展, 重点分析了温度、变形量、轧制速度等工艺参数对组织演变的影响规律, 以及合金成分与热处理工艺对性能调控的作用。

关键词: 铝合金; 轧制; 组织性能; 工艺参数; 热处理

Research progress on microstructure and properties control technology of aluminum alloy rolling forming

MI Jiaojiao, LI Yanhao

China National Heavy Machinery Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710018, Shaanxi, China

Abstract: Aluminum alloy, as a key lightweight structural material, is widely used in aerospace, automotive manufacturing, shipbuilding and other fields. Rolling forming is one of the main plastic forming methods for aluminum alloy forming, and precise control of its properties by controlling its micro structure has become a key research direction. Based on this, this article systematically reviews the research progress of micro structure and performance control technology in aluminum alloy rolling forming, with a focus on analyzing the influence of process parameters such as temperature, deformation, and rolling speed on micro structure evolution, as well as the role of alloy composition and heat treatment process optimization in performance control.

Keywords: aluminum alloy; rolling; microstructure and property; process parameters; heat treatment

1 序言

由于铝合金具有密度小、比强度高、耐腐蚀性好等特性, 因此广泛应用于航天航空、船舶、汽车及建筑等多个领域。铝合金在航空航天领域广泛应用于结构件和航空器零部件, 如制造飞机机身的外壳、肋骨和壁板等部件, 以保证飞机整体结构的稳定性; 还广泛应用于其他关键部件, 如起落架、舱门和机翼等^[1]。铝合金在船舶工程中用于船体和船

舶设备, 如船体、艇身装饰、舵轮、锅炉和压缩机等^[2]。铝合金在汽车领域用于发动机缸体、缸盖、变速器壳体、底盘结构件, 以及车身面板、车身覆盖件和装饰件等^[3]。轧制成形是铝合金加工的关键工艺之一, 通过轧制不仅可以获得所需的几何尺寸, 更重要的是能够通过控制微观组织结构来调控材料的力学性能、物理性能等。近年来, 随着高性能、高精度铝合金产品需求的不断增长, 如何精确

调控铝合金在轧制过程中的组织演变及最终性能已成为研究的主要方向之一。

本文将系统梳理铝合金轧制成形组织性能调控技术的研究进展,重点分析轧制过程中的组织演变规律、关键调控技术及其对性能的影响,并分析了新型轧制技术的发展。

2 轧制成形原理及其组织演变

铝合金轧制成形的常见方法是纵向轧制,轧制时上下工作辊运动方向相反,轧件的轴线与轧辊轴线空间垂直;轧坯向着一个方向运动,以纵向延伸为主。轧件在厚度方向变形不均匀,表面变形大于心部变形;沿长度方向变形也不均匀,既有压缩变形也有剪切变形^[4-6]。轧制原理如图1所示。

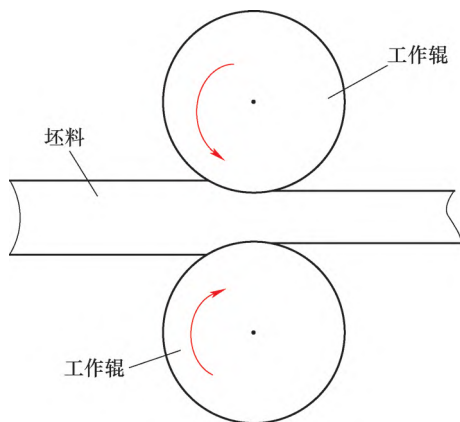


图1 轧制原理示意

在变形过程中,金属中的位错密度迅速增加,晶粒发生拉长变形,形成一定的择优取向,即变形织构,随着变形程度的增加,原始晶界被拉长,同时产生亚晶界,晶粒被细分成更小的亚晶,整个晶体结构发生显著变化^[7-9]。铝合金热轧过程通常在其再结晶温度以上进行,此时材料具有较低的变形抗力和较高的塑性,变形过程伴随着动态回复和动态再结晶,使得变形能以较低的能耗完成;而冷轧则在室温下进行,主要依靠位错滑移等机制实现塑性变形,变形过程中的加工硬化效应显著,材料强度持续提高但塑性下降。

3 组织性能调控关键技术

工艺参数调控、合金成分优化、热处理工艺优化是铝合金轧制成形组织性能调控的重要方式。其中,工艺参数调控主要是指轧制温度、轧制速度、

变形量的控制;合金成分优化是指Cu、Mg、Si、Mn及稀土元素等的添加;热处理方式主要是在轧制之后通过固溶、时效、退火等方法进一步调控合金组织和性能。

3.1 工艺参数优化技术

(1) 温度控制 轧制温度对铝合金组织演变的影响主要体现在回复和再结晶行为的调控上。高温轧制时,热激活效应使位错的攀移与消失更为容易,动态回复和动态再结晶过程更加显著。温度过高时晶粒异常长大现象加剧,导致组织不均匀和性能下降。相反,低温轧制则主要通过位错强化和亚晶强化机制来提高材料强度,但可能导致塑性降低。

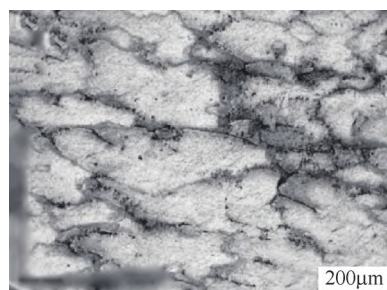
马少明^[10]研究了不同轧制温度下7075铝合金的组织演变及力学性能,当轧制温度为250~350℃时,7075铝合金晶粒尺寸先增大后减小,晶粒当量直径平均值从215μm增加至257μm,然后又减小至220μm;当轧制温度从350℃升高至400℃时,晶粒进一步细化,初始晶界组织一次晶界组织变得不明显,初始粗大晶界逐步消失,出现了细小球状晶粒,晶粒当量直径平均值减小至47μm;在400℃轧制时存在再结晶现象。不同温度下7075铝合金的微观组织如图2所示。

王宗谱^[11]对7A85铝合金形变再结晶近奇异晶界及控制进行了研究,将经双级固溶处理的7A85铝合金分别在250℃、300℃、350℃、400℃和450℃下进行厚度变形量为80%的轧制后,再经520℃×30min再结晶退火。晶界比例表现为随轧制温度的升高呈先上升后下降趋势,当下降至一定值后将保持基本恒定的变化规律。

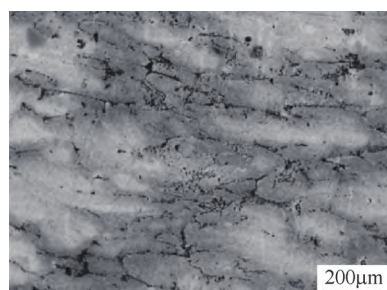
余伟^[12]对不同变形温度下7A04铝合金组织与性能的变化规律进行了研究,结果表明,在320℃和360℃下轧制变形,7A04铝合金以动态回复为主要软化机制;在400℃以上变形时,发生动态再结晶,温度升高有利于动态再结晶。

李红祥^[13]研究了低温形变热处理对6201铝合金组织性能的影响,6201铝合金经过固溶处理后轧制,在相同轧制压下量条件下,轧制温度越低,位错胞和位错列等数量越多,甚至会形成亚晶。

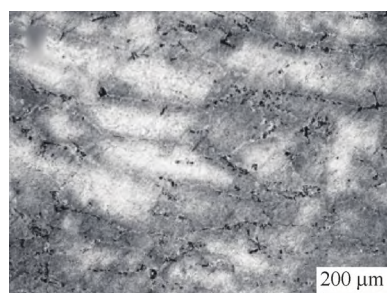
齐国旭^[14]探索了6061铝合金深冷轧制时力学性能及其强化机理研究,相比于室温轧制试样,深冷



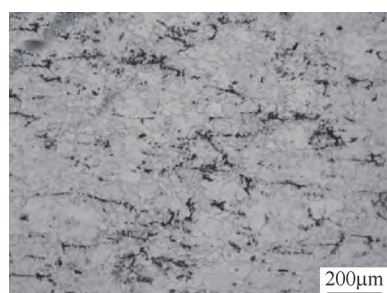
a) 250°C



b) 300°C



c) 350°C



d) 400°C

图2 不同轧制温度下7075铝合金的微观组织^[10]

轧制T6态试样的晶粒细化程度更高，晶粒内部存在更高密度的小角度晶界，位错缠结现象更加明显；此外，晶粒内部还观察到了大量的纳米孪晶及层错，且其周围存在相当程度的晶格畸变，导致其附近的位错运动更加困难，从而提升了材料的强度。

研究表明，通过在厚度方向建立特定的温度梯度可以实现材料组织的梯度分布，从而获得表面与内部性能差异化的铝合金板材^[15, 16]。表面急冷轧制

技术通过轧辊冷却系统使板材表面快速冷却，而内部保持较高温度，能够在表面形成细小晶粒，同时内部组织仍保持较好塑性。

(2) 轧制速度 轧制速度对合金塑性的影响较为复杂，较高的轧制速度可以降低合金的各向异性，合适的轧制速度可以细化晶粒，从而提高合金塑性；随着轧制速度的增加，加工硬化速率增加，合金的塑性降低。

DU等^[17]以1060铝合金为研究对象，利用累积叠轧技术制备超细晶1060铝合金板材，增加异速比均可以改善1060铝合金板材的Copper织构和S织构组分及分布，降低其平面各向异性，进而提升板材的成形性能。

张鹏等^[18]对2A14铝合金进行了420°C不同应变速率的3道次热轧试验，结果表明，随着轧制应变速率的增加，T6态2A14铝合金的抗拉强度与屈服强度先升高后降低，伸长率先降低后升高。轧制应变速率继续升高，合金晶粒尺寸无明显变化。

鞠英男^[19]以7075铝合金板材轧制为研究对象，在压下量相同的情况下，改变轧制速度。轧制后期7075铝合金轧制板材力学性能有着明显的增加趋势，轧制初期轧制速度对力学性能影响不大。在轧制初期，5m/min轧制速度的晶粒细化程度最高，6m/min轧制速度晶粒较为粗大，在轧制后期，伴随选择的轧制速度的增大，不规则晶粒较多，形变组织与动态再结晶组织共存，如图3所示。

(3) 变形量控制 对于大部分铝合金，增加变形量能够提高位错密度，晶粒尺寸显著细化，强度提高。在热轧过程中，粗大第二相（如 Al_2Cu 相、 $MgZn_2$ 相）沿轧制方向破碎，形成断续分布的细小析出相，减少偏析并提升组织均匀性；变形量超过一定比例后，再结晶晶粒尺寸会长大与粗化，位错密度也会降低，合金强度也会降低。

在冷轧过程中，变形量越大，合金的形变储能越大，后续过程中发生再结晶的驱动力也越大^[20, 21]。但是，过大的变形量会致使合金产生加工硬化现象，通过合理匹配中间退火工艺可以消除加工硬化、恢复材料塑性，同时通过静态再结晶调控晶粒尺寸和组织特征。

翟鹏飞^[22]的研究表明，随着轧制变形量的增加，Al-Mg-Si-0.1La铝合金的铸态组织逐渐消失，

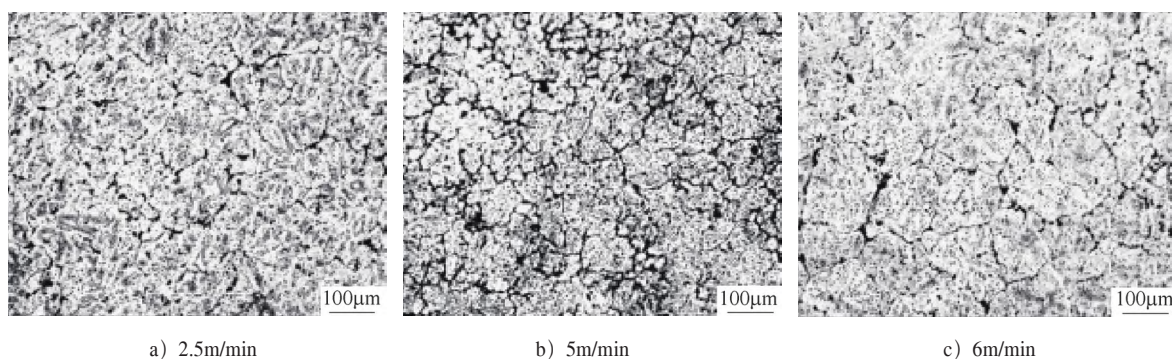


图3 不同轧制速度下某道次板材微观组织^[19]

晶粒沿轧制方向被拉长,小角度晶界和位错密度逐渐增加。经过热处理后,晶粒尺寸逐渐减小,粗大第二相的数量也逐渐减少。当轧制变形量达到75%时,合金晶粒达到最小尺寸,为65μm;同时,粗大第二相的数量降至最低,仅占1.32%。此时,合金展现出最佳的力学性能。

李姚君等^[23]探究了不同轧制变形量下轧制成形且在T6热处理后的微观组织。在试验范围内,变形量越大,晶粒越细小。与此同时,位于晶界的强化相由于受力破碎,沿着轧制方向断续分布。

周晓平等^[24]对不同轧制变形量下7050铝合金的轧制变形与组织性能进行了分析,在55%轧制变形量的7050铝合金中,可见轧制条带和细小再结晶晶粒,增加变形量至65%以上,晶粒粗化长大,35%变形量时位错密度低,55%时位错密度增大,形成胞状结构,75%变形量时,再结晶晶粒粗化长大,位错密度降低。不同变形量下的拉伸性能见表1。

表1 不同轧制变形量下7050铝合金的拉伸性能^[24]

轧制变形量 (%)	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	断后伸长率 (%)
25	611.4	596.4	8.1
35	620.4	614.0	6.6
45	629.7	621.4	7.2
55	661.2	639.6	7.0
65	621.1	601.6	5.4
75	546.3	533.6	4.6

3.2 合金成分优化

合金成分中的主要元素如Cu、Mg、Si、Mn及稀土元素等,在铝合金中通过析出强化、晶粒细化等机制影响材料组织性能。例如,Cu是6系铝合金的主要元素之一,通过形成第二相实现析出强化;

Al-Mg-Si系合金的主要元素是Mg和Si,它们能形成稳定的Mg₂Si初生相,以及分散的β" (Mg₅Si₆)相、β' (Mg₉Si₅)相,使基体得到强化,因此Mg、Si添加量可直接影响合金的性能;在Al-Mg合金中添加0.5%~1.0% (质量分数,下同)的Mn,可形成弥散分布的Al₆Mn相,有效钉扎晶界和亚晶界,提高高温变形稳定性;稀土元素通过协同作用,包括晶界调控、第二相强化及熔体净化等机制,在铝合金的轧制过程中显著提升了材料的强度与塑性。另外,通过合金成分设计也可以调控轧制过程中的组织演变。

李嘉豪^[25]对Cu元素及热处理对6101铝合金组织与性能的影响进行了研究分析。结果表明,Cu添加引入的第二相强化与细晶强化相结合,提高了合金的硬度和抗拉强度,降低了塑性,当Cu添加到1.00%时,铸态铝合金的硬度和抗拉强度分别从65.83HV、71.35MPa提高到74.74HV、78.4MPa。

胡奇等^[26]研究了Mg、Si含量对Al-Cu-Mg-Ag-Si合金析出相的影响。结果表明,Al-Cu-Mg-Ag-Si合金中高Mg含Si合金析出了大量S相和粗大的第二相;低Mg低Si合金中析出了常见的θ相和Ω相;低Mg含Si合金中出现了6系铝合金中常见的σ相和β"相等多种析出相,且具有非常细小弥散的θ相,为合金提供了良好的强化效果。

饶宇^[27]研究了轧制工艺及Er元素对6016铝合金组织与性能的影响。研究结果表明,适当添加Er元素,可以使铸态6016铝合金的晶粒细化,获得较小的初始晶粒,轧制后具有较多的晶界,使热处理后的板材再结晶后获得较小的晶粒,达到细化晶粒的效果,当添加Er含量为0.29%时,细化效果最佳。

综上所述,合金成分优化可通过对合金中的元素进行调控,或者重新加入合金元素来调控合金微

观组织，从而影响合金性能。适当的合金元素加入量，可以有效提高合金硬度和强度^[28-31]。不同Er含量的6016铝合金轧制态硬度和强度情况见表2。

表2 不同Er含量的6016铝合金轧制态硬度和强度情况^[27]

Er含量 (质量分数, %)	硬度HV	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa
0	113.44	298.35	181.88
0.13	119.23	301.47	197.55
0.29	123.52	318.77	295.29
0.48	116.84	303.81	245.91

3.3 热处理优化

铝合金轧制过程中的热处理工艺主要包括退火处理、固溶处理和时效处理等。退火处理是通过原子扩散、再结晶等机制，来调整合金微观组织、优化性能。固溶处理与时效处理相结合，目的是使合金内的可溶性元素重新溶解到合金基体中。快速冷却技术可以避免合金中亚稳态相的形成，从而产生过饱和固溶体。但是，这种过饱和固溶体不稳定，其较容易发生脱溶析出。因此，固溶之后的时效处理是必不可少的。

6×××系铝合金的固溶处理中主要目的是使强化相(β相)回溶至基体；随着固溶时间的增加，β相的溶解量也在增加。7系铝合金固溶处理通常将合金加热到一定温度并保温一段时间，使第二相(如MgZn₂、Al₂CuMg)充分溶解于基体，形成过饱和固溶体^[32-35]。时效处理中，过饱和固溶体逐渐析出第二相。

方越平^[36]对7075铝合金经均匀化→冷变形→固溶→时效工艺处理，当变形量为30%时，时效温度140℃时的析出相平均粒径为9.6nm，而时效温度160℃时的析出相平均粒径为30.8nm，可判断出时效温度140℃时主要析出η'相，时效温度160℃时主要析出η相。

李毅^[37]的研究表明，6061铝合金随着保温时间的增加，β相的溶解量增加。对固溶后的合金进行时效处理，合金中能形成β'、β"等亚稳相粒子。

李嘉豪^[25]研究了热处理工艺对6061铝合金组织与性能的影响。研究结果表明，在固溶过程中，由于温度升高，第二相由化合物状态转变成原子状态溶入基体，使得第二相充分溶解。

热处理工艺可以显著影响合金的晶粒尺寸，也

可以促进强化相的析出。合适的热处理工艺可以有效提高合金的硬度和强度。如7075铝合金经均匀化→冷变形→固溶→时效处理，当时效温度为120℃时强度最高，屈服强度为337.4MPa，抗拉强度为439.2MPa，具体力学性能见表3。

表3 7075铝合金不同时效温度的力学性能^[36]

时效温度/℃	断后伸长率(%)	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa
120	9.3	439.2	337.4
140	10.0	350.4	237.9
160	6.7	369.4	258.8

4 新型轧制技术

随着市场的发展，对产品的要求也逐渐提高。基于传统轧制工艺，逐步创新出了适用于不用场景的高性能轧制技术。铝合金的高性能轧制技术主要有连轧、非对称轧制、轧制复合技术、超声波辅助轧制，以及大塑性变形累积叠轧等技术^[38-42]。

4.1 连轧技术

连轧技术是通过多机架联动实现板带材的轧制，有热连轧和冷连轧。该技术有高效、低能耗和流程较短的优点，所得产品表面质量、板形都较为优良。在连轧过程中，随着动态再结晶的反复发生，合金晶粒尺寸得到充分优化，力学性能也得到充分提高。5083铝合金热连轧后抗拉强度可达275MPa，屈服强度126MPa，伸长率27%，与铸态合金相比分别提升提升20%、15%和50%^[43]。

4.2 非对称轧制技术

非对称轧制技术是通过速度差、辊径差等方式，以及不同方式组合进行的轧制。非对称轧制可以有效改变合金织构，降低合金各向异性。AA5454铝合金板材经不对称轧制后立方、高斯、旋转立方等织构占比减少，平面异性降低^[44]。单辊驱动轧制Al-5.6Zn-2.5Mg-1.4Cu合金，由于旋转立方织构的形成减小了总的织构强度，以及动态再结晶过程中新晶粒的形成，因此使合金面内异性值降低^[45]。

4.3 铝合金轧制复合技术

铝合金轧制复合技术是通过轧制的方式将两种以上的金属结合到一起的方法。该技术可以获得优于单种金属性能的产品，有效扩大了金属的使用范围。复合板界面结合强度和成形质量是轧制复合技术的关键控制点。温差、异速比和压下率是影响复

合板界面结合强度和成形质量的关键因素；在一定范围内温差、异速比和压下率越大，界面结合强度和成形质量越高^[46-48]。差温轧制6063/7072铝合金复合板，压下率在20%~40%内增大，温度差在50~150℃内增加时，复合板的翘曲率逐渐减小^[49]。

4.4 累积叠轧（ARB）技术

累积叠轧（ARB）技术是一种新型强塑性变形技术，ARB技术的基本原理是将板材切割、叠合后进行轧制结合，然后重复上述过程多次。这种技术能够在不改变板材几何尺寸的前提下，实现极高的累积变形量，有效细化晶粒结构。同种铝合金和不同种铝合金在经过多道次累积叠轧后，其力学性能均有很大得提升。例如：高温累积叠轧工艺制备6061/7075铝合金层状复合板，在冷轧压下量为12.5%~37.5%时，界面结构保持平直连续，由于加工硬化与细晶强化共同作用，复合板抗拉强度随冷轧压下量的增加而增大；当冷轧压下量超过37.5%后，硬层发生颈缩和断裂^[50]。

4.5 超声波辅助塑性变形技术

超声波辅助塑性变形技术是通过超声波能量辅助来影响金属的塑性变形行为。超声波能量场对塑性变形的影响主要是提高材料的流动性和成形能力，以及改善模具与工件的接触情况^[51]。在铝合金热轧中，施加超声波处理既可加速再结晶过程，细化晶粒尺寸，也可以有效提高合金力学性能。2219铝合金在热轧过程中，施加一定时间的超声波处理后，晶粒尺寸降低51.3%，抗拉强度提高65.4%，屈服强度提高18.7%^[52]。

5 结束语

铝合金的轧制方式、轧制工艺参数、热处理工艺等对其组织性能均有显著的影响。目前，关于铝合金轧制工艺参数的研究以单因素变量为主，缺少多变量共同作用的规律探索；合金元素对组织与性能的影响，以添加一种元素为主要研究对象，缺乏添加多种元素的研究；此外，以实际生产中存在问题为基础的研究较少。

今后，铝合金轧制成形的组织与性能优化技术研究探讨方向可以从复合成形，多元素共同作用，以及大数据辅助等方面开展，具体如下。

1) 将大数据辅助与轧制技术相结合，通过大数

据辅助技术优化出最佳工艺参数，最佳微合金添加组分和含量，以提高优化效率。

2) 不同微合金元素的协同优化，同时添加几种合金元素与单元素相比，作用机制和优化效果的区别。

3) 复合轧制技术的探索，不同轧制技术结合使用时，轧制工艺参数对组织与性能的调控，以及与单轧制技术的对比分析。累积叠轧、能量辅助轧制等在实际中的应用，包括所需设备的探索研究。

参考文献：

- [1] 李伟. 铝合金在航空航天领域的应用与技术创新趋势[J]. 大众标准化, 2024 (6) : 49-51.
- [2] 张磊, 熊永亮. 铝合金在船舶工程中的应用实践[J]. 船舶物资与市场, 2023, 31 (8) : 7-9.
- [3] 曹玉凤, 郭望, 李亨, 等. 铝合金在汽车轻量化中的研发应用及发展[J]. 汽车工程学报, 2025, 15 (2) : 125-136.
- [4] 马存强, 侯陇刚, 庄林忠, 等. 铝合金板材同步/异步轧制变形行为有限元分析[J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (6) : 125-132.
- [5] 杨若雯. 铝合金厚板蛇形轧制应变建模及分析[D]. 太原: 太原科技大学, 2024.
- [6] 江连运, 卫焱宇, 薛志伟, 等. 基于流函数法的铝合金板材异步轧制应变计算数学模型[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52 (3) : 911-920.
- [7] 姚未怡, 卜恒勇. 轧制态7050铝合金双道次热变形微观组织演变[J]. 材料导报, 2025, 39 (4) : 168-175.
- [8] 周晓平, 田壮壮, 刘玉芬. 不同轧制变形量下7050铝合金的轧制变形与组织性能[J]. 锻压技术, 2024, 49 (8) : 80-87.
- [9] 江海涛, 张韵. 变形镁合金塑性加工及组织性能的理论基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2023.
- [10] 马少明. 轧制温度对7075铝合金组织演变及力学性能影响[J]. 材料研究与应用, 2024, 18 (4) : 656-661.
- [11] 王宗谱. 7A85铝合金形变再结晶近奇异晶界研究与控制[D]. 福州: 福建工程学院, 2022.
- [12] 余伟. 高温变形对7A04铝合金组织和性能影响研究[D]. 太原: 中北大学, 2011.
- [13] 李红祥. 低温形变热处理对6201铝合金组织性能的影响[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2019.

- [14] 齐国旭. 深冷轧制6061铝合金的力学性能及其强化机理研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2024.
- [15] 李磊, 鲁世红, 张涛. 铝厚板梯温剪切轧制变形研究[J]. 机械制造与自动化, 2020, 49 (4) : 24-27.
- [16] 贺有为. 温度梯度对铝合金厚板轧制变形的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [17] DU Q L, LI CH, CUI X H, et al. Fabrication of ultrafine-grained AA1060 sheets via accumulative roll bonding with subsequent cryorolling[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31 (11) : 3370-3379.
- [18] 张鹏, 段宏钢, 张丽娜, 等. 轧制应变速率对2A14铝合金组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50 (15) : 91-93.
- [19] 鞠英男. 7075铝合金板材热轧过程中组织性能变化规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [20] 苏原明, 赵艳君, 陈思昊, 等. 冷轧变形量和退火制度对超快速加热下5083铝合金晶粒尺寸的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50 (3) : 948-956.
- [21] 李永欣, 王建伟. 不同冷轧变形量3003铝合金的再结晶退火工艺研究[J]. 热处理技术与装备, 2025, 46 (1) : 1-5.
- [22] 翟鹏飞. 均匀化及轧制工艺对Al-Mg-Si-0.1La铝合金组织和性能的影响[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2024.
- [23] 李姚君, 何方有, 郜均虎, 等. 轧制变形量对2A14铝合金组织及性能的影响[J]. 冶金管理, 2020 (15) : 16-17.
- [24] 周晓平, 田壮壮, 刘玉芬. 不同轧制变形量下7050铝合金的轧制变形与组织性能[J]. 锻压技术, 2024, 49 (8) : 80-87.
- [25] 李嘉豪. Cu元素及热处理对6101铝合金组织性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2024.
- [26] 胡奇, 郭一鸣, 章立钢, 等. Mg、Si含量对Al-Cu-Mg-Ag-Si合金析出相的影响[J]. 矿冶工程, 2024, 44 (1) : 143-146.
- [27] 饶宇. 轧制工艺及Er元素对6016铝合金组织与性能的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2023.
- [28] ZHONG H, ROMETSCH P A, CAO L, et al. The influence of Mg/Si ratio and Cu content on the stretch formability of 6xxx aluminium alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2016, 651: 688-697.
- [29] WU X, GUAN Z P, YANG Z Z, et al. Effect of Cu content on central-segregation composition and mechanical properties of Al-Mg-Si alloys produced by twin-roll casting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 869: 144782.
- [30] NORMAN, A F, HEDY K, COSTELLO F, et al. Examination of the effect of Sc on 2000 and 7000 series aluminium alloy castings: for improvements in fusion welding[J]. Materials Science and Engineering: A, 2003, 354 (1) : 188-198.
- [31] 单世杰. 微合金化对6082铝合金组织和性能调控机理的研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2024.
- [32] 郭旭东, 邹仕军, 卢影峰, 等. 固溶工艺对7C04铝合金组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2025, 50 (3) : 132-137.
- [33] 戴晓元, 熊超宇, 华煜煜. 固溶-时效对7×××系铝合金淬透性的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43 (7) : 155-162.
- [34] 黄超群, 赵天生, 高飞. 热处理对7×××系铝合金组织及性能影响的研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29 (23) : 98-102, 107.
- [35] 李惠曲, 邢清源, 张景亮, 等. 固溶工艺对7075铝合金薄板组织与损伤容限性能的影响[J]. 机械工程材料, 2025, 49 (5) : 91-97.
- [36] 方越平. 7075铝合金的形变热处理工艺及组织性能研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2023.
- [37] 李毅. 轧制及热处理工艺对6xxx系列铝合金组织与性能影响的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2024.
- [38] 卢仲圩, 邵健, 何安瑞. 宽幅铝合金板带热连轧高精度板形控制系统[J]. 金属世界, 2019 (4) : 75-80.
- [39] 刘志文, 王倩雅, 刘雪梅, 等. 浅谈连铸连轧生产工艺特点及其对铝合金成分添加剂质量的特异性要求[J]. 有色金属加工, 2023, 52 (6) : 45-49.
- [40] ZANCHETTA B D, DA SILVA V, SORDI V L, et al. Effect of asymmetric rolling under high friction coefficient on recrystallization texture and plastic anisotropy of AA1050 alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29 (11) : 2262-2272.
- [41] 肖颜君, 李林艳, 熊英杰, 等. 累积叠轧及时效热处理对6061铝合金腐蚀性能的影响[J]. 热加工工

- 艺, 2025 (16) : 44-49, 55.
- [42] OU L, LI L Y, FAN C H, et al. Enhancement of strength and ductility in 6061Al alloy processed by cross accumulative roll bonding[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33 (7) : 2001-2013.
- [43] 赵明伟, 陈兴旺, 梁忠, 等. 不同工艺制备的 5083-O 铝合金板材的组织 and 性能[J]. 轻金属, 2020 (3) : 36-39.
- [44] GODEC M, ZAEFFERER S, KRANER J, et al. Influence of symmetric and asymmetric rolling on texture evolution of work-hardened AA 5xxx aluminium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2025, 35 (1) : 30-44.
- [45] KAZEMI-NAVAEE A, JAMAATI R, JAMSHIDI AVAL H. Effect of single roll drive rolling on microstructure, texture, and mechanical property anisotropy of Al-5.6Zn-2.5Mg-1.4Cu aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33 (11) : 3266-3281.
- [46] 张小惠, 彭文飞, 傅邦杰, 等. 6063/7072 铝合金复合板异温异步轧制界面结合强度多因素影响分析[J]. 塑性工程学报, 2025, 32 (5) : 15-22.
- [47] 张会强, 张丁丁, 刘志敏, 等. 余温轧制压下率对 1070A/2024 铝合金铸轧复合板材组织性能影响研究[J]. 有色金属加工, 2025, 54 (3) : 9-14, 31.
- [48] 唐超兰, 周钰波, 翁浩, 等. 等厚 4343/4A60 铝合金板轧制复合变形规律及其界面结合行为[J]. 轻合金加工技术, 2016, 44 (7) : 26-31.
- [49] 傅邦杰, 彭文飞, 林龙飞, 等. 差温轧制 6063/7072 铝合金复合板有限元模拟及翘曲影响因素[J]. 材料导报, 2024, 38 (15) : 66-73.
- [50] 路光明. 累积叠轧 6061/7075 铝合金层状复合板界面结构及性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- [51] 田少杰, 刘雪峰, 王文静, 等. 超声振动系统的研究现状及其在塑性成形领域的应用进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59 (20) : 198-214.
- [52] 黄冠. 2219 铝合金超声凝固组织在热轧中的演变及其对性能的影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2023.
- (收稿日期: 20250513)

(上接第115页)

3) 筛选出3组高性能简单双重退火制度: 7[#]试样强塑积 14707 MPa%、10[#]试样强塑积 17248 MPa%、11[#]试样强塑积 13470 MPa%。实现与复杂双重退火 (00[#]试样强塑积 15612.5 MPa%) 等效的强塑性匹配 ($\Delta R_m < 5\%$, $\Delta A < 2.5\%$)。

参考文献:

- [1] HUANG B Y, LI C G, SHI L K, et al. Chinese material engineering dictionary[M]. Beijing: China Materials Engineering Canon, 2005.
- [2] HUANG X, ZHU Z S, WANG H H, et al. Advanced Aeronautical titanium alloys and applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.
- [3] 陈军, 赵永庆, 常辉. 中国船用钛合金的研究和发展[J]. 材料导报, 2005 (6) : 67-70.
- [4] 中国工程院化工、冶金与材料工程学部与中国材料研究学会. 中国新材料产业发展报告[M]. 北京: 化学工业出版社, 2022.
- [5] 李斌. 航空用钛合金 TC18 板材轧制工艺研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- [6] CHEN Y, WANG K, REN Z. Interaction between phase transformation and static recrystallization during annealing of rolled TC18 titanium alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 202: 1-15.
- [7] 翟欣姣, 张明玉, 宋一新, 等. 热处理温度对 TC18 钛合金微观组织与冲击性能的影响[J]. 稀有金属与硬质合金, 2024, 52 (5) : 62-67.
- [8] 于兰兰, 毛小南, 赵永庆, 等. 热变形行为与 BT22 钛合金的组织演变[J]. 稀有金属材料与工程, 2007 (3) : 505-508.
- [9] 汤育玺, 王进, 崔明磊, 等. 双重退火工艺对准 β 锻 TC18 合金锻件组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49 (11) : 262-266.
- [10] 王晓燕, 郭鸿镇, 姚泽坤, 等. 双重退火对 TC18 钛合金等温锻件组织性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2009, 30 (1) : 100-103.
- (收稿日期: 20250414)