DOI: 10.3901/JME.2021.08.146

大压下量限宽轧制 AZ31 镁合金板材的边裂行为及强化机制*

聂慧慧^{1,2} 郑留伟^{2,3} 田 静² 梁 伟^{2,3}

- (1. 太原理工大学机械与运载工程学院 太原 030024;
2. 先进镁基材料山西省重点实验室 太原 030024;
3. 太原理工大学分析测试中心 太原 030024)

摘要: AZ31 镁合金板在航空、航天、汽车、电子、武器等轻量化领域具有广阔的应用前景,但其塑性成形能力较差,无法承受单道次大压下量轧制变形,且易产生边裂。对 AZ31 镁合金板分别进行传统轧制和限宽轧制,结果表明,采用限宽轧制时,镁合金板材的单道次实际压下量最高可达 50%,双向压缩应力状态可有效抑制边裂产生,裂纹长度在 2 mm 以内;同等压下量时,传统轧制的镁合金板边裂严重,中心区域也出现鱼鳞状裂纹。与原始板材相比,限宽轧制镁合金板的位错强化作用明显,沿轧向的屈服强度和抗拉强度分别提高了 54.7%和 54.1%,沿横向的屈服强度和抗拉强度分别提高了 383.9%和 131.1%。限宽轧制板材沿横向的强度和伸长率均高于轧向,主要原因是沿横向的细晶强化作用更强。

关键词: AZ31 镁合金板; 限宽轧制; 大压下量; 边裂; 强化

中图分类号: TG33

Edge Crack Behavior and Strengthening Mechanism of Width-limited Rolled AZ31 Magnesium Sheet with Large Reduction

NIE Huihui^{1,2} ZHENG Liuwei^{2,3} TIAN Jing² LIANG Wei^{2,3}

- (1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024;
2. Shanxi Key Laboratory of Advanced Magnesium-based Materials, Taiyuan 030024;
3. Instrumental Analysis Center, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024)

Abstract: AZ31 magnesium alloy sheet has a broad application prospect in the field of lightweight including aviation, aerospace, automotive, electronics, weapons, etc. However, its plastic forming ability is so poor that it cannot withstand large rolling reduction in a single pass and easy to produce edge cracks. Traditional rolling and width-limited rolling are conducted on AZ31 sheet respectively. The results show that the actual maximum single rolling reduction can reach 50% and the length of edge crack is less than 2 mm under bidirectional compressive stress. However, serious edge cracks and fish-scale cracks in center region can be observed in AZ31 sheet fabricated by traditional rolling with 50% rolling reduction. Compared with as-received sheet, the strengthening mechanism of the width-limited rolled magnesium sheet is mainly dislocation strengthening. The yield strength and tensile strength of width-limited rolled sheet along the rolling direction increase by 54.7% and 54.1%, and along the transverse direction increase by 383.9% and 131.1%, respectively. The strength and elongation along the transverse direction of width-limited rolled sheet are higher than that along the rolling direction owing to its stronger refinement strengthening effect.

Key words: AZ31 magnesium alloy sheet; width-limited rolling; large rolling reduction; edge crack; strengthening

0 前言

镁合金具有密度小、比强度高、比刚度、电

磁屏蔽性能好等优点,轧制镁合金薄板在航空、航天、汽车、电子、武器等轻量化领域具有广阔的应用前景^[1-2]。然而,镁合金本身特殊的密排六方结构导致其塑性变形协调能力较差^[3],单道次轧制压下量只能达到 5%~15%,超过这个压下量,镁合金中能够开动的滑移系无法协调变形,导致板材发生开

* 国家自然科学基金(52005362, U1810208, U1710254)和山西省高等学校科技创新(2019L0149, 2019L0994)资助项目。20201115 收到初稿, 20210310 收到修改稿

裂。若最终要求的轧制压下量较大,则一般采用以下两种方法:① 提高轧制温度:温度升高对镁合金板材具有软化作用,材料流动性增强,能够承受较大程度的塑性变形^[4];② 进行多道次轧制:每道次压下量较小,各道次之间配合热处理来消除上一道次的残余应力,保证下一道次成功轧制^[5]。然而,这两种方法必然会造成人力和能源消耗。此外,镁合金板材在轧制过程中一般都会存在边裂现象^[6],严重降低轧制成材率,且最终的边裂部分需要进行切边处理,造成材料和资源浪费。

目前,学者们提出了多种新的轧制技术来抑制镁合金发生边裂行为并提高镁合金单道次轧制压下量。徐海洁等^[7]研究发现在 400 ℃ 下对 AZ31B 镁合金板材进行多道次交叉轧制,可有效减小边裂尺寸,有利于促进镁合金晶粒细化和均匀化,并削弱板材基面织构^[8]。XIA 等^[9]采用对 AZ31 镁合金板材进行异步轧制,当速比为 1.05,轧制温度为 350 ℃ 时,单道次压下量可提高至 20%,平均晶粒尺寸为 5 μm ,但屈服强度和抗拉强度低于传统轧制板材。如果进一步提高速比,将更有利于获得单道次可承受压下量更大、晶粒尺寸更小的镁合金板材^[10]。谭湘夫等^[11]研究了电磁场、超声波和超声电磁组合场对镁合金铸轧板材的微观组织及力学性能的影响,结果表明,施加外场后,镁合金板材的塑性变形能力增强,平均晶粒尺寸细小均匀,综合力学性能明显提升。

此外,通过在镁合金板材表面垫衬或者包覆其他金属板材也可以提高镁合金的塑性变形能力、减小边裂尺寸。WANG 等^[12]在镁合金板材表面加入硬质合金衬板后再进行轧制,降低了镁合金板材所受的剪切应力和板材中部和边部的温度差,有效地减少了裂纹萌生。将镁合金板材包覆在铝合金板中后进行轧制,也可以改善镁合金板材受力情况,降低板材散热,最终获得边裂较小、压下量较大的镁合金板材^[13]。

同时,也有一些学者通过改变板材形状来减少边裂。HUANG 等^[14]预先在 AZ31 镁合金轧制试样的横向边缘切制了高度为 4.1 mm 的凸起,经过 5 道次传统轧制(总压下量为 77%)后未发现边裂。ZHANG 等^[15]使用沿轧向为楔形的镁合金试样在 400 ℃ 下进行传统轧制,当压下量超过 51% 时产生边裂。

综上所述,这些方法都能够在一定程度上提高镁合金板材单道次压下量、减少边裂,但轧制装备或工艺较为复杂,生产成本较高。因此,本文自行

设计异形轧辊对 AZ31 镁合金板材进行限宽轧制,旨在采用简单的轧制装置和工艺过程,在增大镁合金板材单道次轧制压下量的同时减少边裂、提高强度。分析了限宽轧制镁合金板材的力学性能与微观组织之间的关系,揭示了板材变形强化机制。

1 试验材料和方法

1.1 AZ31 镁合金板材和限宽轧制试验

试验材料为商用 AZ31 镁合金轧制板材,厚度为 3 mm,化学成分如表 1 所示。轧制前,对镁合金板材表面进行清洗和打磨,以去除板材表面油污。然后,利用线切割切制矩形的镁合金轧制试样,轧制长度方向尺寸为 70.0 mm,宽度方向尺寸为 59.6 mm,厚度方向尺寸为 2.7 mm。

表 1 AZ31 镁合金的化学成分(质量分数) %

Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Ni	Mg
0.37	0.86	0.29	0.04	0.1	0.002	0.005	余量

将所购镁合金板在 300 ℃ 下退火 1 h 后空冷,其微观组织结构如图 1 所示。可以看出,无论沿着轧向还是横向,AZ31 镁合金板材的初始组织均以粗大晶粒为主,晶粒大小很不均匀,尺寸在 6 μm 到 400 μm 之间。

(a) 轧向组织

(b) 横向组织

图 1 AZ31 镁合金板材初始组织

限宽轧制所用异形轧辊造型和实物如图 2 所示,轧辊材料为 9Cr2Mo。异形轧辊设计步骤如下:首先,根据现有轧机型号确定轧辊长度为 260 mm。其次,根据轧制板材厚度确定轧辊上凹槽和凸起部分的深度。最后,根据轧机吨位和试验设计的压下量计算板材的横向尺寸。文中所用异形轧辊各部分的具体尺寸如下:上辊外圆直径为 108 mm,中间凸起部分的直径为 120 mm,长度为 59.6 mm,高度为 5 mm,表面粗糙度 Ra 1.6 μm 。下辊外圆直径为 130 mm,中间凹槽部分的直径为 120 mm,长度为

60 mm, 深度为 5 mm, 表面粗糙度 Ra 1.6 μm 。

图 2 限宽轧制轧辊

1.2 试验方法和表征测试

将切制好的镁合金试样放置在电阻炉中, 在 400 $^{\circ}\text{C}$ 下保温 10 min 后分别进行传统轧制和限宽轧制。轧辊温度为室温, 轧制速度为 25 r/min(轧制允许的最高速度为 30 r/min)。考虑轧制后的板材会发生回弹, 本文所用压下量为通过测量轧制前后板材厚度计算所得的单道次实际压下量。

利用 X 射线衍射仪(Rigaku Smartlab SE)对限宽轧制前后的镁合金板材进行宏观织构测试。采用配有电子背散射衍射(Electron backscatter diffraction, EBSD)(Oxford Instruments)探头的场发射扫描电子显微镜(Tescan Mira 3)对限宽轧制前后镁合金板材的微观组织进行表征, 并利用 Channel 5 进行数据后处理。EBSD 测试试样的处理步骤如下: ① 切制尺寸为 10 mm×10 mm 的小样; ② 依次采用 600#、1000#、1500#、2000#和 3000#的砂纸对观察面进行打磨; ③ 采用过饱和 MgO 溶液对试样进行抛光, 并超声清洗 5 min; ④ 采用离子减薄仪对表面进行抛光, 电压 5 kV, 时间 15 min。

根据 GB/T 228.1—2010, 采用万能电子拉伸试验机(DNS 200)对限宽轧制前后镁合金板材的室温力学性能进行测试。拉伸速度为 0.5 mm/min, 试样尺寸如图 3 所示。

图 3 室温力学性能测试试样尺寸

2 结果与讨论

2.1 边裂行为

图 4 为传统轧制和限宽轧制后 AZ31 镁合金板

材的宏观形貌。对轧制前后的板材进行厚度测试, 计算可得单道次实际压下量为 50%。从图 4 中可以看出, 相同条件下, 传统轧制镁合金板材的表面几乎布满了裂纹, 边裂十分明显。中部也出现了鱼鳞状的裂纹, 几乎与边缘处的裂纹连成一体, 严重影响板材使用性能。限宽轧制后镁合金板材中心区域比较光滑, 无肉眼可见裂纹。在边缘局部区域有微小边裂, 方向平行于横向, 长度小于 2 mm, 证明限宽轧制能够有效地抑制镁合金板材产生边裂。

图 4 AZ31 镁合金板材轧制后的宏观形貌

在传统轧制和限宽轧制过程中, 镁合金板材受力情况不同是二者边裂行为差异明显的主要原因。根据体积不变原理, 传统轧制过程中, 大部分材料沿着轧向进行延伸, 小部分材料沿着横向扩展。然而, 大压下量限宽轧制过程中, 镁合金板材沿法向承受的压应力较大, 理论上板材横向扩展程度会随着压下量的增大而增大^[16]。然而, 异形轧辊上设置的凹槽限制了材料沿着横向扩展, 绝大部分材料只能沿着轧向进行延伸。

如图 5a 所示, 传统轧制板材处于双向拉伸应力状态, 由于板材边缘比中部的材料流动速度大, 因此会在板材边缘产生附加拉应力^[17]。当轧制压下量较大时, 板材边缘所受附加拉应力也较大, 导致板材内应力激增, 最终在应力集中微区萌生裂纹。此外, 剪切应力也能够引起边裂^[18], 一般裂纹方向与轧向成 45 $^{\circ}$ 角。结合图 4a 中的边裂方向可知, 在单道次大压下量的传统轧制过程中, 拉应力是导致边裂的主要原因。相比之下, 限宽轧制镁合金板材(图 5b)在横向和法向都处于压缩应力状态, 由于板材无法自由宽展, 因此会在板材边缘形成一定的凸度^[19], 减少板材中部对边缘的附加拉应力, 从而有

效抑制裂纹萌生及扩展。

图5 传统轧制和限宽轧制镁合金板材受力状态图

其次，边缘裂纹形态学指出镁合金板材边裂行为与其温度场密切相关，特别是板材中部和边缘的温度差异^[20]。李洋等^[21]采用流体循环流动加热的方式对轧辊进行加热，以期降低板材中部和边缘的温差，实现镁合金的等温轧制，最终减少板材裂纹。

传统轧制和限宽轧制过程中，镁合金板材的散热方式不同也是造成边裂差异明显的原因之一。传统轧制过程中，板材边缘为三向散热，中部则为两向散热，加之镁合金热容小、辐射率高，温度变化比一般金属都快^[22]，导致板材中部和边缘温差较大，边裂容易产生。限宽轧制过程中，板材被包覆在轧辊凸起和凹槽形成的相对密闭的空间中，板材边缘在宽展初期就受到横向压应力，降低了板材边缘散热速率，有助于保证板材中部和边缘协调变形。

2.2 力学性能

由于传统轧制镁合金板材的边缘和中部裂纹几乎贯通整个轧面，无法切制完整的单向拉伸试样。因此，仅对原始和限宽轧制镁合金板材沿轧向和横向的力学性能进行了测试，应力应变曲线如图6所示，具体性能数值如表2所示。

图6 AZ31 镁合金板材限宽轧制前后力学性能

表2 AZ31 镁合金板材限宽轧制前后的强度值 MPa

项目	原始板	限宽板	原始板	限宽板
	轧向	轧向	横向	横向
屈服强度	161	249	62	300
抗拉强度	209	322	209	483

与原始镁合金板材相比，限宽轧制后的镁合金板材沿轧向和横向的屈服强度和抗拉强度均有大幅提升，但伸长率下降。具体来说，限宽轧制镁合金板材沿轧向的屈服强度提高了 54.7%，抗拉强度提高了 54.1%。板材横向的强度提升更加显著，屈服强度提高了 383.9%，抗拉强度提高了 131.1%。在传统轧制过程中，板材内部储存的变形能可以通过边裂形式释放^[23]。然而，限宽轧制过程中板材内部的塑性变形热增大，储存了更多的变形能，因此加工硬化效果非常明显^[24]。

MAO 等^[25]研究了传统轧制镁合金板材不同方向的力学性能，结果发现传统轧制镁合金板材轧向的屈服强度和抗拉强度均高于横向。这与本文限宽轧制镁合金板材的力学性能测试结果相反，主要原因是限宽轧制过程中镁合金板材受力情况与传统轧制不同，造成板材沿轧向和横向的微观组织和力学性能差异。从应力应变曲线的斜率也可以看出，限宽轧制板材沿横向的硬化率明显高于轧向，说明板材沿横向储存了更多的变形能。

2.3 宏观组织

图7为原始和限宽轧制镁合金板材(0002)、(10-11)和(10-10)面的宏观组织测试结果，可以看出限宽轧制前后镁合金板材的宏观组织差异较大。

原始镁合金板材经过退火处理后，出现了晶粒c轴//横向的组织组分，最高强度可达5.8。限宽轧制后镁合金板材具有强烈的(0002)基面组织，大部分晶粒c轴//法向，最高强度可达6.0。限宽轧制后板材的柱面组织强度明显减弱，导致基面和柱面组织强度差值明显高于原始板材，这也是图6中限宽轧制板材力学性能各向异性明显的主要原因。

图7 AZ31 镁合金板材的宏观组织

2.4 微观组织及强化机理

为进一步探索限宽轧制镁合金板材的强化机制，分别沿其轧向和横向进行微观组织表征，结果

如图8所示。从图8a可以看出,由于镁合金板材单道次轧制压下量较大,因此可以观察到较多与轧向成 45° 的剪切变形带、大量碎晶和少量的动态再结晶细小晶粒。与限宽轧制轧向组织相比,如图8b所示,板材横向组织中细小等轴晶数量明显增多。晶粒尺寸的差异和大量剪切变形带都说明单道次压下量为50%的限宽轧制使得镁合金板材发生剧烈塑性变形,出现大量非均匀组织,这对诱发板材边裂行为具有重要影响^[26]。

图8 限宽轧制镁合金板材沿轧向和横向的微观组织

限宽轧制板材沿着横向和轧向的组织差异能够较好地解释图6中板材沿两个方向强度和塑性的区别。横向的晶粒尺寸减小,晶界面积增加,在塑性变形过程中晶界对位错的阻碍作用增强^[27],表现为限宽轧制板材沿横向的抗拉强度和屈服强度较高。在同等塑性应变条件下,晶粒尺寸越小,更容易将变形分散在数量更多的晶粒中,变形越均匀,应力集中诱发裂纹的概率越小^[28],表现为限宽轧制板材沿横向的伸长率较高。

然而,与原始镁合金板材相比,限宽轧制板材的伸长率降低,主要原因是大压下量作用下,晶粒内部位错密度大幅升高,位错强化作用显著。轧制过程中位错强化作用可表示为^[29]

$$\Delta = aGb\sqrt{\rho} \quad (1)$$

式中, Δ 为位错强化屈服应力, a 为常数,通常取0.2, G 和 b 为镁合金的切变模量和柏氏矢量,分别

为16.6 GPa和 $0.32 \text{ nm}^{[30]}$,当 ρ 取 $10^{-14} \text{ m}^{-2[31-32]}$ 时,位错强化应力可达40 MPa。

图9为限宽轧制镁合金板材的晶粒取向分析结果。从图9a可以看出,限宽轧制镁合金板材呈现(0002)强基面织构,强度可达27.2。晶粒主要是由沿着轧向拉长的大晶粒和细小的等轴晶粒组成的。将小晶粒提取出来,如图9b所示,基面织构强度可

图9 限宽轧制镁合金板材晶粒取向结果

降低至 12.4, 而且在 30° 附近出现强织构, 进一步证实限宽轧制过程中部分微区发生了动态再结晶^[33]。图 9c 中显示限宽轧制板材中占比最多的为大变形晶粒, 其次为亚晶粒, 再结晶晶粒最少, 可见变形后位错密度较高。小角晶界是由排列的位错组成的^[34], 从图 9d 中晶界分布及统计柱状图可以看到小角晶界占比远远大于大角晶界, 证明大压下量限宽轧制后镁合金板材中存在高密度位错, 大幅提升了板材强度。图 9e 为限宽轧制镁合金板材的局部取向差分布图, 它可以定性地反映金属材料塑性变形的均匀化程度, 结合图 8a 中的高亮部分可以看出, 剪切变形带处的塑性应变较大, 局部取向差值在 0.2~0.3, 这也同样证明了镁合金板材经过限宽轧制后内部的缺陷密度较高。然而, 限宽轧制前镁合金板材经过退火处理, 多数晶粒 c 轴方向平行于板材横向, 在限宽轧制过程中不处在拉伸孪生启动的有利位向^[35]。图 8 中的微观组织结果也证明了这一结论, 因此高密度位错是造成图 9e 中变形带处局部取向差较大的主要原因, 也是限宽轧制板材强度提升的本质原因。

图 10 为限宽轧制镁合金板材基面和柱面<a>滑

图 10 限宽轧制镁合金板材的施密特因子分布图

移的施密特因子分布图。显然, 柱面<a>滑移的施密特因子在 0.35~0.5, 明显高于基面<a>滑移的施密特因子, 说明大压下量限宽轧制过程中, 镁合金板材中柱面<a>滑移比基面<a>滑移更容易开动, 协调板材整体的塑性变形。

3 结论

(1) 限宽轧制时, 镁合金板处于双向压缩应力状态, 可有效抑制边裂产生, 单道次实际压下量达到 50%时, 边裂长度小于 2 mm, 轧面光滑平整。同等条件下传统轧制的镁合金板材破裂严重, 无法进行力学性能测试。

(2) 大压下量限宽轧制条件下, 镁合金板材边缘裂纹的方向平行于横向, 说明由板材中部和边缘区域材料流动速度差异导致的附加拉应力是产生边裂的主要原因。

(3) 位错强化是限宽轧制板材强度提升的主要机制。与原始板材相比, 限宽轧制后镁合金板材沿轧向和横向的屈服强度和抗拉强度明显升高, 增量最高可达 383.9%和 131.1%。

(4) 限宽轧制镁合金板材沿横向的强度和伸长率均高于轧向, 造成这种现象的主要原因是板材在法向和横向组成的平面内晶粒尺寸更小, 细晶强化作用更强。

参 考 文 献

- [1] 莫华均, 程仁山, 马立峰, 等. 大应变轧制 Mg-Al-Sn 合金板材的微观组织与力学性能[J]. 机械工程学报, 2020, 56(2): 56-62.
MO Huajun, CHENG Renshan, MA Lifeng, et al. Microstructure and mechanical properties of Mg-Al-Sn alloy sheet produced by large strain rolling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(2): 56-62.
- [2] 李落星, 周佳, 张辉. 车身用铝、镁合金先进挤压成形技术及应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(18): 35-43.
LI Luoxing, ZHOU Jia, ZHANG Hui. Advanced extrusion technology and application of aluminium, magnesium alloy for vehicle body[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(18): 35-43.
- [3] 蒋成钢, 陈章华, 臧勇. 镁合金板材温热冲压过程的各向异性损伤与失效分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(16): 62-69.
JIANG Chenggang, CHEN Zhanghua, ZANG Yong. Anisotropic damage and failure analysis of magnesium

- alloy sheet thermal stamping[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(16): 62-69.
- [4] SHI Yansong, SHU Qinghai, ZHAO Shuai, et al. Effect of controlled rolling temperature on microstructure and properties of Mg-9Li-1Zn alloy sheet[J]. Journal of Alloy and Compounds, 2020, 835: 55296.
- [5] ZHI Chenchen, MA Lifeng, HUANG Qingxue, et al. Improvement of magnesium alloy edge cracks by multi-cross rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 255: 333-339.
- [6] CULBERTSON D, JIANG Yanyao. An experimental study of the orientation effect on fatigue crack propagation in rolled AZ31B magnesium alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 676: 10-19.
- [7] 徐海洁, 马立峰, 刘崇林, 等. AZ31B 镁合金板材多道次轧制路径研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(10): 43-51.
- XU Haijie, MA Lifeng, LIU Chonglin, et al. Research of multi-pass rolling routes for AZ31B Magnesium alloy sheet[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(10): 43-51.
- [8] WU Jialin, JIN Li, DONG Jie, et al. The texture and its optimization in magnesium alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 42(7): 177-191.
- [9] XIA Weijun, CHEN Zhenhua, CHEN Ding, et al. Microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy sheets produced by differential speed rolling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(1): 26-31.
- [10] KIM W J, LEE J B, KIM W Y, et al. Microstructure and mechanical properties of Mg-A-Zn alloy sheets severely deformed by asymmetrical rolling[J]. Scripta Materialia, 2007, 56: 309-312.
- [11] 谭湘夫, 毛大恒, 蔡安辉, 等. 镁合金板带双辊连续铸轧试验研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(16): 30-35.
- TAN Xiangfu, MAO Daheng, CAI Anhui, et al. Experimental study on twin-roll casting magnesium alloy strip[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(16): 30-35.
- [12] WANG Pan, ZHOU Bo, YAO Hongxiang, et al. Aberrant intra- and inter-network connectivity architectures in Alzheimer's disease and mild cognitive impairment[J]. Scientific Reports, 2015, 5(6): 1-12.
- [13] KIM S J, KIM D Y, KIM Y S, et al. Influence of constraint condition on rolling behavior of magnesium alloy at low temperatures[J]. Metals and Materials International, 2015, 21(4): 719-725.
- [14] HUANG Zhiquan, HUANG Qingxue, WEI Jianchun, et al. Inhibitory effects of prefabricated crown on edge crack of rolled AZ31magnesium alloy plate[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 246: 85-92.
- [15] ZHANG Dingfei, DAI Qingwei, FANG Lin, et al. Prediction of edge cracks and plastic-damage analysis of Mg alloy sheet in rolling[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(5): 1112-1117.
- [16] 马立峰, 贾伟涛, 林金保, 等. 铸态 AZ31B 镁合金变温轧制本构数学模型的建立[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(2): 339-345.
- MA Lifeng, JIA Weitao, LIN Jinbao, et al. Establishment of a constitutive model of temperature-changed rolling process for as-cast AZ31B magnesium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(2): 339-345.
- [17] PEKGULERYUZ M, CELIKIN M, HOSEINI M, et al. Study on edge cracking and texture evolution during 150 °C rolling of magnesium alloys: The effects of axial ratio and grain size[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 510: 15-25.
- [18] KWEON S. Damage in edge cracking of rolled metal slabs[J]. Mechanics Research Communications, 2015, 63: 13-20.
- [19] 韦建春, 黄庆学, 黄志权, 等. 变厚度轧制对 AZ31 镁合金板材边部损伤影响分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(2): 652-656.
- WEI Jianchun, HUANG Qingxue, HUANG Zhiquan, et al. Variable gauge rolling impact on the edge damage of AZ31 magnesium alloy sheets[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(2): 652-656.
- [20] MANABE S, UTSUNOMIYA H, SAKAI T, et al. Morphology of edge cracks of rolled magnesium alloy sheet[J]. Advanced Materials Research, 2014, 922: 469-474.
- [21] 李洋, 马立峰, 姜正义, 等. 通过流固耦合加热的轧辊温度场分析[J]. 机械工程学报, 2018, 54(24): 51-60.
- LI Yang, MA Lifeng, JIANG Zhengyi, et al. Temperature field analysis of roll heated by fluid-solid coupled heat transfer[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(24): 51-60.
- [22] NISHIMURA K, MIYAZAKI N. Molecular dynamics simulation of crack growth under cyclic loading[J]. Computational Materials Science, 2004, 31(3-4): 269-278.

- [23] GUO Fei, ZHANG Dingfei, YANG Xusheng, et al. Influence of rolling speed on microstructure and mechanical properties of AZ31 Mg alloy rolled by large strain hot rolling [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 607, 383-389.
- [24] 刘筱, 朱必武, 吴远志, 等. 中高应变速率轧制 AZ31 镁合金的边裂、组织与性能[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(2): 232-240.
- LIU Xiao, ZHU Biwu, WU Yuanzhi, et al. Edge crack, microstructure and mechanical property of AZ31 magnesium alloy sheets rolled by medium-high strain rate[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(2): 232-240.
- [25] MAO Longhui, LIU Chuming, GAO Yonghao, et al. Microstructure and mechanical anisotropy of the hot rolled Mg-8.1Al-0.7Zn-0.15Ag alloy[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2017, 701: 7-15.
- [26] 刘庆. 镁合金塑性变形机理研究进展[J]. *金属学报*, 2010, 46(11): 1458-1472.
- LIU Qing. Research progress on plastic deformation mechanism of Mg alloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2010, 46(11): 1458-1472.
- [27] WEI Jiansheng, JIANG Shunong, CHEN Zhiyong, et al. Increasing strength and ductility of a Mg-9Al alloy by dynamic precipitation assisted grain refinement during multi-directional forging[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2020, 780: 139192.
- [28] ZHENG Ruixiao, DU Junping, GAO Si, et al. Transition of dominant deformation mode in bulk polycrystalline pure Mg by ultra-grain refinement down to sub-micrometer[J]. *Acta Materialia*, 2020, 198: 35-46.
- [29] WANG S C, ZHU Z, STARINK M J. Estimation of dislocation densities in cold rolled Al-Mg-Cu-Mn alloys by combination of yield strength data, EBSD and strength models[J]. *Journal of Microscopy*, 2005, 217: 174-178.
- [30] YAO Y, HUANG Z H, MA H, et al. High strength Mg-1.4Gd-1.2Y-0.4Zn sheet and its strengthening mechanisms[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2019, 747: 17-26.
- [31] BHATTACHARYYA J J, WANG F, WU P D, et al. Demonstration of alloying, thermal activation, and latent hardening effects on quasi-static and dynamic polycrystal plasticity of Mg alloy WE43-T5 plate[J]. *International Journal of Plasticity*, 2016, 81: 123-151.
- [32] BETTLES C, BARNETT M. *Advances in wrought magnesium alloys: Fundamental of processing, properties and applications*[M]. Oxford: Woodhead Publishing, 2012.
- [33] TAN J C, TAN M J. Dynamic continuous recrystallization characteristics in two stage deformation of Mg-3Al-1Zn alloy sheet[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2003, 339(1): 124-132.
- [34] 杨平. 电子背散射衍射技术及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2013.
- YANG Ping. *Electron backscattering diffraction technique and its application*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013.
- [35] 张士宏, 宋广胜, 宋鸿武, 等. 镁合金板材温热变形机理及温热成形技术[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(18): 28-34.
- ZHANG Shihong, SONG Guangsheng, SONG Hongwu, et al. Deformation mechanism and warm forming technology for magnesium alloys sheets[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(18): 28-34.

作者简介: 聂慧慧(通信作者), 女, 1986 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为镁合金及其复合材料的制备加工及塑性成形。

E-mail: niehuihui@tyut.edu.cn