

累积叠轧焊温度对 AZ31 镁合金板材组织与性能的影响

陈家明, 宋登辉, 周涛, 时来鑫, 胡励

(重庆理工大学, 重庆 400054)

摘要: **目的** 研究叠轧温度对 AZ31 镁合金板材组织与性能的影响。**方法** 在 450 °C 和 550 °C 下, 对 AZ31 镁合金板材进行 2 道次叠轧, 研究不同温度下板材界面裂纹的金相组织、RD-ND 面晶体取向、力学性能以及断面形貌的异同。**结果** 450 °C 累积叠轧制备的 ARB2 镁合金板材室温断裂伸长率为 2.3%, 550 °C 累积叠轧制备的 ARB2 镁合金板材室温断裂伸长率为 8%; 450 °C 叠轧板材中动态再结晶晶粒大多数尺寸约为 1~3 μm 左右, 550 °C 叠轧板材中动态再结晶晶粒大多数尺寸约为 600 nm~2 μm。**结论** 通过提高温度, 可改善界面结合性能, 促进基面晶粒往非基面取向偏转, 提升了叠轧板材的力学性能, 使叠轧板材由较低温度下的脆性断裂向韧性断裂转变。

关键词: AZ31 镁合金; 温度; 叠轧; 力学性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.04.017

中图分类号: TG339 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)04-0129-05

Effects of Accumulative Rolling Temperature on Microstructure and Properties of AZ31 Magnesium Alloy Sheet

CHEN Jia-ming, SONG Deng-hui, ZHOU Tao, SHI Lai-xin, HU Li

(Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

ABSTRACT: The paper aims to study on effects of rolling temperature on microstructure and properties of AZ31 magnesium alloy sheets. The metallographic structure of interface crack, RD-ND crystal orientation, mechanical properties and the cross-section morphology of the AZ31 magnesium alloy sheet which was rolled respectively at the 450 °C and 550 °C were studied. The room temperature fracture elongation of ARB2 magnesium alloy sheet prepared by accumulative rolling at 450 °C was 2.3%, and that of ARB2 magnesium alloy sheet prepared by accumulative rolling at 550 °C was 8%; most of the dynamic recrystallization grains in 450 °C rolled sheet were about 1~3 μm, and in 550 °C were about 600 nm~2 μm. Improving the temperature can improve the interface bonding performance, promote the base level grain deflection to the base orientation, improve the mechanical properties of the accumulative roll-bonding sheet, and transform the sheet brittle fracture to ductile fracture by raising the temperature.

KEY WORDS: AZ31 magnesium alloy; temperature; accumulative roll-bonding; mechanical properties

收稿日期: 2019-04-30

基金项目: 国家自然科学基金 (51701034, 51805064); 重庆市基础研究与前沿探索项目 (cstc2017jcyjAX0062, cstc2018jcyjAX0035, cstc2017jcyjAX0381); 重庆市教委科学技术研究项目 (KJ1600922, KJQN201801137)

作者简介: 陈家明 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为轻合金及其特种加工技术。

通讯作者: 周涛 (1981—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为轻合金及其特种加工技术。

镁合金作为结构金属中最轻的金属,在汽车及航空领域有着替换钢和铝的巨大潜力,尤其在汽车领域,可以通过减轻汽车自重以减少燃油的消耗,达到节能减排的目的,但是镁及大部分镁合金都是密排六方结构,在室温下的成形性能较差,而提高镁合金塑性成形能力的一个重要途径就是最大程度地细化晶粒。目前,通过大塑性变形获得超细晶镁合金的方法能够提高镁合金的成形性能,例如等径角挤压、高压扭转等,而累积叠轧焊(ARB)与大塑性变形方式相比,具有设备简单、效率高、适宜板材的优良特点。文中以AZ31为研究对象,初步研究了不同温度(450℃和550℃)对合金组织性能的影响。

1 实验方法

采用购买的商用AZ31镁合金板材进行累积叠轧实验,成分如表1所示。板材初始尺寸为120 mm×60 mm×1.2 mm。板材经粗砂纸打磨后,放入酸中浸泡10 min,以除去表面的氧化物,其中,清洗酸液的配方如表2所示。酸洗后放入丙酮中,除去表面附着物和油渍。利用细铁丝将两块叠合的镁合金板材固定住。将叠合后的板材分别加热到450℃,并保温5 min,压下量为50%,轧辊线速度为0.4 m/min,无润滑。第一次叠轧后记为450ARB1。将板材从中间切开后重新叠轧制,以此类推,依次记为450ARB2,450ARB3,450ARB4,450ARB5。同样当保温温度为550℃时,依次记为550ARB1,550ARB2,550ARB3,550ARB4,550ARB5。

金相显微组织在DMI5000M光学显微镜观察,观察面为轧制RD-ND面。拉伸性能测试在万能拉伸试验机上进行。利用英国思百吉PANalytical Empyrean

Series 2设备做XRD物相检测。在日本电子JSM-6460LV扫描电子显微镜上观察拉伸试样断口形貌。

表1 AZ31 镁合金板材成分(质量分数)

Tab.1 Composition of AZ31 magnesium alloy (mass fraction)					
Al	Zn	Mn	Si	Ca	Mg
2.5~3.5	0.6~1.4	0.2~1.0	≤0.08	≤0.04	余量

表2 AZ31 清洗酸液成分

Tab.2 Composition of AZ31 cleaning acid solution		
HF	HNO ₃	H ₂ O
375	30	595

2 结果与讨论

2.1 微观组织

不同温度下AZ31镁合金板材叠轧RD-ND面的微观组织见图1。图1a为450℃时ARB3的界面结合情况,可以清楚地看到界面(箭头指示位置)。图1b为550℃时界面结合情况,界面被剪切带遮盖,不能清楚地区分出界面,可见,温度的升高,对于界面的结合具有促进作用。目前比较公认的叠轧焊合机制^[1-4]包括薄膜机制、能量势垒机制、扩散焊合机制和再结晶连接机制。詹美燕^[5]认为,叠轧AZ31在轧制变形过程中会使结合面硬化层或氧化层下的金属暴露出来,新鲜金属相遇从而产生冶金结合。丁祎^[6]认为,镁合金累积叠轧是再结晶连接机制所致,通过叠轧界面处累积的应变促使界面发生再结晶,晶粒越过界面,重新排列并逐渐长大,达到界面焊合的目的。

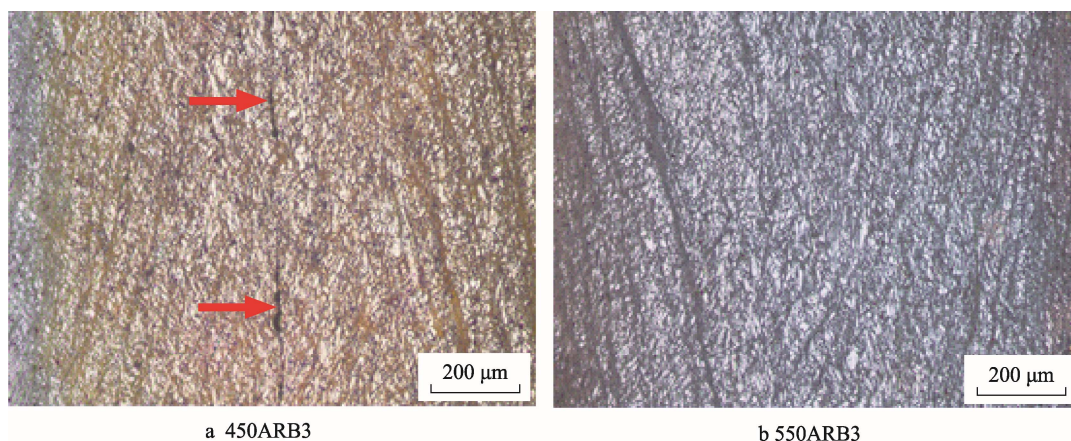


图1 不同累积叠轧温度AZ31镁合金板材显微组织

Fig.1 Microstructure of AZ31 Magnesium alloy sheets of accumulative rolling at different temperatures

图1中另外一个显著特征是,其累积叠轧AZ31镁合金板材显微组织中均存在大量的V形剪切带,且V形剪切带呈现对称的趋势。郭非等^[7]研究表明,板材在轧制过程中会受到两个方向的力:轧辊对板

材的径向压力和摩擦力,这两个力的合成会形成与RD方向约为20°~25°的夹角,所以在该角度上易形成剪切带。一般来说,剪切带的形成是大的变形应变所致。另外,相比450℃,在550℃时剪切带数

量明显减少。这是因为温度越高, 镁合金越易于启动 $\langle c+a \rangle$ 非基面滑移, 塑性会有所提高。当应力集中时, 能够通过非基面滑移来分散应力集中, 所以 550 °C 时剪切带相对较少。Sandlobes 等^[8]认为剪切带的形成与压缩和二次孪晶有关。压缩和二次孪晶的增加, 会产生更多的剪切带, 导致变形区域应力均匀分布, 从而提高板材的轧制性能。在轧制变形的过程中, 容易形成动态再结晶, 如图 2 所示。图 2a 和 2b 分别表示在 450 °C 和 550 °C 下 ARB2 的界面处再结晶组织。可以明显看到的是, 界面处存在大量细小的动态再结晶。这些动态再结晶的存在为后期退火处理而产生的静态再结晶提供了形核点。另外, 450 °C 叠轧板材中这些动态再结晶晶粒尺寸大多为 1~3 μm 左右, 550 °C 叠轧板材中的动态再结晶晶粒尺寸大多为 600 nm~2 μm 左右。镁合金的动态再结晶组织为大小不均匀且晶内位错密度较低的等轴晶粒。动态再结晶晶粒一般在晶界或晶界附近形核长

大^[9]。动态再结晶晶粒不同于再结晶退火时得到的完全无畸变的等轴晶粒, 在动态再结晶晶粒内还存在一定程度的应变。动态再结晶的晶粒尺寸与变形量、应变速率和变形温度有关。当变形温度较低时, 由于镁合金塑性变形时滑移系少, 镁合金中会生成大量的孪晶, 阻碍了位错的移动和重新排布, 所以导致动态再结晶不易发生。当温度升高后, 合金中位错的滑移、攀移、交滑移比低温时更容易, 动态再结晶的形核率增加, 同时晶界迁移能力增强, 因此温度的升高可促进镁合金动态再结晶的发生, 但再结晶尺寸会随着温度的升高先减小后增大。Liu Yi^[10]在研究中指出, AZ31 镁合金动态再结晶晶粒随变形温度的升高而增大, 在高的应变速率以及低的温度下可以得到细小的再结晶晶粒。通过叠轧后退火处理, 可以得到均匀的超细晶板材。Zuzanka Trojanová^[11]将 AZ31 镁合金板材通过两次 ARB, 从原始平均晶粒尺寸 100 μm 细化到平均 7.6 μm 。

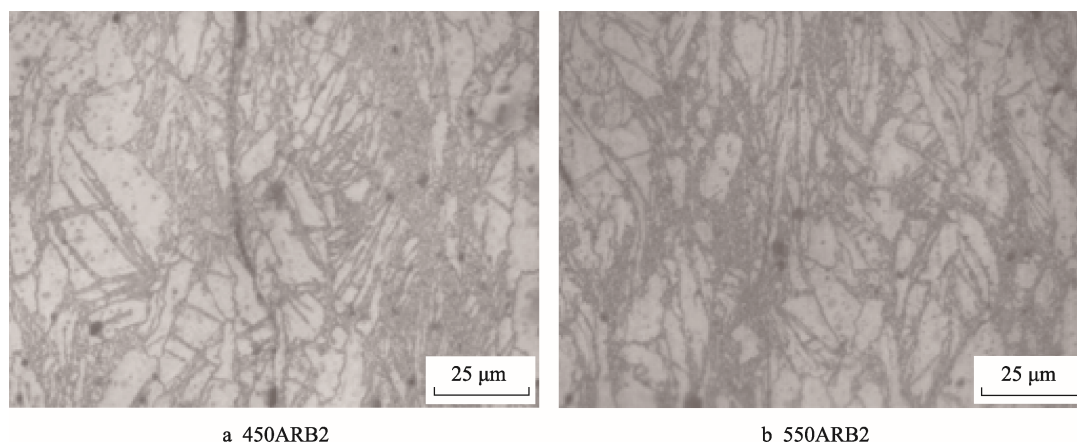


图 2 累积叠轧温度 AZ31 镁合金板材界面附近显微组织

Fig.2 Microstructure near B2 interface of AZ31 magnesium alloy plates at different cumulative rolling temperatures

2.2 晶体取向分析

初始 AZ31 板材、450 °C ARB2 和 550 °C ARB2 的取向峰谱见图 3, 具体峰值如表 3 所示。可以看到, 三者都是典型的基面织构。镁合金在轧制过程中容易形成(0001)基面织构, 这具有很强的各向异性, 不利于塑性变形。VALLE^[12]认为旋转动态再结晶和新晶粒易于形成基面取向, 使得基面强度增强。随着温度的升高, 材料非基面滑移取向增多, 基面强度相对降低。Iwanaga 等^[13]研究表明, 降低基面织构的强度有利于改善镁合金板材的成形性能。Chino Y^[14]认为, 剪切变形有助于改善基面织构的强度, 对于室温成形性能的改善起很大作用。

2.3 力学性能

AZ31 镁合金在室温下为密排六方(HCP)结构, 独立滑移系较少, 且基面滑移的临界剪切应力值远远

小于柱面和锥面, 板材往往表现出较低的延性。450 °C 和 550 °C 下制备的循环道次为 2 的累积叠轧 AZ31 镁合金板室温拉伸工程应力应变曲线见图 4,

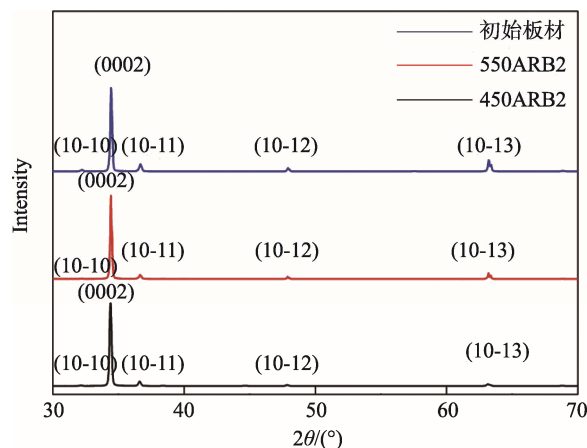
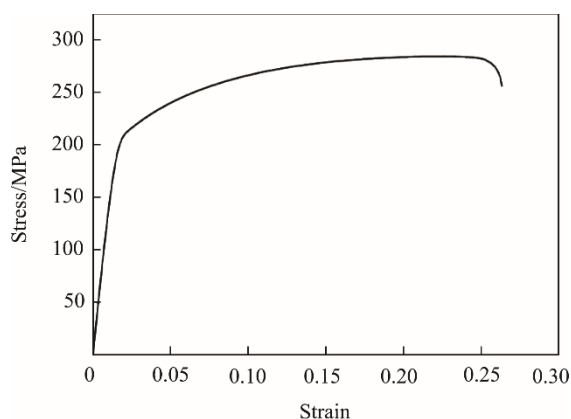


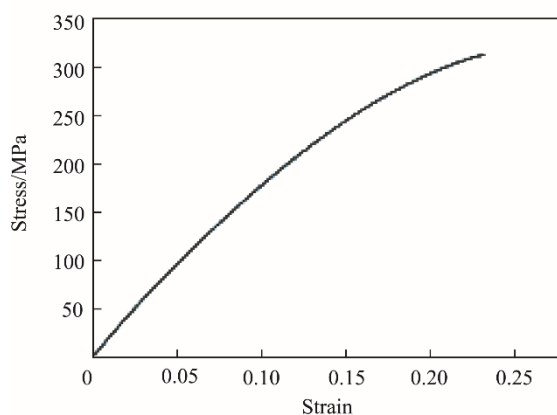
图 3 AZ31 镁合金板材 XRD 衍射峰谱图
Fig.3 XRD spectra of AZ31 magnesium alloy sheets

表3 不同累积叠轧温度镁合金板材晶粒取向相对峰强
Tab.3 Relative strong peak of grain orientation of magnesium alloy sheets at different accumulative rolling temperatures

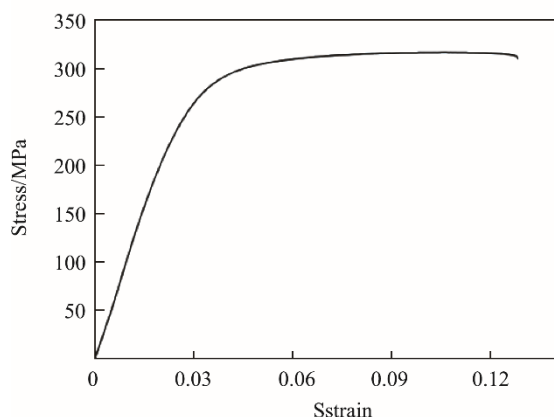
板材	(10-10)	(0002)	(0002)	(10-11)	(10-12)
初始板材	2.02	100.00	100.00	8.75	4.14
450ARB2	0.77	100.00	100.00	5.39	1.18
550ARB2	0.54	100.00	100.00	5.17	2.77



a 初始板材



b 450ARB2



c 550ARB2

图4 不同累积叠轧温度 AZ31 镁合金板材应力应变曲线
Fig.4 Stress strain curve of AZ31 magnesium alloy sheet of accumulative rolling at different temperature

AZ31 镁合金板材力学性能详细数值如表4所示。从图4a可以看出,450℃累积叠轧制备的ARB2镁合

金板材室温断裂伸长率为2.3%,与初始板材断裂伸长率23%相比,其值降低了90%;550℃累积叠轧制备的ARB2镁合金板材室温断裂伸长率为8%,较于初始板材断裂伸长率23%,其值降低了65%。这是因为累积叠轧造成的应变使镁合金产生加工硬化,从而导致其伸长率均显著降低。而450℃累积叠轧两次的镁合金板材却呈现出极其脆性的一面,这说明累积叠轧工艺可以显著提高金属板材的强度,却导致其延展性严重下降,ARB2叠轧板材界面焊合不佳使得板材塑性差,如图2a所示。而550℃的伸长率更高,原因在于550℃时界面结合相比于450℃更好,如图2b所示。由图4可知,通过研究不同累积叠轧温度对板材界面焊合情况,说明了累积叠轧板材最终道次产生的新界面其焊合质量决定着该样品的拉伸性能。若其焊合不足够好,这将促使镁合金板材在室温拉伸变形时,呈现出非常脆性的一面。

在低温下累积叠轧,镁合金板材加工硬化更多,而加工硬化越大,导致其力学性能抗拉强度提高就越大,而该次实验结果所得抗拉强度值相差无几,说明界面焊合情况也是影响累积叠轧板材抗拉强度的因素。从显微组织图2中可以对对比发现,450ARB2板材界面焊合情况明显差于550ARB2板材界面焊合情况,因此加工硬化和叠轧板材界面焊合情况两个方面共同影响着累积叠轧AZ31镁合金板材抗拉强度。加工硬化越大,促使板材强度提高,叠轧板材界面焊合情况越差会降低板材强度,这两者的共同作用导致了450ARB2板材与550ARB2板材抗拉强度相差无几。

表4 不同累积叠轧温度 AZ31 镁合金板材力学性能
Tab.4 Mechanical properties of AZ31 magnesium alloy sheet of accumulative rolling at different temperature

板材	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%	均匀伸长率/%	屈强比
初始板材	153	260	25	23	0.590
450ARB2	125	312	3.0	2.2	0.401
550ARB2	181	313	12.8	10.8	0.575

2.4 断口形貌

450℃和550℃下制备的ARB2的累积叠轧AZ31镁合金板材室温拉伸断口形貌如图5所示。沿着ND方向拍摄此断口形貌。从图5a看出,450ARB2镁合金板材室温下拉伸的断口形貌存在较少的韧窝和刺状形貌,但是550ARB2镁合金板材室温拉伸下的断口形貌存在较多的韧窝和刺状形貌,这两种板材呈现出截然相反的断口形貌。该现象与图4中450ARB2断裂伸长率值很低,而550ARB2断裂伸长率相对很高的结果相符合。这说明550℃下ARB2镁合金板材塑性较好,其断裂为韧性断裂。450℃下ARB2镁合金板材塑性较差,其呈现出强烈的脆性,其断裂为脆性断裂。

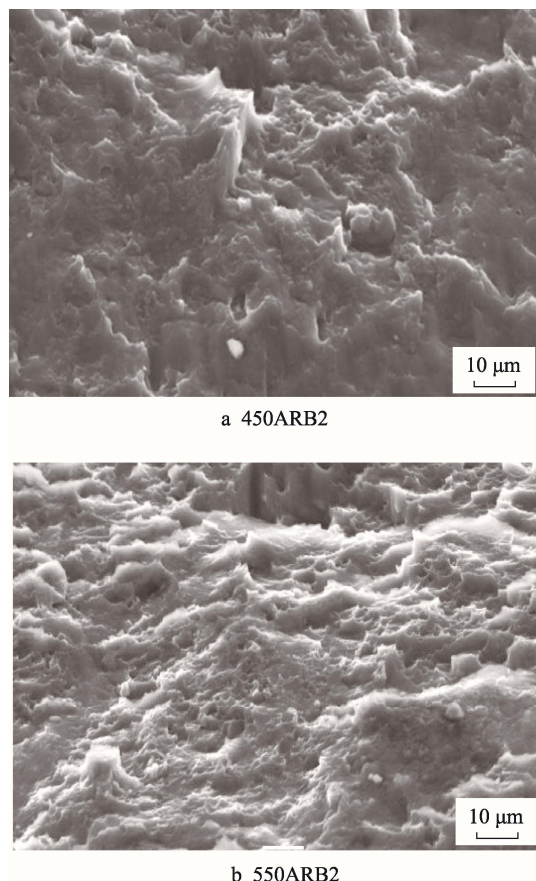


图 5 不同累积叠轧温度 AZ31 镁合金板材室温拉伸断口形貌

Fig.5 Tensile fracture morphology at room temperature of accumulative rolling on different temperature

3 结论

1) 随着累积叠轧温度的增加, 其非基面取向晶粒 (晶面为(10-10), (10-11), (10-12), (10-13)) 的比例逐步增加, 从 450 °C下的 9.56%增加到 550 °C下的 15.53%, 对于改善其力学性能有一定的作用。

2) 加工硬化和板材焊合界面焊合质量两个方面共同作用影响板材的抗拉强度, 加工硬化越大, 抗拉强度越高, 而界面焊合质量越差, 其抗拉强度越低, 两者的共同作用是使 450 °C与 550 °C时 ARB2 板材抗拉强度相差无几的原因。

3) 在 450 °C时, 由于界面焊合的质量不好, 使得 ARB2 伸长率很低, 为脆性断裂。相比而言, 550 °C时, 其断裂伸长率大大提高, 为韧性断裂。

参考文献:

- [1] VAIDYANATH L R, NICHOLAS M G, MILNER D R. Pressure Welding by Rolling[J]. British Welding Journal, 1959(6): 13—28.
- [2] DANESH M H, KARIMI T A. Study of Mechanisms of Cold Roll Welding of Aluminum Alloy to Steel Strip[J].

- Materials science and technology, 2004, 20(8): 1064—1068.
- [3] CAVE J. The Mechanisms of Cold Pressure Welding by Rolling[J]. Journal of the Institute of Metals, 1973, 101(7): 203—207.
- [4] ROOHOLLAH J, MOHAMMAD R T. Effect of Friction, Annealing Conditions and Hardness on the Bond Strength of Al/Al Strips Produced by Cold Roll Bonding Process[J]. Materials and Design, 2010(31): 4508—4513.
- [5] 詹美燕, 李春明, 张卫文, 等. AZ31 镁合金在累积叠轧过程中的界面焊合研究[J]. 材料工程, 2012(1): 18—24.
ZHAN Mei-yan, LI Chun-ming, ZHANG Wei-wen, et al. Study on the Interface Bonding of AZ31 Magnesium Alloy During Accumulative Rolling[J]. Materials Engineering, 2012(1): 18—24.
- [6] 丁祎, 陈拂晓, 郭俊卿, 等. AZ63 镁合金累积叠轧界面焊合条件研究[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(4): 62—66.
DING Yi, CHEN Fu-xiao, GUO Jun-qing, et al. Study on Interface Bonding Conditions of AZ63 Magnesium Alloy by Accumulative Rolling[J]. Journal of Plastic Engineering, 2017, 24(4): 62—66.
- [7] GUO F, ZHANG D, FAN X, et al. Deformation Behavior of AZ31 Mg Alloys Sheet during Large Strain Hot Rolling Process: A Study on Microstructure and Texture Evolutions of an Intermediate-rolled Sheet[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2016(663): 140—147.
- [8] SANDLOBES S, ZAEFFERER S, SCHESTAKEOW I, et al. On the Role of Non-basal Deformation Mechanisms for the Ductility of Mg and Mg-Y Alloys[J]. Acta Materialia, 2011(59): 429—439.
- [9] 陈振华, 许芳艳, 傅定发, 等. 镁合金的动态再结晶[J]. 化工进展, 2006, 25(2): 140—146.
CHEN Zhen-hua, XU Fang-yan, FU Ding-fa, et al. Dynamic Recrystallization of Magnesium Alloy[J]. Chemical Progress, 2006, 25(2): 140—146.
- [10] LIU Y. Transient Plasticity and Microstructural Evolution of a Commercial AZ31 Magnesium Alloy at Elevated Temperatures[D]. Michigan: Wayne State University, 2003: 111—124.
- [11] TROJANOVÁ Z, DZUGAN J, HALMEŠOVÁ K, et al. Influence of Accumulative Roll Bonding on the Texture and Tensile Properties of an AZ31 Magnesium Alloy Sheets[J]. Materials, 2018(11): 73.
- [12] VALLE J A D, PÉREZ-PRADO M T, RUANO O A. Texture Evolution during Large-strain Hot Rolling of the Mg AZ61 Alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2003(355): 68—78.
- [13] IWANAGA K, TASHIRO H, OKAMOTO H, et al. Improvement of Formability from Room Temperature to Warm Temperature in AZ31 Magnesium Alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004(155/156): 1313—1316.
- [14] CHINO Y, MABUCHI M, KISHIHARA R, et al. Mechanical Properties and Press Formability at Room Temperature of AZ31 Mg Alloy Processed by Single Roller Drive Rolling[J]. Materials Transactions, 2005(43): 2554—2560.