

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2016.12.010

异径轧制对 AZ31 镁合金薄带微观组织的影响

唐岩, 乐启炽, 贾伟涛, 杜德望

(东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁沈阳 110819)

摘要: 考虑到轧制镁合金薄带板形的控制精度要求, 采用小辊径同径轧制和异径轧制工艺分别制备了 0.5, 1.0 mm 的 AZ31 镁合金薄带, 研究不同工艺过程中板材内部晶粒微观组织的变化规律以及同径轧制与异径轧制在轧制过程中的对称性问题。结果表明: 0.5 mm 异径轧制和同径轧制板带的晶粒尺寸分别为 8.8 和 10.1 μm , 1.0 mm 的分别为 13.6 和 16.7 μm 。0.5 mm 的异径轧制与同径轧制的单元等效塑性应变最大值分别为 0.42 和 0.29, 1.0 mm 的分别为 0.75 和 0.66, 与实验结果相符。0.5 mm 同径轧制的特征节点在板带上中下部的等效米塞斯应力和剪切应力分布对称, 异径轧制的分布非对称。0.5 mm 板带经过 250, 300, 350 $^{\circ}\text{C}$ 退火 1 h 后, 异径轧制的晶粒长大较缓慢, 同径轧制的晶粒长大较快。350 $^{\circ}\text{C}$ 下, 异径轧制的晶粒尺寸为 9.8 μm , 同径轧制的为 24.9 μm 。

关键词: 异径轧制; 同径轧制; 模拟; 退火

中图分类号: TG 335

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)12-1715-05

Effect of Asymmetric Rolling on Microstructure of AZ31 Magnesium Alloy Sheets

TANG Yan, LE Qi-chi, JIA Wei-tao, DU De-wang

(Key laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LE Qi-chi, E-mail: qichil@mail.neu.edu.cn)

Abstract: To fulfill the demand of rolling accuracy of magnesium alloy sheets, the symmetric problem during rolling process and the microstructural evolution of the AZ31 sheets with the thickness of 0.5 and 1.0 mm, which made by symmetric and asymmetric rolling process using small rollers, were investigated. The results showed that the average grain size in the 0.5 mm sheets by symmetric and asymmetric rolling was 10.1 and 8.8 μm , respectively, that of the 1.0 mm was 16.7 and 13.6 μm , respectively. The element equivalent strain of the 0.5 mm sheet was up to 0.42 by asymmetric rolling and 0.29 by symmetric rolling and that of the 1.0 mm was 0.75 and 0.66, respectively. In symmetric rolling, the distributions of the nodal equivalent Mises stress and shear stress in the 0.5 mm sheet were more symmetric by symmetric rolling process, in contrast with those by asymmetric rolling. Grain growth in the 0.5 mm sheet by asymmetric rolling was much slower than that by symmetric rolling during annealing for 1h at 250, 300 and 350 $^{\circ}\text{C}$. At 350 $^{\circ}\text{C}$, the average grain size in the 0.5 mm sheet by asymmetric rolling was 9.8 μm and that by symmetric rolling was 24.9 μm .

Key words: asymmetric rolling; symmetric rolling; simulation; annealing

镁合金作为最轻的金属结构材料, 具有优良的综合性能, 被广泛应用到交通运输、航空航天、消费电子等领域, 是 21 世纪最有发展前途的绿色金属材料^[1-3]。镁及其合金具有密排六方晶体结构, 同径轧制的镁合金板材具有强烈的基面织构,

不利于塑性加工, 采用异径轧制工艺可以减弱镁合金的基面织构, 从而可以提高镁合金在室温下的成形性能^[1-3]。因此, 采用异径轧制来改善镁合金的成形性能与组织结构成为镁合金应用的关键技术之一。Watanabe 等^[2]的研究表明, 在 200 $^{\circ}\text{C}$,

收稿日期: 2015-10-24

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB632203); 辽宁省自然科学基金资助项目(2014028027)。

作者简介: 唐岩(1988-), 男, 辽宁鞍山人, 东北大学博士研究生; 乐启炽(1968-), 男, 福建三明人, 东北大学教授。

异步轧制的板材的韧性是同步轧制的 1.5 倍。Kim 等^[4]研究了高转速比异步轧制对镁合金板材内细晶的影响, 板材轧制三个道次后, 微观组织由均匀细小的小于 3 μm 的等轴晶构成。在模拟结果中, 高转速比异步轧制有效地降低了轧制力, 产生了更大的剪切应变, 在轧件厚度方向上的应变分布均匀。

本文采用小辊径同径轧制和异径轧制对 AZ31 镁合金板带进行了多道次轧制, 分析异径轧制和同径轧制对板材微观组织的影响, 运用 MSC. Marc 软件模拟, 分析单元等效应变以及特征节点的等效米塞斯应力的分布情况, 辅助实验对比分析。轧出的板带经过退火处理后, 分析对比二者工艺对退火态板带的微观组织的影响。

1 实 验

本实验采用 AZ31 镁合金热轧态卷板为原

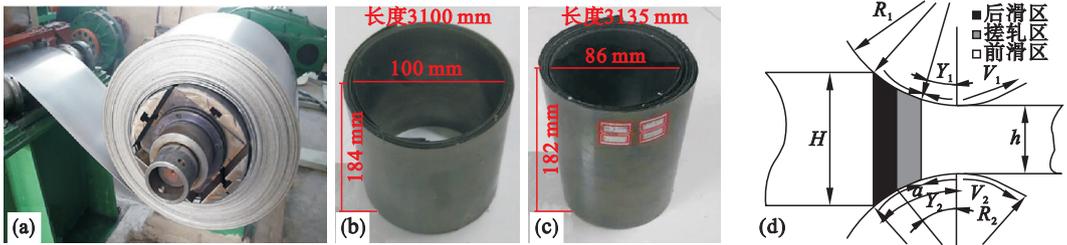


图 1 镁合金板带与轧制变形区

Fig. 1 Magnesium alloy sheets and rolling deformation zone

(a) — 原始板带; (b) — 同径轧制 0.5 mm 薄带; (c) — 异径轧制 0.5 mm 薄带; (d) — 异径轧制变形区。

2 结果与讨论

图 2 和图 3 分别为 0.5 和 1.0 mm 的镁合金薄带厚度方向的上、中、下部与上下表面的微观组织, 从图中可以看出, 异径轧制对晶粒的细化程度更明显。由于镁合金是密排六方结构, 滑移系较少, 由于搓轧的效果(图 1d), 异径轧制使 c 轴向搓轧方向偏转了 5° 到 10° ^[5-6], 并且开动更多的滑移系, 提高了塑性变形能力。异径轧制减小了总轧制压力, 平均单位压力的减小主要是由于变形区接触长度 L 的缩减, 导致接触面积减小, 由公式(1)^[3]可知, 当异径比 x 为 1.3 时, 在相同压下量下, L 缩减了 40%, 总轧制压力至少减小 40%。在轧制压力等同的情况下, 异径轧制相比同径轧制可以获得更大的压下量^[3-4,7]。由 D. M. 斯通推出的最小可轧厚度公式(2)^[3]可知, 异径轧制的 D/h 值要远比同径轧制的小得多。同径与异径轧

料, 厚度 2.8 mm, 宽度 200 mm, 见图 1a, 其化学成分见表 1。轧制实验采用镁合金可逆温轧机, 同径轧制上下工作辊直径均为 80 mm, 异径轧制上下工作辊直径分别为 80, 60 mm。

表 1 AZ31 镁合金化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of AZ31 magnesium alloy plate(mass fraction) %

Al	Zn	Mn	Fe	Ni	Mg
2.8	1.03	0.31	0.003	0.000 2	余量

两种轧制工艺分别轧出的 0.5 mm 镁合金薄带见图 1b, 1c, 轧制出的薄带再进行 250, 300, 350 $^\circ\text{C}$ 退火 1 h。为了验证同径轧制与异径轧制对晶粒的细化程度不同, 本次采用有限元模拟仿真的方法进行对比分析, 运用 MSC. Marc 软件模拟实验过程, 分析二者轧制的对称性规律。

制 0.5 mm 板材的晶粒尺寸分别为 10.1 和 8.8 μm ; 1.0 mm 的为 16.7 和 13.6 μm 。图 4 为模拟单元的等效塑性应变分布情况, 同径轧制模拟单元的等效应变整体要小于异径轧制, 异径轧制变形区中的单元在受到轧制压力的同时, 也受到了平行于轧向的搓拉作用。异径轧制和同径轧制的 0.5 mm 板单元的等效应变最大值分别为 0.42 和 0.29, 1.0 mm 的最大值分别为 0.75 和 0.66。实验结果与模拟结果基本吻合。

$$L_{as}/L_{sy} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{1+x}}, \quad (1)$$

$$h_{\min} = \frac{3.58(K-\bar{q})fD}{E}. \quad (2)$$

其中: E 为轧辊弹性模量; K 为平面变形抗力; \bar{q} 为平均张应力; f 为摩擦系数。

异径轧制相比同径轧制, 减小了下工作辊直径, 在轧制过程中, 小辊侧的咬入角增加, 即 $\Delta\alpha_1$, 大辊侧的咬入角减小, 即 $\Delta\alpha_2$, 其比值见式

(3)^[3], 当辊径比 x 为 1.3 时, $\Delta\alpha_1 = 3.14\Delta\alpha_2$, 小辊侧咬入角的增加量是大辊侧咬入角减小量的 3.14 倍. 此时小辊径的接触区增加了咬入状态, 增加了板材咬进厚度, 平均单位压力加大, 下部晶粒变形更严重; 相反, 大辊侧接触区的金属流动快, 板材厚向形变较小, 晶粒细化程度相对较小. 图 5 为上下特征节点的剪切应力分布, 同径轧制

上下节点的切应力分布比较均匀, 异径轧制的分布呈现非对称. 因为辊速差的存在, 异径轧制对板材下部金属的搓拉效果最明显, 中间金属的搓拉效果最弱.

$$\frac{\Delta\alpha_1}{\Delta\alpha_2} = \sqrt{2(1+x)} + 1. \quad (3)$$

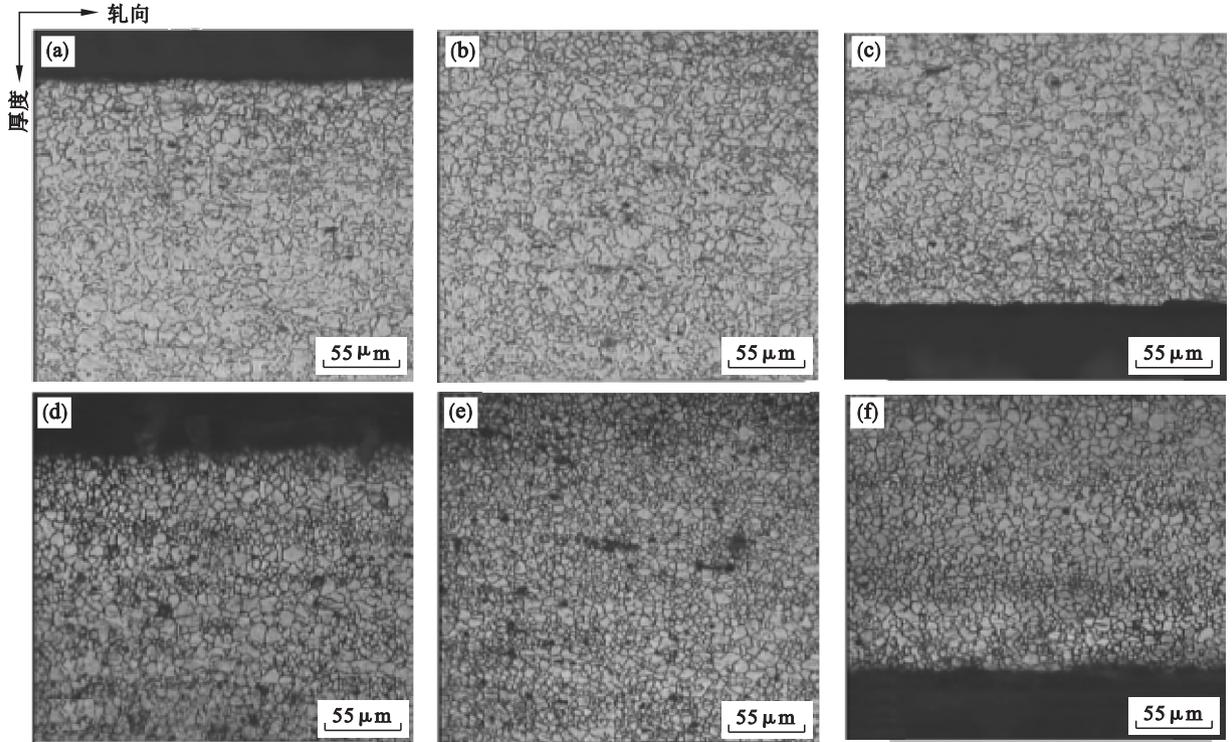


图 2 0.5 mm 镁合金薄带微观组织
Fig. 2 0.5 mm microstructure of sheets

(a), (b), (c) 一同径轧制板带上、中、下部; (d), (e), (f) 一异径轧制板带上、中、下部.

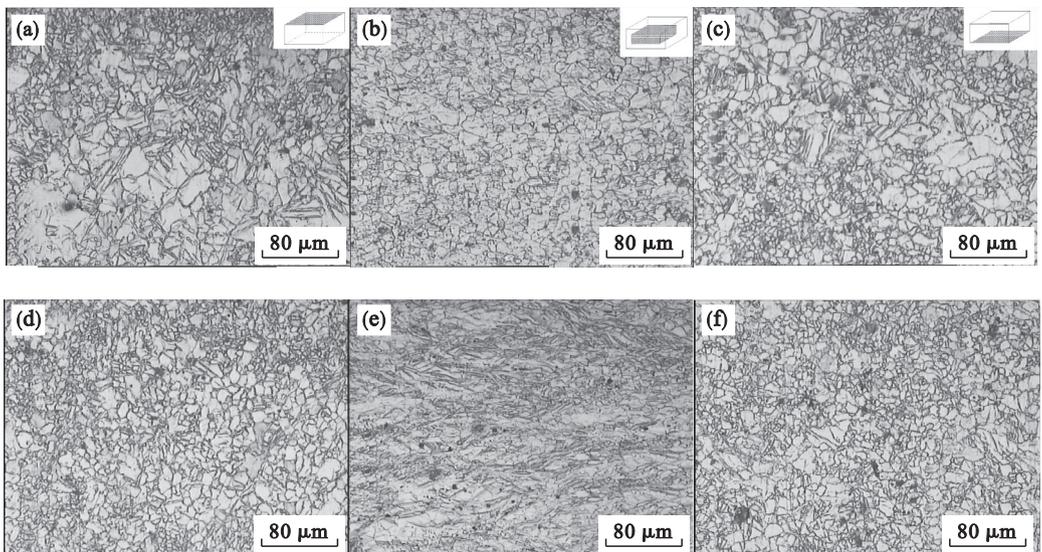


图 3 1.0 mm 镁合金薄带微观组织
Fig. 3 1.0 mm microstructure of Mg alloy sheets

(a), (b), (c) 一同径轧制板带上、中、下表面; (d), (e), (f) 一异径轧制板带上、中、下表面.

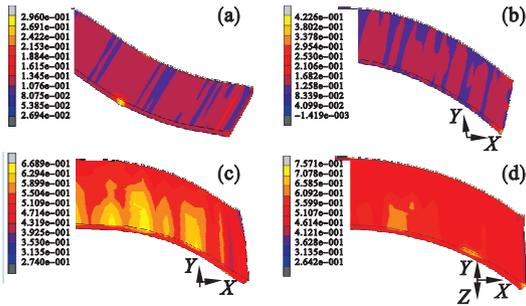


图 4 0.5 mm 与 1.0 mm 轧件中单元的等效塑性应变分布

Fig. 4 Element equivalent plastic strain

- (a)—0.5 mm 同径轧制; (b)—0.5 mm 异径轧制;
(c)—1.0 mm 同径轧制; (d)—1.0 mm 异径轧制.

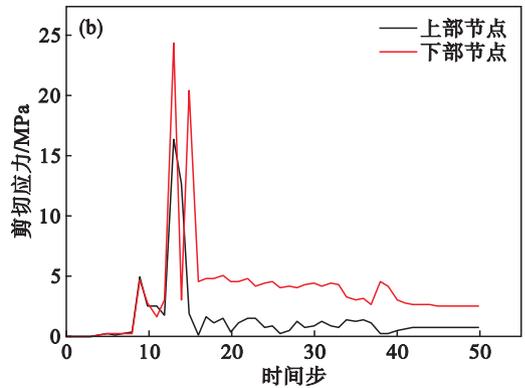
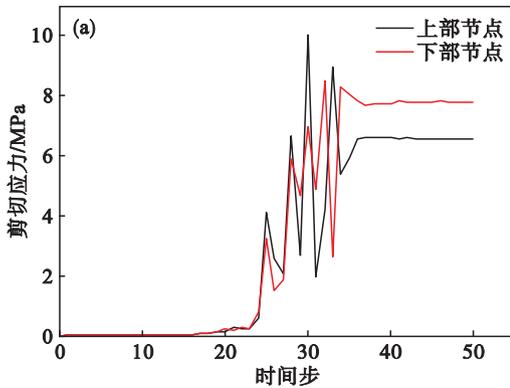


图 5 0.5 mm 轧件中特征节点的剪切应力随时间步的变化

Fig. 5 Node shear stress of 0.5 mm sheet

- (a)—同径轧制; (b)—异径轧制.

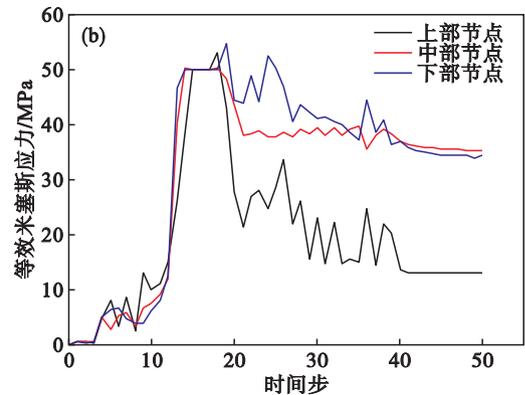
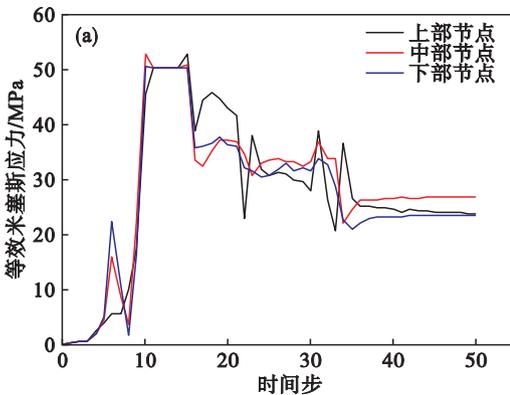


图 6 0.5 mm 轧件中特征节点的等效米塞斯应力随时间步的变化

Fig. 6 Node equivalent mises stress of 0.5 mm sheet

- (a)—同径轧制; (b)—异径轧制.

图 7 为同径轧制和异径轧制轧出的 0.5 mm 镁合金板带退火态的微观组织,同径轧制的板带经过 1 h 退火后,晶粒长大较为明显,250 °C 出现了退火孪晶,当 300 °C 时候,孪晶群变得稀疏,晶粒尺寸变大,在 350 °C 时,孪晶几乎消失.出现退火孪晶是因为在发生回复再结晶的过程中,界面能的降低导致了晶界迁移,当前沿晶界取向差处于低迁移率情况时,就会迫使形成孪晶以改变前沿晶界取向差,成为高迁移率取向^[8].在晶界处

从图 6 的模拟结果中可以看出,特征节点的等效应力在同径轧制与异径轧制中的分布情况明显不同,同径轧制变形区中的应力分布比较集中,异径轧制的应力分布比较离散.由于上辊接触的单元流动速度快,单元刚离开变形区后,节点应力状态迅速下降,于此同时,下部单元流动速度慢,加工变形时间较长,节点应力状态保持稳定并继续逐渐上升,而且上辊接触的板材厚向深度相比下辊接触的深度较浅,所以下部特征节点的等效应力普遍大于上部,中部的节点等效应力居于二者之间.模拟结果与实验结果基本吻合.

存在较多的缺陷,晶格畸变较为严重,在再结晶阶段,晶界处优先形核,然后长大,新长大的晶粒会吞并周围的孪晶,导致孪晶数量减少^[9].异径轧制的再结晶过程较为缓慢,在组织中出现了等轴晶,发生了回复再结晶.由于异径轧制产生了更多的形变储能,相同温度下,形核率比同径轧制的大,所以异径轧制的晶粒长大的效果不明显.同径轧制板带在三种退火温度下的晶粒尺寸分别为 11.3, 16.7, 24.9 μm ,异径轧制板带在三种退火

温度下的晶粒尺寸分别为 7.1, 8.3, 9.8 μm . 异径轧制板材的组织变化比同径轧制板材具有较高的热稳定性。

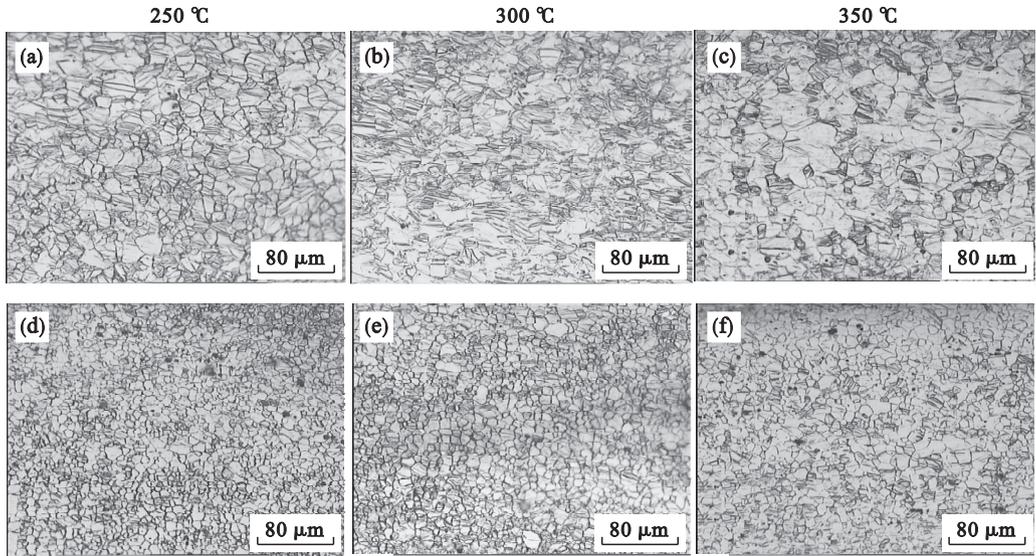


图 7 0.5 mm 板材退火态的微观组织

Fig. 7 0.5 mm annealing microstructure of Mg alloy sheets

(a), (b), (c)—同径轧制; (d), (e), (f)—异径轧制。

3 结 论

1) 小径辊异径轧制比同径轧制细化晶粒更明显, 异径轧制 0.5 mm 板带的晶粒平均尺寸分别为 8.8 和 10.1 μm , 1.0 mm 的分别为 13.6 和 16.7 μm 。

2) 异径轧制的 0.5 mm 板带单元的等效应变分布更均匀, 塑性应变更大, 最大值可达到 0.42, 同径轧制的最大值为 0.29; 1.0 mm 的分别为 0.75 和 0.66。同径轧制上中下部特征节点的等效米塞斯应力与剪切应力分布集中, 异径轧制的分布比较离散, 下部的特征节点的米塞斯应力与剪切应力最大。

3) 异径轧制的 0.5 mm 板带内部晶粒在退火过程中长大较慢, 350 °C 时的晶粒平均尺寸为 9.8 μm , 同径轧制的为 24.9 μm 。

参考文献:

- [1] Kim S H, You B S, Yim C D, et al. Texture and microstructure changes in asymmetrically hot rolled AZ31 magnesium alloy sheets[J]. *Materials Letters*, 2005, 59(29): 3876–3880.
- [2] Watanabe H, Mukai T, Ishikawa K. Effect of temperature of differential speed rolling on room temperature mechanical properties and texture in an AZ31 magnesium alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 182(1): 644–647.
- [3] 王延涛, 齐克敏. 金属塑性加工学: 轧制理论与工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001. (Wang Yan-pu, Qi Ke-min. Metal plastic processing: rolling theory and technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001.)
- [4] Kim W J, Park J D, Kim W Y. Effect of differential speed rolling on microstructure and mechanical properties of an AZ91 magnesium alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 460(1): 289–293.
- [5] Ucuncuoğlu S, Ekerim A, Secgin G O, et al. Effect of asymmetric rolling process on the microstructure, mechanical properties and texture of AZ31 magnesium alloys sheets produced by twin roll casting technique [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2014, 2(1): 92–98.
- [6] Watanabe H, Mukai T, Ishikawa K. Differential speed rolling of an AZ31 magnesium alloy and the resulting mechanical properties [J]. *Journal of Materials Science*, 2004, 39(4): 1477–1480.
- [7] Kim W Y, Kim W J. Fabrication of ultrafine-grained Mg-3Al-1Zn magnesium alloy sheets using a continuous high-ratio differential speed rolling technique [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 594: 189–192.
- [8] Liu T G, Xia S, Li H, et al. Effect of initial grain sizes on the grain boundary network during grain boundary engineering in Alloy 690 [J]. *Journal of Materials Research*, 2013, 28(9): 1165–1176.
- [9] Sun H F, Liang S J, Wang E D. Mechanical properties and texture evolution during hot rolling of AZ31 magnesium alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, 19: 349–354.