文章编号: 1004-0609(2014)08-1953-07

轧制参数对 AZ31 镁合金织构和室温成形性能的影响

杨海波,胡水平

(北京科技大学 高效轧制国家工程研究中心,北京 100083)

摘 要:为了获得基面织构强度弱化、室温埃里克森值高的镁合金板材的热轧工艺,采用异步轧制研究轧制温度为 250~450 ℃、道次压下率为 15%~35%、异速比为 1:1.5 时轧制工艺对镁合金宏观织构和室温成形性能的影响,并以此设计一组轧制工艺,使轧制后合金织构强度明显弱化,室温埃里克森值得到明显提高。结果表明:提高轧制温度、减小道次压下率可以有效地弱化基面织构,提高镁合金室温成形性能。但是在 450 ℃、道次压下率为 5%时,轧制后板材晶粒粗大,成形能力较低。经轧制温度为 450 ℃、道次压下率为 10%的工艺轧制后板材具有优良的室温成形性能,即室温埃里克森值为 5.35 mm,此时基面织构强度为 9852。 关键词: AZ31 镁合金;织构;热轧参数;成形性能

中图分类号: TG146.2 文献标志码: A

Influence of rolling parameters on texture and formability of rolled AZ31 magnesium alloys at room temperature

YANG Hai-bo, HU Shui-ping

(National Engineering Research Center of Advanced Rolling, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To develop the AZ31 magnesium alloy plates (sheets) with low macro-texture intensity and high Erichen value, the effects of hot rolling process on the macro-texture and formability were investigated, under the rolling temperature of 250-450 °C, pass reduction of 15%-35% and differential ratio of 1:1.5, respectively. The results show that, with increasing the rolling temperature or decreasing pass reduction, the basal plane texture intensity declines obviously and the Erichsen value improves. However, when the pass reduction drops to 5%, the coarse grain and decreasing formability are observed in the plates after being rolled at high temperature of 450 °C. When the rolling temperature is 450 °C and pass reduction is 10%, the excellent formability of AZ31 magnesium can be obtained, i.e. the Erichsen value under room temperature is 5.35 mm, the base plane texture degree is 9852.

Key words: AZ31 magnesium alloy; texture; hot rolling parameter; formability

镁合金具有低密度、高比强度和优异的减震降噪效果,在航空航天、交通、家电等领域具有广阔的应用前景^[1]。尽管如此,由于受材料制备、加工技术、抗腐蚀性能以及价格等因素的制约,镁合金尤其是变形镁合金的应用量仍远远落后于钢铁和铝合金的应用量。镁是密排六方晶体结构,晶体结构对称性较低,室温下独立滑移系数量远少于立方结构金属的,室温

变形条件下其棱柱面滑移和锥面滑移的临界分切应力 (Critical resolved shear stress, CRSS)远大于基面滑移 的^[2-3],塑性变形主要靠(0002) 〈1120〉 基面滑移以及 {1011}、{1012} 面孪生,这是导致镁合金室温塑性较 差、变形加工困难的主要原因。大量研究^[4-6]表明,由 于轧制镁合金在轧制平面上分布着很强的基面织构, 使得镁合金板材沿着厚度方向变形困难,强烈的基面

基金项目: 国家"十二五"镁合金支撑项目课题三(2011BAE22B003) 收稿日期: 2013-10-15;修订日期: 2014-05-20 通信作者: 胡水平,副研究员,博士;电话: 13611044910; E-mail: husp@nercar.ustb.edu.cn

织构严重影响了镁合金的二次成形性能,制约了镁合 金的应用。减弱轧后板材的基面织构可以显著地弱化 其各向异性,提高其室温成形性能。

不同轧制工艺后的板材具有不同的织构强度和成 形性能;退火能使镁合金发生回复和再结晶,减弱轧 制后板材的残余应力,减弱基面织构强度,提高板材 的成形性能。因此,可以通过优化板材轧制工艺来减 弱轧制-退火后镁合金板材的基面织构强度,从而提 高其成形性能。异步轧制通过在轧制过程中引入剪切 变形,改变成形过程中外加应力的方向,能够有效地 弱化镁合金的基面织构强度^[6];不同异速比对于基面 织构强度弱化的能力是不一样的^[7-8],研究^[9-10]认为, 当异速比为 1:1.5 时对基面织构弱化效果最好;同时由 于异步轧制快、慢辊两侧板材变形程度不一致,因而 轧制后两侧板材的宏观织构强度也不一样,慢辊侧板 材织构强度明显低于快辊侧的,这与钢和铝合金轧制 的结果一致^[11-12],基于此,本次实验中将异速比定为 1:1.5,所测宏观织构位置皆选用板材中间部分。

1 实验

实验用 3.0 mm 厚商用 AZ31B 挤压板坯的主要成 分见表 1。轧制前板材在 400 ℃下进行 2 h 退火处理, 在异径异步轧机上进行轧制实验,异速比为 1:1.5(大 辊直径 *d* 120 mm,小辊直径 *d* 80 mm),轧至 1.0 mm。 第一组轧制工艺如下:轧制温度分别为 250、300、350、 400 和 450 ℃,道次压下率为 20%,每道次间板材重 新回炉保温 10 min。终轧后板材在温度 400 ℃下退 火,退火保温时间为 30 min。第二组轧制工艺如下: 轧制温度 400 ℃,道次压下率分别为 15%,25%,30% 和 35%,其他条件和第一组的相同。以此来探讨轧制 温度和道次压下率对镁合金宏观织构和室温成形性能 的影响。根据所得规律,以弱化轧后板材的基面织构 强度为目的,设计一组新的轧制工艺,并与第一、二 两组轧制-退火工艺的后板材基面织构强度和室温成 形性能进行对比。

从轧制-退火后板材中间部位截取试样,以进行 微观组织观察和室温成形性能分析。用 25 mL 无水乙 醇+2g苦味酸+5 mL 去离子水+5 mL 冰醋酸混合溶 液侵蚀金相试样。通过 Carl Zeiss 光学显微镜观察板 材的微观组织,用 Image-Pro Plus 图像分析软件分析 晶粒尺寸;采用飞利浦 X'pert MRD 射线衍射仪进行 宏观织构测定;使用 Zwick 板料成形试验机进行室温 埃里克森实验,以分析材料的室温成形性能。圆片试样的直径为 60 mm,冲头速度为 0.1 mm/s,压边力为 10 kN,对每种板材重复进行 3 次实验。

表1 实验用 AZ31 镁合金的化学成分

 Table 1
 Chemical compositions of tested AZ31 magnesium

 alloys (mass fraction, %)

Al	Zn	Mn	Ni
2.95	1.09	0.3018	0.0002
Fe	Cu	Si	Mg
0.0016	0.0017	0.016	Bal.

2 实验结果

2.1 轧制温度对 AZ31 镁合金宏观织构强度和埃里克 森值的影响

轧制温度对轧制后镁合金板材基面织构强度及室 温埃里克森值的影响如图1所示。由图1可以看出, 轧制后板材存在强烈的基面织构。随着轧制温度的升 高基面织构强度降低,但是300℃轧制后板材强度相 比于250℃轧制后板材强度更高,继续提高轧制温度, 基面织构强度降低十分迅速,特别是当轧制温度高达 450℃时,基面织构强度仅为14184,明显低于其他温 度下轧制后板材的基面织构强度。室温埃里克森值随 着轧制温度的升高而增加。

图 2 所示为轧制后板材 {0002} 面极图。从图 2 可 以看出,轧制后极图等密度线沿着 RD 方向被拉长,



图 1 轧制温度对镁合金板材宏观织构强度和室温埃里克森值的影响

Fig. 1 Influence of rolling temperature on macro-texture intensity and Erichsen value of rolled magnesium sheets at room temperature



Fig. 2 {0002} plane pole figures of rolled AZ31 magnesium alloy sheet at different rolling temperatures: (a) 250 °C; (b) 350 °C; (c) 450 °C

最强极密度点与板材法向偏离约 10°左右,并且呈多 峰织构,这是异步轧制的"搓轧"效应所致。异步轧 制引入了剪切应力,使滑移面法线方向偏离轧制压力 方向一定的角度,故其形成的晶粒取向也会随之偏离 一定的角度。随着轧制温度的升高,极密度线偏离板 材法向更多,而且极密度等高线相邻两条线相距更远, 说明轧制温度的提高使轧制过程中参与滑移的滑移系 明显增多,使得变形后晶粒取向更加随机,变形后基 面织构得到弱化。结合图1可以看出,此时板材的室 温埃里克森值较高,板材各向异性得到弱化。

2.2 道次压下率对 AZ31 镁合金宏观织构强度和埃里 克林值的影响

轧制温度对轧制后镁合金板材基面织构强度及室 温埃里克森值的影响如图 3 所示。从图 3 可以看出, 随着道次压下率的增加,基面织构强度明显增加,室 温埃里克森值持续减小。道次压下率为 15%时,基面 织构强度较小,但是当道次压下率达到 20%时织构强 度急剧增加,继续增加道次压下率,织构强度增加不 明显,当道次压下率达到 30%时,基面织构强度增加 又较明显。这说明高温下小的道次压下率有利于弱化 基面织构强度,同时,当道次压下率在 20%~30%之间 时,增加道次压下率的增加对基面织构强度影响不大, 但是当道次压下率大于 30%后,道次压下率的增加对 基面织构强度的影响十分明显。

不同道次压下率轧制后镁合金的{0002}面极图如 图 4 所示,不同道次压下率轧制后板材中均有非常明 显的基面织构。从极图的等高线分布可以看出,随着 道次压下率的增加,峰值中心逐渐向 RD 方向发生了 偏转,且随着道次压下率的增加,偏转角度逐渐增加, 两条等高线间距离也随之减小,基面织构较为集中, 等高线在 TD 方向的扩展也减小而逐渐接近于圆形。 结合图 3 可以看出,此时板材各向异性明显,基面取 向晶粒较多,室温埃里克森值较低。



图 3 道次压下率对镁合金板材宏观织构强度和室温埃里 克森值的影响

Fig. 3 Influence of pass reduction on macro-texture intensity and Erichsen value at room temperature of rolled magnesium sheets

3 分析与讨论

镁合金轧制后会呈现强烈的基面织构,严重影响 了其成形性能。轧制过程中基面织构强度主要受到板 材本身材料、轧制温度、道次压下率、变形程度的影 响,在本次轧制过程中由于实验材料和总变形量一定, 则其主要受轧制温度和道次压下率的影响,根据本次



图 4 不同道次压下率轧制后 AZ31 镁合金 {0002} 面极图

Fig. 4 {0002} plane pole figures of rolled AZ31 magnesium alloy sheet at different pass reductions: (a) 15%; (b) 25%; (c) 35%

实验结果对其具体影响进行如下讨论。

3.1 轧制温度的影响

轧制温度对镁合金板材轧制后织构的影响,其实 质是通过对轧制时的塑性变形机制和动态再结晶过程 的影响来实现的[13]。低温轧制时,非基面滑移难以启 动,变形主要以基面滑移和孪生方式进行,轧制后存 在明显的基面织构,高温轧制时非基面滑移启动。在 一定程度上轧制温度越高,开动的非基面滑移系越多, 变形越容易, 轧制后晶粒可以朝着更多取向转动, 使 得轧后基面取向晶粒数量越少。同时,高温轧制过程 中会发生再结晶, 轧制过程中取向改变的晶粒发生再 结晶形核时,新形核的晶粒取向会更加随机,更高的 再结晶温度使得再结晶形核率和新形核的晶粒具有更 大的长大速率,因而生成更多的非基面取向晶粒,使 基面织构得到弱化。WU 等^[14]研究发现随着轧制温度 的升高, {0002}织构减弱。MABUCHI等^[15]研究发现 当轧制温度升高到 500 ℃时, {0002}织构几乎完全消 失,形成{0552}+{1011}织构,这种织构的形成是高 温下基面、棱柱面、锥面滑移和孪生及晶粒异常长大 共同导致的。在高温轧制时, 镁合金的滑移系明显增 多,棱柱面滑移和锥面滑移均参与变形,使得轧制后 板材的基面取向的晶粒明显减少, {1011} 面和 {1012} 面取向晶粒数量增加^[16]。

值得注意的是,300 ℃轧制后板材宏观织构强度 大于250 ℃轧制后板材的。观察两温度轧制后微观组 织(见图5)可以发现,250 ℃轧制后组织中存在条状的 灰白色"变形带",镁合金中的切变带一般是在变形量 较高的情况下由大量的孪晶汇聚而形成,在侵蚀时与 苦味酸发生剧烈的反应,生成这种灰白色的带状组 织^[16]。切变带区域储存的畸变能很高,退火时容易发 生再结晶,使得退火后板材晶粒取向随机;同时,低 温轧制由于板材塑性差,金属流动能力差,异步轧制 的"搓轧"效应也更加明显,使得轧制后晶粒取向更 加随机。两方面原因使得 250 ℃轧制后板材基面织构 强度低于 300 ℃轧制后板材基面织构强度,但是板材 的成形性能不仅与织构有关,而且与晶粒大小也有很 大关系,250 ℃轧制后板材晶粒细小,室温成形时孪 生等机制不易发生,不利于板材室温成形。综合两方 面原因,300 ℃轧制后板材的室温埃里克森值更高。

随着轧制温度的升高,滑移在轧制过程中的作用 逐渐增大,孪晶迅速减少,变形带消失,退火后晶粒 长大明显,如图6所示。400 ℃、30 min 退火后晶粒 基本为大小均匀的等轴晶,随着轧制温度的升高,晶 粒大小明显增加,这是退火过程中形成的细小再结晶 晶粒吞噬了周围大量的不同取向的晶粒所致,吞噬作 用也使得高温轧制后基面取向的晶粒数目减小,基面 织构得到弱化。织构弱化使板材晶粒取向更加散漫, 晶粒 C 轴不再集中垂直于板面, 使板厚方向的变形能 力增加,从而使板材埃里克森值得到提高。粗大的晶 粒中更容易发生孪生,特别是压缩孪晶的产生使得晶 粒偏转近 56°, 在室温成形时偏转后的晶粒更容易发 生滑移,显著提高了板材的室温成形性能。因此,提 高轧制温度可以使基面织构强度得到弱化,晶粒更加 粗大,基面织构弱化和晶粒粗化可以显著增大板材的 埃里克森值,提高板材的成形能力。

3.2 道次压下率对 AZ31 镁合金织构和性能的影响

轧制时,可以根据道次压下率的不同计算应变速率,其换算公式^[17]如下:



图 5 250 和 300 ℃轧制后板材微观组织

Fig. 5 Microstructures of AZ31 magnesium alloy sheets at rolling temperature of 250 °C(a) and 300 °C(b)



(1)

图 6 不同温度轧制、400 ℃、30 min 退火 后 AZ31 镁合金的显微组织

Fig. 6 Microstructures of AZ31 magnesium alloy sheets at different rolling temperatures following annealing at 400 °C for 30 min: (a) 250 °C; (b) 350 °C; (c) 450 °C

$\dot{\varepsilon} = \frac{2v\sqrt{\Delta h / R}}{H + h}$

式中: v 为轧制速度, m/s; Δh 为道次压下率, mm; R 为工作辊半径, m; H 和 h 分别为轧前和轧后的坯 料厚度, mm。根据式(1),道次压下率对轧制镁合金 来说,主要影响其变形速率和道次变形程度,道次压 下率越大,变形速率和道次变形程度也越大。根据文 献[13]可知,变形速率对织构的影响主要表现在两方 面:一方面是变形速率将影响变形过程中的工件的温 度变化;另一方面为变形速率会影响高温轧制过程的 变形机制,并最终导致织构类型变化或强弱不同。变 形程度对轧制镁合金的织构影响主要在于锋锐程度发 生变化。道次压下率对镁合金织构的影响由两方面共 同决定。 张亚萍等^[18]对 Mg-0.5%Zn-0.5%Ce-0.5%Zr 合金 在 400 ℃下进行道次压下率分别为 20%、30%和 50% 的轧制变形,发现随着道次压下率的增加,轧制后板 材基面织构强度明显增加,{0002}面极图锋锐程度也 受到了影响,变得更加接近于圆形。变形速率对位错 运动有一定影响,变形速率过高不利于相邻晶粒之间 滑移的传播和连续性,容易引起应力集中^[19],变形后 板材中存在大量的残余应力,这为退火时再结晶提供 了大量的形核点,同一区域新形核的晶粒取向差较小, 不能通过吞噬周围的晶粒长大,退火后板材的晶粒十 分细小,大量的晶粒取向为基面取向,提高了基面织 构强度。同时,变形程度对织构的影响主要体现在极 图的锋锐程度,从图 4 中也能明显看出,大道次压下 率轧制后{0002}面极图中两条密度等高线的距离减 小,等高线在 TD 和 RD 方向上的扩展也被压缩而逐 渐成为圆形,此时板材室温成形性能较差,其室温埃 里克森值仅为 3.98 mm。因此,降低道次压下率可以 弱化板材基面织构,提高板材成形性能。

4 优化工艺及其对性能与组织影响

根据上述两工艺结果可知,较高的轧制温度、较 小的道次压下率有利于板材的基面织构弱化,板材室 温成形性能提高。为此设计如下一组轧制工艺:轧制 温度为 450 ℃,道次压下率分别为 5%和 10%,退火 工艺和上两组一致。观察其轧制后{0002}面极图和室 温埃里克森值。

实验后测得道次压下率为 5%时板材宏观织构强 度为 7897,室温埃里克森值为 4.81 mm;道次压下率 为 10%时板材宏观织构强度为 9852,埃里克森值达到 5.33 mm。其所得 {0002} 面极图如图 7 所示,与其他轧 制工艺相对比可以明显看出,优化后板材的基面织构

强度更弱,最强极密度中心与板法向取向差更大,相 邻两等高线之间的距离更大,等高线沿着 RD 方向和 TD 方向被拉长,说明该方案下板材晶粒取向更加随 机,基面织构得到弱化。相对于道次压下率为10%的 板材,道次压下率为 5%的板材轧制后具有更弱的织 构强度,说明高温小道次压下率轧制时基面织构能够 得到弱化,但是其埃里克森值反而更低。观察其两组 轧制后的微观组织(见图 8)发现,道次压下率为 5%时, 晶粒明显十分粗大,晶粒尺寸在 30 µm 左右,其中部 分晶粒甚至达到 50 um,同时晶粒出现了明显的混晶 组织,混晶组织也不利于板材成形。同时,由于轧制 温度很高,晶界能量很高,小道次压下率轧制时,晶 界滑移也参与了变形,板材中的大晶粒在变形时根本 没有被破碎与再结晶,就直接通过晶界滑移存在于轧 制后板材中。过于粗大的晶粒在成形时增大了变形的 难度,成形时更容易出现颈缩等现象,使其成形能力 明显降低。对 450 ℃道次压下率为 10%的板材进行室 温拉伸实验,其拉伸性能如下:抗拉强度为 230 MPa, 屈服强度为 175 MPa, 伸长率达到 22.2%, 具有十分

Fig. 7 (0002) plane pole figures of rolled AZ31 magnesium alloy sheet after different rolling processes: (a) 450 $^{\circ}$ C, 5%; (b) 450 $^{\circ}$ C, 10%

Fig. 8 Microstructures of rolled AZ31 magnesium alloy sheet with new rolling processes: (a) 450 °C, 5%; (b) 450 °C, 10%

优良的综合力学性能。

5 结论

1) 轧制后板材出现强烈的基面织构,通过改进的 轧制工艺基面织构能够得到明显弱化,弱化后 AZ31 镁合金板材的室温埃里克森值有所增加,板材成形性 能得到有效改善。

 2)提高轧制温度和减小道次压下率能够显著弱 化基面织构强度,特别是当轧制温度提高到450℃时, 基面织构得到明显弱化,室温成形能到显著提高。但 是在450℃、道次压下率为5%时,轧制后板材晶粒 粗大,即使轧后基面织构强度较弱也不利于室温埃里 克森值的提高。

3) 最优的轧制工艺为轧制温度 450 ℃, 道次压下 率为 10%, 轧后板材基面织构强度为 9852, 室温埃里 克森值达到 5.33 mm, 显著提高了板材的室温成形性 能。

REFERENCES

- ELIEZER D, AGHION E, FROES F H. Magnesium science, technology and applications[J]. Advanced Performance Materials, 1998, 5(3): 201–205.
- [2] OBARA T, YOSHINGA H, MOROZUMI S. Twinning deformation in magnesium compressed along the C-axis[J]. Materials Science and Engineering, 1973, 12(5/6): 845–851.
- [3] 孟 利. 镁合金热、温形变行为的 EBSD 微织构研究[D]. 北 京:北京科技大学, 2008.
 MENG Li. An EBSD micro-texture study on hot and warm deformation behaviors of magnesium alloys[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2008.
- [4] WALDE T, RIEDEL H. Experimental and numerical investigation of texture development during hot rolling of magnesium alloy AZ31[J]. Materials Science Forum, 2007, 539/543(4): 3448–3453.
- [5] HARTIG C, BOHLEN J, LETZIG D. Cold rolling textures in AZ31 wrought magnesium alloy[J]. Scripta Materialia, 2004, 50(7): 943–947.
- [6] 刘华强,唐 荻,胡水平,米振莉,王 哲.不同轧制工艺对AZ31 镁合金薄板室温成形性能的影响[J].中国有色金属学报,2012,22(12):3291-3296.
 LIU Hua-qiang, TANG Di, HU Shui-ping, MI Zhen-li, WANG Zhe. Effects of rolling technology on forming properties of AZ31 magnesium alloy sheets at room temperature[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(12): 3291-3296.
- [7] 尚尔峰. 单向轧制镁及 AZ31 镁合金的织构演变[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.

SHANG Er-feng. Textures of magnesium and AZ31magnesium

alloy processed by unidirectional rolling[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.

- [8] KIM S H, YOU B S, YIM C D, SEO Y M. Texture and microstructure changes in asymmetrically hot rolled AZ31 magnesium alloy sheets[J]. Materials Letters, 2005, 59(29/30): 3876–3880.
- [9] 郭 睿. 提高 AZ31 镁合金板材室温成型性能的轧制工艺研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2013.
 GUO Rui. The rolling process research of improving formability at room temperature for AZ31 magnesium alloy sheet[D].
 Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2013.
- [10] 孙 瑞. 异步轧制 AZ31 镁合金板材的微观组织及力学性能研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2012.
 SUN Rui. Research on microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy by asymmetrical rolling[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2012.
- [11] CUI Q, OHORI K. Grain refinement of high purity aluminium by asymmetric rolling[J]. Materials Science and Technology, 2000, 16(10): 1095–1101.
- JIN H, LLOYD D J. The tensile response of a fine-grained AA5754 alloy produced by asymmetric rolling and annealing[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35(3): 997–1006.
- [13] 陈振华. 变形镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 349.
 CHEN Zhen-hua. Wrought magnesium alloys[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 349.
- [14] WU S K, CHOU T S, WANG J Y. The deformation texture in AZ31B magnesium alloy[J]. Materials Science Forum, 2003, 419/422: 527–532.
- [15] MABUCHI G I, CHINO Y, IWASAKI H. The grain size and texture dependence of tensile properties in extrude Mg-9Al-Zn[J]. Materials Transaction, 2001, 42(7): 1182–1189.
- [16] DONG J, WANG R, PENG L M. Effects of hot rolling processing on microstructures and mechanical properties of Mg-3%Al-1%Zn alloy sheet[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(7/8): 1970–1974.
- [17] 孟 强. AZ31 镁合金板异步轧制工艺及变形机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2006.
 MENG Qiang. Study on asymmetrical rolling processing and deformation mechanism of AZ31 magnesium alloy sheet[D].
 Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2006.
- [18] 张亚萍,靳 丽,董 洁,张桢彦,王 瑶. 道次压下量和退 火工艺对 Mg-Zn-Ce-Zr 合金微观组织及力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(11): 2985-2991. ZHANG Ya-ping, JIN Li, DONG Jie, ZHANG Zhen-yan, WANG Yao. Effects of per-pass reduction and annealing treatment on microstructures and mechanical properties of Mg-Zn-Ce-Zr alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(11): 2985-2991.
- [19] 赵志业. 金属塑性变形与轧制理论[M]. 北京: 冶金工业出版 社, 1996.

ZHAO Zhi-ye. Theory of plastic deformation and rolling of metals[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996.