

变厚度轧制对 AZ31 镁合金板材边部损伤影响分析

韦建春, 黄庆学, 黄志权, 朱艳春

(太原科技大学 重型机械教育部工程研究中心, 山西 太原 030024)

摘要: 基于变厚度轧制工艺理论, 利用 DEFORM-3D 软件对 AZ31 镁合金板材轧制边部损伤行为进行分析。设定轧制温度为 350 °C, 轧辊转速为 20 r/min, 先对 3 组试样进行压下量分别为板厚的 37.5%, 75% 和 112.5% 立轧预变形; 随后进行小压下量多次或大压下量单道次的平辊轧制。结果表明: 对镁合金板采用变厚度轧制工艺能显著减少其边部损伤; 立辊侧压量为 37.5% 时效果最好, 其最大损伤因子为 0.35; 变厚度轧制工艺更适用于大压下轧制, 当立辊侧压量为 75%, 平辊压下量为 49% 时最大损伤因子最小, 仅为 0.126; 侧压量的取值与板厚有关。

关键词: AZ31 镁合金; 变厚度轧制; DEFORM-3D; 边部损伤

中图分类号: TG146.2⁺2; TG339

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)02-0652-05

镁合金被誉为 21 世纪的绿色工程材料, 是目前可实现工业化应用最轻的金属结构材料^[1-4]。但由于其特殊的密排六方晶体结构, 在室温条件下的塑性变形仅限于基面 {0001} <1120> 滑移以及锥面 {1012} <1011> 孪生, 只有 3 个几何滑移系和 2 个独立滑移系^[5-10], 塑性变形困难, 在轧制过程中极易产生边裂。边裂的产生不仅对板材的性能影响较大, 更是大大降低其成材率, 增加了生产成本。而各国学者针对镁合金轧制边裂的研究还较少, 刘先兰等^[11]通过异步轧制细化了镁合金板材晶粒尺寸; 戴庆伟^[12]运用有限元技术, 结合损伤理论对镁合金轧制边裂机制进行了初步研究; 马立峰等^[13]对 AZ31B 宽幅镁合金铸轧板材热轧的边裂进行了分析, 并认为金属流动各向异性是热轧镁合金板易产生边裂的原因之一; Z. Wu, W. A. Curtin^[14]应用有限元模拟分析和原子理论系统研究了镁中裂纹尖端附近位错与 Griffith 解理断裂的竞争机制; Dae-Guen Kim 等^[15]通过对商用 AZ31 镁合金采用水平轧制和交叉轧制进行比较。

由于常规的实验方法很难获得轧制变形区的应力应变状态及边部损伤分布。因此, 本研究借助于 DEFORM-3D 软件, 基于变厚度轧制 (MAS) 工艺理论, 对镁合金板材轧制过程边部损伤情况进行了分析。首先对镁合金板材进行不同侧压量立辊轧制预变形; 然后, 对已形成边部凸度的轧件进行平辊轧制, 比较不同侧压量对镁合金轧件边部损伤及板材形状的影响

规律, 并分析边部应力应变状态变化, 探索镁合金变厚度轧制工艺, 以期对镁合金板材轧制边裂控制提供理论参考。

1 有限元模型的建立

镁合金变厚度轧制工艺的几何模型主要包括轧件、立辊、平辊和推块 4 部分, 所建立模型如图 1 所示。为了使模拟结果与实验结果具有可比性, 根据实验设备参数, 模拟时设定立辊和平辊直径都为 360 mm, 轧件尺寸: 150 mm×150 mm×20 mm。模拟过程中设置的主要参数如表 1 所示^[12,13]。

为使模拟结果具有可比性, 在几何模型、初始条件以及边界条件均不变的情况下, 采用不同变形条件总共对 6 块试样进行轧制。试样 1#、2#、3# 分别进行 1 道次立轧, 立辊侧压量分别为 37.5%、75% 和 112.5%,

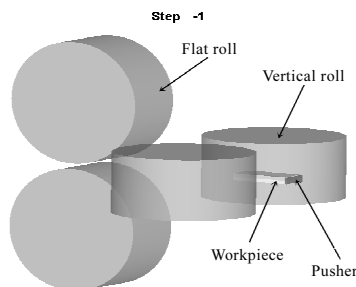


图 1 轧制模型示意图

Fig.1 Model diagram of rolling process

收稿日期: 2017-02-19

基金项目: 国家自然科学基金 (51501122, 51604181); 山西省科技创新项目 (2015172); 太原科技大学研究生创新项目 (20151020); 太原科技大学校博士科研启动基金 (20142033)

作者简介: 韦建春, 男, 1991 年生, 硕士生, 太原科技大学重型机械教育部工程研究中心, 山西 太原 030024, 电话: 0351-2776769, E-mail: weijianchun125@163.com

表 1 模拟参数设置

Table 1 Parameters setting of digifax

Parameter	Value
Room temperature/°C	20
Initial temperature of roller/°C	150
Initial temperature of workpiece/°C	350
Sliding friction coefficient	0.5
Convective heat-transfer coefficient of Mg sheet/ W·m ⁻² ·°C ⁻¹	1000
Thermal conductivity/W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹	35
Convective heat transfer coefficient of Magnesium plate and the air/W·m ⁻² ·°C ⁻¹	102.5
Emission coefficient	0.12
Specific heat/J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹	102.5

然后每块试样再经过 3 道次平辊轧制，压下量分别为 20%，25%，15%；为了确定变厚度轧制工艺对镁合金轧制边部损伤的影响，对试样 4# 只进行 3 道次平辊轧制；同时，为研究镁板侧压后大压下轧制的边部损伤情况，对试样 5# 和 6# 侧压后进行了大压下量轧制，其中立辊侧压量分别为 37.5% 和 75%，平辊压下量为 49%。为了便于比较上述不同条件下轧后镁板损伤值的分布情况，每个试样沿宽度方向每隔 5 mm 取点标记，如图 2 所示。

2 数值模拟结果与分析

试样 1#、2#、3# 分别在 37.5%、75% 和 112.5% 侧压量下经过 1 道次立轧。结果发现：试样 1# 和 2# 的边部凸度随侧压量的增大而增加，而试样 3# 的边部凸度小于试样 1# 和 2#，并且最边部的高度要稍小于靠近板坯中间部位凸起的高度，即凸起区域发生扭曲，如图 3 所示。由此可见，对镁板进行变厚度轧制时，立辊侧压量小于板坯初始厚度为宜。因此在后续平辊轧制实验中，不再对试样 3# 进行平辊轧制。

2.1 不同侧压量立轧+小压下多道次平辊轧制镁板边部损伤分析

图 4 为经过不同侧压量变厚度处理的试样 1#、2# 以及未经过变厚度处理的试样 4#，在相同条件下经过 3 道次平辊轧制（压下量分别为 20%、25% 和 15%）

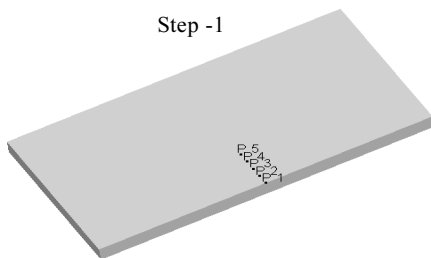


图 2 所取标记点位置

Fig.2 Positions of picked points

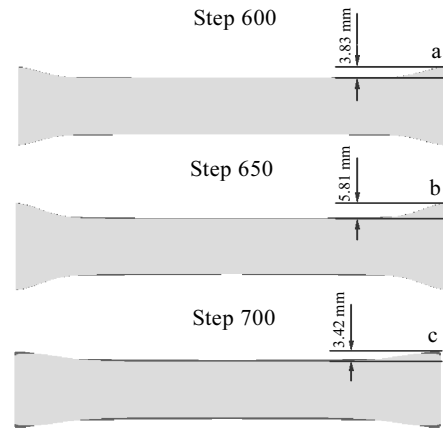


图 3 不同侧压量边部凸起高度

Fig.3 Raised contour under different lateral reductions: (a) 37.5% (sample 1#), (b) 75% (sample 2#), and (c) 112.5% (sample 3#)

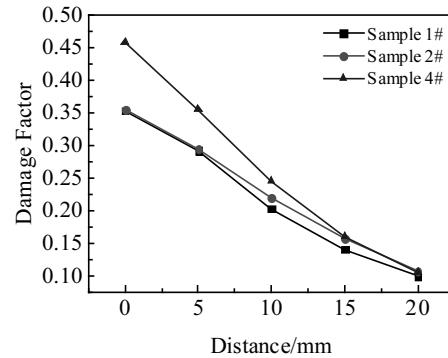


图 4 不同侧压量条件下轧制 3 道次镁板损伤比较

Fig.4 Edge damage factor of rolled Mg plate under different lateral reductions and three pass reduction of flat roll

后的损伤值分布情况，即试样 1#、2# 和 4# 完成轧制后沿板材宽度方向各标记点的损伤值。从图中可以明显看出，采用经过立辊侧压后再用平辊轧制的变厚度轧制工艺，镁板边部损伤值明显小于没有进行变厚度轧制的镁板，试样 1#、2# 和 4# 的最大损伤因子分别为 0.350、0.353、0.458。最大损伤均出现在镁板边部区域，这与马立峰等人的研究结论相一致^[16]。这主要是因为平辊轧制过程中金属的流动遵循最小阻力定律，板材边部沿宽度方向运动受到的阻力要小于轧制方向，而中间区域的金属沿轧制方向运动的阻力要小于宽度方向的阻力，导致轧制过程中变形不均匀，中部延伸大于边部金属的延伸，对板材边部起到拉伸作用，导致边部损伤较大；另一方面镁合金的热容小，散热系数高，使得板材边部温度要远低于中间区域的温度，边部区域受冷收缩而产生拉裂^[13]。而采用变厚度轧制

工艺时，边部形成的凸度可有效增大边部金属纵向的延伸量，达到轧件中部与边部金属同步延伸的目的，减少中部对边部的拉应力作用，从而减少边部的损伤。

由图 4 可以看到，当侧压量为板厚的 37.5% 时，采用小压下经过 3 道次平辊轧制后镁板沿宽度方向各标定点的损伤值最小。因此，对镁板采用适当的变厚度轧制有利于促进镁板轧制过程中金属变形的均匀性，从而可以大大降低其损伤值，减小镁板轧制过程中边裂倾向，提高镁合金板轧制成材率。

2.2 不同侧压量立轧+单道次大压下轧制镁板边部损伤分析

试样 5# 的侧压量为板厚的 37.5%，平辊一道次轧制压下量为 49%；试样 6# 的侧压量为板厚的 75%，平辊一道次轧制压下量为 49%。试样 1#、2#、4#、5#、6# 轧后损伤值分布比较如图 5 所示。从图中可以看出，试样 5# 和 6# 的轧后最大损伤因子明显小于试样 1#、2# 和 4# 的最大损伤因子，并且试样 6# 的最大损伤值小于试样 5#。说明可以对侧压轧制后的镁板采用大变形压下轧制；同时，随着侧压量的增大，大压下平轧后的最大损伤值反而减小。

对图 5 进行定量分析，可以看出，试样 5# 的最大损伤值约为 0.229，是试样 4# 的 1/2，而试样 1#、2# 的最大损伤值约为 0.353；而试样 6# 的侧压量达到板厚的 75%，再经过压下量为 49% 的平轧后，最大损伤值仅为 0.126。这表明，通过立辊侧压预变形轧制再采用平辊进行大压下轧制有利于减少镁板轧制过程的损伤。

主要是因为镁合金比热容较小，同时热辐射系数较高，从而轧制过程中温降较快，特别是板材边部经过多道次轧制温度更低，轧制过程中容易产生裂纹。当采用变厚度轧制工艺时，使镁板边部凸起一定高度，而采用大压下轧制时，边部区域塑性变形的剧烈程度大于中部，因而产生大量的塑性变形热，在一定程度上弥补了边部区域的温降，使得轧制过程中板材中部与边部变形机制趋于一致，降低了由于中间区域的金

属延伸较大而对边部产生的拉应力，从而使镁板损伤较小。

同时，从试样 1#、2#、4# 轧后的形状（如图 6 所示）可以看出，试样 4# 轧后的端部呈“舌”形，如图 6a 所示，也进一步印证了平辊轧制时轧件中部金属纵向流动大于边部，因而边部必然受到中部拉应力的作用，从而产生边部损伤。试样 1# 轧后镁板形状（如图 6b 所示）与试样 4# 相比，形状近似于矩形，只是端部由于受到咬入作用的影响，还呈现小“月牙”形，但很明显可以看出，轧件中部与边部的纵向金属流动基本趋于一致，因而边部的损伤也就较小；而试样 2# 轧后端部呈现明显的“月牙”形（如图 6c 所示），这是由于侧压量过大，使得边部凸度区域体积增大，平辊轧制时边部金属的纵向流动大于中部而造成。由此可见，对镁板采用变厚度轧制可以使轧后镁板形状趋于矩形，从而减少切边损失，但应确保所取侧压量的适宜性。从实验过程可以看出，侧压量的选取与轧件的初始厚度和后续平辊轧制时的压下量有关，进一步分析可知，该值的选取还与材料的性能、轧制温度、轧辊辊径等因素有关。因此，关于侧压量精确确定方法将是随后的研究重点。

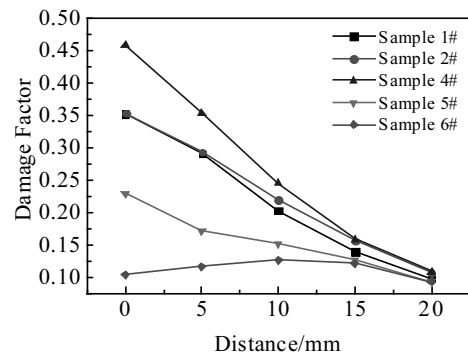


图 5 不同侧压量再平辊轧制压下 49% 镁板损伤比较
Fig.5 Edge damage factor of rolled Mg plate with different lateral reductions and flat roll reduction of 49%

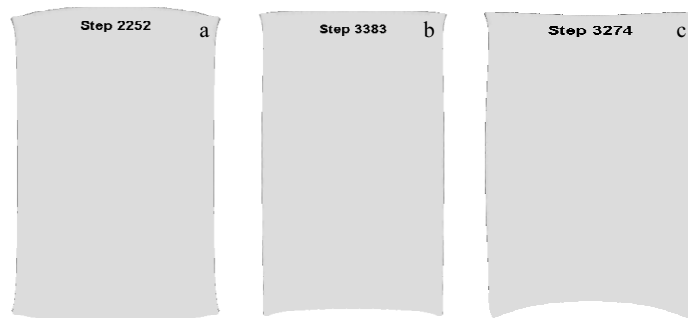


图 6 不同侧压量并经过 3 道次小压下轧制后镁板平面形状

Fig.6 Rolled plate shape with different lateral reductions: (a) sample 4#, (b) sample 1#, and (c) sample 2#

通过上述分析可以看出，对镁合金板材采用立辊进行侧压后再进行平辊轧制的变厚度轧制（MAS）工艺，可有效提高轧制变形区边部和中部金属沿轧制方向的“同步流动性”，使轧后板材呈现近似矩形，减少切边量，并且有利于减缓或消除轧制过程中的边部边裂；同时，可有效改善镁板轧后端部形状，减少头尾剪切损失，提高其成材率。

2.3 变厚度轧制变形区应力与应变分析

在平辊轧制过程中，变形区内各单元沿 RD，TD 和 ND 3 个方向上的应力值都存在较大差异，轧件中部区域处于三向不均等压应力状态，而边部区域处于两向压应力和一向拉应力（纵向）状态。在轧制变形区中部和边部分别取一个单元，其受力状态如图 7 所示。

图 8 为镁板经过不同立辊侧压量后再采用平辊轧制过程中变形区内沿轧制方向的应力曲线图。从图中可以明显看到，当没有采用立辊进行侧压预变形轧制时，在轧制变形区内镁板边部沿轧制方向受到拉应力作用，并且越靠近中部拉应力越小，最大拉应力为 49.86 MPa，约为最小拉应力的 9.4 倍，沿轧制方向受力不均匀。这是因为轧制过程中金属的流动遵循最小阻力定律，板材边部的金属沿宽度方向处于自由状态，其沿宽度方向流动受到的阻力要小于靠近中部的金属，因此越靠近边部，其受到由于轧辊施加作用力而导致金属塑性变形产生的沿轧制方向的拉应力也越大。（第 1 个点由于取在处于自由扩散状态的最边部，因此其应力较小）。而当采用立辊侧压预变形之后再采用平辊轧制的变厚度轧制工艺时，可以看到边部拉应力显著减小，并且应力状态由拉应力转变为变厚度轧制时的压应力，从而有利于减少镁板轧制过程中边裂的产生。

图 9 为经过不同侧压量预变形后再进行平辊轧制时变形区内沿轧制方向的应变曲线。根据图 9 可知，当没有采用变厚度轧制工艺时，变形区内中部区域沿轧制方向的应变要大于边部的应变，即中部区域变形大，导致中间区域的金属沿轧制方向的延伸要大于边部，对边部起拉伸作用。而当对镁合金板进行变厚度

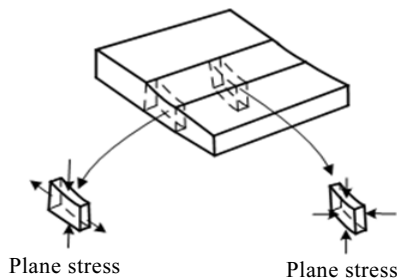


图 7 平辊轧制变形区域应力分布和平面应力状态

Fig.7 Stress distribution of flat rolling deformation zones

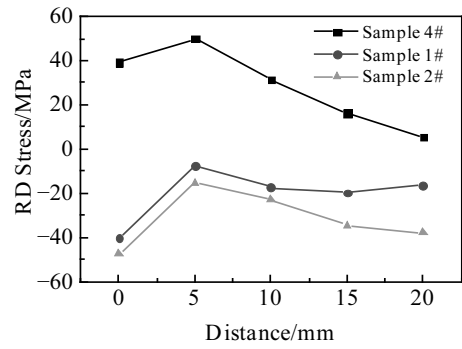


图 8 不同侧压量下平辊轧制变形区内沿轧制方向的应力曲线

Fig.8 RD stress curves of flat rolling deformation zones with different lateral reductions

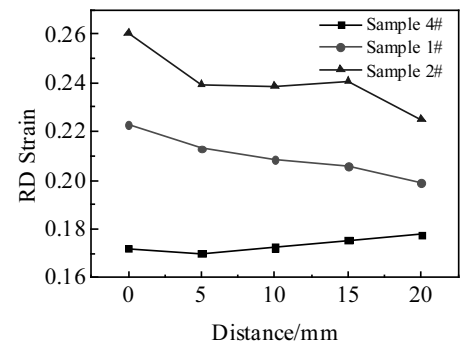


图 9 不同侧压量下平辊轧制变形区内沿轧制方向的应变曲线

Fig.9 RD strain curves of flat rolling deformation zones with different lateral reductions

轧制时，则变形区内沿轧制方向的应变分布正好相反，且越靠近边部应变越大，最大应变值达到 0.26。这是因为立辊侧压后形成的边部凸度可有效增大边部金属纵向的延伸量，使得轧件中部与边部金属尽可能达到同步延伸的目的，有利于降低不均匀变形对镁板轧制边裂的影响。

3 结 论

- 1) 对镁合金板采用变厚度轧制工艺可有效减小镁板轧制时边部的损伤。且最大损伤均出现在镁板边部区域。
- 2) 对镁板采用变厚度轧制工艺可实现大压下轧制；同时，随着立辊侧压量的增大，大压下平轧后的最大损伤值反而减小，但侧压量小于板坯初始厚度为宜，侧压量为板厚的 37.5% 时效果最好。
- 3) 采用立辊先进行侧压后再进行平辊轧制的变厚度轧制工艺，可使轧后镁板形状趋于矩形，侧压量的选取与轧件的初始厚度和后续平辊轧制时的压下量有关。

4) 采用先侧压预变形再用平辊轧制的变厚度轧制工艺对镁板进行轧制, 可有效改变镁板边部应力与应变分布, 使得边部与中部金属几乎同步流动, 有利于降低镁板边部损伤。

参考文献 References

- [1] Peng Xiaodong, Li Junchen, Xie Suyun *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(12): 2421
- [2] Chen Xianhua, Pan Fusheng, Mao Jianjun *et al. Journal of Materials Science*[J], 2012, 47: 514
- [3] Sarker D, Friedman J, Chen D L. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2014, 611: 341
- [4] Feng Fei, Huang Shangyu, Meng Zhenghua *et al. Materials and Design*[J], 2014, 57: 10
- [5] Wang Shouren, Kang Suk Bong, Cho Jae Hyung. *Journal of Materials Science*[J], 2009, 44: 5475
- [6] Khosravani A, Fullwood D T, Adams B L *et al. Acta Materialia*[J], 2011, 59: 6761
- [7] Xu Jie, Wang Xinwei, Zhu Xiaocheng *et al. Journal of Materials Science*[J], 2013, 48: 4117
- [8] Wang X, Jiang L, Luo A *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2014, 594: 44
- [9] Lentz M, Gall S, Schmack F *et al. Journal of Materials Science*[J], 2014, 49: 1121
- [10] Zhang Zhen. *Materials Letters*[J], 2014, 119: 79
- [11] Liu Xianlan(刘先兰), Zhang Wenyu(张文玉), Liu Chuming(刘楚明) *et al. Journal of Central South University, Science and Technology*(中南大学学报, 自然科学版)[J], 2008, 39(6): 1244
- [12] Dai Qingwei(戴庆伟). *Study on Rolling of Mg Alloy and Mechanism of Edge Crack*(镁合金轧制及边裂机制研究)[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011
- [13] Ma Lifeng(马立峰), Pang Zhining(庞志宁), Ma Ziyong(马自勇) *et al. Journal of Materials Science & Engineering*(材料科学与工程学报)[J], 2014, 32(5): 665
- [14] Wu Z, Curtin W A. *Acta Materialia*[J], 2015, 88: 1
- [15] Kim Dae-Guen, Lee Kye-Man, Lee Jae-Seol *et al. Materials Letters*[J], 2012, 75: 122
- [16] Ma Lifeng(马立峰), Pang Zhining(庞志宁), Huang Qingxue(黄庆学) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(S1): 387

Variable Gauge Rolling Impact on the Edge Damage of AZ31 Magnesium Alloy Sheets

Wei Jianchun, Huang Qingxue, Huang Zhiquan, Zhu Yanchun

(Heavy Machinery Engineering Research Center of Education Ministry, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The edge damage behavior of AZ31 magnesium alloy plate was investigated by finite element software DEFORM, which is based on variable gauge rolling. The rolling temperature of magnesium plate was 350 °C, the rolling speed was 20 r/min and the lateral pre-deformation by vertical roll were 37.5%, 75% and 112.5% of plate thickness. Then the specimens that had been pre-deformed were rolled by flat roll with multi cycles of small reduction or single cycle with a large deformation. The results show that the variable gauge rolling process can significantly reduce edge damage of rolled magnesium plate. When vertical roll reduction is 37.5%, the variable gauge rolling process reach the best, and the maximum edge damage factor is 0.35. Variable gauge rolling process seems to be more suitable for large reduction rolling. The maximum damage factor is only 0.126 when vertical reduction is 75% and flat reduction is 49%. The value of vertical roll reduction is related to the initial thickness of magnesium plate.

Key words: AZ31 magnesium alloy; variable gauge rolling process; DEFORM-3D; edge damage

Corresponding author: Huang Zhiquan, Ph. D., Professor, Heavy Machinery Engineering Research Center of Education Ministry, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, P. R. China, Tel: 0086-351-2776769, E-mail: hzq3845@163.com