

AZ31 镁合金板材轧制边裂深度预判模型

黄志权, 韦建春, 马立峰, 朱艳春, 吴冬祖

(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: 在 400 °C 下, 分别以压下量 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40% 和 45% 对初始厚度为 7 mm 的 AZ31 镁合金板材进行了轧制过程数值模拟以及实验验证研究, 并观察轧制后的显微组织。结果表明, 在本实验轧制条件下, 当单次压下量达到 20% 时, 板材边部将有裂纹萌生, 并且边部裂纹深度随着压下量的增大而不断增大, 由 20% 时的 5.24 mm 增加到压下量 45% 时的 14.056 mm; 根据数值模拟结果, 得到了沿板宽方向的损伤值分布情况, 建立了边部裂纹深度预判模型; 对于裂纹深度, 轧制实验实测值和所建立的裂纹深度预判模型的计算值之间的平均误差为 9.23%; SEM 观察结果表明, 边部裂纹附近的显微组织中含有大量孪晶。

关键词: AZ31 镁合金; 显微组织; 边裂深度; 预判模型

中图分类号: TG146.22; TG335.5⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)06-1926-05

随着世界各国对各类能源和材料需求的不断升级, 以及对节能减排和环境保护的重视, 镁合金受到了前所未有的关注^[1,2]。镁合金由于其具有许多优异性能, 如减重效果突出, 比强度高、良好的锻造性能、优良的散热性能和切割性能、以及在控制环境下的可焊性等, 因此正被越来越多地应用于汽车生产以及航空航天领域中^[3-5]。但与体心立方晶体结构以及面心立方晶体结构相比, 镁合金的密排六方晶体结构以及单晶体的内在不对称性, 使其在室温下表现出较高的各向异性且成型性能较低^[6,7]。镁合金在室温下只有一个基面滑移系^[8], 只有在 200~450 °C 的变形温度范围内加工时, 镁合金的锥面滑移系和棱柱面滑移系才会被激活^[9]。镁合金板材在轧制过程中, 孪生和再结晶是其两种主要变形机制^[10], 这 2 种变形机制在金属塑性变形过程中可以消耗大量变形能, 使得晶界处受到的应力集中减小, 从而减少裂纹的产生, 并且可以通过再结晶的方式细化晶粒。但采用轧制方式生产时, 由于变形不均匀的影响, 在板材边部容易产生附加拉应力, 从而极易产生边部裂纹^[11,12], 边裂已经成为限制镁合金板材广泛应用的一个重要因素。在已有文献中, 关于镁合金裂纹的研究大多数都是关于疲劳裂纹的研究, 很少有专门针对镁合金轧制过程中所产生的边部裂纹的研究^[13-16]。

本研究中, 作者以铸态 AZ31 镁合金为研究对象, 利用有限元软件 DEFORM-3D 对镁合金板材轧制过程进

行数值模拟, 建立镁合金板材轧制边裂深度预判模型, 并进行轧制实验验证。在 400 °C 下分别以压下量 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40% 和 45% 对镁板进行单次轧制, 研究不同压下量对铸态镁合金轧制边裂的影响, 同时分析不同压下量轧制后镁合金板材的显微组织。

1 实验

本研究轧制实验所用的 AZ31 镁合金铸锭是由某知名镁业公司提供的商用镁合金, 其主要化学成分如表 1 所示。将镁合金铸锭切割成 100 mm × 100 mm × 7 mm 的尺寸, 采用真空加热炉对板坯进行加热, 以尽量减小镁板氧化对其轧制性能的影响。将轧件加热到 400 °C 并保温 30 min, 然后在轧制速度 0.2 m/s, 压下量分别为 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40% 和 45% 条件下, 利用太原科技大学实验室二辊轧机(辊径 320 mm, 辊身长度 340 mm) 进行轧制实验。使用基恩士超景深三维显微系统(VHX-2000)对轧制后镁板边部产生的裂纹进行测量, 比较不同压下量条件下所产生的边部裂纹深度, 其中将边裂深度定义为沿板

表 1 实验用 AZ31 镁合金化学成分
Table 1 Chemical composition of AZ31 magnesium alloy ($\omega/\%$)

Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Mg
3.35	0.96	0.4	0.1	0.005	0.05	0.005	Bal.

收稿日期: 2017-06-26

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51501122); 山西省科技创新项目(2015172); 太原科技大学校博士科研启动基金(20142033); 晋城市科技计划项目(201502001-1); 太原科技大学研究生创新项目(20151020)

作者简介: 黄志权, 男, 1981 年生, 博士, 副教授, 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: huangzhipeng607@163.com

宽方向 (TD) 由边部向里裂纹所覆盖的尺寸^[17]。对轧制后的镁板沿轧制方向 (RD) 边部区域截取金相试样, 采用 4.2 g 苦味酸+70 mL 无水乙醇+10 mL 冰乙酸+10 mL 水的腐蚀剂进行腐蚀, 采用蔡司场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察不同压下量轧制后的显微组织。同时, 利用有限元软件 Deform-3D 根据实际轧制条件设置模拟参数进行轧制有限元分析。将不同条件下数值模拟得到的边裂损伤值及其对应的边裂深度与实际轧制实验进行对比。通过显示模拟轧制过程中边部某点的三向应力变化情况, 分析边部区域应力对边部裂纹产生的影响规律, 并根据所得到的损伤分布, 建立边部裂纹深度预判模型。

2 结果与讨论

2.1 压下量对镁合金板材边裂的影响

图 1 为基恩士超景深三维显微系统 (VHX-2000) 测量轧后板材裂纹深度的显微图。从图中可以看到, 当压下量达到 20% 时, 铸态镁合金板材经过单道次轧制后边部便开始出现裂纹。这是因为材料达到了其临界断裂因子, 从而产生了裂纹。并且所用实验板材为铸态, 其成分可能存在偏析, 边部裂纹开始萌生, 此时边部裂纹深度为 5.24 mm; 继续增加单道次压下量, 边部裂纹深度也逐渐增大, 当压下量为 45% 时, 边部

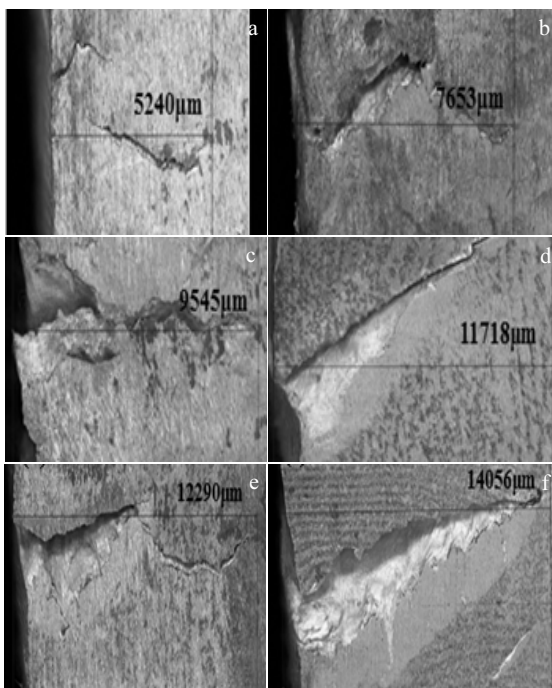


图 1 超景深裂纹深度测量结果

Fig.1 Measurement results of edge crack depth by digital microscope under different reductions: (a) 20%, (b) 25%, (c) 30%, (d) 35%, (e) 40%, and (f) 45%

最大裂纹深度达到 14.056 mm。实验观察发现, 镁合金板材的边裂开口呈现间隔循环分布的规律, 在边部所有裂纹中, 大多数都为“/型”裂纹, 只有少部分为“V型”裂纹。

2.2 边裂预测模型的建立

根据实际轧制条件, 采用有限元软件 DEFORM 建立镁合金板材轧制三维模型, 对 AZ31 镁合金板材轧制过程进行数值模拟, 数值模拟得到的镁板轧制后的损伤值分布云图如图 2 所示。在 DEFORM 中, 内置损伤模型为 Crockroft & Latham 准则, 其认为材料断裂的重要因素是拉伸应力。当给定材料参数时, 则只有损伤因子达到材料的临界损伤因子时才会发生开裂。根据数值模拟得到的结果, 将不同压下量条件下的最大损伤值进行回归分析, 如图 3 所示, 便能得到当前轧制条件下压下量与损伤值的关系式。因此, 铸态 AZ31 镁合金轧制过程中最大损伤值可以用下式表示:

$$C_1 = -0.11 + 9.23e^{\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta h - 2.59}{0.9}\right)^2} \quad (1)$$

其中, C_1 即为在本实验轧制条件下的最大损伤值, Δh 为压下量。

同理, 对轧制后所产生的边部裂纹深度与压下量之间的关系进行分析, 根据不同压下量得到了沿板材宽度方向的损伤值大小分布情况。为了使所得结果更为精确, 沿宽度方向每隔 2 mm 取点标记, 总共取 14 个点, 然后将所得到的损伤分布进行拟合, 如图 4 所示, 再将不同压下量条件下的曲线进行归一化, 可得到沿板材宽度方向的损伤分布曲线:

$$C_2 = \frac{1.05\Delta h - 0.03}{1 + e^{\frac{(x + 8.55\Delta h^2 - 8.42\Delta h - 8)}{(10.76\Delta h^2 - 4.09\Delta h + 3.79)}}} \quad (2)$$

其中, C_2 为沿宽度方向的损伤值, Δh 为压下量, x 为沿宽度方向距镁板边部距离。根据有限元模拟以及实验结果, 并结合图 1、图 2 可以知道, 当压下量达到 20% 时则边部将萌生裂纹, 对应数值模拟结果中此时的损伤因子达到了 0.20, 从而得到以下结论: 在数值模拟镁板轧制过程中, 若损伤因子达到 0.20 以上, 镁板将会产生边部裂纹。因此, 将 $C_2=0.20$ 代入式 (2), 并进行逆向求解得到如下关系式:

$$x = [\log(1.05\Delta h - 0.23) - 2 \log(0.20)] \times (6.0 + 8.42\Delta h - 8.55\Delta h^2) + (3.79 - 4.09\Delta h + 10.76\Delta h^2) \quad (3)$$

结合式 (1) 和式 (3), 便能判断不同压下量对应的板材沿宽度方向的裂纹深度。实际裂纹深度与根据式 (3) 计算得到的裂纹深度结果比较如表 2 所示。从表 2 可知, 公式计算得到的数值与实际测量值存在一定误差, 平均误差为 9.23%。

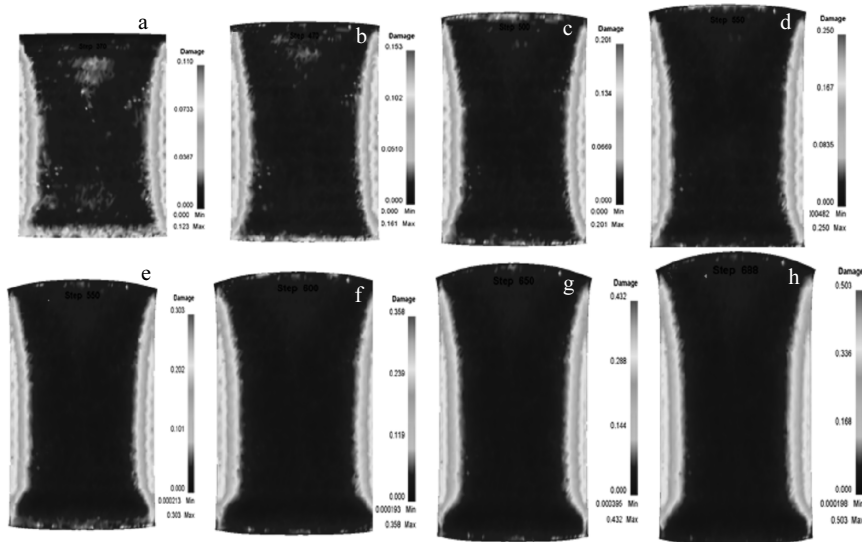


图 2 不同压下量下 AZ31 镁合金轧制后的损伤分布

Fig.2 Damage distribution of AZ31 magnesium alloy rolled under different reductions: (a) 10%, (b) 15%, (c) 20%, (d) 25%, (e) 30%, (f) 35%, (g) 40%, and (h) 45%

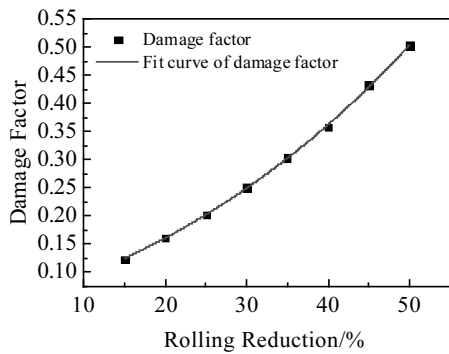


图 3 压下量对铸态 AZ31 镁合金板材轧制边部损伤的影响

Fig.3 Effect of rolling reduction on the edge damage of AZ31 magnesium alloy sheet

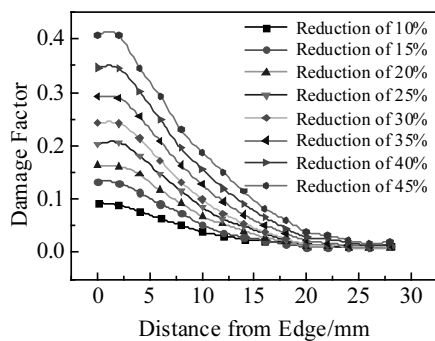


图 4 不同压下量下轧制沿板宽方向损伤分布曲线

Fig.4 Damage distribution curves of AZ31 magnesium alloy along TD direction rolled under different reduction

2.3 轧制变形区内应力对边部裂纹的影响分析

镁合金板材在轧制过程中，其变形区内不同区域各单元沿轧制方向、宽度方向和法线方向的应力值都存在较大差异。变形区域内中间部分以及靠近边部的地方受到不同的应力作用，镁板单元在中间变形区受到三向不均等压应力作用，而在靠近边部区域，则是受到两向压应力和一向拉应力（轧向）的作用，使得整个变形区域内各镁板单元受力不均匀。镁合金板材轧制过程中这种不同应力状态下综合作用导致的不均匀变形是导致边部裂纹的根本原因。

在镁合金板材轧制过程中，随着轧件的不断咬入，坯料由于轧辊施加的作用力而发生的塑性变形不断发展。通过有限元模拟方法，便能得到轧制变形区内的三向应力分布情况。图 5a、5b、5c 分别为轧制过程中变形区内 RD、TD、ND 方向的应力分布情况。其中纵坐标的数值大于零表明应力状态为拉应力，小于零则是受到压应力作用。图 5 验证了如前所述的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。根据图 5a 可以看出，在轧制方向上，随着压下量的不断增大，应力曲线斜率也增大，即板材边部与中部之间的应力差随着压下量的增大而不断增大，当压下量为 10% 的时候，中部与边部的应力之差约为 64 MPa，而以 45% 的压下量进行轧制时，中部与边部的应力之差达到了 117 MPa，中部应力绝对值要远大于边部应力，金属沿轧制方向的流动要远远多于边部区域的金属，对边部起到拉伸作用也越大，从而导致更大的边部裂纹深度。

2.4 边部裂纹区域附近显微组织分析

图 6 显示了铸态 AZ31 镁合金在温度为 400 °C 和轧制速度 0.2 m/s 条件下,以不同压下量进行单次轧制后边部裂纹区域附近的显微组织。根据图 6 可以看出,当 AZ31 镁合金以小于 15%的压下量进行轧制时,显微组织形貌中呈现出大颗粒晶粒与小颗粒晶粒相互混合的状态。这是因为道次压下量比较小,板材没有得到充分的变形,显微组织中还存在部分没有被破碎的铸态粗大晶粒。随着压下量的不断增大,显微组织中大量孪晶,并且孪晶组织交错。这主要是由于镁合金的滑移系少,孪晶起到协调变形的作用^[18]。同时,从图 6 中还可以看到,当压下量达到 30%时,在孪晶组织的晶界之间开始出现部分细小的动态再结晶晶粒。随着压下量的继续增大,边部区域受到中部区域的拉伸作用越明显,晶粒不断被拉长,组织中现出长条形晶粒。当压下量达到 40%以后,细小再结晶晶粒的长大将孪晶切断,孪生晶粒破碎,而成为更细小

的再结晶晶粒,使得显微组织中出现大量等轴晶粒。这是由于此时变形量大,大量的变形能为 AZ31 镁合金板中发生完全动态再结晶提供了充足的条件。并且产生的晶格畸变能也增大,使得再结晶形核速率要远大于其生长速率,因此晶粒几乎全部由细小的等轴晶粒组成。由此可见,对铸态 AZ31 镁合金进行大压下量轧制时可以获得更为均匀的晶粒组织,但压下量大时,轧制过程中容易导致镁合金板材边部产生裂纹,影响其成材率。

表 2 实际边部裂纹深度与计算值的比较
Table 2 Comparison of actual edge crack depth with calculated value

Edge crack depth	Reduction/%					
	20	25	30	35	40	45
Actual/mm	5.240	7.653	9.545	11.718	12.290	14.056
Calculated/mm	5.321	6.856	10.418	12.439	14.039	15.498
Error/%	1.55	10.41	8.73	6.16	14.23	10.26
Average error/%	9.23					

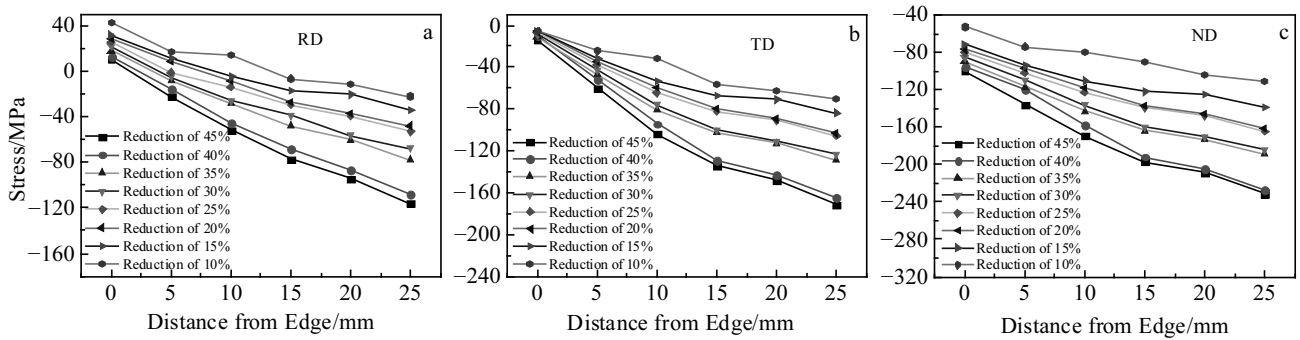


图 5 轧制变形区内三向应力分布

Fig.5 Triaxial stress distribution of magnesium alloy in rolling deformation zone: (a) RD direction, (b) TD direction, and (c) ND direction

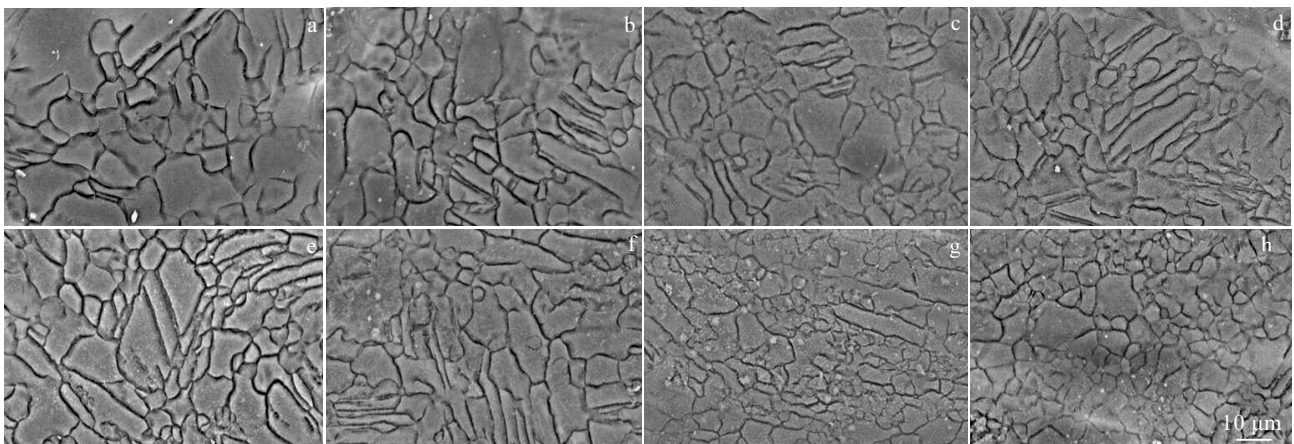


图 6 铸态 AZ31 镁合金不同压下量轧制后边部裂纹区域显微组织

Fig.6 Microstructures of edge crack zones of as-cast AZ31 magnesium alloy rolled under different rolling reductions: (a) 10%, (b) 15%, (c) 20%, (d) 25%, (e) 30%, (f) 35%, (g) 40%, and (h) 45%

3 结 论

1) 对于铸态 AZ31 镁合金, 在本实验条件下进行轧制时, 其损伤因子达到 0.2 后便有裂纹萌生, 即当压下量达到 20% 时, 轧制后的板材边部开始产生裂纹, 裂纹深度为 5.24 mm。

2) 采用本研究建立的边部裂纹深度预测模型计算得到的裂纹深度值与实际裂纹深度值之间的平均误差为 9.23%, 可为铸态 AZ31 镁合金板材轧制的压下量控制提供指导。

3) 在镁合金板材轧制过程中, 边部裂纹附近的显微组织中含有大量孪晶组织。增大单道次压下量有利于细化晶粒组织, 但也容易导致更大的边部裂纹深度。

参考文献 References

- [1] Kazuaki Shiozawa, Tomoki Kashiwagi, Tutomu Muraic *et al. Procedia Engineering*[J], 2010, 2: 183
- [2] Yang Yuan(杨 媛), Li Jiaqiang(李加强), Song Hongbao(宋宏宝) *et al. Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2013, 42(8): 24
- [3] Knezevic Marko, Levinson Amanda, Harris Ryan *et al. Acta Materialia*[J], 2010, 58(19): 6230
- [4] Hänle Udo, Kalke Stefan, Lehnert Frank *et al. ATZ Worldwide* [J], 2002, 104(3): 28
- [5] Wang Zhutang(王祝堂). *Nonferrous Metals Processing*(有色金属加工)[J], 2014, 43(2): 21
- [6] Wua Z, Curtin W A. *Acta Materialia*[J], 2015, 88: 1
- [7] Niknejad Seyedtirdad, Esmaeili Shahrzad, Zhou Norman Y. *Acta Materialia*[J], 2016, 102: 1
- [8] Hamu G B, Eliezer D, Wagner L. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2009, 468: 222
- [9] Antonova O V, Volkov A Y, Kamenetskii B I *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2016, 651: 8
- [10] Su Jing, Sanjari Mehdi, Kabir Abu Syed H *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2016, 662: 412
- [11] Pegguleryuz M, Celikin M, Hoseini M *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2012, 510: 15
- [12] Wang Lingyun(汪凌云), Huang Guangjie(黄光杰), Chen Lin(陈 林) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(5): 910
- [13] Uematsu Yoshihiko, Kakiuchi Toshifumi, Tamada Kazuhiro *et al. International Journal of Fatigue* [J], 2016, 84: 1
- [14] Gali O A, Shafiei M, Hunter J A *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2015, 627: 191
- [15] Venkateswaran P, Raman G S S, Pathak S D *et al. Materials Letters*[J], 2004, 58: 2525
- [16] Huang C J, Cheng C M, Chou C P *et al. J Mater Sci Technol* [J], 2011, 27(7): 633
- [17] Ding Yunpeng(丁云鹏), Le Qichi(乐启焱), Zhang Zhiqiang(张志强) *et al. Journal of Northeastern University, Natural Science*(东北大学学报, 自然科学版)[J], 2014, 35(3): 379
- [18] Fu Xuesong(付雪松), Chen Guoqing(陈国清), Wang Zhongqi(王中奇) *et al. Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(8): 1473

Prediction Model of Edge Crack Depth of Rolled AZ31 Magnesium Alloy Sheets

Huang Zhiqian, Wei Jianchun, Ma Lifeng, Zhu Yanchun, Wu Dongzu

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

Abstract: The numerical simulation and experimental verification of the rolling process of as-cast AZ31 magnesium alloy sheet with an initial thickness of 7 mm were carried out at 400 °C. The reductions were 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40% and 45%. The microstructure and edge cracks were analyzed after rolling. The results show that edge cracks occur when the single pass reduction reaches 20%. The edge crack depth increases from 5.24 mm at 20% reduction to 14.056 mm at 45% reduction in the rolling condition. According to the numerical simulation results, the damage distribution along the width of the plate was obtained, and the prediction model of the edge crack depth was established. For the edge crack depth, the average error between the actual measured data and the calculated value by the prediction model is 9.23%. SEM observations show that the microstructure near the edge crack contains a large number of twins.

Key words: AZ31 magnesium alloy; microstructure; edge crack depth; prediction model

Corresponding author: Ma Lifeng, 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: 2593993533@qq.com