

# AZ31B 镁合金管材纵连轧损伤与温度场探索性研究

苟毓俊<sup>1</sup>, 双远华<sup>1</sup>, 周 研<sup>1</sup>, 代 佳<sup>1</sup>, 刘邱祖<sup>2</sup>, 张培庆<sup>3</sup>

(1. 太原科技大学 重型机械教育部工程研究中心, 山西 太原 030024)

(2. 太原理工大学, 山西 太原 030024)

(3. 山西创奇实业有限公司, 山西 太原 030001)

**摘 要:** 在轧制温度为 350 °C, 轧辊角速度约为 3.14 r/s, 壁厚压下量分别为 20%、30%、40%的条件下, 对尺寸为 50 mm×7 mm×1000 mm 的 AZ31B 镁合金管进行纵连轧热力耦合数值模拟, 在相同温度不同压下量的轧制条件下, 从轧制损伤的应力状态和温度场分布两方面对镁合金管材纵连轧的数值模拟结果进行了探索性研究。结果表明: 在相同轧制温度条件下, 随着压下量的增大, 最大损伤值也随着增大, 且最大损伤值均出现在轧辊的辊缝处。同时塑性变形产生的热量也增大, 且因轧辊辊顶处和镁管间存在较大的热交换, 所以辊缝处的温度要高于辊顶处, 两者之间有一定的温度差, 壁厚压下量越大则温度差越大。相同压下量条件下, 纵连轧镁合金管的损伤程度要比镁合金板材轧制的小。

**关键词:** 镁合金管材; 纵连轧; 温度场分布; 损伤

**中图分类号:** TG146.2<sup>2</sup>

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2017)11-3326-06

镁合金作为目前最轻的商用金属结构材料, 它的优点为: 比强度、比刚度高; 弹性模量较低, 当受到外力作用时, 应力分布将更为均匀, 可以避免过高的应力集中; 减震性能优良, 比铝高 50% 左右; 阻尼性能好, 在受到冲击和摩擦时, 表面不会产生火花; 易于回收利用且不降低其力学性能等<sup>[1,2]</sup>。无论短期还是长期来看, 镁合金在工业上的应用都相当广泛。目前, 应用最广的是镁合金铸态件, 但是铸件的晶粒往往比较粗大, 同时组织中存在枝晶偏析、杂质等使得镁合金的力学性能较差, 限制了镁合金在各个领域的应用<sup>[3]</sup>。经过塑性变形的镁合金具有较高的强度、塑性和韧性, 并可通过调整工艺获得所需的显微组织及性能, 满足不同领域的需求<sup>[4]</sup>。

镁合金管材的塑性加工方法主要有拉拔、挤压及轧制。西北有色金属研究院于振涛等<sup>[5]</sup>研究了用温态拉拔的方法制得一种医用薄壁细直径镁合金管材, 将镁合金管坯进行多道次空芯或芯轴热拉拔, 得到了外径小于 6 mm 的镁合金薄壁管。沈阳工业大学的于宝义<sup>[6]</sup>对镁合金管坯进行多道次拉拔, 得到外径小于 10 mm 的镁合金薄壁管。虽然拉拔可以制备出镁合金管材, 但是拉拔有它的缺点: 工艺复杂, 经过多道次拉拔, 每一道次变形量小; 拉拔管的表面可能产生氧化现象, 从而表面质量差; 拉拔过程中可能会出现管被

拉断的情况, 使得生产率低, 同时还受长度制约。

挤压特别是热挤压是主要的镁合金塑性成形方法, 国内外许多专家学者进行了一系列的研究。重庆大学黄光胜<sup>[7]</sup>等人对 AZ31B 镁合金挤压工艺进行研究, 铸锭经 400 °C/12 h 的均化处理, 在挤压温度为 400 °C, 速度为 1~2.5 m/min, 挤压比为 10~45 的条件下, 挤压过程中出现了动态再结晶, 其抗拉强度在 275~285 MPa 之间, 屈服强度在 220~225 MPa 之间, 延伸率在 15%~17% 之间。所制订的工艺合理, 挤压出的棒材、管材、型材有较好的力学性能。

轧制作为一种高效的生产工艺, 目前, 国内外对镁合金板的轧制已经做了一定的研究<sup>[8-11]</sup>, 但是有关镁合金管轧制工艺方面的研究鲜有报道, 尤其是镁合金管的纵连轧, 这主要因为镁合金在室温下滑移系少, 塑性变形能力差, 变形量过大时易出现裂纹等缺陷<sup>[12-14]</sup>。为了更好地探索镁合金管纵连轧的可行性, 应用损伤理论的数值模拟对镁合金管材纵连轧工艺进行探索研究。纵连轧工艺是一种产品精度高、流程短、生产节奏快且高效的工艺。本研究以 AZ31B 镁合金管材纵连轧工艺为背景, 对 AZ31B 镁合金管材轧制工艺的损伤和温度场分布进行探索性研究, 为开展镁合金管纵连轧奠定基础。

## 1 镁合金管材纵连轧损伤机理分析

收稿日期: 2016-11-12

基金项目: 山西省科技攻关计划 (20140321008-08)

作者简介: 苟毓俊, 男, 1986 年生, 硕士生, 太原科技大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030024, E-mail: 496625508@qq.com

### 1.1 断裂理论模型

本研究采用的是 Cockcraft 和 Latham 损伤模型即：

$$\int_0^{\varepsilon_f} \left( \frac{\sigma_p}{\bar{\sigma}} \right) d\bar{\varepsilon} = C \tag{1}$$

式中： $\sigma_p$  为某一温度及应变速率下受到轧制压应力的峰值应力； $\bar{\sigma}$  为等效应力； $\bar{\varepsilon}$  为等效应变； $\varepsilon_f$  为断裂时的应变； $d\bar{\varepsilon}$  为等效应变增量； $C$  为损伤值。

### 1.2 镁合金板材和管材轧制变形区应力状态对比分析

镁合金板材轧制时轧制变形区的应力状态如图 1，A、B 点分别是轧制变形区内中部和边部区域上的点， $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  和  $\sigma_z$  分别是轧制、宽展和压下方向的应力。中部处于三向压应力状态，边部为两向压（宽展方向的压应力特别小）和一向拉应力（轧制方向）状态。正方体单元受到上下 2 个轧辊压下方向的压应力，就会向轧制方向延伸和宽度方向宽展，镁板与轧辊之间产生摩擦，所以在轧制方向和宽度方向上均产生压应力。在此，不考虑轧制前轧件推板与镁板产生的摩擦阻力，镁板不均匀变形以及残余应力释放等因素<sup>[15]</sup>。如图 2 所示，镁合金板材轧制时在趋向于较大延伸的板材中部会产生较大的纵向附加压应力，较小延伸的板材边部产生附加拉应力。板带边部存在纵向附加拉应力和金属横向流动的横向压应力，同时板带边部处于自由扩散状态，这样会使边部变形不均匀，一旦此附加拉应力达到镁合金的临界断裂强度时，边部附加拉

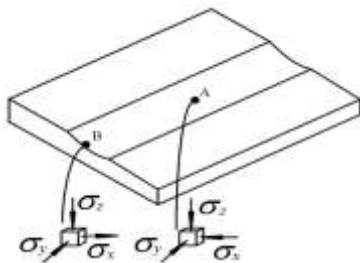


图 1 镁合金板材变形区应力状态

Fig.1 Stress state of magnesium alloy sheet in the deformation zone

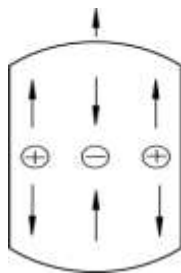


图 2 镁合金板材附加应力

Fig.2 Additional stress of magnesium alloy sheet

应力引起的不均匀变形就会形成镁合金板边裂<sup>[16]</sup>。

镁合金管材轧制时管壁内、外表面上的应力状态如图 3 所示，将轧制变形区划分为 4 个区，其中(I)、(II)区处于轧辊和芯棒之间压缩下的直接变形区，(I)区内、外壁都处于三向压应力状态，(II)区外壁处于三向压应力而内壁处于两向压应力和一向拉应力状态；(III)区为仅与轧辊接触的变形区，外壁处于两向压应力和一向拉应力状态，内壁处于一向拉应力和一向压应力状态；(IV)区为和轧辊、芯棒都不接触，材料在张力和轧辊孔型的弯曲约束作用下产生流动的非直接变形区，外壁处于两向拉应力状态，内壁处于一向拉和一向压的应力状态，由于内壁和外壁上周向应力分别为压应力和拉应力，所以此处为弯曲应力。其中 (III)、(IV)区纵向拉应力是主要的。在(IV)区也就是轧辊的辊缝处处于两向应力状态，管材的辊缝处受到辊顶处的附加轴向拉应力和金属周向流动的弯曲应力，所以认为镁合金管材轧制时最大损伤值可能出现在轧辊的辊缝处，为了验证猜测进行了镁合金管材纵连轧过程的有限元热力耦合模拟分析。图 3 中  $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$  和  $\sigma_l$  分别为径向、周向和轴向应力。

## 2 镁合金管材轧制的热力耦合有限元模拟

### 2.1 有限元模拟参数

采用 Deform-3D 有限元软件建立数学模型，将 AZ31B 在 Gleeble-1500D 热模拟试验机压缩实验得到的应力-应变曲线数据导入软件的材料库中，进行镁合金管的轧制模拟，不考虑轧辊的温度场。图 4 为铸态 AZ31B 在 Gleeble-1500D 热模拟试验机进行压缩实验的应力-应变曲线，压缩温度为 350 °C，应变速率分别为 0.005、0.05、0.5、3 s<sup>-1</sup>。从图 4 可以看出当压缩应变率为 3 s<sup>-1</sup> 时应力-应变曲线呈现出较大的波动，说明 AZ31B 在该应变速率下变形及其不稳定，所以镁合

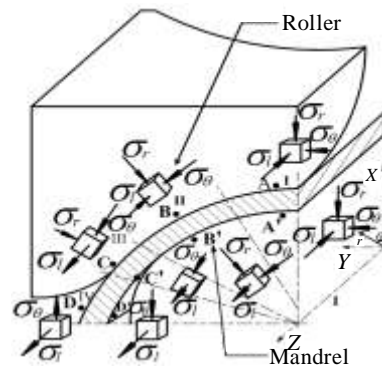


图 3 镁合金管材变形区应力状态

Fig.3 Stress state of magnesium alloy tube in the deformation zone

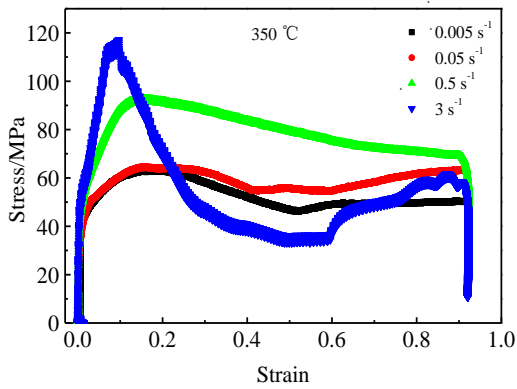


图 4 350 °C 下不同应变速率的应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of AZ31B alloy under condition of 350 °C and different strain rates

金管材纵连轧时轧制速度不能太快。

2.1.1 镁合金化学成分及模拟参数

铸轧 AZ31B 镁合金管材的化学成分见表 1，纵连轧热轧模拟相关参数见表 2。

2.1.2 AZ31B 镁合金管材纵连轧工艺和参数

图 5 为镁合金管材纵连轧的工艺几何模型，有限元模拟使用的是 1/6 模型。

表 1 AZ31B 镁合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of AZ31B magnesium alloy (wt%)

Al	Mn	Fe	Zn	Si	Cu	Ni	Mg
3.37	0.29	0.04	0.86	0.1	0.002	0.005	Bal.

表 2 AZ31B 镁合金管材纵连轧热轧模拟相关参数

Table 2 Simulation parameters of continual mandrel rolling process for AZ31B magnesium alloy tube

Parameter	Value
Room temperature/°C	20
Friction factor	0.6
Specific heat/J (kg ·°C) <sup>-1</sup>	102
Thermal conductivity/W (m ·°C) <sup>-1</sup>	35
Convective I	11
Ir	150



图 5 镁合金管材纵连轧工艺几何模型

Fig.5 Geometric model of continual mandrel rolling process for magnesium alloy tube

图 6 为镁合金管纵连轧工艺参数示意图。

图 7 为纵连轧孔型参数示意图。压下量为 20%、30%和 40%时对应的芯棒直径为 32.8、34.2 和 35.6。

表 3 为镁合金管纵连轧工艺参数表。

2.2 有限元模拟结果分析

2.2.1 镁合金管材轧制变形分析

图 8 和图 9 分别为镁合金管材非变形区和变形区在轧制方向上管材端面网格情况。由图 9 可知，在变形区内，轧辊辊顶处的金属压下量大，因而其等效应变也大；而在轧辊辊缝处由于镁合金管材处于完全自由状态，既不与轧辊接触也不与芯棒接触，所以辊缝处的等效应变较小。轧辊辊顶处被压下的金属沿周向流向辊缝处，沿横向形成宽展变形，沿纵向形成延伸变形。

2.2.2 镁合金管材轧制损伤分析

图 10 为镁合金管材在压下量分别为 20%、30%、40%的轧制条件下轧后损伤值的云图。表 4 为相同轧制温度下轧制镁合金管和镁合金板<sup>[15]</sup>对应压下量下的最大损伤值。通过图 10 和表 4 可以看出，在不同压下量条件下最大损伤值均出现在轧辊的辊缝处区域。在相同的等效应变情况下，随着壁厚压下量的增大，最大损伤值也随着增大，最大损伤值从压下量 20%的 0.175 增加到压下量 40%的 0.231，且镁合金纵连轧工艺轧制的管材的最大损伤值比相同条件下镁合金板材的损伤值要小。

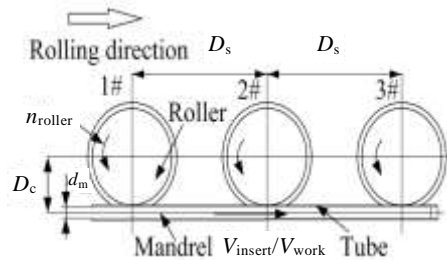


图 6 镁合金管纵连轧工艺参数示意图

Fig.6 Diagram of the processing parameters of continual mandrel rolling process for magnesium alloy tube

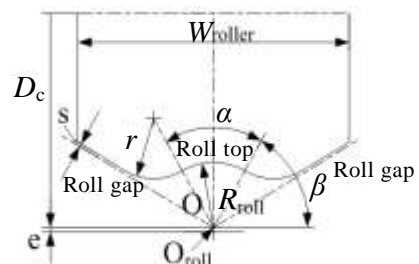


图 7 镁合金管材纵连轧孔型参数

Fig.7 Pass parameters of continual mandrel rolling process for magnesium alloy tube

表 3 镁合金管纵连轧工艺参数

Table 3 Process parameters of continual mandrel rolling process for magnesium alloy tube

Process parameters	Value	Remark
Distance between each stand, $D_s/mm$	500	
Distance between the roller centerline and the rolling centerline, $D_c/mm$	170	
Mandrel diameter, $d_m/mm$	33.5	
Mandrel insert speed, $V_{insert}/mm\ s^{-1}$	140	
Mandrel speed in rolling process, $V_{work}/mm\ s^{-1}$	40	
Roller rotational speed, $n_{roller}/r\ min^{-1}$	Max. 30	
Roller torque, $T/N\ m$	Max. 5000	
WTR section angle, $\alpha/(^\circ)$	60	
Angle, $\beta/(^\circ)$	60	
Roller width, $W_{roller}/mm$	100	
Distance between point O and OWTR, $e/mm$	1.5	1#
	0	2#
	0	3#
Roller gap radius, $r/mm$	21.09	1#
	20.00	2#
	20.00	3#
Rolling radius, $R_{WTR}/mm$	24.40	1#
	22.00	2#
	22.00	3#

Distance of the gap between a roller and its adjacent roller, s/mm 1

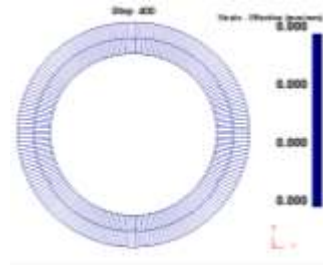


图 8 镁合金管材无变形时在轧制方向上端面网格情况  
Fig.8 Meshes of end surface of magnesium alloy tube in the rolling direction without deformation

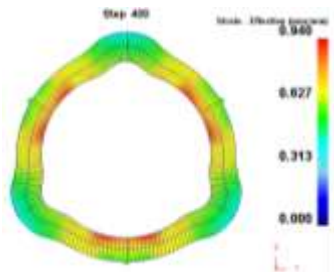


图 9 镁合金管材变形时在轧制方向上端面网格情况  
Fig.9 Meshes of end surface of magnesium alloy tube in the rolling direction under the deformation

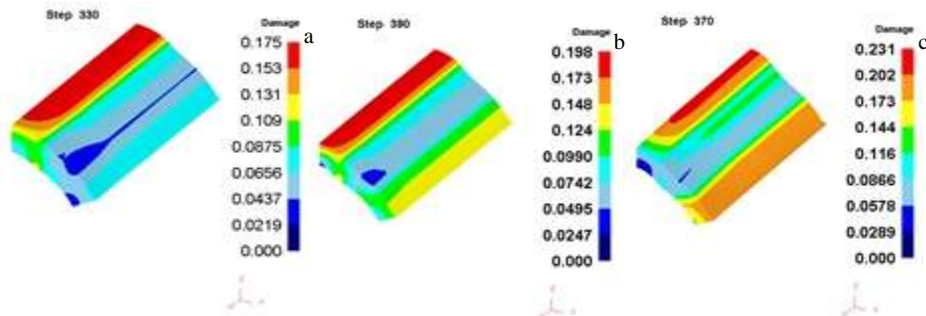


图 10 不同压下量时镁合金管材损伤值云图  
Fig.10 Damage value of magnesium alloy tube under different reduction: (a) 20%, (b) 30%, and (c) 40%

表 4 不同压下量下的镁合金管和板最大损伤值

Table 4 Maximum damage value of magnesium alloy tube and sheet under different reduction

Reduction/%	magnesium alloy tube	magnesium alloy sheet
20	0.175	0.183
30	0.198	0.322
40	0.231	0.392

据公式(1)可知, 损伤值和等效应力成反比, 即等

效应力越大损伤值越小。图 11 分别为压下量为 20%、30% 和 40% 时的周向分布点的等效应力和损伤值曲线。从图 11 可知最大损伤出现在轧辊的辊缝处。另外 F. Feng<sup>[17]</sup>等人在 Johnson-Cook 断裂失效模型下研究了镁合金断裂应变与应力三轴度间的关系, 研究结果显示等效应力增大, 应力三轴度减小, 从而镁合金的断裂应变随之增加, 则镁合金越不易断裂。从图 11 可知, 辊缝处的应力最小, 断裂应变最小, 这从另一

角度验证了最大损伤值出现在轧辊的辊缝处。

管轧制温度场分布的云图。表 5 为不同压下量时镁合

### 2.2.3 镁合金管轧制温度场分析

图 12 为压下量分别为 20%，30%，40% 时镁合金

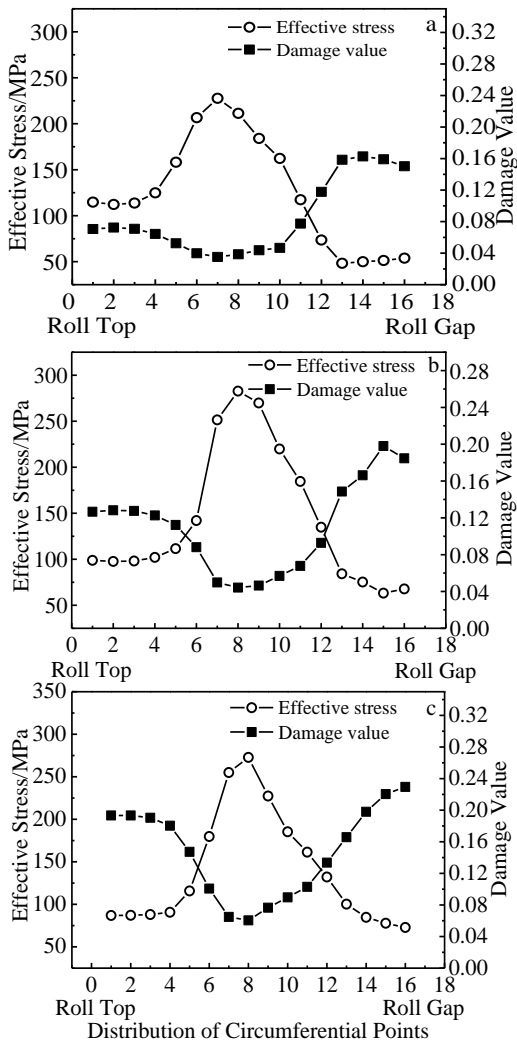


图 11 不同压下量变形区周向分布点的等效应力和损伤值  
Fig.11 Effective stress and damage value of circumferential distribution point in the deformation zone under different reduction: (a) 20%，(b) 30%，and (c) 40%

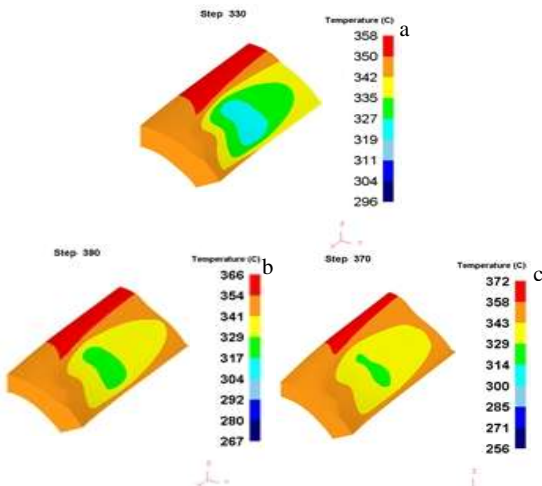


图 12 不同压下量时温度场

Fig.12 Temperature fields of magnesium alloy tube under different reduction: (a) 20%, (b) 30%, and (c) 40%

表 5 不同压下量下的镁合金管辊顶处和辊缝处的温度比较  
Table 5 Temperature comparison between the roll top and roll gap of the magnesium alloy tube under different reduction

Reduction/ %	Roll top zone/°C	Roll gap zone/°C	Temperature difference/°C
20	319	358	39
30	317	366	49
40	314	372	58

金管的辊顶和辊缝处的温度。由于轧制时辊顶和辊缝处的塑性变形从而生热，辊顶处和轧辊直接接触两者之间存在热交换，则辊顶和辊缝处存在一定的温度差。从图 12 和表 5 可以看出压下量为 20% 时，辊顶处和辊缝处的温度从 319 °C 增加到 358 °C，增幅为 12.2%。压下量为 30% 时，辊顶处和辊缝处的温度从 317 °C 增加到 366 °C，增幅为 15.5%。压下量为 40% 时则辊顶处和辊缝处的温度从 314 °C 到 372 °C，增幅达到了 18.5%。可以看出压下量为 40% 时辊顶处和辊缝处的温差最大，达到了 58 °C，这说明随着压下量增加镁合金管内部的塑性变形生热随之增加。

### 3 结 论

1) AZ31B 镁合金铸轧管在 350 °C 的轧制条件下，随着压下量的增大，镁合金管的最大损伤值也随之增大，从压下量 20% 的 0.175 到 30% 的 0.198，压下量为 40% 时达到了 0.231，产生裂纹的几率也增大。

2) 辊缝处和辊顶处都会产生塑性变形热，但辊顶处由于镁合金管和轧辊之间存在较大的热交换，所以辊缝处的温度最高。随着压下量的增大，镁合金管辊缝处温度升高，压下量为 20% 时辊顶和辊缝处的温差最小为 39 °C，40% 压下量条件下辊顶处和辊缝处温度相差最大，温度差达到 58 °C。这说明随压下量的增大镁合金管内部的塑性变形生热增大。

3) 在相同轧制温度不同的压下量的情况下，纵连轧镁合金管材的最大损伤值比板材轧制最大损伤值要小，这就说明通过适当的纵连轧工艺完全可能生产出符合需求的镁合金管材。

## 参考文献 References

- [1] Kim W J, Leea H W, Yooa S J *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528(3): 874
- [2] Li Xinkai(李新凯), Zhang Zhimin(张治民), Zhao Yali(赵亚丽) *et al. Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2011, 40(24): 54
- [3] Chen Zhenhua(陈振华). *Wrought Magnesium Alloy*(变形镁合金)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 102
- [4] Xia Cuiqin(夏翠芹), Liu Ping(刘平), Ren Fengzhang(任凤章) *et al. Materials Review*(材料导报)[J], 2006, 20(9): 89
- [5] Yu Zhentao(于振涛), Du Minghuan(杜明焕), Huang Fuqiang(皇甫强) *et al. Chinese Patent*, 101322985(中国专利)[P]. 2008
- [6] Yu Baoyi(于宝义), Wu Yongguang(吴永广), He Miao(何淼) *et al. Chinese Patent*, 101085377(中国专利)[P]. 2007
- [7] Huang Guangsheng(黄光胜), Wang Lingyun(汪凌云), Fan Yongge(范永革) *et al. Metal Forming Technology*(金属成形工艺)[J], 2002(5): 11
- [8] Che Juntie(车俊铁), Li Maosheng(李茂盛), Fei Limin(费立敏) *et al. Materials Review*(材料导报)[J], 2009, 23(14): 532
- [9] Huang Guangsheng(黄光胜), Xu Wei(徐伟), Huang Guangjie(黄光杰) *et al. Heat Treatment of Metals*(金属热处理)[J], 2009, 35(5): 18
- [10] Meng Qiang(孟强), Cai Qingwu(蔡庆伍), Jiang Haitao(姜海涛) *et al. Journal of University of Science and Technology Beijing*(北京科技大学学报)[J], 2011, 33(1): 47
- [11] 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
- [12] Li Yine(李银娥), Wang Yi(王轶), Ma Guang(马光) *et al. Precious Metals*(贵金属)[J], 2003, 24(4): 40
- [13] Yang Xuyue(杨续跃), Sun Zhengyan(孙争艳) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2009, 19(8): 1366
- [14] Huang Fuqiang(皇甫强), Yu Zhentao(于振涛), Wei Beiling(尉北玲) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(S4): 829
- [15] 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
- [16] Huang Zhiquan(黄志权). *Study on Edge Crack Mechanism and Experiment of Magnesium Alloy Sheet Rolling Process*(镁合金板材轧制过程边裂机理与实验研究)[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2014
- [17] Feng F, Huang S, Meng Z *et al. Materials Science & Engineering A*[J], 2014, 594(4): 334

## Damage and Temperature Field of AZ31B Magnesium Alloy Tube with Continual Mandrel Rolling Process

Gou Yujun<sup>1</sup>, Shuang Yuanhua<sup>1</sup>, Zhou Yan<sup>1</sup>, Dai Jia<sup>1</sup>, Liu Qiuzu<sup>2</sup>, Zhang Peiqing<sup>3</sup>

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

(2. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(3. Shanxi Chuangqi Industrial Co., Ltd, Taiyuan 030001, China)

**Abstract:** When the rolling temperature was 350 °C, the angular velocity of the roller was about 3.14 r/s and the wall thickness reduction rate was 20%, 30% and 40%, the coupled thermo-mechanical numerical simulation of the AZ31B magnesium alloy tube with the size of 50 mm×7 mm×1000 mm in continual mandrel rolling process was carried out. Then, the damage stress and the distribution of temperature field of the simulation were investigated on the condition that the magnesium alloy tube was at the same rolling temperature but differ in reduction rates. The results show that when the rolling temperature is same, the maximum damage value of the AZ31B magnesium alloy tube and the heat generated by the plastic deformation are increased with the increase of the wall thickness reduction ratio, and the maximum damage value occurs in the roller gap. Because of the large heat exchange between the roller and the tube, the temperature of the roller gap is higher than that of the top of the roller, and the temperature difference is increased with the increase of the wall thickness reduction ratio. Therefore, the damage of magnesium alloy tube in longitudinal rolling is smaller than that of the magnesium alloy sheet under the same rolling condition.

**Key words:** magnesium alloy tube; continual mandrel rolling process; distribution of temperature field; damage

---

Corresponding author: Shuang Yuanhua, Professor, Heavy Machinery Engineering Research Center of the Ministry of Education, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, P. R. China, Tel: 0086-351-6998263, E-mail: yhshuang@sina.com