

不同热轧工艺对 ZK61 镁合金板材塑性变形的影响

王硕华, 卫宏喆, 陈 明, 刘庆杰, 张 昊

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: 针对镁合金因其典型的密排六方结构在室温条件下难以成形的问题, 采用多道次同步热轧结合异步温轧的加工工艺, 制备了具有高抗拉强度和伸长率的 ZK61 镁合金薄板, 并结合宏观轧制有限元模拟方法详细分析了轧制过程中板材的塑性变形机制。拉伸实验结果表明: 随着轧制的进行, 板材的各向异性变弱, 力学性能不断提升, 抗拉强度达到 398.9 MPa, 伸长率达到 30.4%。模拟结果显示: 在同步轧制时, 最大等效应力值随轧制的进行略微增加, 而异步轧制时的最大等效应力值随轧制的进行逐渐降低; 同步轧制前几道次的轧件的等效塑性应变并不均匀, 但随着轧制的进行和后续的异步轧制, 板材的塑性应变逐渐均匀。

关键词: ZK61 镁合金; 同步轧制; 异步温轧; 力学性能; 塑性变形机制

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.02.018

中图分类号: TG146

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 02-0146-06

Influence of different hot rolling processes on plastic deformation for ZK61 magnesium alloy plate

Wang Shuohua, Wei Hongzhe, Chen Ming, Liu Qingjie, Zhang Hao

(School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

Abstract: For the problem that magnesium alloy was difficult to form at room temperature due to its typical close-packed hexagonal structure, ZK61 magnesium alloy sheet with high tensile strength and elongation was obtained through a combination process of multi-pass synchronous hot rolling and asynchronous warm rolling, and combined with the finite element simulation method of macroscopic rolling, the plastic deformation mechanism during the rolling process was analyzed in detail. The results of the tensile test show that as the rolling progresses, the anisotropy of sheet becomes weaker and the mechanical properties continue to be improved, and the tensile strength reaches 398.9 MPa and the elongation reaches 30.4%. The simulation results show that during the synchronous rolling, the maximum equivalent stress value increases slightly as the rolling progresses, while the maximum equivalent stress value during the asynchronous rolling gradually decreases as the rolling progresses. The equivalent plastic strain of rolled piece in the first few passes of synchronous rolling is not uniform, but as the rolling progresses and the subsequent asynchronous rolling, the plastic strain of sheet gradually becomes uniform.

Key words: ZK61 magnesium alloy; simultaneous rolling; asynchronous warm rolling; mechanical property; plastic deformation mechanism

镁合金具有比强度和比刚度高, 吸能效果好, 阻尼性能好, 减振性能好, 抗冲击、机加工性能和电磁屏蔽性能优异等优点^[1-2], 被称为 21 世纪的绿色金属结构材料^[3-4]。我国是镁资源大国, 据有关部门统计, 我国镁矿资源储量居世界第一^[5]。以镁合金为代表的轻量化材料近年来得到了广泛重视, 在世界范围

内掀起了研究热潮, 在电子 3C、交通运输、航空航天等领域飞速发展^[6-8]。

ZK61 镁合金属于 Mg-Zn-Zr 系列中的高强度镁合金, 此类变形镁合金在室温下具有较高的屈服强度及抗拉强度、良好的热加工塑性和较好的耐腐蚀性, 拥有广阔的应用前景^[9]。Qi Y S 等^[10]研究了 Y 元素含量对 ZK61-Y 镁合金液锻毛坯组织和力学性能的影响, 并利用 Deform-3D 软件对等温锻造过程进行了数值模拟, 分析了成形温度对锻件温度场和应力场的影响。Malik A 等^[11]分析了预压缩 ZK61-1 和 ZK61-2 镁合金中孪晶产生的晶粒细化硬化效应, 其晶体取向均由强基体结构向弱基体结构转变, 且屈服强度显著提高。Zhang L X 等^[12]采用单向拉伸和压缩的实验方法, 研

收稿日期: 2023-08-09; 修订日期: 2023-11-19

基金项目: 辽宁省教育厅重点基金资助项目 (LJKZ0281); 辽宁科技大学大学生创新创业项目 (S202310146023)

作者简介: 王硕华 (2002-), 男, 本科生

E-mail: wsh200205052023@163.com

通信作者: 陈 明 (1980-), 男, 博士, 副教授

E-mail: chenming@ustl.edu.cn

究了晶粒尺寸对挤压态 ZK61 镁合金拉伸和压缩应变硬化行为的影响,发现不同晶粒尺寸 ZK61 合金的拉伸应变硬化和压缩应变硬化在早期变形过程中均存在位错积累的非热区,且拉伸应变硬化曲线上存在明显的过渡点,表明材料发生了动态再结晶。Li Z G 等^[13]采用不同的屈服准则对比研究了 AZ31B 和 ZK61M 镁合金的力学性能,发现与 AZ31B 相比,ZK61M 随着轧制方向角和应变角的变化表现出更明显的各向异性,具有更复杂的拉压不对称和硬化特征。

目前,对于 ZK 系列镁合金的研究主要处于宏观力学及微观组织方面^[14-15],因此,研究 ZK61 镁合金在不同轧制条件下的塑性变形机制及轧制后板材的力学性能为未来开发高性能镁合金板材提供了较好的参考价值。本文采用初始厚度为 17 mm 的铸态 ZK61 镁合金板材进行双辊同步热轧及六辊异步温轧加工从而制备成 0.5 mm 厚度的薄板,并对每道次轧件取样进行室温单向拉伸实验,得到拉伸真实应力-真实应变曲线;采用商业有限元仿真软件 ABAQUS 对 ZK61 镁合金板材的相应实验工艺进行建模分析,探究材料每道次轧制的等效应力场与等效应变场的变化规律,并与拉伸实验结果进行综合对比,分析出 ZK61 镁合金在不同轧制工艺下的塑性变形机制。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验所用材料为 ZK61 镁合金铸态坯料,规格为 195 mm×200 mm×17 mm。由于 ZK61 镁合金铸坯内存在较多的 Mg-Zn 相,在轧制实验开始前需要对其进行均匀化热处理,以消除晶内组织偏析现象,提高 ZK61 镁合金铸坯的塑性加工性能。在对其进行均匀化处理时,为消除坯料内的枝晶偏析,选择处理温度为 400 ℃,加热时间为 14 h,加热设备为 LDK-A 隧道炉。使用电火花线切割将铸坯分割为规格为 65 mm×200 mm×17 mm 的小块,并在轧制前进行打磨,清除表面缺陷及污渍。ZK61 镁合金板材的化学成分如表 1 所示。

表 1 ZK61 镁合金的化学成分 (%, 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of ZK61 magnesium alloy
(%, mass fraction)

Mn	Zr	Si	Zn	Mg
<0.02	0.76	<0.02	6.6	余量

1.2 板材轧制实验

首先,对 ZK61 镁合金进行 17 mm 厚铸坯的 7

道次高压下量 380 ℃ 同步热轧,制备出 3.4 mm 厚度的镁合金板材;然后,使用辽宁科技大学自研的六辊温轧机进行多道次小压下量的 280 ℃ 逆异步温轧,其中上辊径为 Φ75 mm、下辊径为 Φ55 mm,全部轧制实验均采用道次间退火 15 min;最终,得到 0.5 mm 厚度的 ZK61 镁合金薄板。

1.3 室温单向拉伸实验

室温单向拉伸实验参照 GB/T 228.1—2021^[16],将 ZK61 镁合金各道次轧制板材按图 1 所示进行取样,通过线切割分别在横向 (Transverse Direction, TD)、轧制方向 (Rolling Direction, RD)、与 RD 呈 45° 的 3 个方向制取标准拉伸试样^[17]。拉伸实验均在室温 25 ℃ 下进行,单向拉伸速率设定为 1 mm·min⁻¹。在拉伸实验开始前,采用 1500# 砂纸对试样外表面进行轻微打磨,去除试样表面的毛边及表面硬化。

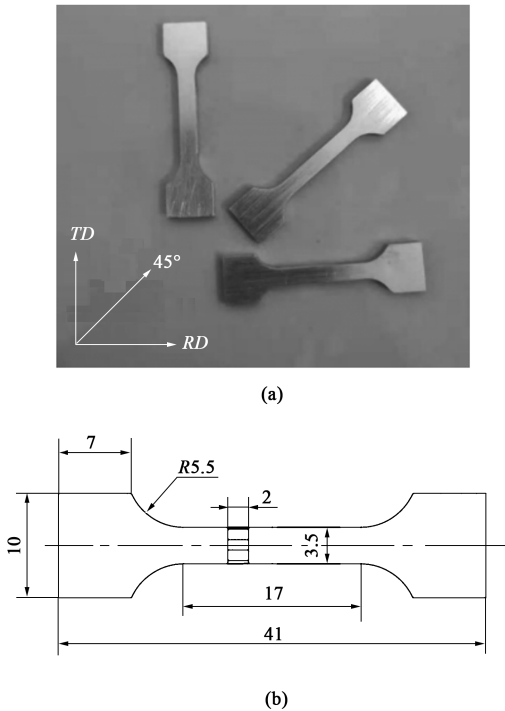


图 1 ZK61 镁合金拉伸试样取样示意图

(a) 拉伸试样取样方向 (b) 单向拉伸标准试样尺寸

Fig. 1 Schematic diagrams of sampling for ZK61 magnesium alloy tensile specimen

(a) Sampling direction of tensile specimen (b) Sizes of unidirectional tensile standard specimen

2 ZK61 镁合金宏观轧制有限元模拟

本文以 ABAQUS 有限元软件为载体,对板材在同步热轧和异步温轧加工时的轧制变形进行模拟,

观察在不同轧制方式下不同道次轧制后镁合金板材的应力场与应变场的变化情况，分析不同轧制方式及轧制道次对材料产生的影响。

为了获得准确的宏观模拟结果，需要确定材料的基础物理参数及定义所需的轧制过程的实验参数。CALPHAD 作为一种常用的相图计算方法^[18]，以温度作为边界条件，得到 ZK61 镁合金在不同温度下的基本物性参数及弹性模量，如表 2 所示。

表 2 不同温度下的 ZK61 镁合金物性参数

Table 2 Physical parameters of ZK61 magnesium alloy at different temperatures

温度/℃	25	100	200	300	400
密度/($\times 10^{-6}$ kg · mm ⁻³)	1.84	1.83	1.82	1.80	1.79
弹性模量/MPa	43619	42000	39535	36718	33551
泊松比	0.284	0.289	0.296	0.303	0.310
热膨胀系数/($\times 10^{-6}$ K ⁻¹)	25.00	25.64	26.55	27.46	28.44
导热系数/(mW · (mm · °C) ⁻¹)	99.8	103.8	109.8	114.9	120.3
比热/($\times 10^6$ J · (kg · °C) ⁻¹)	0.98	1.02	1.06	1.10	1.16

定义同步轧制模型工作辊的直径为真实尺寸 $\Phi 270$ mm，异步轧制模型的上、下工作辊直径也为实际温轧机的真实尺寸。定义轧板厚度与实验板材厚度一致，同步热轧板长度统一设置为 100 mm，而异步温轧板长度统一设置为 30 mm。赋予轧板材料参数、轧辊约束与轧辊载荷设置均一致。由于实际轧制时需要考虑通过每道次间退火保温，因此，选择每道次进行一次仿真建模计算。为了对比不同轧制道次情况，还需要对有限元仿真轧制模型进行如下假定：（1）轧板材质均匀，轧辊为具有导热属性的解析刚体，对轧辊的弹性变形忽略不计；（2）轧辊转速相同、转向相反，轧制过程中轧板仅受轧辊作用力，不考虑其他外力影响。具体轧制实验仿真规程如表 3 所示，其中括号内为热轧仿真建模所设定的厚度值。则二维同步、异步轧制模型示意图如图 2 所示，其中，X 为轧制方向，Y 为垂直于轧制方向。

3 结果与讨论

3.1 轧制模拟结果分析

3.1.1 不同道次等效应力场的结果

观察图 3a 可知，同步轧制各道次的等效应力场的规律相似，即轧制变形时等效应力场沿板材厚度

表 3 ZK61 镁合金多道次轧制实验（仿真）规程

Table 3 Procedure of multi-pass rolling experiment (simulation) for ZK61 magnesium alloy

热轧类型	道次	入口厚度/mm	出口厚度/mm	单次压下量/mm	压下率/%
同步热轧	1	17.0 (17.0)	15.0 (15.0)	2.0 (2.0)	11.8 (11.8)
	2	15.0 (15.0)	11.5 (11.5)	3.5 (3.5)	23.3 (23.3)
	3	11.5 (11.5)	8.6 (8.5)	2.9 (3.0)	25.2 (26.1)
	4	8.6 (8.5)	6.9 (7.0)	1.7 (1.5)	19.8 (17.6)
	5	6.9 (7.0)	5.6 (5.5)	1.3 (1.5)	18.8 (21.4)
	6	5.6 (5.5)	4.5 (4.5)	1.1 (1.0)	19.6 (18.2)
	7	4.5 (4.5)	3.4 (3.5)	1.1 (1.0)	24.4 (22.2)
多道次异步温轧	—	3.4 (3.5)	0.5 (0.5)	—	10.0 (10.0)

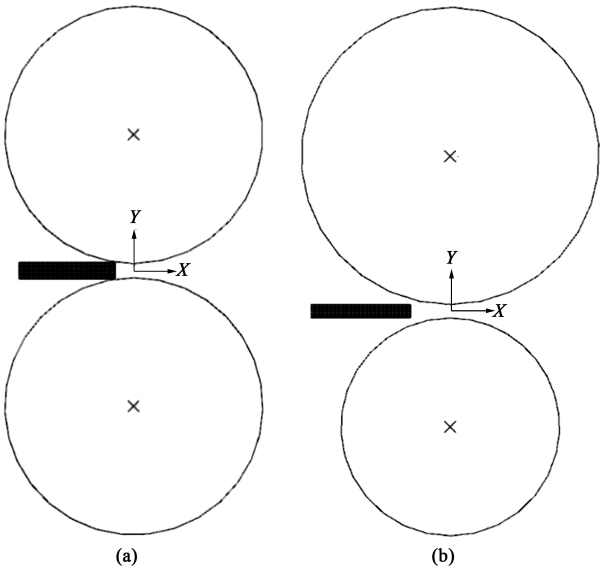


图 2 二维同步热轧 (a) 和异步温轧 (b) 的轧制模型

Fig. 2 Rolling models of 2D synchronous hot rolling (a) and asynchronous warm rolling (b)

方向 ND 关于中心层呈对称分布状态。轧制过程中表面受力最大，从表面到中心应力呈现出减小趋势；沿 RD 方向观察，轧制变形区从轧制变形中心部位向未变形轧板的两侧依次减少，每道次轧制的等效应力最大值均有所不同。第 1 道次的最大等效应力值为 160.1 MPa，第 2 道次为 165.2 MPa，第 3 道次下降至 142.4 MPa，但第 4 道次又恢复至 162.7 MPa，第 5 道次略增至 164.6 MPa，第 6 道次持续增加至 168.8 MPa，第 7 道次又略微降低至 166.7 MPa。沿板材轧制方向，镁合金板材的等效应力值由变形区向两端逐渐减小，轧板前滑区的等效应力值大于轧板后滑区。经过对比可以得出结论，随着轧板厚度的减少，轧制变形区域的等效应力有一定的上升趋势，这是因

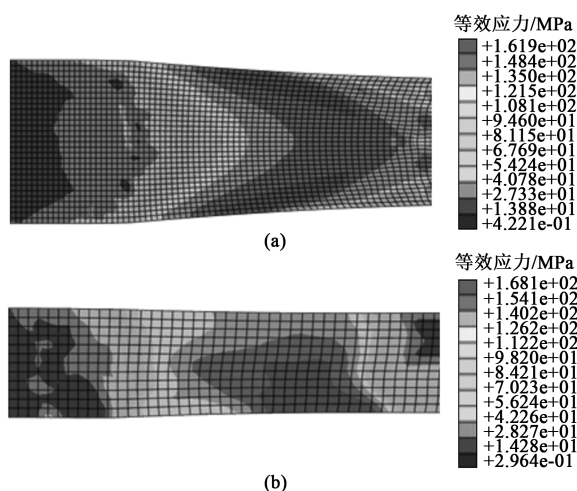


图3 同步、异步轧制时不同道次板材的仿真等效应力结果

(a) 同步轧制第7道次 (b) 异步轧制终轧道次

Fig. 3 Simulated equivalent stress results of plate at different passes by synchronous and asynchronous rolling

(a) 7th pass of synchronous rolling (b) Final pass of asynchronous rolling

为随着板材厚度的降低其轧制过程中的散热能力也略有增强, 板材在轧制时硬度的影响也越发明显。

对于异步轧制, 如图 3b 所示, 由于上辊直径较大, 与轧制板材未变形区域接触较快, 等效应力场沿 ND 方向呈现出不对称现象; 下辊直径较小, 故等效应力值较其他区域高。沿 RD 方向可以观察到, 轧制变形区域由中心部位向两侧依次减小, 异步轧制时终轧的等效应力最大值为 168.1 MPa。由于异步轧制时上、下轧辊的角速度设定相同, 使得实际轧制线速度不同, 轧板中间层发生了明显的偏移现象, 上辊因为线速度较大, 故靠上辊一侧的金属流动性较快, 两辊之间的速度差使轧制变形区内产生了异步轧制所特有的“搓轧区”现象, 即入口带速等于下辊线

速度, 出口带速等于上辊线速度。该现象有效减小了水平应力对于板材变形的阻碍作用, 使得轧制力降低。

3.1.2 不同道次等效应变场的结果

如图 4a 所示, 在同步轧制时, 轧板的等效应变值沿 RD 方向从轧制已变形区向未变形区不断下降。观察图 4b 可知, 异步轧制终轧道次的等效塑性应变场情况类似, 其等效塑性应变场呈现出非对称分布, 板材中部会产生强烈的剪切变形。

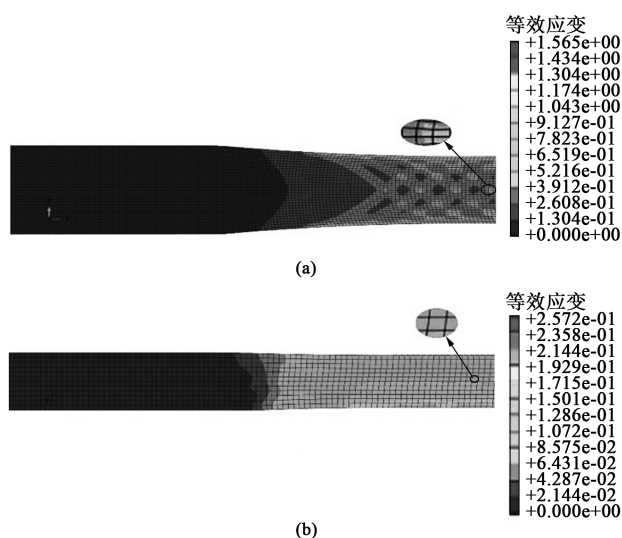


图4 同步、异步轧制时不同道次板材的仿真等效应变结果

(a) 同步轧制第7道次 (b) 异步轧制终轧道次

Fig. 4 Simulated equivalent strain results of plate at different passes by synchronous and asynchronous rolling

(a) 7th pass of synchronous rolling (b) Final pass of asynchronous rolling

如图 5a 所示的三向等效应变曲线图, 其中 $PE11$ 、 $PE12$ 、 $PE22$ 分别表示图 4a 中圆圈所选单元以水平面为参考平面时的正应变、剪切应变、负应

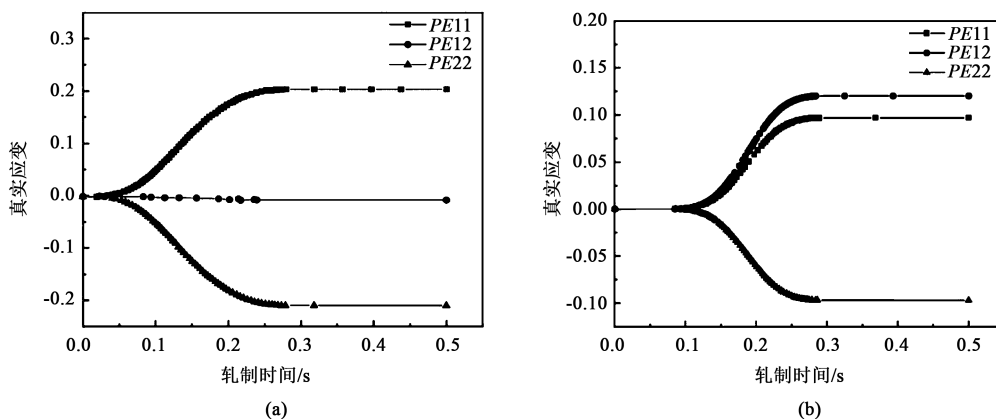


图5 同步、异步轧制的三向等效应变曲线

(a) 同步轧制第7道次 (b) 异步轧制终轧道次

Fig. 5 Three-direction equivalent strain curves of synchronous and asynchronous rolling

(a) 7th pass of synchronous rolling (b) Final pass of asynchronous rolling

变。同步轧制的等效塑性应变场为对称分布，轧制均匀变形时，第 1 道次的最大等效塑性应变值为 0.170，第 2 道次为 0.281，第 3 道次为 0.271，第 4 道次为 0.217，第 5 道次为 0.205，第 6 道次为 0.214，第 7 道次为 0.207。各道次板材中心部位的等效应变小于轧板表层的等效应变，随着轧制的进行板材厚度不断降低，等效应变在 *ND* 方向上的分布变得较为均匀。沿 *ND* 方向观察，上、下两表面的应变值比板材中心部位大。

由图 5b 可知，异步轧制时终轧板材的最大剪切应变为 0.120，沿 *ND* 方向观察，下表面的塑性应变值相比上表面较大，这是因为上、下轧辊的直径不同，轧辊与轧板上、下两表面的接触面积有差异；沿 *RD* 方向观察，已完成轧制的板材的等效应变值最大，而轧制板材未变形区则随着与变形区距离的增大而逐渐递减。

3.2 拉伸实验结果分析

为了测试 ZK61 镁合金各道次轧制板材的力学性能与变化趋势，以及验证各道次有限元轧制仿真结果的可靠性，进行板材室温单向拉伸实验。根据表 4 及图 6 可知，同步轧制每道次板材的三向屈服比逐渐升高，屈服强度及抗拉强度均呈现先升后降再升高的趋势，而异步轧制到 1.5 mm 时板材性能最为优异，*RD* 方向上 ZK61 镁合金的抗拉强度达到了 391.2 MPa，*TD* 方向上 ZK61 镁合金的抗拉强度达到了 398.9 MPa，但伸长率有所降低。继续进行异步轧制，板材的伸长率有所提高，最终在 0.5 mm 厚度时达到最大值 30.4%，但屈服强度及抗拉强度均有所降低，并且在同步轧制时第 3 道次之后 *RD* 方向的屈服比总是比 *TD* 方向的大；而经过异步轧制后板材 *RD*

表 4 不同道次下板材样品的力学性能数据

Table 4 Mechanical property data of plate samples under different passes

拉伸样品		屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	伸长率 $A/\%$	屈服比 R_{eL}/R_m
同步轧制 第 3 道次	<i>RD</i>	196.5	328.9	17.1	0.60
	45°	153.1	287.1	17.2	0.53
	<i>TD</i>	159.9	197.2	16.1	0.81
同步轧制 第 5 道次	<i>RD</i>	175.8	302.8	17.2	0.58
	45°	175.8	299.5	18.3	0.59
	<i>TD</i>	175.8	325.5	21.9	0.54
同步轧制 第 7 道次	<i>RD</i>	230.2	344.3	21.7	0.67
	45°	253.7	366.3	26.5	0.69
	<i>TD</i>	233.3	348.0	23.3	0.67
异步轧制 1.5 mm	<i>RD</i>	264.4	391.2	18.0	0.68
	45°	273.2	374.3	16.0	0.73
	<i>TD</i>	290.4	398.9	22.0	0.73
异步轧制 0.5 mm	<i>RD</i>	183.1	296.4	30.4	0.62
	45°	165.3	281.5	29.1	0.59
	<i>TD</i>	196.2	308.6	29.0	0.64

方向的屈服比又小于 *TD* 方向。从这里可以看出，同步轧制时 *TD* 方向的塑性成形性能要优于 *RD* 方向，异步轧制时 *RD* 方向的塑性成形性能优于 *TD* 方向。

由上述室温拉伸实验可以看出，与同步轧制镁合金板材相比，异步轧制制备出的 ZK61 镁合金薄板的抗拉强度和伸长率大幅度提高，力学性能表现更加优异。通过对比实验数据与仿真结果，可发现二者的整体变化趋势较为接近，考虑到建模简化与实验误差等因素，可认为轧制仿真结果与实验结果的吻合程度较好，表明在该条件下的有限元轧制仿真对于实际轧

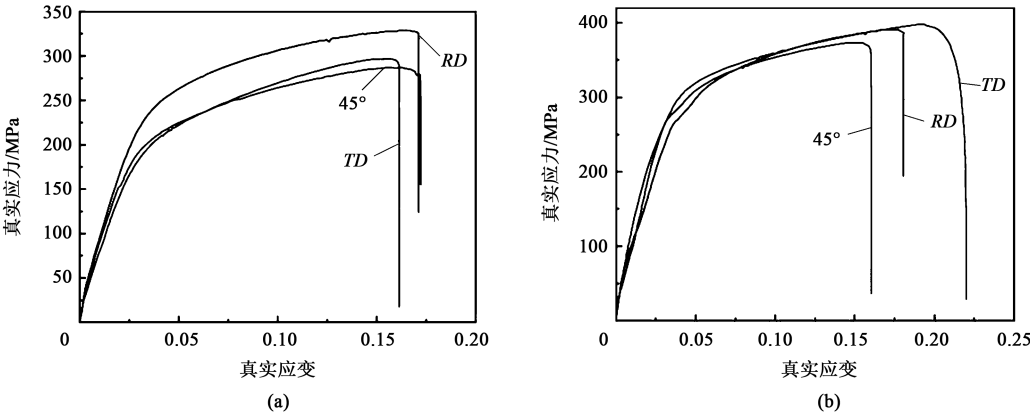


图 6 同步、异步轧制时不同道次板材的室温单向拉伸实验结果

(a) 同步轧制第 3 道次 (b) 异步轧制 1.5 mm

Fig. 6 Results of uniaxial tensile test at room temperature for plates at different passes by synchronous and asynchronous rolling

(a) 3th pass of synchronous rolling (b) Asynchronous rolling of 1.5 mm

制工艺具有一定的指导意义和参考价值。

4 结论

(1) 通过 ABAQUS 软件模拟同步热轧加工过程发现,同步轧制时不同轧制道次的最大等效应力值差别不大,整体上随着板材轧制的进行,最大等效应力值在略微增加。异步轧制时因为上下轧辊的直径有所差别,产生的搓轧区降低了轧制变形时产生的水平应力,使轧制力降低。前几道次因为轧制力在板材 ND 方向分布并不均匀,所以塑性应变也不均匀,但会随着轧制过程的进行与板材逐渐变薄而有所改善。

(2) 通过 7 道次同步热轧制备出 3.4 mm 厚度的镁合金板材。经取样检测分析,经过轧制后的板材的力学性能不断提升,板材的各向异性变弱,屈服强度及抗拉强度随着轧制的进行不断提高,延伸性能也有明显提升,轧板塑性不断优化。但随着轧制进行,板材有明显的加工硬化出现。后续经过六辊轧机多道次、小压下量异步温轧后,发现板材的力学性能有明显提高, RD 方向的抗拉强度达到了 391.2 MPa, TD 方向的抗拉强度达到了 398.9 MPa,但伸长率有所降低。后续继续进行异步轧制后,板材的伸长率有所提高,最终达到 30.4%,但屈服强度及抗拉强度均有所降低。

参考文献:

- [1] 张志华,潘复生,陈先华,等. 镁及其合金的电磁屏蔽性能研究 [J]. 材料工程, 2013, (1): 52-57.
Zhang Z H, Pan F S, Chen X H, et al. Electromagnetic shielding properties of magnesium and magnesium alloys [J]. Materials Engineering, 2013, (1): 52-57.
- [2] 周国伟. AZ31B 镁合金板材温热塑性变形机制与成形极限的实验与理论研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
Zhou G W. Experimental and Crystal Plasticity Analysis on the Deformation Mechanisms and Forming Limit of AZ31B Mg Alloy Sheet at Warm Conditions [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [3] 玲犀. 加强创新, 促进镁合金的发展和应用——访中国工程院院士, 上海交通大学丁文江教授 [J]. 航空制造技术, 2017, 531 (12): 24-26.
Ling X. Innovation promoting the development and application of magnesium alloy—Visiting academician of chinese academy of engineering, professor Ding Wenjiang, Shanghai Jiao Tong University [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 531 (12): 24-26.
- [4] Aghion E, Bronfin B, Eliezer D. The role of the magnesium industry in protecting the environment [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 117 (3): 381-385.
- [5] 丁云鹏, 崔建忠, 乐启焱, 等. 镁合金板材的生产历史与研究现状 [J]. 精密成形工程, 2014, 6 (6): 7-21.
Ding Y P, Cui J Z, Le Q Z, et al. Production history and present study status of magnesium alloy sheet [J]. Precision Forming Engineering, 2014, 6 (6): 7-21.
- [6] Kulekci M K. Magnesium and its alloys applications in automotive industry [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39 (9): 851-865.
- [7] 范子杰, 桂良进, 苏瑞意. 汽车轻量化技术的研究与进展 [J]. 汽车安全与节能学报, 2014, (1): 1-16.
Fan Z J, Gui L J, Su R Y. Research and development of automotive lightweight technology [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2014, (1): 1-16.
- [8] 吴国华, 陈玉狮, 丁文江. 镁合金在航空航天领域研究应用现状与展望 [J]. 载人航天, 2016, 22 (3): 281-292.
Wu G H, Chen Y S, Ding W J. Current research, application and future prospect of magnesium alloys in aerospace industry [J]. Manned Spaceflight, 2016, 22 (3): 281-292.
- [9] 陈文振. ZK61 镁合金薄板轧制与组织、织构及性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
Chen W Z. Research on Microstructure, Texture and Mechanical Properties of ZK61 Mgthin Sheets Produced by Rolling [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [10] Qi Y S, Wang H, Chen L L, et al. Preparation and mechanical properties of ZK61-Y magnesium alloy wheel hub via liquid forging-isothermal forging process [J]. Metals-Open Access Metallurgy Journal, 2020, 10 (3): 385.
- [11] Malik A, Wang Y W, Nazeer F, et al. Effect of pre-compression on changes in texture and yielding behavior of ZK61 Mg alloy [J]. Vacuum, 2020, 172, 109039.
- [12] Zhang L X, Zhang W C, Chen W Z, et al. The effect of grain size on the strain hardening behavior for extruded ZK61 magnesium alloy [J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2017, 26 (12): 6013-6021.
- [13] Li Z G, Yang H F, Liu J G. Comparative study on yield behavior and non-associated yield criteria of AZ31B and ZK61M magnesium alloys [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 759: 329-345.
- [14] 李奇. ZK60 镁合金板材轧制工艺研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
Li Q. Research on Rolling Process of ZK60 Magnesium Alloy Sheet [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [15] 胡耀波, 杨生伟, 蒙万秋, 等. ZK61 镁合金的磨损性能 [J]. 功能材料, 2016, 47 (10): 10157-10161, 10167.
Hu Y B, Yang S W, Meng W Q, et al. Wear characteristics of ZK61 magnesium alloy [J]. Function Materials, 2016, 47 (10): 10157-10161, 10167.
- [16] GB/T 228.1—2021, 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法 [S].
GB/T 228.1—2021, Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature [S].
- [17] 钱鹏. AZ31 镁合金板材制备及组织与性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
Qian P. Fabrication of AZ31 Magnesium Alloy Sheet and Its Microstructure and Stamping Formability [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [18] Lu X G, Wang Z, Cui Y, et al. Computational thermodynamics, computational kinetics, and materials design [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59 (15): 1662-1671.