

特约稿件

凸模错距量对镁合金弯曲构件动态再结晶的影响

李 峰, 王雁鹏, 张熙杰

(哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要: 传统弯曲构件成形工艺存在工序流程长、曲率调控难度大等瓶颈问题。错距挤压工艺能够在单道次挤压成形过程中实现挤压-成形一体化,同时,通过改变凸模端部的错距量 h ,达到控制弯曲构件曲率特征的目的。由错距挤压工艺获得的 AZ31 弯曲构件经过 EBSD 测试,分析了凸模错距量 h 对弯曲构件的晶粒形貌、平均晶粒尺寸、晶界分布、晶粒取向和施密特因子的影响。研究表明,随着凸模错距量 h 的增加,AZ31 镁合金构件发生了充分的动态再结晶,晶粒得到细化,且由于凸模结构的特殊性,弯曲构件中平行于挤压方向的晶粒数量增加,晶粒取向由原先的软取向转为硬取向。为镁合金弯曲构件错距挤压成形微观组织演变的研究提供了科学指导。

关键词: AZ31 镁合金; 错距挤压; 凸模错距量; 晶粒形貌; 动态再结晶; 施密特因子

DOI: 10.15938/j.jhust.2019.05.006

中图分类号: TG376 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2019)05-0029-05

Effect of Staggered Distance on Dynamic Recrystallization of Magnesium Alloy Bending Products

LI Feng, WANG Yan-peng, ZHANG Xi-jie

(School of Electric and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China)

Abstract: Traditional bending processes have many bottlenecks, such as long processing flow and difficulty in controlling bending characteristics. The staggered extrusion (SE) process can realize the integration of extrusion and bending in a single pass. The bending characteristics of bending products can be controlled by adjusting the staggered distance (h) of the stem. The AZ31 bending products obtained by the staggered extrusion process was observed by EBSD. The influence of the staggered distance on grain morphology, average grain size, grain boundary distribution, grain orientation and Schmid factor of bending products was investigated, respectively. The results show that the dynamic recrystallization of AZ31 magnesium alloys occurs and the grains are refined with the increase of the h . Because of the special structure of the stem, the number of grains parallel to the extrusion direction in the bending products increases, and the grains change from the original soft orientation to the hard orientation. The above phenomena provide scientific guidance for the investigation of microstructure evolution in staggered extrusion of magnesium alloy bending products.

Keywords: AZ31 magnesium alloy; staggered extrusion; staggered distance; grain orientation; dynamic recrystallization; Schmid factor

收稿日期: 2019-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(51975166)。

作者简介: 王雁鹏(1993—),女,硕士研究生;

张熙杰(1997—),男,硕士研究生。

通信作者: 李 峰(1978—),男,教授,博士研究生导师,E-mail: fli@hrbust.edu.cn.

0 引言

轻量化是现阶段工业应用中长期追逐的目标^[1],轻质弯曲构件则是实现轻量化的重要手段及途径之一^[2-3]。目前常用的传统弯曲工艺主要有绕弯法^[4]、拉弯法^[5]、压弯法^[6]、推弯法^[7-8]、滚弯法^[9-10]及数控弯曲^[11]等。传统弯曲构件的获得方式主要为“先成形-后弯曲”的制造模式,存在着工序流程长、曲率调控难度大、工艺方案制定复杂等难题。针对上述问题,国内外学者开始致力于探索挤压成形-弯曲一体化技术的研究。如 Klaus 等^[12]提出了带导向模片挤压弯曲成形工艺,可通过将多组导向模片自由组合,直接挤压成形出带曲率的型材;Zhou 等^[13]提出了双向对侧挤压控制金属侧向挤压成形曲率的新方法,是一种非常有意义的尝试;Shiraishi 等^[14]提出了一种 VCSE 工艺,将带角度的模具固定在挤压筒上来控制坯料的流动方向,从而获得弯曲构件。如李落星等^[15]提出了挤压弯曲-淬火一体化新工艺,并取得了丰富的研究成果;石磊等^[16]提出了动态流量控制法,即通过动态调整传统分流挤压模中分流孔内金属的流量获得了高精度高强度细晶弯管件。

本文提出了一种错距挤压成形新方法。该工艺通过凸模部分结构的改变,可对挤出截面处金属流速不均匀性进行定量调控,这在单次挤压成形带曲率构件成为了可能。通过前期探索,获得了较理想的效果^[17]。但错距挤压成形中微观组织的变化较复杂,本文重点围绕再结晶对微观组织的影响展开研究。

1 实验方案

错距挤压法对传统正挤压的凸模局部结构进行改进,利用挤出模口流速的不均匀性进行调控,从而获得带曲率特征的弯曲构件,如图 1 所示。错距挤压工装模具组成主要包括:凸模、挤压筒、芯模、底座等部分。将凸模端部设计成台阶式的错距结构,可以控制挤出构件的曲率特征,实现挤压-成形一体化的目的。

本实验采用商用 AZ31 镁合金,具体成分如表 1 所示。将原始铸态 AZ31 镁合金加工成尺寸为 $\Phi 40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 的圆柱形坯料,把加工好的坯料在 673 K 下进行均匀化退火 12 h,在空气中冷却至室温。将退火后的坯料与工装模具按照图 1a) 所示方式装配好,实验采用水基石墨作为润滑剂。使用箱式保

温炉将模具加热到 623 K 并保温 30 min,采用热电偶控制实验温度误差在 $\pm 2\text{ K}$ 之内,压力机挤压速度为 1 mm/s。

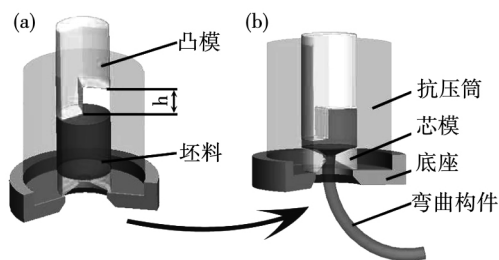


图1 错距挤压工艺原理图

Fig. 1 Principle diagrams of the staggered extrusion

为了对比研究,凸模端部错距量 h 分别取 8 mm、12 mm、16 mm、20 mm、24 mm,挤压比为 19.75,最终获得 $\Phi 9\text{ mm}$ 的弯曲构件。将挤压成形的弯曲构件脱模后马上在水中进行淬火,以保留弯曲构件的微观组织。

表1 商用 AZ31 镁合金成分(质量分数%)

Table. 1 AZ31 alloy chemical composition (%)

Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Ni	Mg
3.20	0.86	0.36	0.001 8	0.021	0.002 2	0.000 56	Bal.

在每个弯曲构件的中心部位取一个尺寸为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的长方体试样进行微观组织测试。先把试样在电解溶液中进行电解抛光,然后放置在 Quanta 200 F 场发射扫描电镜中进行电子背散射衍射 (electron backscattered diffraction, EBSD) 测试。实验台倾斜 70° ,扫面步长为 $1.2\text{ }\mu\text{m}$,工作距离为 13 mm,采用 HKL-Channl 5.0 软件对弯曲构件的晶粒形貌、晶界分布和施密特因子 (Schmid factor, SF) 进行分析。

2 动态再结晶行为

图 2 为不同错距量 h 条件下,通过错距挤压获得的 AZ31 镁合金弯曲构件。

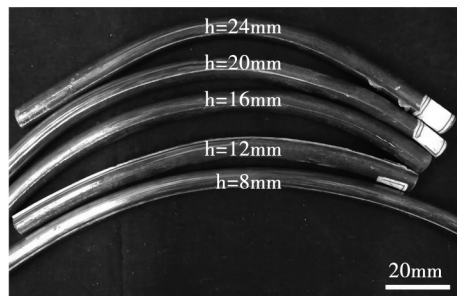


图2 AZ31 镁合金弯曲构件

Fig. 2 AZ31 magnesium alloy bending products

从图2中可以看出,随着错距量 h 的增加,弯曲构件的弯曲高度增加,弯曲半径减小。证明了错距挤压能够实现挤压-成形一体化,缩短了此类构件制造的工艺流程且能通过调整凸模结构来获得相应的曲率特征。

图3为通过不同错距量 h 加载成形获得弯曲构件的晶粒形貌和晶界分布对比。其中,红色晶界表示大角度晶界(high angle grain boundary, HAGBs $> 15^\circ$),黑色晶界表示小角度晶界(low angle grain boundary, LAGBs $> 15^\circ$)。晶粒形貌是判断晶粒再结晶的标准之一,从图3中可以看出,经过错距挤压后,镁合金弯曲构件的晶粒形貌均呈现均匀的等轴状,这说明了错距挤压成形后晶粒发生了充分的动态再结晶行为。

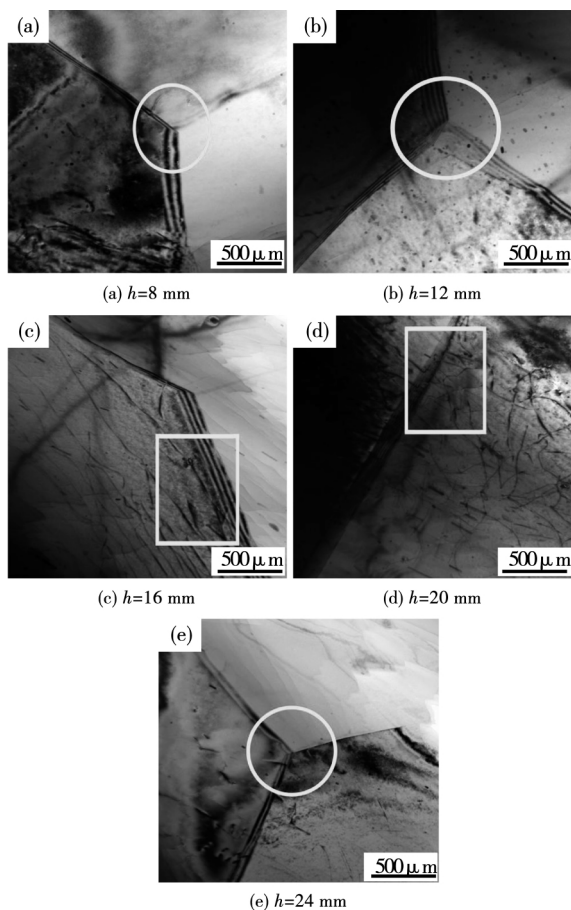


图3 弯曲构件晶粒形貌及晶界分布

Fig. 3 Grain morphology and grain boundary distribution of bending products

大角度晶界的分布是判断晶粒再结晶现象是否充分的依据之一。从图3中还可以看出,经错距挤压后,大部分晶粒之间具有大角度晶界且均匀分布在弯曲构件中。

图4为弯曲构件中大角度晶界与错距量 h 之间的关系曲线。从图4可以看出,随着错距量 h 从8 mm增加到24 mm,大角度晶界的数量百分比从78.04%增加到89.88%,证明了错距挤压成形后,晶粒的动态再结晶行为进行的较为充分,这对改善弯曲构件的微观组织无疑是有益的。

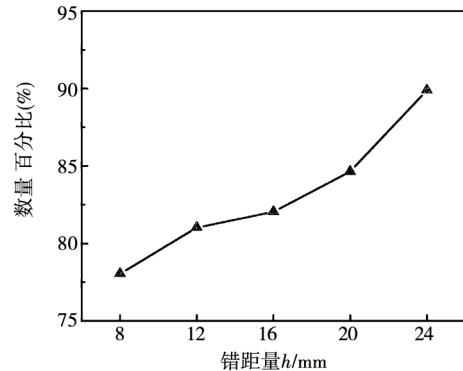


图4 弯曲构件大角度晶界与错距量 h 关系曲线

Fig. 4 Curve between HAGBs and h of bending products

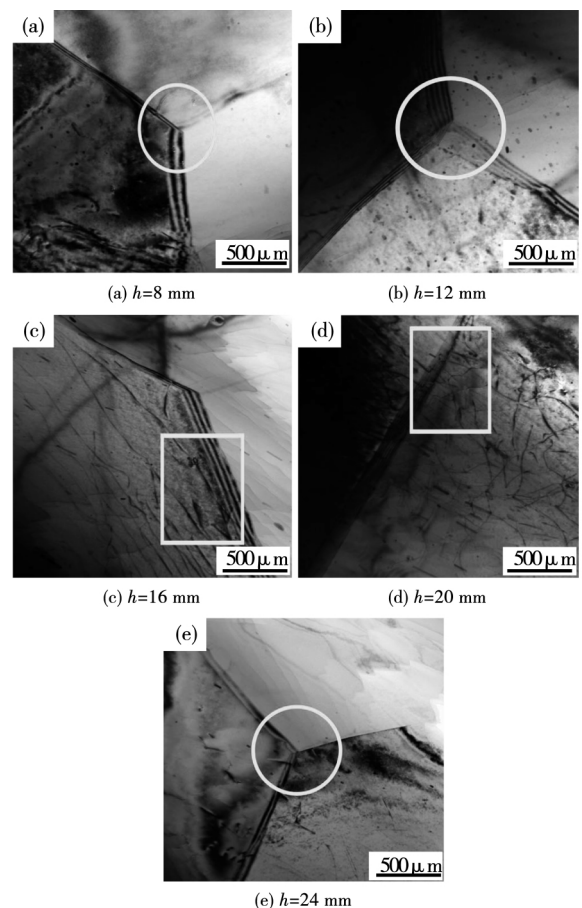


图5 弯曲构件晶界形貌 TEM 图

Fig. 5 TEM images of grain boundaries

图5为弯曲构件在透射电子显微镜(transmission electron microscope, TEM)下的晶界形貌。从图

5(a), (b), (e) 蓝色圆形区域中可以发现, TEM 可以观测到相邻晶粒之间出现三叉晶界。小角度晶界逐渐形成大角度晶界后, 大角度晶界又能够通过迁移促进弯曲构件晶粒的动态再结晶行为。图 5(c), (d) 中蓝色矩形区域所示为被晶界截断的位错线, 可以看出, 在晶界处的位错密度较高。弯曲构件塑性变形主要是通过位错运动来实现的, 位错的运动能够促进再结晶晶粒的形成。

3 晶粒取向演化

图 6 所示为弯曲构件沿挤压方向(ED)与径向(TD)平面的晶粒取向反极图(inverse pole figure, IPF)。

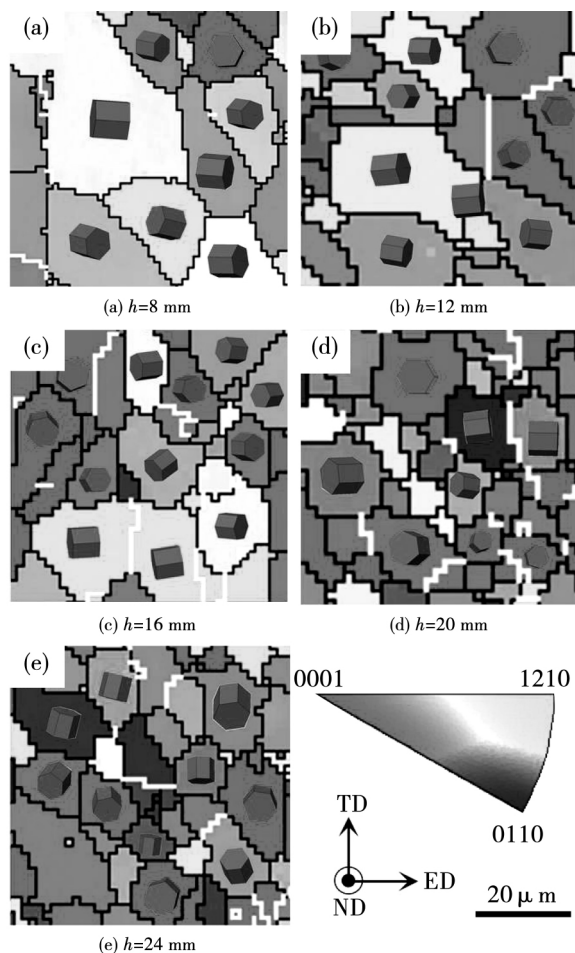


图 6 弯曲构件晶粒取向反极图

Fig. 6 Inverse pole figures of bending products

图 6 中不同颜色的晶粒代表不同的晶粒取向, 灰色六棱柱为晶粒 3D 点阵取向图示意图。从图 6 中可以看出, 错距挤压成形中镁合金的晶粒在外力作用下发生旋转, 导致晶粒取向发生改变。晶粒取

向具有向平行于 ED 方向变化的趋势, 该方向的晶粒数量在错距挤压后显著增多, 即平行于{0001}基面的晶粒数量增加。同时, 动态再结晶晶粒能够在旋转过程中逐渐吸收能量长大, 小角度晶界逐渐吸收能量转变为大角度晶界。

图 7 所示为平均施密特因子(Average Schmid factor, ASF)与错距量 h 之间的关系。施密特因子作为判断晶体发生塑性变形的重要依据, 在微观组织演变分析中起到重要作用^[21]。

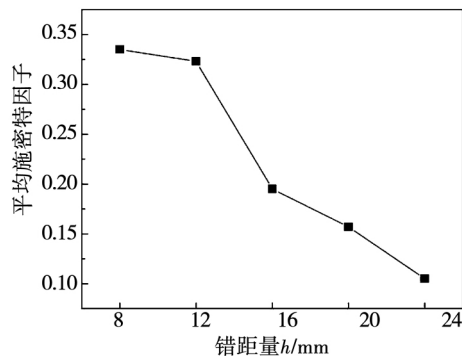


图 7 弯曲构件平均施密特因子与错距量 h 关系曲线

Fig. 7 Curve between ASF and h of bending products

从图 7 中可以看出, 随着错距量 h 从 8 mm 增加至 24 mm, 弯曲构件的 ASF 从 0.34 降低至 0.11。经错距挤压后, 晶粒有由最初的软取向转为硬取向的变化趋势。且随着错距量 h 的增加, 硬取向晶粒的数量增多。说明了经过错距挤压后, 镁合金弯曲构件的晶粒 ASF 减小, 这有利于消除弯曲构件的各向同性。

4 结 论

1) 错距挤压所获 AZ31 镁合金弯曲构件具有均匀分布的微观组织, 这是由于在挤压过程中发生了动态再结晶所致。随着错距量 h 从 8 mm 增加至 24 mm, 弯曲构件的平均晶粒尺寸从 $14.88 \mu\text{m}$ 减小至 $10.51 \mu\text{m}$, 同时, 大角度晶界的数量百分比从 78.04% 增加到 89.88%, 这对于提高弯曲构件的综合力学性能非常有益;

2) AZ31 镁合金错距挤压成形促使平行于基面{0001}的晶粒增加, 晶粒从最初的软取向向硬取向转变。随着错距量 h 从 8 mm 增加至 24 mm, 弯曲构件的 ASF 从 0.34 降低至 0.11, 这有利于消除弯曲构件的各项同性, 使得弯曲构件在后续的应用中具有稳定的力学性能;

3) 错距挤压法巧妙地通过对凸模结构的局部改进,实现了镁合金弯曲构件挤压-成形一体化的目的。缩短了工艺流程,节约了生产成本。且通过凸模错距量 h 的调整,定量调控 AZ31 镁合金弯曲构件的曲率特征,为带曲率构件成形制造提供了一种新思路。

参 考 文 献:

- [1] 董大勇,孔凡涛. 700℃短时用高温钛合金的显微组织与力学性能[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2015(3):78.
- [2] XIAO H, ZHANG S H, ZHOU R, et al. Springback Characteristics of AZ31 Magnesium Alloy As-extruded Profile in Warm Tension-rotation Bending Process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22: s416.
- [3] 蒋伟,周涛,宋登辉,等. AZ31 镁合金轧制-剪切-弯曲变形工艺数值模拟研究[J]. 精密成形工程, 2016, 8(5):121.
- [4] 周慧子,肖寒,曾文文,等. 不同温度加载模式 AZ31 镁合金型材张力绕弯成形数值模拟[J]. 材料导报, 2017(18):134.
- [5] WANG S H, CAI Z Y, MING-ZHE L I. Numerical Simulation of Multi-point Bend-stretch Forming Process of Aluminum Profiled Material[J]. Forging & Stamping Technology, 2010, 35(2):66.
- [6] 周丽娜,李志强,韩晓宁,等. 钛合金板料热压弯过程数值模拟[J]. 航空制造技术, 2017(7):92.
- [7] GUO X, JIN K, WANG H, et al. Numerical Simulations and Experiments on Fabricating Bend Pipes by Push Bending with Local Induction-heating Process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 84(9/12):2689.
- [8] ZENG Y, LI Z. Experimental Research on the Tube Push-bending Process[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2002, 122(2):237.
- [9] SALEM J, CHAMPLAUD H, FENG Z, et al. Experimental Analysis of an Asymmetrical Three-roll Bending Process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 83(9/12):1823.
- [10] YANG M, SHIMA S, WATANABE T. Model-based Control for Three-roll Bending Process of Channel Bar[J]. Journal of Engineering for Industry, 1990, 112(4):346.
- [11] ZHAN M, HE Y, JIANG Z Q, et al. A study on 3D FE Simulation Method of NC Bending Process of Thin-walled Tube[J]. Journal of Materials Processing Tech. 2002, 129(1):273.
- [12] LIN J B, WANG Q D, CHEN Y J, et al. Microstructure and Texture Characteristics of ZK60 Mg Alloy Processed by Cyclic Extrusion and Compression[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(11):2081.
- [13] ZHOU W, LIN J, DEAN T A, et al. Analysis and Modelling of a Novel Process for Extruding Curved Metal Alloy Profiles[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 138-139:524.
- [14] FATEMI-VARZANEH S M, ZAREI-HANZAKI A, IZADI S. Shear Deformation and Grain Refinement During Accumulative Back Extrusion of AZ31 Magnesium Alloy[J]. Journal of Materials Science, 2011, 46(6):1937.
- [15] KLAUS B. M. Bending of Extruded Profiles During Extrusion Process[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(11):1238.
- [16] ZHOU W, LIN J, TREVOR A Dean, et al. Analysis and Modelling of a Novel Process for Extruding Curved Metal Alloy Profiles. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 138:524.
- [17] SHIRAISHI M, NIKAWA M, GOTO Y. An Investigation of the Curvature of Bars and Tubes Extruded Through Inclined Dies. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2003, 43(15):1571.
- [18] 李落星,周佳,张辉. 车身用铝、镁合金先进挤压成形技术及应用[J]. 机械工程学报, 2012, 48(18):35-43.
- [19] 石磊,徐国辉,任畅,等. 动态流量控制法挤出镁合金三维弯曲管件[J]. 材料科学与工艺, 2016(6):8.
- [20] WANG Y P, LI F, SHI W Y, et al. Dynamic Recrystallization and Metal Flow Behavior of AZ31 Magnesium Alloy Bending Products Processed by Staggered Extrusion. 2. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28:3551.
- [21] 张士宏,宋广胜,徐勇,等. 施密特因子在镁合金微观变形机制研究中的应用[J]. 精密成形工程, 2014(6):1.

(编辑:王 萍)