

ZK60镁合金筒形件挤成形工艺研究

梁海成, 白羽鸿*, 张玉鹏, 董子铭

沈阳理工大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2022年10月21日; 录用日期: 2022年11月30日; 发布日期: 2022年12月7日

摘要

采用数值模拟和实验相结合的方式, 对ZK60镁合金筒形件反挤压成形进行研究, 优化工艺参数。结果表明: 随着挤压温度的升高, 镁合金内部晶粒细化程度越大, 但温度越高动态再结晶程度愈不明显; 坯料温度在290℃时最高应力可达400 MPa, 零件整体应力大约在180 Mpa, 380℃时最高应力为130 MPa, 零件整体应力约为80 MPa; 其次, 随着坯料高度的减小和直径增大, 成形中坯料的等效力也随增加, 但尺寸过大或过小均会产生应力集中现象, 容易产生缺陷。经过模拟分析和实验验证, 坯料直径为 $\phi 70$, 坯料温度为350℃时, 筒形件成形质量更佳。

关键词

镁合金, 筒形件, 反挤压, 数值模拟

Study on Extrusion Process of ZK60 Magnesium Alloy Cylindrical Parts

Haicheng Liang, Yuhong Bai*, Yupeng Zhang, Ziming Dong

School of Materials Science and Engineering, Shenyang Institute of Technology, Shenyang Liaoning

Received: Oct. 21st, 2022; accepted: Nov. 30th, 2022; published: Dec. 7th, 2022

Abstract

By means of numerical simulation and experiment, the back extrusion forming of ZK60 magnesium alloy cylinder was studied and the process parameters were optimized. The results show that with the increase of extrusion temperature, the internal grain refinement degree of magnesium alloy increases, but the dynamic recrystallization degree is less obvious with the increase of extrusion temperature. When the billet temperature is 290°C, the maximum stress can reach 400 MPa, and the overall stress of the parts is about 180 Mpa. When the billet temperature is 380°C,

*通讯作者。

the maximum stress is 130 MPa, and the overall stress of the parts is about 80 MPa. Secondly, with the height and diameter of the billet decreasing, the equivalent stress of the billet in forming also increases, but too large or too small size will produce stress concentration phenomenon, easy to produce defects. Through simulation analysis and experimental verification, the forming quality of cylindrical parts is better when the billet diameter is $\phi 70$ and the billet temperature is 350°C .

Keywords

Magnesium Alloy, Cylinder, Backward Extrusion, The Numerical Simulation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

镁合金是结构材料中最轻的金属，具有密度小、比强度与比刚度高、生物兼容性好以及减震等优异性能，还拥有较高的吸振性，导热导电性良好、兼具备良好的阻尼减震特性和电磁屏蔽性能，同时易于加工成形、废料容易回收再利用，广泛应用于交通工具、航空航天、电子工业与通讯等领域[1] [2] [3] [4]。是较为先进的绿色金属材料。

金属镁属于密排六方结构，相比于面心立方结构和体心立方结构，滑移系更少，因此塑性较差，塑性加工更加的困难，大多数镁及镁合金材料要通过压铸等成形工艺进行加工[5] [6]。挤压成形是将金属毛坯放入模具后，通过一定速度的压力作用，使坯料在型腔中成形，得到所需的零件的过程[7]。反挤压时，由于金属坯料与挤压筒内壁间无相对滑动，因此挤出过程金属流动更均匀，相比正挤压法挤型材尺寸精度更高。根据温度不同，挤压工艺可以分为冷挤压、温挤压和热挤压[8] [9]。镁合金材料成形过程中具有剧烈的流动，但因筒壁厚较薄，对其成形力造成很大影响，需要保持较高的温度来进一步增强金属的流动性[10] [11]。因此，对于镁合金筒形件来说，热挤压是较为普遍的成形方式[12]。

本文运用有限元软件，对 ZK60 镁合金反挤压过程进行工艺及组织模拟研究，优化成形工艺参数，为筒形件实际生产提供工艺参数依据，以保证能够获得综合性能良好的零件。

2. 有限元模拟及工艺参数优化

筒形零件尺寸如图 1(a)所示，最大外形尺寸 $\phi 88$ mm，内层筒部外径 $\phi 48$ mm，壁厚分别为 6 mm 和 5 mm，外侧壁高度为 43 mm。零件及模具几何模型如图 1(b)所示。具体工艺参数设置如表 1 所示。

在挤压过程中，选取的坯料尺寸分别为 $\phi 65 \times 40$ mm、 $\phi 70 \times 35$ mm、 $\phi 85 \times 25$ mm，设定坯料温度为 290°C 、 320°C 、 350°C 、 380°C ，并保持其余工艺参数一致。模具预热温度比坯料温度低 30°C ，摩擦系数为 0.3、挤压速度为 2 mm/s，对零件挤压成形完成后的情况进行分析。

Table 1. Simulated process parameters

表 1. 模拟工艺参数

工艺参数	数值范围			
坯料温度($^{\circ}\text{C}$)	290	320	350	380
模具温度($^{\circ}\text{C}$)	260	290	320	350
坯料直径(mm)	$\phi 65$	$\phi 70$	$\phi 85$	

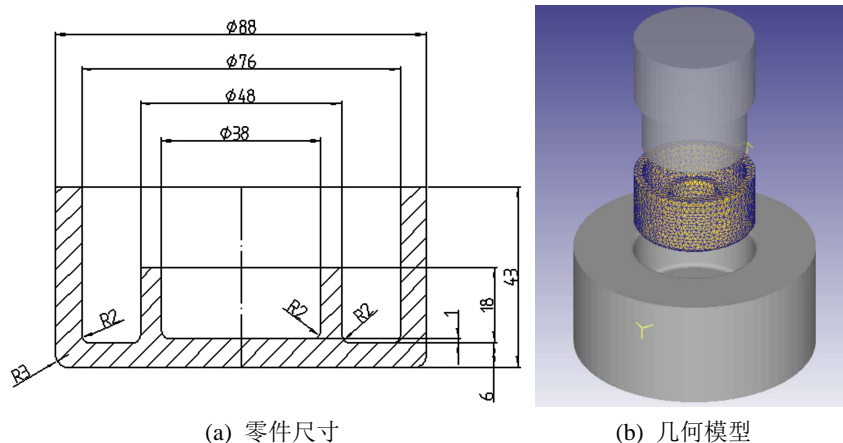


Figure 1. Part drawing and back extrusion geometry model
图 1. 零件图和反挤压几何模型

2.1. 不同坯料尺寸的模拟结果及分析

图 2 为不同坯料尺寸下零件破坏能量的分布，可以反映出坯料易发生缺陷问题的位置。由图可得，破坏能量较高的位置为内侧圆筒壁顶端和凸模圆角的部分，即坯料容易产生缺陷问题。图 2(a)破坏能量在 0.151~0.302；图 2(b)破坏能量在 0~0.207；图 2(c)破坏能量在 0~0.138，三种坯料尺寸的破坏能量差值较小，因此坯料尺寸对破坏能量的影响较小，且 $\phi 70$ 的坯料破坏能量较小且分布更均匀。

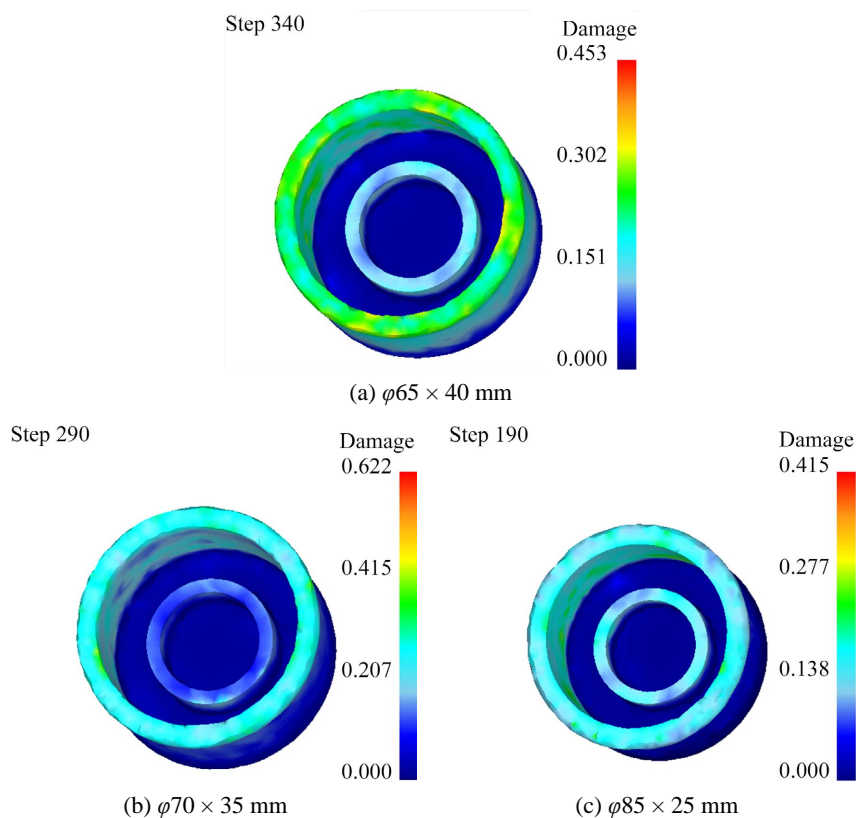


Figure 2. Failure energy distribution of parts under different blank sizes
图 2. 不同坯料尺寸下零件破坏能量分布

图 3 为不同坯料尺寸下零件等效应力的分布情况, 由图可以看出, 在挤压过程中, 最大应力部位出现在凸模圆角的位置, 分别为: 直径为 $\phi 65$ 坯料的最大应力 150 MPa 左右、直径为 $\phi 70$ 坯料的最大应力 200 MPa 左右、直径为 $\phi 85$ 坯料的最大应力 250 MPa 左右。可以看出随着坯料尺寸的高度降低和直径增大, 坯料的等效应力也随之增加, 其中 $\phi 65$ 的坯料应力最小。根据图中颜色深度可以看出坯料应力分布均匀程度, 通过观察三种情况下内侧圆筒顶端均出现应力集中, 而图 3(b)中, 零件整体的应力分布较为均匀, $\phi 65$ 的坯料在凸模圆角部分应力值最小但有多处应力集中的现象, 应力分布规律不如 $\phi 70$ 的坯料均匀, 所以坯料直径为 $\phi 65$ 时成形的零件内部组织形态和表面质量不如 $\phi 70 \times 35$ mm 坯料稳定。

以上的分析和结果表明, 随着坯料尺寸的改变, 挤压成形后的零件的成形情况、等效应变分布、等效应力分布各不一致。当坯料直径增大且高度减少时, 应力和应变都或多或少的增加, 成形质量也会受到影响, 所以 $\phi 65 \times 40$ mm 和 $\phi 70 \times 35$ mm 尺寸的坯料更适合进行生产加工。由于 $\phi 65 \times 40$ mm 坯料的应力、应变分布相较 $\phi 70 \times 35$ mm 坯料而言不够均匀, 且两者应力应变的差值较小, 若使用 $\phi 65 \times 40$ mm 坯料易造成应力集中影响材料内部组织结构和力学性能。并且 $\phi 85 \times 25$ mm 坯料的直径较大, 在凸模下压过程中坯料与凹模侧壁接触较多导致摩擦较大, 会使坯料变形抗力增加会对模具寿命造成影响导致生产效率下降。综合以上分析, 选择尺寸大小为 $\phi 70 \times 35$ mm 的坯料挤压成形所得零件各项性能最佳, 应选择 $\phi 70 \times 35$ mm 坯料进行生产加工。

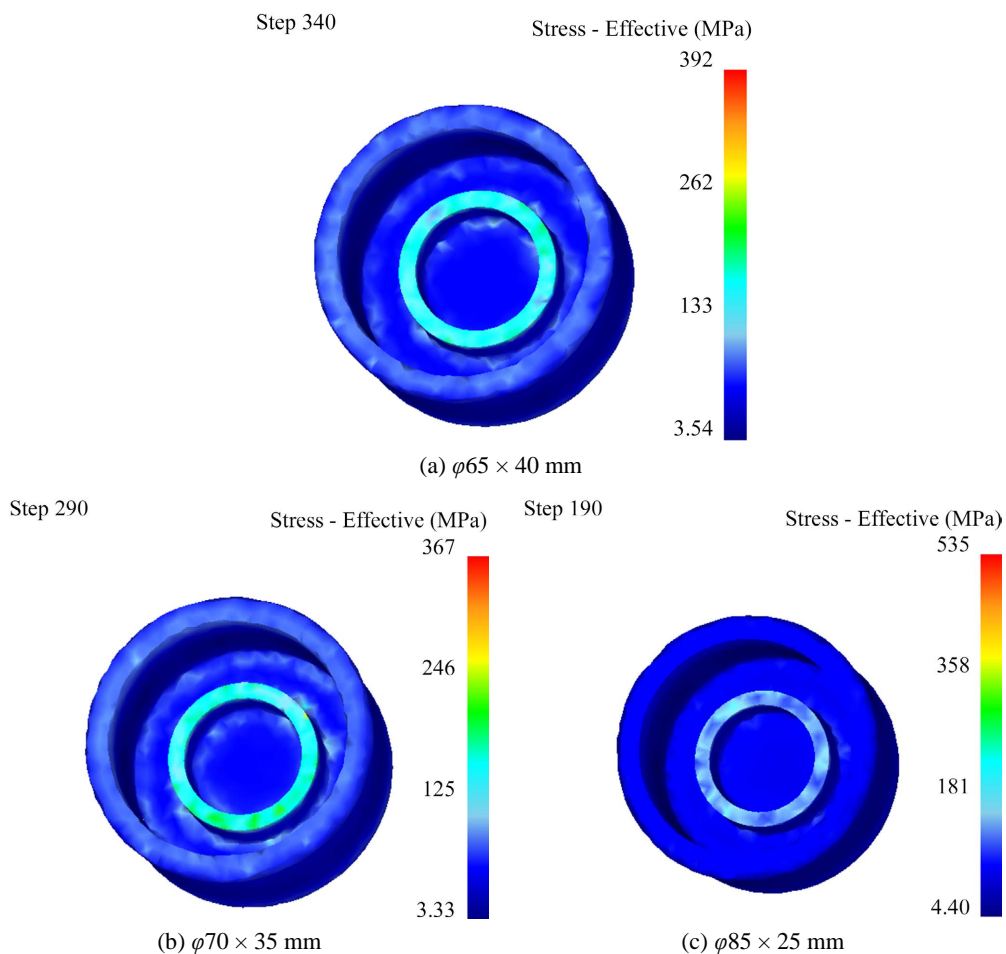


Figure 3. Equivalent stress distribution of parts under different blank sizes

图 3. 不同坯料尺寸下零件等效应力分布

2.2. 不同坯料温度的模拟结果及分析

图4表示了在不同坯料温度下, $\phi 70 \times 35$ mm 坯料挤压成形后等效应力的分布情况。

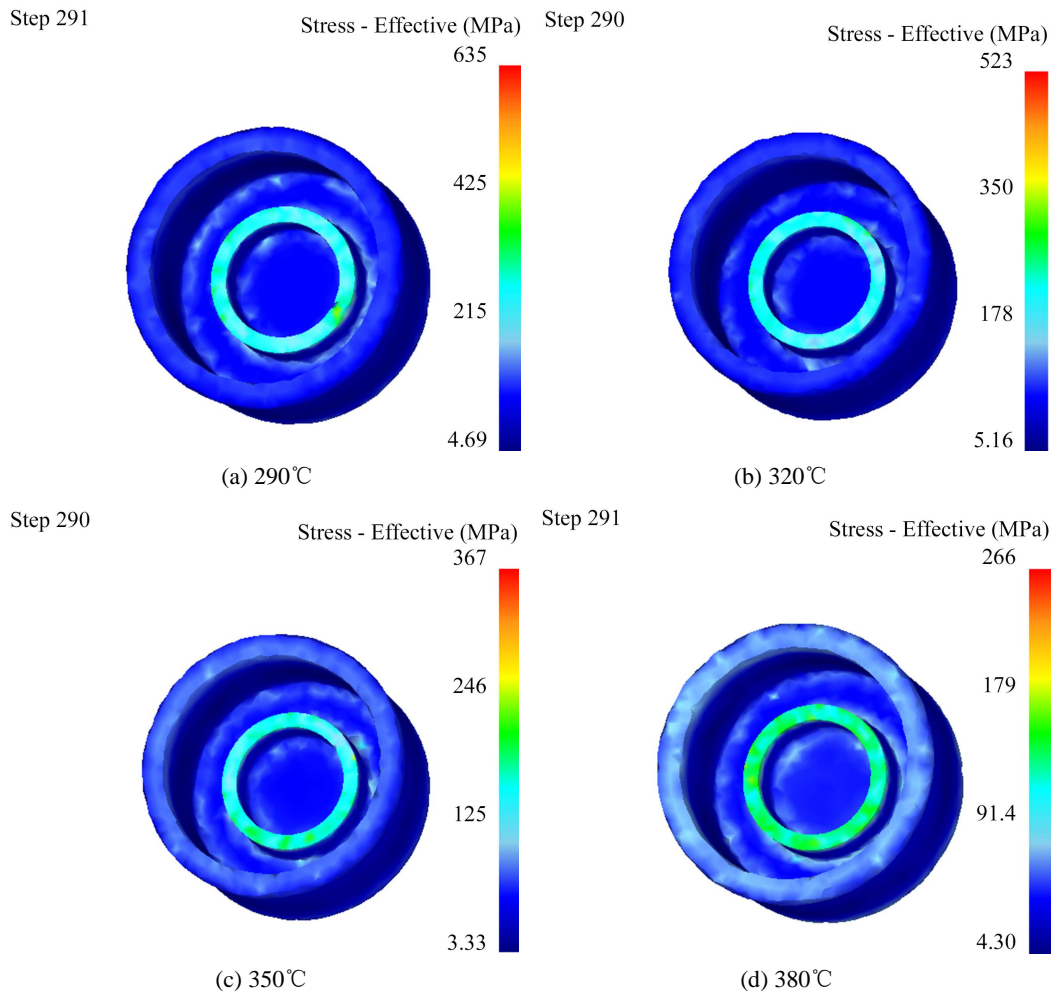


Figure 4. Equivalent stress distribution of parts with different billet temperature

图4. 不同坯料温度零件等效应力分布

坯料温度在 290°C 时最高应力可达 400 MPa 左右, 零件整体应力大约在 180 MPa ; 320°C 时最高应力为 200 MPa 左右, 零件整体应力约为 84.5 MPa ; 350°C 时最高应力可达 180 MPa 左右, 零件整体应力大约在 150 MPa ; 380°C 时最高应力为 174 MPa , 零件整体应力约为 80 MPa 。因此可以得出, 随着温度的升高零件的等效应力逐渐降低, 这是因为温度升高使得镁合金塑性变形能力增强并且降低了变形时的变形抗力。虽然 380°C 时零件应力最低, 但是在零件底面应力分布不太均匀, 出现的多处应力集中会影响零件质量。

3. 组织模拟及参数分析

元胞自动机(cellular automata, CA)的构成比较繁琐, 变形种类繁多, 它利用一系列的数学和物理模型而构成[13], 是一个方便、可靠、高效的模拟神器[14], 主要在于模拟材料的组织演变过程, 并为生产提供导向[15]。

3.1. 再结晶过程

ZK60 镁合金在挤压变形过程中，内部组织的变化过程如图 5 所示。

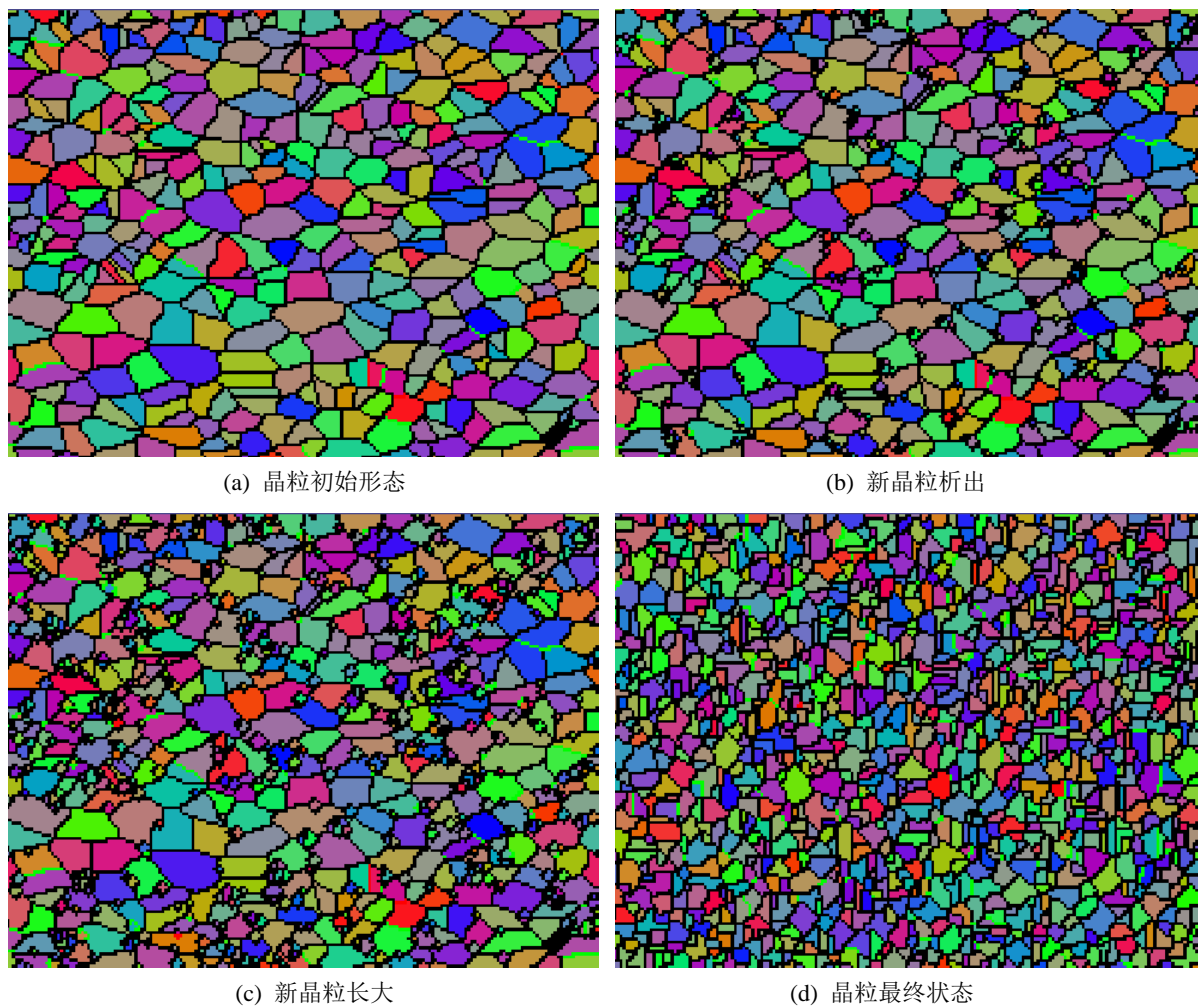


Figure 5. Recrystallization process

图 5. 再结晶发生过程

从变化过程可以看出，当镁合金坯料受到挤压开始发生塑性变形时，内部的组织也开始发生变化。图 5(a)为镁合金初始的晶粒形态，全部为较大的晶粒，当开始发生塑性变形时，在晶界处开始有少量的新晶粒被析出，随着变形程度的增大，新晶粒析出的也越来越多，并且新晶粒逐渐长大，如图 5(c)所示。变形结束晶粒的长大也随之停止，图 5(d)为晶粒为最终状态。

3.2. 温度对晶粒尺寸的影响

尺寸为 $\phi 70 \times 35$ mm 在不同形变温度下的晶粒状态如图 6 所示，图 7 为对应的晶粒尺寸。

从图 6 和图 7 可以看出，坯料中的原始粗大柱状晶已基本消失，并且在原始晶界和晶粒内都有细小的新晶粒形成，这表明材料在反挤压过程中发生了动态再结晶，且在每个温度下的晶粒长大状态不一，变形温度为 350°C 和 380°C 时晶粒的平均尺寸较小。

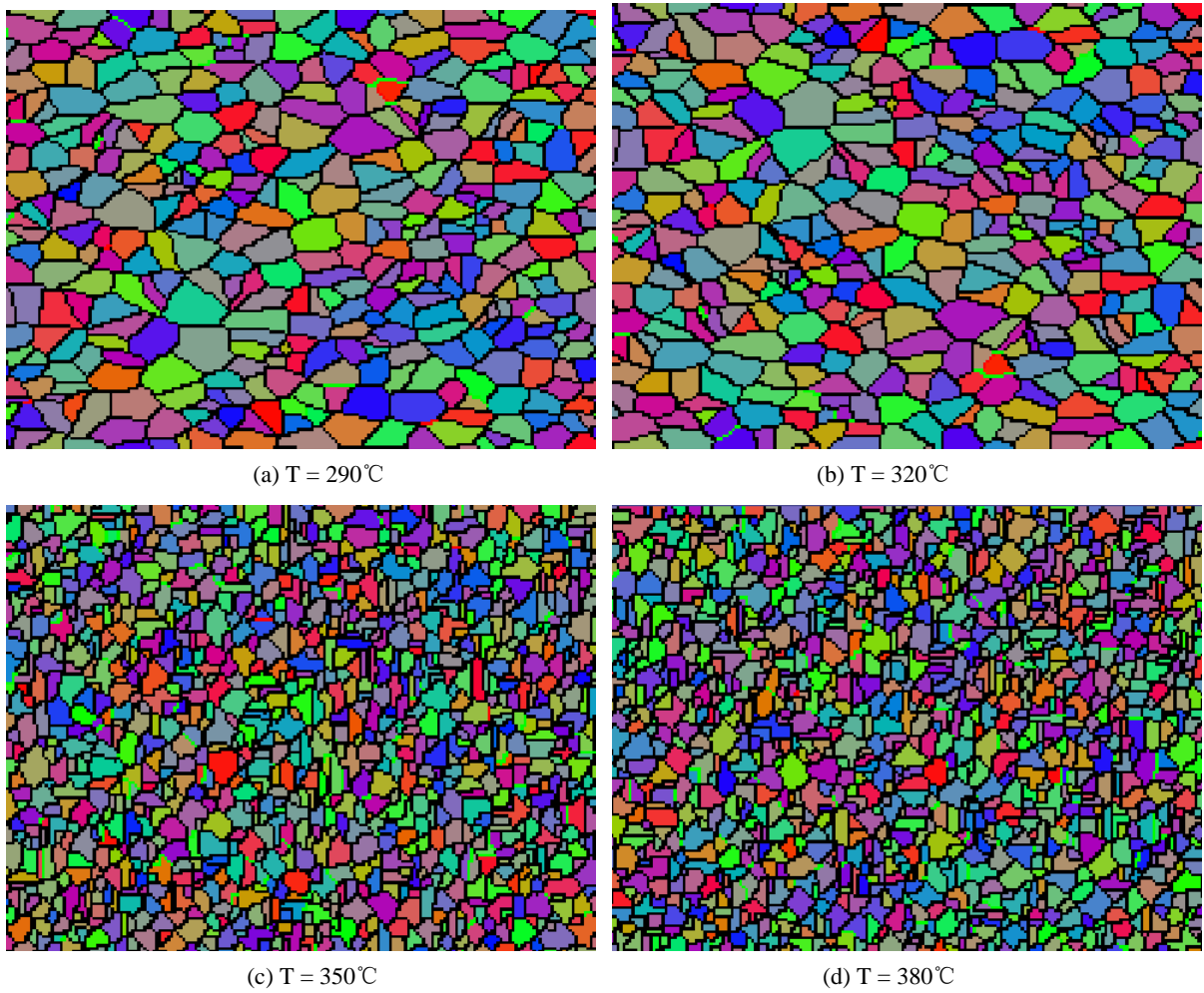
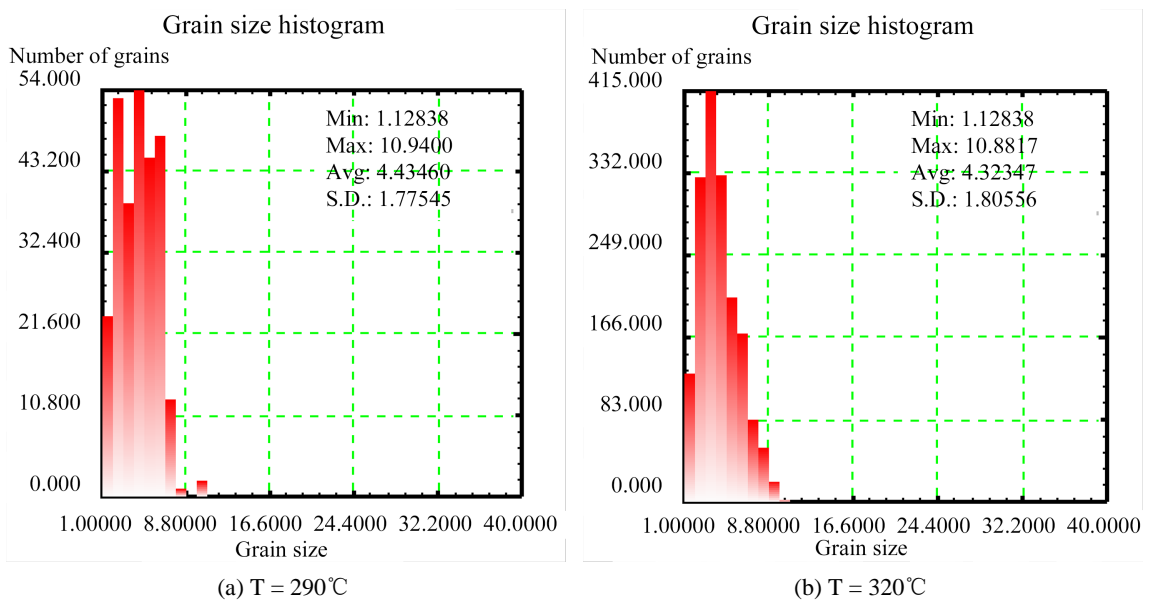


Figure 6. Microstructure of $\phi 70 \times 35$ mm billet at different temperatures

图 6. $\phi 70 \times 35$ mm 坯料不同温度的微观组织



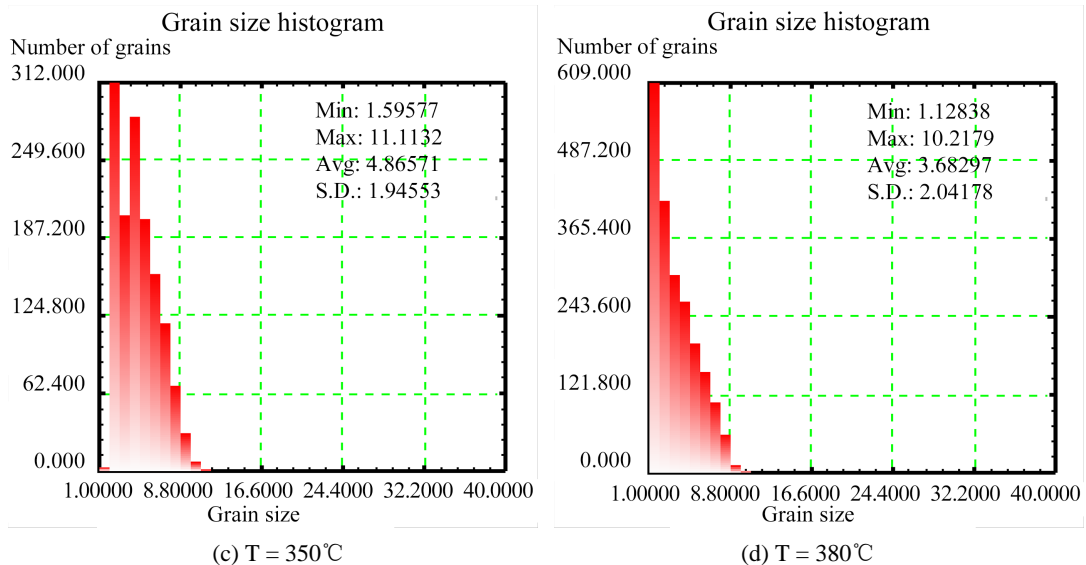


Figure 7. Grain size of $\phi 70 \times 35$ mm billet at different temperatures

图 7. $\phi 70 \times 35$ mm 坯料不同温度的晶粒尺寸

根据以图 7 分析得出, 当坯料温度为 290°C 、 320°C 时, 镁合金原始组织中的粗大晶粒在挤压力作用下发生塑性变形, 在外力的作用下发生动态再结晶, 形成细小的等轴晶粒, 随着变形温度的逐渐升高, 变形的程度愈加剧烈, 位错密度明显加大, 如图 7(c)、图 7(d), 材料内部动态再结晶加剧, 在晶界处生成大量细小的新晶粒, 原始晶粒尺寸开始减少, 材料内部的平均晶粒尺寸减小。再结合工艺模拟分析, 由于镁合金在 350°C 和 380°C 下成形后的组织平均晶粒尺寸大小相差不大, 且 380°C 时零件底面应力分布不太均匀。所以, 在 350°C 时挤压成形出的零件综合性能最佳, 故温度应选择 350°C 。

4. 筒形件反挤压成形实验

4.1. 实验材料及设备

本课题中 ZK60 镁合金体零为圆周对称筒状, 因此坯料使用圆柱体形状, 圆柱体的形状在挤压过程中受力更加均匀, 便于加工。具体尺寸选择 $\phi 65 \times 40$ mm、 $\phi 70 \times 35$ mm、 $\phi 85 \times 25$ mm 三种。实验还需要采用 SRJX-8-13 高温箱式电阻炉, 武汉电炉有限公司、Y32-315 型号 3150KN 液压机, 河北弘凯重型机床有限公司; 陶瓷加热套, 沈阳市五金机电城。图 8 为反挤压模具。



Figure 8. Back extrusion die

图 8. 反挤压模具

本次实验中的重要参数包括坯料尺寸、坯料及模具温度。坯料尺寸分别是 $\phi 65 \times 40$ mm、 $\phi 70 \times 35$ mm、 $\phi 85 \times 25$ mm，设定坯料温度为 290℃、320℃、350℃、380℃。模具温度为 260℃、290℃、320℃、350℃。

4.2. 实验结果及分析

挤压成形的零件质量良好，大部分没有挤压缺陷，尺寸精度和形状精度已到达图纸的要求。模拟中已经优化出一套工艺参数，在 350℃ 坯料尺寸为 $\phi 70 \times 35$ mm 的实验结果如图 9(a) 所示。从图中可以看到，整个零件内部成形较好，内层圆筒也顺利挤出，整个内部表面光洁度较好，没有裂纹。但零件不对称，侧壁接近边缘顶部出现横向撕裂现象。这是因为在挤压成形后期，随着侧壁的升高，侧壁与凹模的摩擦力增大，侧壁出现折叠造成的。而在 350℃ 坯料尺寸为 $\phi 85 \times 25$ mm 的实验结果中，成形出来的零件圆周对称，且无裂纹等缺陷，如图 9(b) 所示。

零件不对称是因为在实验中存在坯料定位的问题，若坯料中心不在模具中心，偏差较大时，成形零件外侧壁容易造成挤压高度不对称现象。所以，当坯料直径与凹模内径相差较大时，应采用定位装置，避免造成挤压偏心。图 9(b) 中坯料尺寸与凹模内径较为接近，放入模具后，自动锁定在了凹模中心位置，受力更均匀，因此对称无缺陷。综上所述，结合模拟结果与反挤压实验，在 350℃ 下，通过定位装置将坯料尺寸为 $\phi 70 \times 35$ mm 的坯料定位在凹模中心，成形效果最佳。



Figure 9. Forming results of different billet sizes at 350℃
图 9. 温度为 350℃ 时不同坯料尺寸成形结果

5. 结论

经过对 ZK60 镁合金筒形零件反挤压过程进行模拟分析，并结合实验研究，得出结论如下：

- 1) 随着温度的升高零件的等效应力逐渐降低，在 350℃ 时零件平均应力值与 380℃ 的相差不大，并且所受应力更为均匀，在 350℃ 时挤压成形出的零件损伤值更小；
- 2) 坯料尺寸一定时，随着变形温度的升高，动态再结晶程度也会加剧，晶粒细化更加明显，但 350℃ 与 380℃ 时的平均晶粒尺寸相差不大；
- 3) 在实际生产中设计好定位装置，能避免出现挤压偏心的情况，即选择 $\phi 70 \times 35$ mm，在 350℃ 时挤压件受力更均匀，不易产生缺陷。

基金项目

辽宁省教育厅科学研究经费项目(LG202010)。

参考文献

- [1] 杨继华, 董亮. 控制室防静电的合作设计[J]. 医药工程设计, 2013, 34(3): 40-42.
- [2] 刘金生, 肖永超, 丁军平. 仪器设备静电防护管理[J]. 中国个体防护装备, 2013(1): 53-56.
- [3] 张秀侠, 王姜维. 《防静电地板用冷轧钢带》行业标准解读[J]. 冶金标准化与质量, 2010, 48(3): 44-46.
- [4] Zhang, O., Hu, H., Hu, G. and Ou, Z. (2022) A New Method of Processing Magnesium Alloy Thin-Walled Tube by Direct Extrusion and Corrugated Equal Channel Angular Extrusion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **122**, 4029-4039. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10070-0>
- [5] 鲍键, 李全安, 陈晓亚, 张迁, 陈籽佚. 挤压镁合金的研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(10): 108-119.
- [6] 曾志朋, 刘晓飞, 张艳姝, 金泉林. 变形镁合金杯形件反挤压成形工艺研究[J]. 锻压技术, 2006, 31(6): 64-66.
- [7] Abdiyan, F., Khanlarkhani, A., Zahedi Asl, V., *et al.* (2021) Effect of Adding Y and Ce on Corrosion Behaviour of the Extruded ZK60 Magnesium Alloy. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, **57**, 1-6. <https://doi.org/10.1080/1478422X.2021.1976085>
- [8] 贾昌远, 霍元明, 何涛, 等. 镁合金从工艺到应用的发展研究现状[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(4): 61-65.
- [9] 梁海成. AZ80 和 ZK60 镁合金热变形行为及热挤压成形工艺研究[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- [10] Du, H., Li, F., Wang, Y., Li, C. and Chen, Z.Y. (2022) Modification of Grain Refinement and Texture Based on Pre-Upsetting AZ31 Mg Alloy in Interactive Alternating Forward Extrusion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **121**, 4805-4815. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09684-1>
- [11] Palacios-Trujillo, C., Victoria-Hernández, J., Hernández-Silva, D., Letzig, D. and García-Bernal, M.A. (2021) Superplasticity at Intermediate Temperatures of ZK60 Magnesium Alloy Processed by Indirect Extrusion. *Metals*, **11**, Article No. 606. <https://doi.org/10.3390/met11040606>
- [12] 王鹏, 李媛媛, 孙旭东, 董新飞. 镁合金材料的挤压成形工艺优化研究[J]. 世界有色金属, 2019(19): 293+295.
- [13] 赖松柏, 于登云, 陈同祥. 整体壁板结构弯曲成形分析的等效塑性模形[J]. 宇航学报, 2012, 33(6): 809-815.
- [14] 郭洪民, 刘旭波, 杨湘杰. 元胞自动机方法模拟微观组织演变的建模框架[J]. 材料工程, 2003(8): 23-27+48.
- [15] 李旭, 周清, 陈明, 王小芳. 热塑性成形过程微观组织模拟研究新进展[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(S1): 83-90.