

轻质高强镁合金机匣可分凹模模锻工艺

符韵, 张霞, 林军, 夏祥生, 宁海青

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 通过对新型镁合金材料 Mg-5Gd-4Y-0.3Zr 进行力学性能实验和成形工艺数值模拟分析, 对镁合金机匣成形工艺进行设计优化和开发参考。**方法** 采用 Gleeble-3500 热模拟试验机, 得到该镁合金材料在不同温度、不同应变速率下对应的真应力数据, 并建立材料模型, 应用在有限元模拟分析中。**结果** 经优化后的工艺方案能得到充型饱满、无质量缺陷的镁合金机匣锻件, 并通过工艺实验, 验证了该设计方案的可行性。**结论** 采用可分凹模模锻成形, 能够锻造出外形美观、强度达标的轻质镁合金机匣。

关键词: Mg-5Gd-4Y-0.3Zr 合金; 热模拟; 有限元模拟; 可分凹模

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.05.025

中图分类号: TG319 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)05-0166-05

Die Forging Process of Lightweight and High Strength Magnesium Alloy Casing with Separable Female Die

FU Yun, ZHANG Xia, LIN Jun, XIA Xiang-sheng, NING Hai-qing

(Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: This work aims to optimize design and process reference by mechanical experiment and finite element simulation of Mg-5Gd-4Y-0.3Zr magnesium alloy forming process. Gleeble-3500 thermal simulation instrument was used to obtain the true stress data at different temperature and strain rate of magnesium alloy. A material model was built to be used in finite element simulation. The process program after optimization could obtain magnesium alloy casing of full shape and good quality. Process experiments proved that the design was feasible. Lightweight magnesium alloy casing of intact shape and high strength can be formed with separable female die.

KEY WORDS: Mg-5Gd-4Y-0.3Zr alloy; thermal simulation; finite element simulation; separable female die

镁合金是目前工业上可应用密度最小的金属结构材料, 目前在航空航天、国防军工、汽车、3C 等领域均有广泛的应用^[1], 其中应用较广的变形镁合金主要包括 AZ, AM, ZK 系, 这几种系列的镁合金抗拉强度很难大于 400 MPa, 特别是 150 ℃ 以上时的耐热性能较低, 不能满足国防军工等领域用镁合金替代中等强度铝合金的需求。已有研究表明, 添加 Gd, Y 等稀土元素的 Mg-5Gd-4Y-0.3Zr 超高强镁合金具有比强度与比刚度较高、尺寸稳定与切削性能高等优

点^[2-4], 有较好的应用前景^[5], 其强韧化处理后达到了硬铝的力学性能, 是非主承力结构件实现减重要求的首选材料。

文中以镁合金机匣锻件为研究对象, 基于镁合金材料开展热模拟试验, 获得最佳成形工艺参数。针对机匣锻件的几何结构特征、镁合金材料在高温下的流动应力特征, 开展机匣体可分凹模成形工艺设计, 并通过模拟分析和试验验证, 最终获得无缺陷镁合金机匣锻件。

收稿日期: 2017-07-11

作者简介: 符韵 (1982—), 男, 工程师, 主要研究方向为精密塑性成形与数值模拟分析。

1 成形与工艺性分析

1.1 高强韧镁合金成形性分析

文中选用的高强韧镁合金为 Mg-5Gd-4Y-0.3Zr，采用 Gleeble-3500 热模拟试验机，通过等温模拟试验，获得的应力应变曲线见图 1，可知，该镁合金在热加工过程中的真应力-真应变曲线为动态再结晶型^[6-8]，并且

随着变形速率减小或变形温度升高，峰值流变应力及其所对应的应变值均降低，在 400 ℃ 的温度以下流动性能较低，而该合金的变形抗力明显增大。考虑到镁合金对成形温度、成形速率非常敏感，为避免产生裂纹缺陷，该镁合金最低成形温度不小于 350 ℃^[9-11]，变形速率控制在 0.003~0.02 s⁻¹，成形过程应力状态保持三向压应力状态，适宜在油压机上成形^[12-13]。

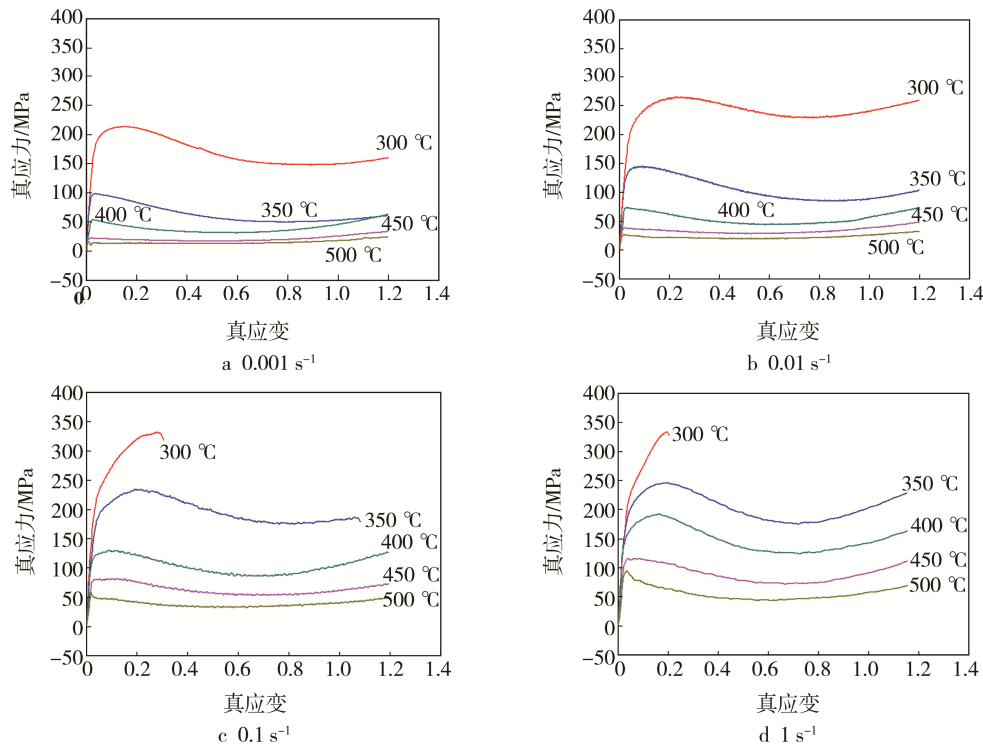


图 1 不同应变速率下 Mg-5Gd-4Y-0.3Zr 镁合金真应力-真应变曲线
Fig.1 True stress- strain curve of Mg-5Gd-4Y-0.3Zr magnesium alloy at various strain rates

1.2 机匣锻件特征分析

文中拟开发的镁合金机匣锻件见图 2，该锻件总长 283 mm、主体厚度为 40 mm、最大高度为 74.5 mm，该锻件在左右侧面及上表面有多个凸台及凹槽，且最小圆角为 0.5 mm。其沿轴向方向截面积分布规律见图 3，最大截面积与最小截面积之比为 1.8 以上，由该锻件几何特征得知，传统模锻工艺难以同时成形该锻件结构，必须选择其他的成形工艺^[14]。

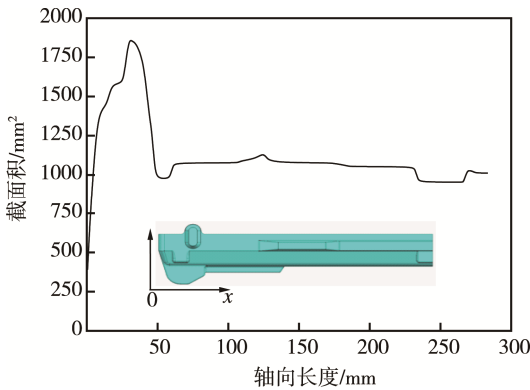


图 3 机匣锻件轴向方向截面积分布
Fig.3 The cross sectional area distribution of casing along the axis

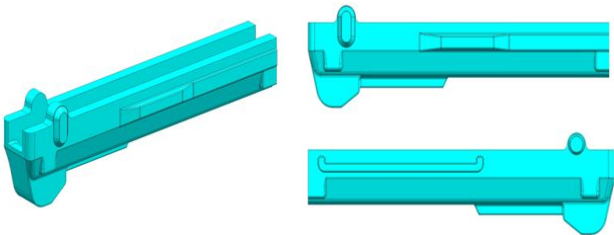


图 2 机匣锻件三维模型
Fig.2 Three dimensional model of casing piece

1.3 模具与工艺设计

为了实现在成形过程的三向压力状态，成形出机匣体左右凸台和凹槽，模具采用可分凹模结构设计，可分凹模模具见图 4。可以看出，凹模分为凹模块及

凹模圈,同时凹模块与凹模圈成一定斜面,当顶料杆顶出时,凹模块沿着斜面上升并分离,可使锻件易于脱模。

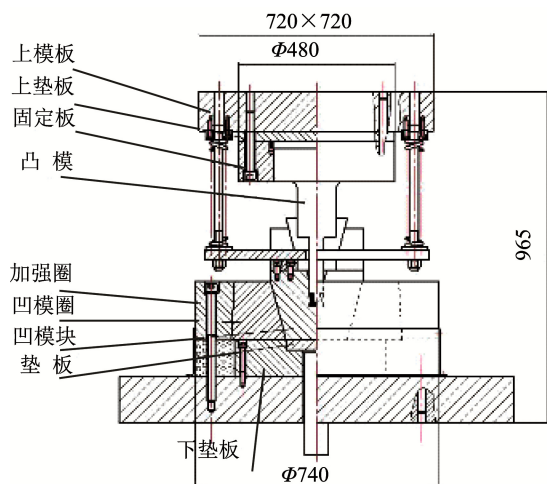


图4 可分凹模模具
Fig.4 Separable female die

2 成形工艺模拟分析

2.1 有限元模拟参数设置

运用数值模拟软件对机匣锻造工艺进行有限元模拟分析,在模拟软件中将坯料设定为刚塑性材料模型,其流动应力模型采用热模拟试验获得的数据;坯料和模具之间传热系数设定为为 $11 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;凸模下行速度为 20 mm/s ;左右凹模、凸模、坯料的温度

分别为 $653, 623, 676 \text{ K}$;坯料与模具之间的摩擦因数为 $0.15^{[15-16]}$ 。下面对2种工艺方案开展模拟分析。

2.2 棒料直接成形方案分析

首先对棒料直接成形方式进行分析,计算的坯料尺寸为 $\Phi 38.5 \text{ mm} \times 281 \text{ mm}$,有限元模拟结果见图5。可以看出,当压下量达到 20 mm 时,坯料已将模具侧面凸台基本完整充型,而左边大头部分则没有完整充型,在这种情况下,沿着凸台处的坯料将会发生剪切变形(见图5b);在压下量达到 35 mm 时(此时还有 2 mm 压下量),为了充满型腔,坯料产生了大规模的体积转移过程中,从而产生折叠(见图5c)。

通过棒料直接成形模拟,获得了坯料流动方式,文中拟设计的机匣锻造工艺流程如下:下料→镦头→预成形→终成形→切边,下面对新工序可行性开展模拟分析。

2.3 新工艺方案模拟分析

新工艺成形过程的坯料过程演变见图6,坯料几何形状演变过程来看,镦头工序坯料演变过程较为简单,不会产生折叠等工艺缺陷。文中仅对预成形工序和终成形工序的坯料流动过程开展分析,预成形和终成形模拟结果见图7和图8。通过模拟可以看出,坯料在成形过程中,流动稳定,无成形缺陷产生。预成形、终成形工序的位移-载荷分析结果见图9。通过模拟计算可知,预成形载荷最大为 590 t 、终成形最大载荷最大为 820 t 。

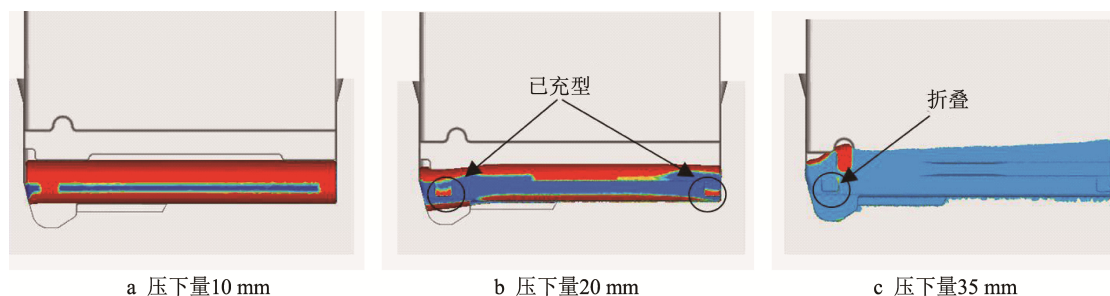


图5 挤压成形过程模拟分析
Fig.5 Simulation of extrusion forming process

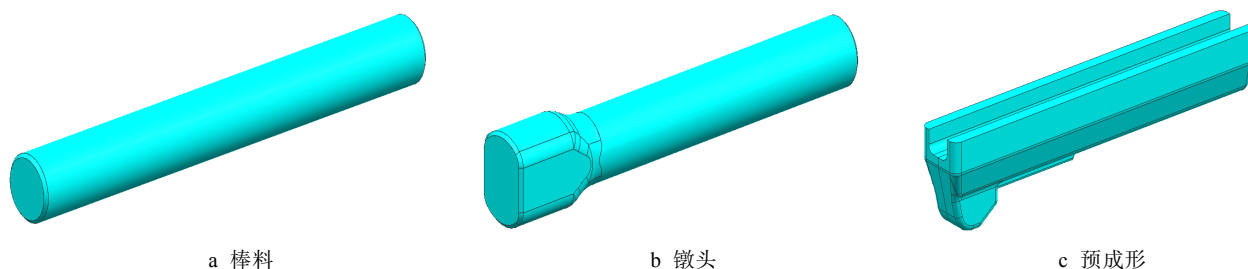


图6 坯料几何形状演变
Fig.6 Evolvement of blank shape

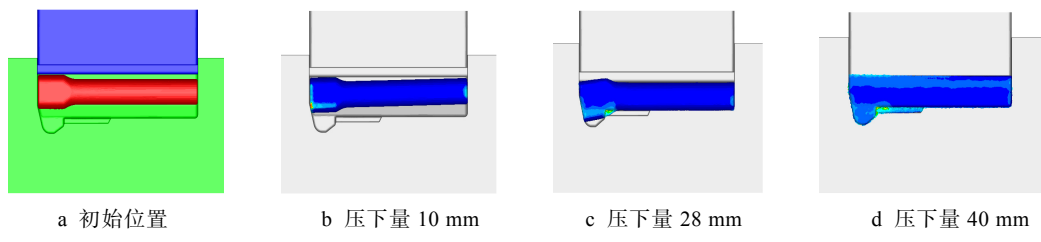


图 7 预成形坯料几何形状演变
Fig.7 Evolvement of blank shape in performing

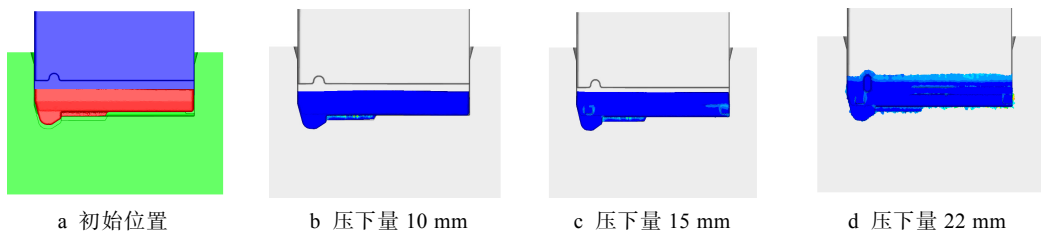


图 8 终成形坯料几何形状演变
Fig.8 Evolvement of blank shape in final forming

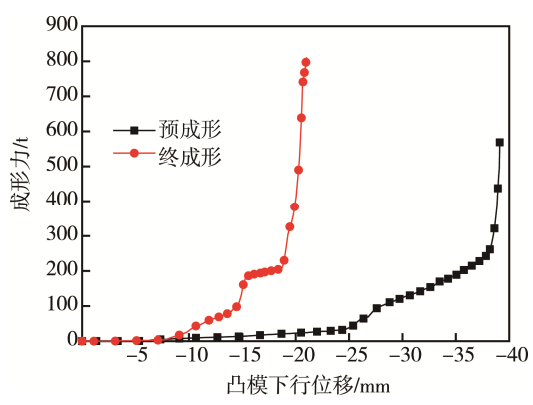


图 9 预成形、终成形工序成形载荷
Fig.9 The forming load of performing and final forming

3 工艺试验

以模拟分析为参考，设计开发了成形模具，制定了成形参数。机匣体预成形、终成形分别在 800, 1000 t 油压机上进行，获得的机匣样件见图 10。工艺试验表明，终成形的机匣样件结构完整，尺寸准确，表面光洁，物理性能均达到了用户要求。采用可分凹模模具设计，成形镁合金机匣体的工艺方法可行，充分满足设计要求。



图 10 工艺试验获得的机匣样件
Fig.10 Experimental trial of casting part

4 结论

- 1) 通过有限元模拟，可以准确预测可分凹模成形工艺过程的坯料流动特征，为工艺优化设计提供有价值的参考。
- 2) 采用可分凹模模锻成形，可以有效降低锻件机械加工量，节省原材料，明显提高生产效率，节约生产成本。
- 3) 采用可分凹模模锻实现了镁合金机匣体快速精密成形，成功解决了其应变速率敏感性、塑性流动阻力大、成形较困难的问题。

参考文献：

[1] 刘正, 张奎, 曾小勤. 镁基轻质合金理论基础及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
LIU Zheng, ZHANG Kui, ZENG Xiao-qin. Magnesium Matrix of Lightweight Alloy Theoretical Basis and Application[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2002.

[2] 李克杰, 李全安. Mg-12Gd-2Y-1.5Sm-0.5Zr 合金中镁稀土相形成机理[J]. 热加工工艺, 2012, 41(5): 27—29.
LI Ke-jie, LI Quan-an. Formation of Mg-RE Phases in Mg-12Gd-2Y-1.5Sm-0.5Zr Alloy[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(5): 27—29.

[3] 桑英明, 郭永春, 李建平, 等. Mg-Gd-Y 系合金 400 ℃ 衡相图的计算与验证[J]. 热加工工艺, 2012, 41(18): 8—11.
SANG Ying-ming, GUO Yong-chun, LI Jian-ping, et al. Calculation and Verification for Mg-Gd-Y Alloy Equilibrium Phase Diagram at 400 ℃[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(18): 8—11.

[4] 夏祥生, 张帷, 王长朋, 等. 稀土镁合金热压缩流变应力修正及热变形行为[J]. 精密成形工程, 2013,

- 5(4): 1—6.
XIA Xiang-sheng, ZHANG Wei, WANG Chang-peng, et al. Correction of Hot Compression Flow Stress and Hot Deformation Behavior of Rare Earth Magnesium Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013, 5(4): 1—6.
- [5] 夏祥生, 李兴刚, 马鸣龙, 等. 粗晶 Mg-6.8Gd-4.5Y-1.1Nd-0.5Zr 合金高温变形行为[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(9): 30—35.
XIA Xiang-sheng, LI Xing-gang, MA Ming-long, et al. High Temperature Deformation Behavior of Coarse Grain Mg-6.8-4.5Y-1.1Nd-0.5Zr Alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(9): 30—35.
- [6] XIA Xiang-sheng, CHEN Qiang, ZHANG Kui, et al. Hot Deformation Behavior and Processing Map of Coarse-Grained Mg-Gd-Y-Nd-Zr Alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 587: 283—290.
- [7] HE S M, ZENG X Q, PENG L M, et al. Precipitation in a Mg-10Gd-3Y-0.4Zr (wt.%) Alloy During Isothermal Ageing at 250 °C[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2006, 421: 309—313.
- [8] 张新明, 陈健美, 邓运来, 等. Mg-Gd-Y-(Mn, Zr)合金的显微组织和力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(2): 219—227.
ZHANG Xin-ming, CHEN Jian-mei, DENG Yun-lai, et al. Microstructures and Mechanical Properties of Mg-Gd-Y-(Mn, Zr) Magnesium Alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(2): 219—227.
- [9] ASL K M, TARI A, KHOMAMIZADEH F. Effect of Deep Cryogenic Treatment on Microstructure, Creep and Wear Behaviors of AZ91 Magnesium Alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2009, 523(1/2): 27—31.
- [10] HE S M, ZENG X Q, PENG L M, et al. Precipitation in a Mg-10Gd-3Y-0.4Zr (wt.%) Alloy During Isothermal Ageing at 250 °C[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2006, 421: 309—313.
- [11] 邓磊, 夏巨谔, 王新云, 等. 机匣多向精锻工艺研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(7): 869—872.
DENG Lei, XIA Ju-chen, WANG Xin-yun, et al. Multi-direction Precision Forging for Casting[J]. The Chinese Mechanical Engineering, 2009, 20(7): 869—872.
- [12] 黄延平. 等温精密成形镁合金上机匣新工艺[J]. 锻压技术, 2008, 33(6): 33—35.
HUANG Yan-ping. New Process of Isothermal Precision Forging of Magnesium Alloy Engine Case[J]. Forging and Stamping Technology, 2008, 33(6): 33—35.
- [13] 薛克敏, 郝南海, 徐福昌, 等. MB15 镁合金上机匣的等温精锻工艺[J]. 中国有色金属学报, 1998, 8(1): 7—10.
XUE Ke-min, HAO Nan-hai, XU Fu-chang, et al. Isothermal Precision Forging Process of MB15 Magnesium Alloy Casting[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1998, 8(1): 7—10.
- [14] 刘川林, 曹洋, 黄美平, 等. 机匣等温成形工艺数值模拟[J]. 制造技术与实践, 2004, 25(4): 35—38.
LIU Chuan-lin, CAO Yang, HUANG Mei-ping, et al. The Isothermal Forming Process Simulation of Casting[J]. The Manufacturing Technology and Practice, 2004, 25(4): 35—38.
- [15] MUKAI T, WATANABE H, HIGASHI K. Grain Refinement of Commercial Magnesium Alloys for High-strain-rate-superplastic Forming[C]// Materials Science Forum, 2000, 350/351: 159—170.
- [16] KIM H, YAMANAKA M. Fe Simulation as a Must Tool in Cold/Warm Forging Process and Tool Design[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 98(2): 143—149.