

文献编号: 1004-0609(1999)03-0531-05

上机匣筋部成形过程的数值模拟^①

郝南海¹ 薛克敏² 吕炎²

(1. 太原重型机械学院 压力加工系, 太原 030024; 2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 采用刚塑性有限元法对径向筋条的成形过程进行了模拟, 结果表明, 锻造时, 金属首先充填轴套部分, 轴套部分基本充满后才开始充填筋部, 且筋条的充填顺序为由里到外, 外侧顶部为最后充填处。在变形终了阶段, 腹板与轴套交界处出现剧烈的剪切流动, 有可能造成组织缺陷。根据模拟结果, 锻造时采取了特殊措施, 成功地锻制出上机匣锻件, 锻件的力学性能、显微组织和尺寸精度均符合要求。

关键词: 塑性成形; 有限元法; 数值模拟

中图分类号: TG319

文献标识码: A

上机匣为某新型直升机传动系统中的关键零件, 其锻件形状如图1所示, 材料为MB15镁合金。该件几何形状复杂, 沿周向有不均匀的体积分布, 出于减重及耐环境腐蚀的原因, 径向筋条窄而高, 且不允许通过机加工修形, 锻造成形十分困难。刚塑性有限元法由Lee和Kobayashi于1973年提出^[1], Park和Kobayashi首先将其用于三维分析^[2]。对于复杂形状锻件成形过程的三维模拟, 由于问题的边界条件复杂, 节点多, 计算量大, 网格自动划分技术有待完善, 故文献报道尚不多见^[3~5]。本文采用刚塑性有限元法对上机匣锻造时径向筋条的成形过程进行模拟分析, 为上机匣成形工艺方案的制订提供依据。

1 有限元基本公式

刚塑性材料变形问题可用下面的变分方程表示^[6]

$$\int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + \int_V k \dot{\epsilon}_V \delta \dot{\epsilon}_V dV - \int_{S_F} \mathbf{F} \delta \mathbf{v} dS = 0 \quad (1)$$

式中 k —引入体积不变条件的惩罚因子, 本

文取 10^6 ;

$\bar{\sigma}$ —等效应力, $\bar{\sigma} = [3/2 \sigma_{ij} \sigma_{ij}]^{1/2}$;

$\dot{\epsilon}$ —等效应变速率, $\dot{\epsilon} = [2/3 \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}]^{1/2}$;

$\dot{\epsilon}_V$ —体积应变速率, $\dot{\epsilon}_V = \dot{\epsilon}_{ii}$;

$\mathbf{F}$ —外力矢量;

$\mathbf{v}$ —速度矢量;

工件与模具接触面上的摩擦力按常用摩擦力模型处理

$$\mathbf{f} = -m \tau \left[\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left[\frac{v_R}{av_D} \right] \right] \mathbf{t} \quad (2)$$

式中 m —摩擦因子;

τ —材料剪切屈服应力;

v_R —工件与模具之间的相对滑动速度;

v_D —模具速度;

a —比模具速度小几个数量级的常数, 取 10^{-5} ;

$\mathbf{t}$ —接触面上相对滑动速度的单位矢量

经有限元离散后, 式(1)变成一组以节点速度为未知量的非线性方程组

$$\mathbf{G}(\tilde{\mathbf{u}}) = \tilde{\mathbf{0}} \quad (3)$$

采用 Newton-Raphson 法求解

① 收稿日期: 1998-05-14; 修回日期: 1998-08-25 郝南海(1964-), 男, 副教授, 博士

$$\frac{\partial G(\tilde{u})}{\partial \tilde{u}} \Big|_n \Delta \tilde{u}_{n+1} = - G(\tilde{u}) \Big|_n \quad (4)$$

$$\tilde{u}_{n+1} = \tilde{u}_n + \beta \Delta \tilde{u}_{n+1} \quad (5)$$

β 为减速因子, $0 < \beta \leq 1$ 。

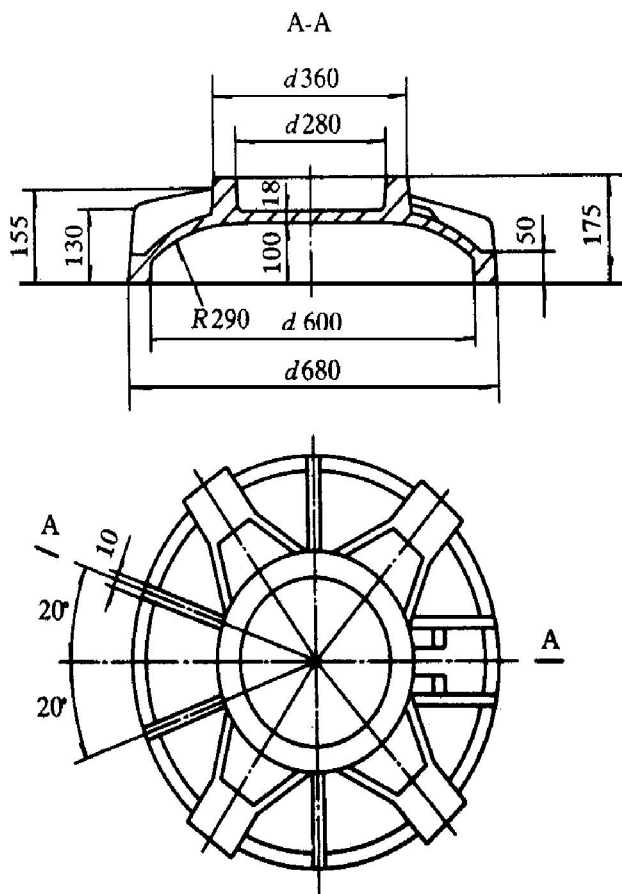


图1 上机匣锻件图

Fig. 1 Drawing of upper case forging

2 模拟方案

为简化计算, 截取包含径向筋条在内的扇形区域进行分析, 将扇形区域两侧面设定为金属切向流动的分流面, 沿其法线方向设置位移约束, 模具形状如图2所示。镁合金于 360 °C 锻造时, 流动应力取 25 MPa^[7], 由于是等温锻造不考虑温度的影响。锻造时采用水基石墨润滑, 摩擦因子取 0.2^[8]。由于对称, 取模型的 1/2 进行分析。初始坯料为饼坯, 直径 680 mm, 厚度 60 mm。

在变形初期, 从上模开始接触坯料到上模与坯料贴合止, 坯料的变形基本上是一个纯弯曲过程, 此阶段只有少量金属充填型腔。模拟计算时, 将这一变形阶段略去, 以弯曲后的坯

料为原始坯料进行计算。

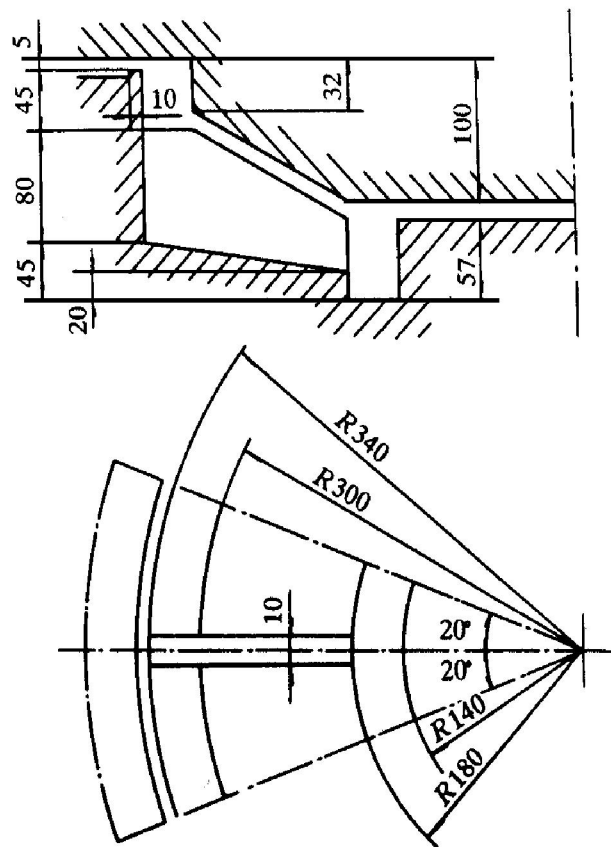


图2 模具尺寸

Fig. 2 Die dimensions

模拟计算时, 将下模固定, 上模以 1 mm/s 的速度向下移动。采用逐步增量计算的方法, 时间步长取 1 s。

为减少计算过程中网格与模具的干涉以及延缓网格的蜕化, 划分网格时对模具过渡圆角处进行了适当的网格细化。初始坯料被离散成 832 个八节点六面体单元和 1215 个节点。

3 飞边部处理

锻造时, 金属一方面充填模腔, 一方面由飞边桥口处流出形成飞边。模拟计算时, 若将飞边部分列入计算范围, 不仅计算量增大, 且由于飞边形状难以描述, 处理较困难。本文在模拟计算时将飞边部分沿飞边桥部出口处切除, 对于圆盘类锻件, 把切下的部分视为一受内压圆环, 其内压力按下式计算^[9]:

$$p = 1.1 \sigma_s \ln D/d \quad (6)$$

式中 p — 径向内压力;

σ_s —材料屈服应力;
 D —飞边外径;
 d —飞边内径

将此压力的反力作为外力施加于工件飞边桥部的出口处, 计算过程得以简化(图 3)。

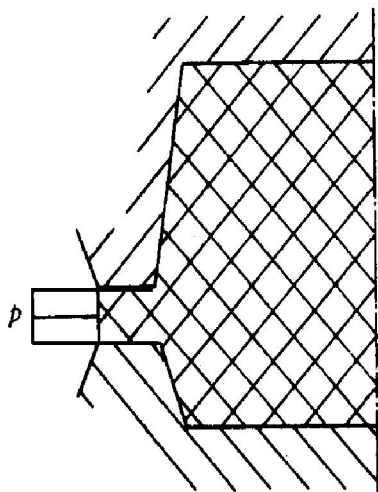


图 3 飞边部简化计算

Fig. 3 Simplified calculation on flash

4 模拟结果与分析

图 4 为锻造过程中不同时刻的有限元计算网格, 整个计算过程中共进行了 9 次网格重划^[10]。由模拟结果可以看出: 锻造时, 金属首先充填轴套部分, 同时向外流动并逐渐形成飞边; 轴套部分基本充满后才开始充填筋部, 且筋条的充填顺序为先里后外, 外侧顶部为最后充填处, 若压机吨位不足或坯料较薄, 该处有可能充不满。值得注意的是, 在变形终了阶段, 由于腹板较薄, 加之模腔已基本充满, 金属大量流向飞边, 腹板与轴套交界处出现剧烈的剪切流动, 将造成涡流、穿流等组织缺陷存在。

筋条成形时金属的流动行为是由其应力场决定的。模压时, 坯料轴向受压, 金属沿径向向外流动, 由于受摩擦作用的影响, 轴向压应力由外向内逐渐增大, 在其它条件相近的情况下, 中心部位易于满足屈服准则, 故中心部位的金属先变形, 形成由里到外的充填顺序。

为避免腹板与轴套交界处出现组织缺陷, 应设法降低腹板处金属径向流动速度。可在预

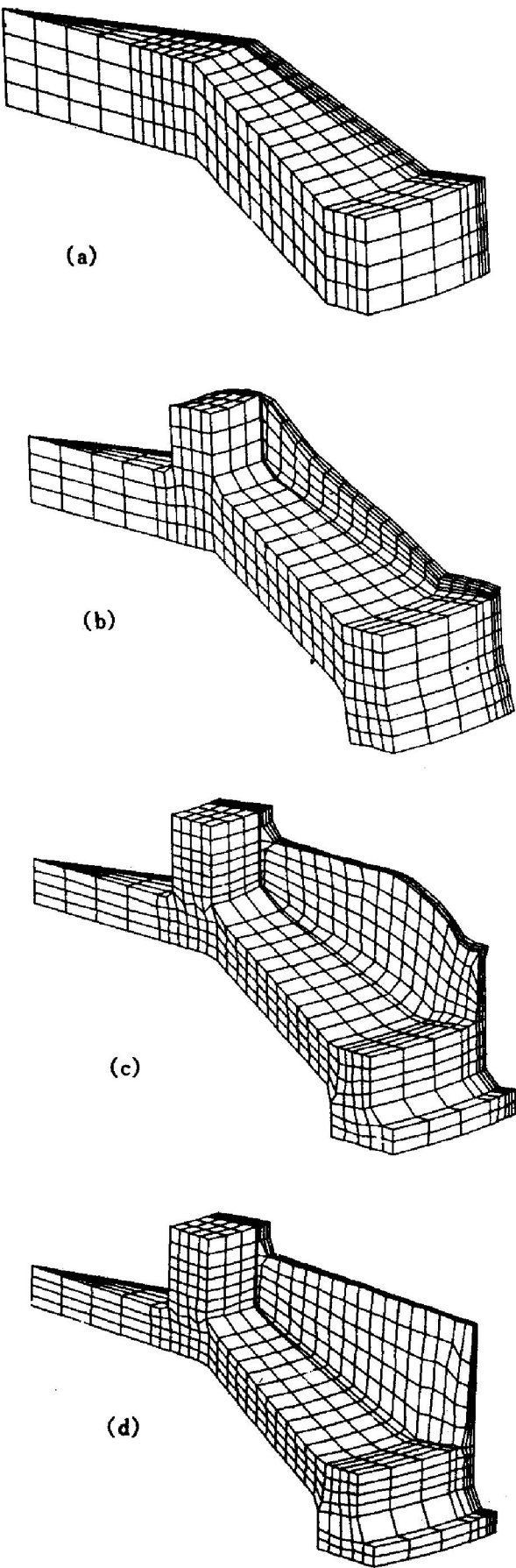


图 4 不同压下量下的有限元网格

Fig. 4 FEM mesh with different reductions
(a) —0 mm; (b) —16.8 mm;
(c) —29.4 mm; (d) —33.6 mm

锻后将锻件中心部位的连皮切除,为终锻时腹板处金属增加流动通道,改善金属流线分布,这样不仅可降低腹板处金属的径向流速,还能减小锻造变形载荷(图5)。

鉴于筋条外侧是最后充填处,当设备吨位不足时,可采取特殊加压方式对该部位施压,保证筋条顺利成形。

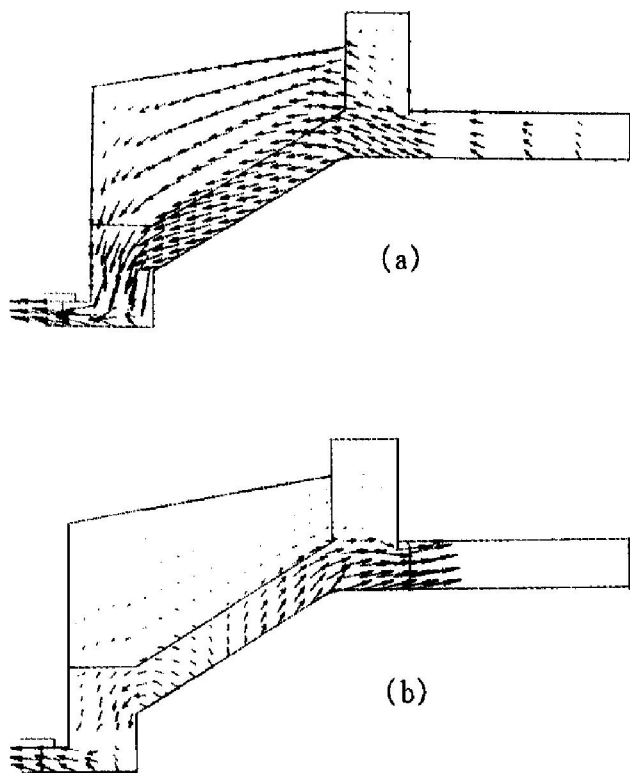


图5 筋条中心面速度分布

Fig. 5 Distributions of velocity on central plane of rib

(a) —Before was punched; (b) —After was punched

根据模拟结果,制订了合理的锻造工艺方案,成功地锻制出上机匣锻件(图6)。锻件各部分轮廓清晰,充填饱满,表面质量及形状尺寸均符合要求。经力学性能及高低倍组织性能检查,锻件横向、纵向力学性能均达到或超过规定指标,锻件各部位晶粒细小均匀,流线沿锻件外形分布,无穿流、涡流等组织缺陷存在^[11]。

5 结论

采用刚塑性有限元法模拟了上机匣筋条的成形过程,模拟结果表明,对于上机匣成形,



图6 上机匣锻件照片

Fig. 6 Photo of upper case forging

筋条外侧顶部为最后充填处,应采取措施保证该处完整充填。在变形终了阶段,腹板与轴套交界处出现剧烈的剪切流动,应在预锻后切除中心连皮以避免出现穿流等组织缺陷。

REFERENCES

- 1 Lee C H and Kobayashi S. Trans ASME, 1973, 95: 865.
- 2 Park J J and Kobayashi S. Int J Mech Sci, 1984, 26: 165.
- 3 Yoon J H and Yang D Y. Int J Mech Sci, 1990, 32: 277.
- 4 Takemasu T, Vazquez V, Painter B *et al.* Journal of Materials Processing Technology, 1996, 59: 95.
- 5 Altan T and Vazquez V. Annals of CIRP, 1996, 45: 599.
- 6 Kobayashi S, Oh S I and Altan T. Metal Forming and the Finite Element Method. New York: Oxford University Press, 1989: 126.
- 7 Su Zuwu(苏祖武) and Zhang Zhiwen(张志文). Forging Technology for Nonferrous Metals(有色金属锻造). Beijing: Defence Industry Press, 1979: 86.
- 8 Xia Juchen(夏巨谌), Ding Yongxiang(丁永祥) and Hu Guoan(胡国安). Closed Die Forging(闭式模锻). Beijing: Mechanical Industry Press, 1993: 229.
- 9 Wang Zhongren(王仲仁), Guo Dianjian(郭殿俭) and Wang Tao(汪涛). Mechanics of Plastic Forming(塑性成形力学). Harbin: Press of Harbin Institute of Technology, 1989: 102.
- 10 Hao Nanhai(郝南海). PhD thesis(博士学位论文). Harbin: Harbin Institute of Technology, 1997: 27.
- 11 Xue Kemin(薛克敏), Hao Nanhai(郝南海), Xu Fuchang

Numerical simulation on forming process of rib portion of upper case

Hao Nanhai¹, Xue Kemin², Lu Yan²

*1. Department of Metal Forming, Taiyuan Heavy Machinery
Institute, Taiyuan 030024, P. R. China*

*2. School of Materials Science and Engineering,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China*

Abstract: The forming process of radial rib of upper case is simulated by the rigid plastic finite element method. It can be seen that, in the forming process, the metal fulfill the axial ring first, then fulfill the rib. The sequence of metal fulfillment is from the inner to the outer and the upper portion of the outer is fulfilled lastly. In the final stage of forming, the severe shear flow presents at the joint portion of web and axial ring which is of the possibility for generating the defects of microstructure. According to the simulating result, some special means are adopted and the forging of upper case is conducted successfully. Both the mechanical properties, microstructure and the accuracy of forging satisfy the requirements of the user

Key words: plastic forming; finite element method; numerical simulation

(编辑 黄劲松)