

胎模锻制坯的塑性成形过程仿真

苏 芳^{1,2}, 薛 峰¹, 李璟莉^{1,2}, 郭爽爽^{1,2}

(1. 太原重工股份有限公司 技术中心, 山西 太原 030024; 2. 太重(天津)滨海重型机械有限公司 技术中心, 天津 300452)

摘要: 为了准确模拟胎模锻制坯的塑性成形过程, 根据塑性成形理论总结了影响金属塑性成形的主要因素为成形过程中的坯料温度状态、变形速度强度、坯料所用材料的变形抗力和接触摩擦。选择适合塑性成形计算的刚黏塑性有限单元以及节约计算资源的 1/4 结构模型, 对已有压机的镦粗、冲孔工作过程进行有限元仿真, 将仿真计算结果与实际测量数据进行对比, 验证了仿真方法的准确性。最后, 使用该有限元仿真方法对胎模锻制坯的塑性成形过程进行仿真, 确定镦粗、冲孔、切底去连皮和扩孔等各工艺步骤所需的成形时间分别为 5.8、9.5、2.5 和 20 s, 最大成形力分别为 12.63、35.00、3.44 和 5.08 MN, 镦粗、冲孔及切底去连皮后坯料的表面温度分别为 977、715 和 666 °C。研究结果为压机工艺设计提供了技术依据。

关键词: 胎模锻; 塑性成形; 热锻; 液压机; 温度场

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.04.003

中图分类号: TG375; TG306

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 04-0013-06

Plastic forming process simulation of loose tooling forging for a blank

Su Fang^{1,2}, Xue Feng¹, Li Jingli^{1,2}, Guo Shuangshuang^{1,2}

(1. Technology Center, Taiyuan Heavy Industry Co., Ltd., Taiyuan 030024, China;

2. Technology Center, TZ (Tianjin) Binhai Heavy Machinery Co., Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: In order to accurately simulate the plastic forming process of blank making in loose tooling forging, according to the plastic forming theory, the main factors affecting the metal plastic forming were summarized as the temperature state of blank, strength of deformation speed, deformation resistance of material used for blank and contact friction during the forming process. The rigid-viscous-plastic finite element suitable for the plastic deformation calculations was selected, and a quarter structural model was used to save the computing resources. Then, the upsetting and punching processes of an existing press were simulated by finite element, and the simulated calculation results and the actual measurement data were compared to verify the accuracy of the simulation method. Finally, the plastic forming process of blank making in loose tooling forging was simulated by the finite element simulation method. The required forming time and the maximal forming forces during the upsetting, punching, bottom-cutting and flash removal and hole expansion processes are obtained by statistics, which are 5.8, 9.5, 2.5 and 20.0 s, and 12.63, 35.00, 3.44 and 5.08 MN, respectively, as well as the surface temperatures of blank after upsetting, punching and bottom-cutting and flash removal are 977, 715 and 666 °C, respectively. The study results provide a technical basis for the process design of press.

Key words: loose tooling forging; plastic forming; hot forging; hydraulic press; temperature field

胎模锻是介于模锻和自由锻之间的锻造方法, 锻造时使用可移动的简易模具对坯料进行成形锻造^[1]。兼具模锻和自由锻的特点, 模具成本低, 设计灵活, 工艺性好。胎模锻造中的几个重要工艺过程如镦粗、冲孔、切底是典型的塑性成形过程。在

高温高压的成形条件下, 坯料的几何尺寸、热力学状态、界面摩擦条件及变形时长等多因素耦合作用, 使得成形力的理论预测变得极为困难。目前工业生产过程中, 成形力的确定主要依靠工艺人员的经验积累。随着数值模拟技术的发展, 基于有限元方法的塑性成形仿真能够有效模拟变形过程中的力学响应, 包括全过程的成形力分布、应力应变场演化以及温度场变化等关键参数, 为工艺优化提供了新的技术手段。康海鹏等^[2]仿真了游车提环的胎模锻成形过程, 优化了锻造工艺流程; 张振等^[3]对牵引支座锻件进行数值模拟分析, 验证了是否存在锻造缺陷; 文献 [4] ~ 文献 [8] 也对其他各类锻件进行

收稿日期: 2024-06-14; 修订日期: 2024-09-18

基金项目: 天津市科技领军(培育)企业认定及支持项目(20YDLZGX00290); 天津市“项目+团队”重点培养专项(XC202050)

作者简介: 苏 芳(1985-), 女, 硕士, 高级工程师

E-mail: sufang@tz.com.cn

锻造模拟, 为热加工提供仿真结果以优化工艺流程。

本文分析讨论了影响金属塑性成型的主要因素并提出仿真时的相应处理方法, 对钢锭胎模锻制坯的镦粗、冲孔、切底去连皮、扩孔这 4 个主要工艺步骤进行连续的塑性成型过程仿真。

1 胎模锻制坯工艺过程

根据技术要求, 坯料使用材料牌号为 GCr15SiMn 的优质高强度钢, 具有较高的抗压强度和疲劳极限。材料成分为 (% , 质量分数): 碳 0.95, 锰 0.9, 硅

0.46, 磷 0.02, 硫 0.018, 铬 1.55, 镍 0.23, 铜 0.2。下料规格为: 圆柱直径为 $\Phi 500$ mm, 高度为 790 mm。胎模锻制坯锻件为环形件, 外径为 $\Phi 660$ mm, 内径为 $\Phi 300$ mm, 高度为 550 mm。制坯工艺流程为: 上料—对中—镦粗—对中夹紧并抬起—下砧换位—冲孔—顶出—对中夹紧并抬起—下砧换位至切底工位—切底去连皮—扩孔—取料。其中, 塑性成型过程为: 镦粗—冲孔—切底去连皮—扩孔。为减小冲孔及扩孔时的成形力, 冲头均带有小倾角并采用石墨乳润滑。成形过程如图 1 所示。

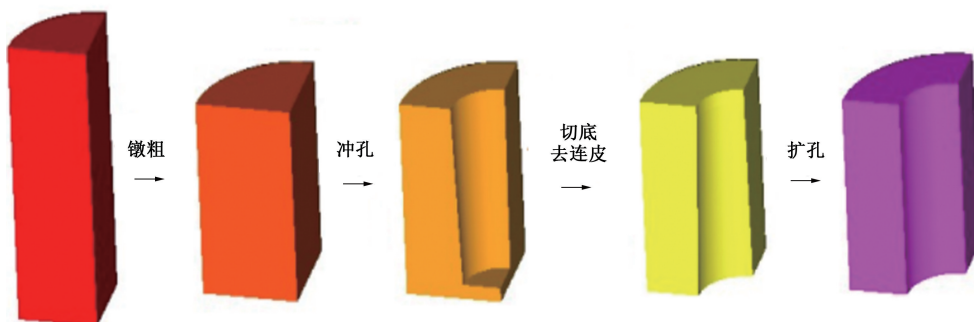


图 1 胎模锻制坯过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of blank making in loose tooling forging process

2 胎模锻制坯的塑性成型仿真方法

2.1 影响塑性成型的关键因素

可以根据塑性变形的应力表达式来分析影响塑性成型的因素。根据金属塑性成型理论^[9], 处于塑性变形状态的物体某一点的应力表达式见式 (1), 其形变过程满足边界条件和体积不变条件。

$$\sigma_p = \alpha b \cdot \varphi_1(\Phi \sigma \lambda_p) \quad (1)$$

式中: σ_p 为处于塑性变形状态的某点的应力; α 为无因次量; b 为坯料的变形抗力; $\varphi_1(\Phi \sigma \lambda_p)$ 为与 Φ 、 σ 、 λ_p 这 3 个自变量有关的函数; Φ 为变形率; σ 为平均应力; λ_p 为坯料变形速度强度。

无因次量的取值依应力状态的种类不同而在 $1 \sim \sqrt{3}/2$ 之间变化, 对于有限元计算来说, 应力状态由程序根据前一步的计算自动提供, 无需特别处理。坯料的变形抗力 b 需要根据材料实际统计数据设置, 作为仿真计算的输入条件。由于塑性变形过程存在温度变化且坯料各点温度也并非一致, 而变形抗力的取值与温度密切相关, 因此, 变形抗力的设置需考虑温度的影响。变形率 Φ 是描述物体形状变化程度的指标, 定义为物体在变形过程中各个部分相对于初始状态变形量的比值, 是位移的偏导数,

因此也是无因次量。其在仿真时无需设置, 也是由程序自动计算。但变形率与变形抗力存在相关性^[10-12], 所以, 坯料变形抗力的设定除了要考虑温度外还要考虑变形率。坯料变形速度强度 λ_p 是变形速度对时间的导数, 与模具移动速度相关, 设置模具参数后由程序自动计算。

边界条件为接触条件, 包括对坯料变形边界的限制及接触摩擦的设置。坯料变形边界的限制可以通过模具参数设置; 接触摩擦采用设定摩擦模型和参数后由计算程序自动判定求解。体积不变条件是指在塑性成型过程中忽略弹性变形的部分, 即在 3 个方向上应变之和为 0。因此, 分析时选用刚黏塑性有限单元, 这类单元的特点是假定体积不可压缩, 避免了几何非线性问题且求解速度较快。

综上, 对有限元仿真计算来说, 准确建立上下模具、初始坯料模型并选定单元后, 影响胎模锻塑性成型的因素为成形过程中的坯料温度状态、变形速度强度、坯料所用材料的变形抗力及接触摩擦。

2.2 塑性成型仿真各参数的设置

坯料的温度状态主要取决于坯料初始温度和成形过程中坯料与周围环境的热交换情况, 此外形变过程也会造成坯料自身温度的变化。初始温度较易确定, 根据车间提供下料初始温度为 1200 °C 即可; 与周围

环境的热交换可以通过设置坯料热传导系数和辐射率值并根据实际情况设置上下模(砧板或冲头)温度(通常为 $100\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$)、周围环境温度($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)和适当的热交换系数来模拟成形过程中的温度场。各种工况下的热交换系数是根据同等条件下现有压机工作过程中红外温度传感器测得的坯料温度来确定的。

坯料变形速度强度与自身材料属性相关,也与模具移动速度相关。仿真计算根据实际工况分别定义模具移动速度及方向,由系统程序自动判断坯料变形速度强度。热锻时坯料变形抗力与温度及变形率相关。坯料所用材料为 GCr15SiMn 钢,根据试验测量数据并进行曲线拟合,其在 $800\sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且变形率 Φ 在 $0.04\sim 1.60$ 时的变形抗力如图2所示。

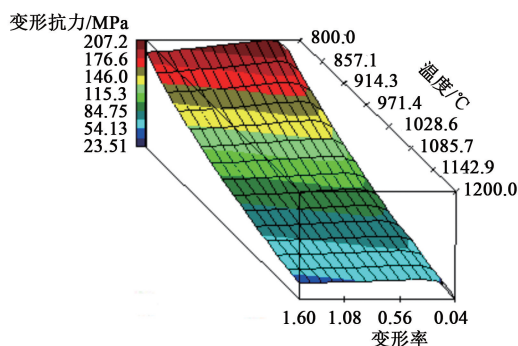


图2 GCr15SiMn 钢的变形抗力

Fig. 2 Deformation resistance of GCr15SiMn steel

在镦粗成形阶段,坯料与模具之间为干摩擦状态,冲孔及扩孔工序采用石墨乳作为润滑介质。数值模拟中,针对两种摩擦工况(干摩擦与润滑摩擦)统一采用修正库伦摩擦模型进行表征,其关键参数通过实际压机测试数据标定获得,并作为仿真计算的初始边界条件。值得注意的是,随着变形过程的持续进行,接触界面处于动态演变状态——新生接触面不断形成,接触条件实时更新。该复杂摩擦行为通过有限元求解器的自适应接触算法实现自动识别与计算。

2.3 仿真方法的准确性验证

将上述有限元网格模型、材料本构参数及摩擦边界条件等关键参数作为前处理数据导入塑性成形仿真软件 FORGE。对工厂 20 MN 压机实际工况下的镦粗-冲孔过程开展数值模拟研究,并将仿真结果与生产现场采集的工艺数据进行对比验证。分析显示,模拟计算获得的坯料温度场演变规律与实测数据高度吻合。图3为镦粗结束时坯料的温度场分布云图,其外表面预测温度区间为 $935\sim 985\text{ }^{\circ}\text{C}$,与图4所示的在实际生产过程中红外测温仪记录的 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 实测温度值完全匹配,充分验证了仿真模型的可靠性。

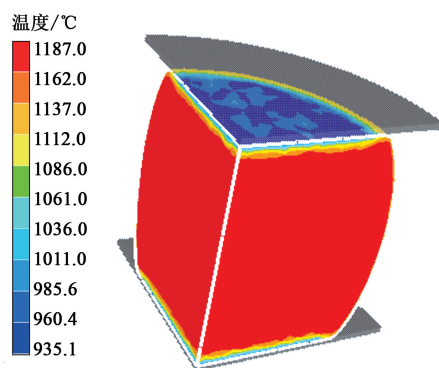


图3 镦粗结束时坯料温度的仿真结果

Fig. 3 Simulation result of blank temperature at end of upsetting



图4 坯料镦粗结束时的状态

Fig. 4 State of blank at end of upsetting

冲孔成形过程中设定的最大冲孔力为 20 MN,初速度为 $50\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,仿真计算的冲头高度随时间的变化情况同实际情况几乎一致。图5为仿真计算冲孔过程中的冲头高度随时间的变化曲线,图6为坯料冲孔现场图。冲孔前期速度较快,前10 s留底约45 mm(图5中时间为10.02 s、冲头高度为45.078 mm),最终留底为36 mm,需要37 s。现场实测冲孔的最终留底约为40 mm。因此,可以使用上述有限元法仿真胎模锻制坯的成形过程。

3 胎模锻制坯的塑性成形过程仿真

3.1 镦粗

为节约计算资源,仿真使用1/4结构模型并施加两个对称面约束。镦粗时设定上模具速度为 $50\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,高度为790 mm下行至500 mm。求解并绘制出成形力-时间曲线如图7所示。可以看出,镦粗过程耗时5.8 s。由于使用1/4结构模型,计算所得数值的4倍即为成形力,因此,镦粗力 $F_1 = 3156.6\text{ kN}\times 4 \approx 12630\text{ kN}$,即12.63 MN。

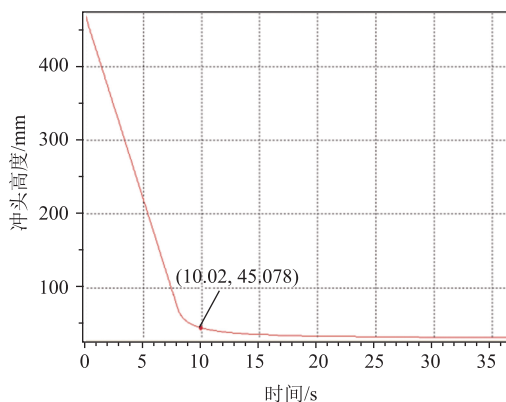


图 5 最大冲孔力为 20 MN 下, 冲头高度和时间的相关性曲线
Fig. 5 Correlation curve of punch height and time under maximum punching force of 20 MN



图 6 坯料冲孔现场图
Fig. 6 On-site photo of blank punching

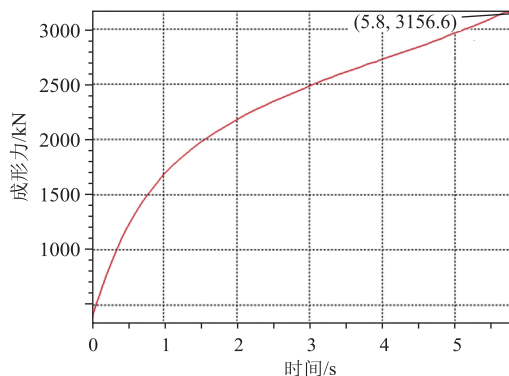


图 7 镦粗过程中时间和成形力的相关性曲线
Fig. 7 Correlation curve of time and forming force during upsetting process

3.2 冲孔

由于设计的油压机已确定公称力为 35 MN, 冲孔计算时直接设定最大冲孔力为 35 MN。冲孔冲头小头直径为 $\Phi 240$ mm, 单边为 2° 倾角; 采用石墨乳润滑, 下行速度为 $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。坯料冲孔初始的状态 (包括温度、几何形状、应力场等) 直接调用上一步镦粗结束时的状态, 如图 8 所示。之后求解并绘制出冲头高度-时间相关性曲线如图 9 所示。可

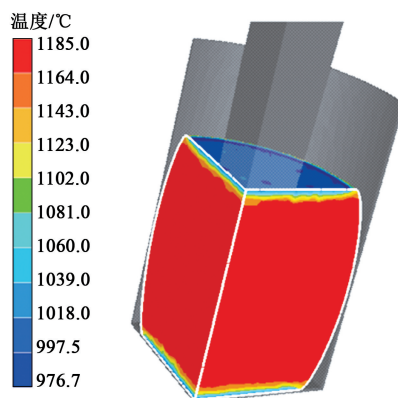


图 8 冲孔开始时坯料温度分布
Fig. 8 Blank temperature distribution at beginning of punching

以看出, 冲孔在 9.4565 s 开始后, 坯料留底为 30 mm, 此时温度状态如图 10 所示。之后冲孔速度变慢, 为了保证坯料在下一步有更好的温度条件, 以留底 30 mm 时的坯料作为下一步彻底去连皮工序的初始状态。

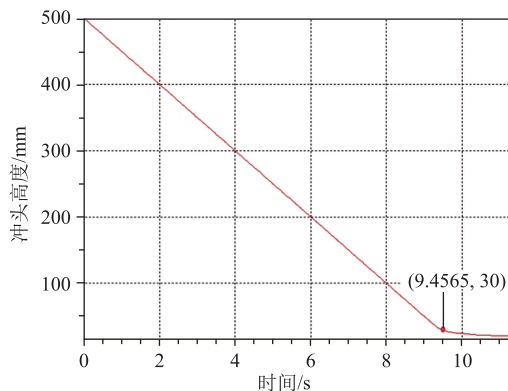


图 9 最大冲孔力为 35 MN 下, 冲头高度和时间的相关性曲线
Fig. 9 Correlation curve of punch height and time under maximum punching force of 35 MN

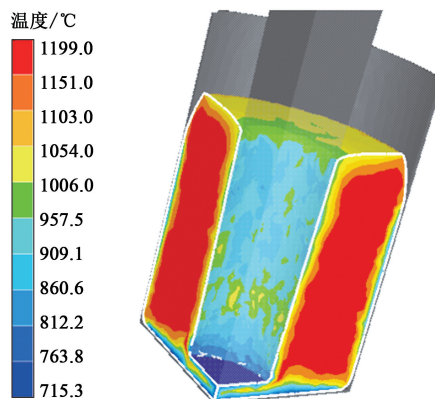


图 10 冲孔结束时坯料温度分布
Fig. 10 Blank temperature distribution at end of punching

3.3 切底去连皮

冲孔后翻转坯料, 更换上下模具, 用冲头切底去连皮, 坯料为上一步冲孔结束时的状态, 如图 11 所示。求解并绘制出成形力-时间曲线如图 12 所示。最大切底力 $F_3 = 860.03 \text{ kN} \times 4 \approx 3440 \text{ kN}$, 即 3.44 MN 。切底去连皮结束时坯料温度状态如图 13 所示。

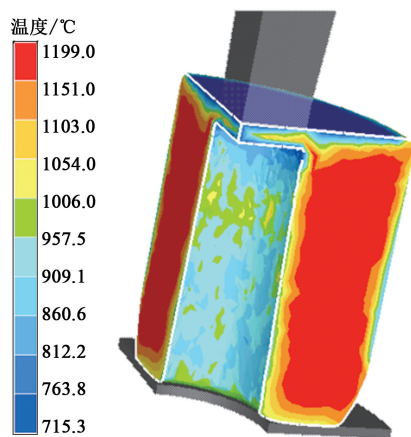


图 11 切底去连皮开始时坯料温度分布

Fig. 11 Blank temperature distribution at beginning of bottom-cutting and flash removal

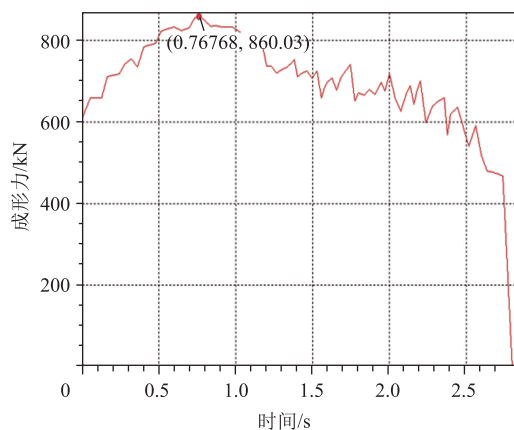


图 12 切底去连皮过程中成形力和时间的相关性曲线

Fig. 12 Correlation curve of forming force and time during bottom-cutting and flash removal process

3.4 扩孔

切底去连皮后更换为扩孔冲头, 扩孔冲头小头直径为 $\Phi 240 \text{ mm}$, 单边为 4° 倾角至最大直径 $\Phi 300 \text{ mm}$, 之后无倾角, 如图 14 所示。冲头采用石墨乳润滑, 下行速度为 $50 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 从切底端进入开始扩孔, 行程约为 1000 mm 。由于扩孔后锻件制作基本完成不再有成形工序, 因此, 不再列出扩孔结束的坯料温度, 只关注扩孔过程中的成形力。扩孔过程中成形力与时间的相关性曲线如图 15 所示, 最大成形力 $F_4 = 1269.4 \text{ kN} \times 4 = 5080 \text{ kN}$, 即 5.08 MN 。

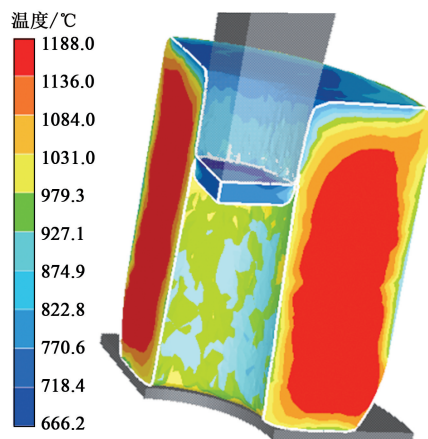


图 13 切底去连皮切底结束时坯料温度分布

Fig. 13 Blank temperature distribution at end of bottom-cutting and flash removal

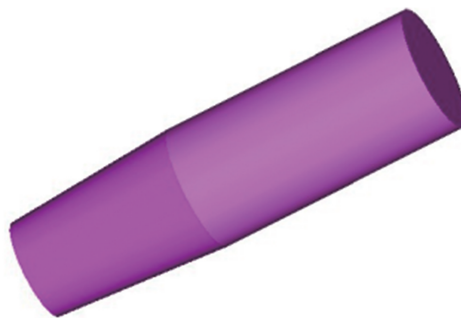


图 14 扩孔冲头示意图

Fig. 14 Schematic diagram of hole expansion punch

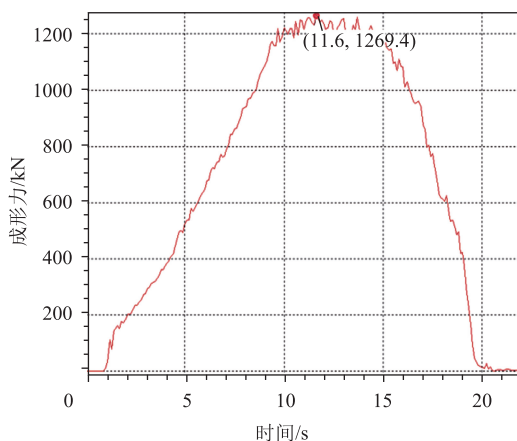


图 15 扩孔过程中成形力和时间的相关性曲线

Fig. 15 Correlation curve of forming force and time during hole expansion process

3.5 胎模锻制坯过程小结

根据仿真计算结果, 对制坯过程中的成形力、所用时间和坯料表面温度进行总结, 如表 1 所示, 这 3 个参数也是压机及工艺设计时的重要依据。

表 1 胎模锻制坯参数

Table 1 Parameters of blank making in loose tooling forging

形变过程	最大成形力/MN	所需时间/s	坯料表面温度/℃
镦粗	12.63	5.8	977
冲孔	35.00	9.5	715
彻底去连皮	3.44	2.5	666
扩孔	5.08	20.0	—

4 结论

(1) 根据塑性成形理论讨论了影响金属塑性形成的主要因素为成形过程中的坯料温度状态、变形速度强度、坯料所用材料的变形抗力及接触摩擦。

(2) 提出了塑性成形过程仿真方法：建立 1/4 实体模型以节约计算资源；选择忽略弹性变形且求解速度较快的刚黏塑性有限单元；对材料特性等各参数在计算软件中进行相应设置。使用已有压机验证仿真方法的准确性。

(3) 对钢锭胎模锻制坯的塑性成形过程进行仿真，计算结果表明：镦粗过程需要时间为 5.8 s，最大成形力 12.63 MN，镦粗后坯料表面温度为 977 ℃；以全锻造力 35 MN 冲孔，需要时间为 9.5 s，冲孔后坯料表面温度为 715 ℃；彻底去连皮过程需要成形力为 3.44 MN，时间为 2.5 s，结束后坯料表面温度为 666 ℃；最后一步扩孔过程需要的最大成形力为 5.08 MN，时间为 20 s。可根据以上结果进行压机工艺设计。

参考文献：

[1] 傅著寿. 锻压技术问答 [M]. 北京：机械工业出版社，1993.
Fu Q S. Forging Technology Q & A [M]. Beijing: China Machine Press, 1993.

[2] 康海鹏，党恩. 140 MPa 环形防喷器壳体的锻造 [J]. 大型铸锻件，2024 (2)：6-9.
Kang H P, Dang E. Forging of 140 MPa annular blowout preventer shell [J]. Heavy Casting and Forging, 2024 (2)：6-9.

[3] 张振，王大勇，陶剑锋，等. HXD2 型电力机车牵引支座锻造工艺研究与应用 [J]. 模具工业，2021，47 (5)：60-66.
Zhang Z, Wang D Y, Tao J F, et al. Research and application of forging process for traction support of HXD2 electric locomotive [J]. Die & Mould Industry, 2021, 47 (5)：60-66.

[4] 金飞翔，周翔，郭平安，等. 高筋复杂缸底塑性成形流动分析及优化 [J]. 塑性工程学报，2024，31 (11)：33-38.
Jin F X, Zhou X, Guo P A, et al. Flow analysis and optimization

of high reinforcement complex cylinder bottom plastic forming [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2024, 31 (11)：33-38.

[5] 秦红付，金明，李光，等. 大法兰侧轴锻件热加工工艺研究 [J]. 模具工业，2023，49 (9)：65-69.
Qin H F, Jin M, Li G, et al. Study on hot working process of large flange side shaft forgings [J]. Die & Mould Industry, 2023, 49 (9)：65-69.

[6] 马璟. 大型厚壁封头分步加载胎模锻工艺的理论与实验研究 [D]. 太原：太原科技大学，2022.
Ma J. Theoretical and Experimental Study on Loose Tool Forging Process of Step-by-step Loading for Large Head with Wall Thickness [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2022.

[7] 孙统辉，师洪强，张鹏豪，等. 液压打桩锤 $\Phi 6.5$ m 砧铁锻件近净成形技术分析与应用 [J]. 锻压技术，2023，48 (6)：1-9.
Sun T H, Shi H Q, Zhang P H, et al. Analysis and application on near net shape technology for $\Phi 6.5$ m anvil iron forging of hydraulic piling hammer [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (6)：1-9.

[8] 魏科，马庆，徐勇，等. 大型/复杂模锻件省力成形工艺研究进展 [J]. 塑性工程学报，2021，28 (5)：166-182.
Wei K, Ma Q, Xu Y, et al. Research progress of less-loading forming technology for large-sized/complex die forgings [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (5)：166-182.

[9] 古勃金 C И. 金属塑性变形 [M]. 北京：中国工业出版社，1963.
Губкин C И. Plastic Deformation of Metal [M]. Beijing: China Industry Press, 1963.

[10] 薛河，贺晋璇，贾文娜，等. 球压痕法获取不同变形率下 316L 不锈钢的力学性能 [J]. 热加工工艺，2024，53 (4)：91-95.
Xue H, He J X, Jia W N, et al. Mechanical properties of 316L stainless steel under different deformation rates obtained by ball indentation method [J]. Hot Working Technology, 2024, 53 (4)：91-95.

[11] 王晖，张小明，王峰，等. 变形率和退火温度对 TaW12 合金再结晶行为的影响 [J]. 有色金属工程，2016，6 (3)：13-16.
Wang H, Zhang X M, Wang F, et al. Effect of deformation rate and annealing temperature on recrystallization behavior of TaW12 alloy [J]. Non-ferrous Metals Engineering, 2016, 6 (3)：13-16.

[12] 张奕，郑永键，唐晓东，等. 变形率和热处理制度对 Nb47Ti 合金显微组织的影响 [J]. 中国有色金属学报，2010，20 (S1)：331-335.
Zhang Y, Zheng Y J, Tang X D, et al. Effect of deformation rate and heat treatment on microstructure of Nb47Ti alloy [J]. The Chinese journal of Non-ferrous Metals, 2010, 20 (S1)：331-335.