

宽厚板 P20 塑料模具钢成形仿真分析与试验研究

赵建国^{1,2}, 胡振志^{1,2}, 汪雨昌^{1,2}, 李春辉^{1,2}, 金 明^{1,2}, 郭卫东^{1,2}, 杨戈辉^{1,2}

(1. 洛阳中重铸锻有限责任公司, 河南 洛阳 471039; 2. 中信重工机械股份有限公司, 河南 洛阳 471039)

摘要: P20 塑料模具钢锻件属于异形截面(中心凹槽), 且吨位重、厚度和展宽尺寸大, 采用传统的镦拔下料、压扁出成品的成形方法很难保证技术标准、锻透压实效果和金属纤维流线的延续性要求。通过综合分析宽厚板锻件成形方法和控制难点, 提出“首次 WHF 法拔长(10 趟)+二次 WHF 法拔长(6 趟)+宽砧拔扁下料(6 趟)+锻制凹槽”的压实现成方案 and 近净成形控制新方法; 并结合工艺控制和难点分析, 建立有限元分析模型, 全流程仿真 WHF 法、宽砧拔扁法和心部凹槽锻制过程, 预测工艺参数设计和过程控制成形效果和质量; 最后, 通过生产试制验证了工艺参数及成形工艺的合理性。

关键词: P20 塑料模具钢; 宽厚板锻件; WHF 法; 宽砧拔扁法; 异形截面

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.05.012

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 05-0073-08

Simulation analysis and experimental study on forming of wide and thick plate P20 plastics mold steels

Zhao Jianguo^{1,2}, Hu Zhenzhi^{1,2}, Wang Yuchang^{1,2}, Li Chunhui^{1,2}, Jin Ming^{1,2}, Guo Weidong^{1,2}, Yang Gehui^{1,2}

(1. LuoYang CITIC HIC Casting & Forging Co., Ltd., Luoyang 471039, China; 2. CITIC Heavy Industries Co., Ltd., Luoyang 471039, China)

Abstract: P20 plastics mold steel forgings belong to special-shaped sections (core grooves) which are heavy in tonnage and large thickness and widening size, and it is difficult to ensure technical standards, forging through the compaction effect and continuity requirements of metal fiber streamlines by the traditional forming method of upsetting, blanking and flattening into finished product. Therefore, through comprehensive analysis of the forming method and control difficulties for wide and thick plate forgings, a compaction forming plan of “the first pulling length by WHF method (10 times) + the second pulling length by WHF method (6 times) + wide anvil flattening and blanking (6 times) + forging groove” and a new method of near-net shape control were proposed, and a finite element analysis model was established by combining with process control and difficulties analysis. Then, the whole processes of the WHF method, the wide anvil flattening method and the core groove forging were simulated, and the process parameter design and the forming effect and quality of process control were predicted. At last, the rationality of the progress parameters and the forming process was verified by the trial production.

Key words: P20 plastics mold steels; wide and thick plate forgings; WHF method; wide anvil flattening method; special-shaped section

大型宽厚板 P20 塑料模具钢锻件由于其结构特殊性: 展宽尺寸大、厚度较厚、中心凹槽, 在实际生产中极易产生心部超声波探伤超标缺陷以及各部位质量控制不均匀等现象, 制约着高品质模具钢的使用寿命。近几年, 通过不断研究和摸索大型厚截面模具钢锻造工艺和生产操作法, 提出了契合实际的成形控制法。本次承制的 1050 mm×2920 mm×3550 mm 宽厚板塑料模具钢为首次承制, 在金属纤维流线、内质、均质性、强度指标等方面均提出了

较为苛刻的要求, 采用传统镦拔下料—压扁出成品的工艺方案无法满足技术指标, 通过工艺创新, 提出了新的热处理参数、锻造方法及参数控制, 最终成功完成了生产试制^[1-2]。

1 锻件基本信息

异型截面模具钢锻件重量为 80.46×10^3 kg, 锻件尺寸见图 1, 化学成分见表 1, 具体技术指标要求如下。

(1) 通用技术要求。采用 EF (熔炼)+LF (炉外精炼)+VD (真空除气)+VC (真空浇注) 冶炼工艺, 钢锭头尾确保足够的切除量; 锻造比不小于 4.5; 保证锻件内部金属纤维流线的延续性。

收稿日期: 2021-04-06; 修订日期: 2021-07-08

作者简介: 赵建国 (1983-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: tetao_ustb@126.com

通信作者: 胡振志 (1981-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: zhenzhi401@163.com

产实践可知,厚截面方板锻件锻造方法的选择和工艺参数控制不合理极易产生心部锻不透现象。

措施:(1)首次采用 WHF (Wide Die Heavy Blow Forging) 法拔长(10 趟),拔方比按 2.2 控制;(2)第 2 次采取 WHF 法拔长(6 趟)+宽砧拔扁下料(6 趟),增加心部压应力,改善心部铸态缺陷,锻造比按 2.6 控制。通过两次锻造压实,总锻造比大于 4.5^[6]。

2.4 宽砧拔扁控制分析

锻件截面尺寸为 2920 mm×1050 mm,根据最小阻力定律,宽砧拔扁时存在纵向和横向金属流动速度不同的现象,纵向金属流动速度明显优于横向,拔扁之前制坯尺寸和拔扁参数控制不合理极易导致纵向已经满足锻造尺寸,而横向未能满足工艺要求。因此,精准控制制坯尺寸、合理选择成形辅具和优化设计拔扁参数极为关键^[7]。

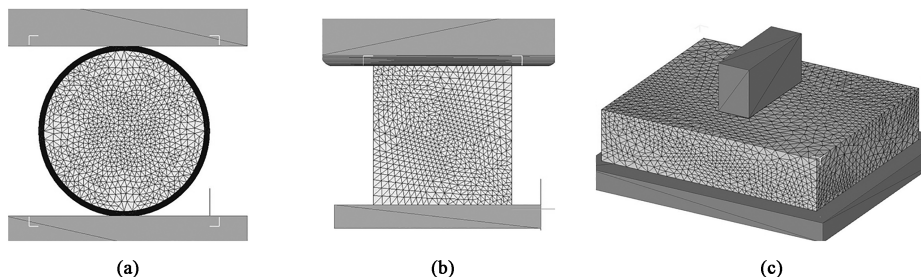


图3 有限元模型

(a) 模型1 (b) 模型2 (c) 模型3

Fig. 3 Finite element models

(a) Model 1 (b) Model 2 (c) Model 3

3.1 WHF 法模拟分析

结合仿真分析发现(图4):WHF 法第1趟拔方和第2趟拔方时压应力主要集中在近表面(存在变形死区),且压应力很小,压力基本未传递至心部;第3趟拔方时心部开始传递压应力且逐步得到压实,心部最大压应力约为 80 MPa;第4趟拔方时心部最大压应力约为 120 MPa。即:随着拔方的进行,变形量增加,逐步焊合心部铸态缺陷。为了提高拔方比和增大变形量,首次 WHF 法拔长采取 10 趟拔方方案。此外,由于近表面存在变形死区,实际操作过程需要合理错砧和控制搭接量。

3.2 拔扁压实模拟分析

结合仿真分析发现(图5):采用上、下宽砧拔扁时,心部首先承受压应力、近表面变形“死区”面积较大。随着拔扁方的进行,变形量增加,压应力逐步增大,逐步压实心部,且近表面也逐步传递

3 成形仿真分析

结合上述成形工艺性分析和相关过程控制参数,对模具钢锻件主变形 WHF 法和 WHF 法+宽砧拔扁压实法的成形可靠性进行模拟分析,重点针对锻出凹槽阶段金属流动及成形效果进行预测,并根据模拟情况调整、制定后续工艺参数及过程。

利用数值模拟仿真软件设置相关参数,分析采用热机耦合方法及刚粘塑性(简称粘塑性)有限元理论。根据实际工艺过程,模拟分析中选取有限元计算参数为:坯料初始网格数量为 200000,温度为 1210 ℃,平均增量步长 $t=1$ mm,毛坯锻件与成形辅具各部件之间的摩擦因子均为 $m=0.7$ ^[7],同时,为减少模拟计算量,根据锻件成形过程分别建立 3 种有限元模型,如图 3 所示^[8-10]。

压应力。即:通过后续的拔扁下料,进一步改善了心部铸态组织缺陷。

3.3 凹槽成形仿真分析

结合凹槽部位尺寸和近净成形参数控制要求,采用两趟锻造进行模拟,满砧进给,第1趟设置压下量为 150 mm,第2趟设置压下量为 120 mm。

通过仿真分析(图6),第1趟压凹槽时,由于变形部位截面和变形量较小,非变形部位金属流动变化不明显,尺寸变化不大;第2趟压凹槽时,主要存在上、下面金属流动存在速度差,出现两端翘曲现象,由于凹槽部位尺寸相对较小,锻制成形过程对其余部位尺寸的影响作用较弱。

针对中心凹槽模拟结果:(1)在实际生产中制作方形坯料时,确保棱角部位满足工艺尺寸;(2)出成品后增加平整端面工序,消除金属坯料两端翘曲对尺寸控制的影响;(3)通过仿形制造技术锻出中心凹槽尺寸可控,也避免各部位金属坯料因切削加工量不

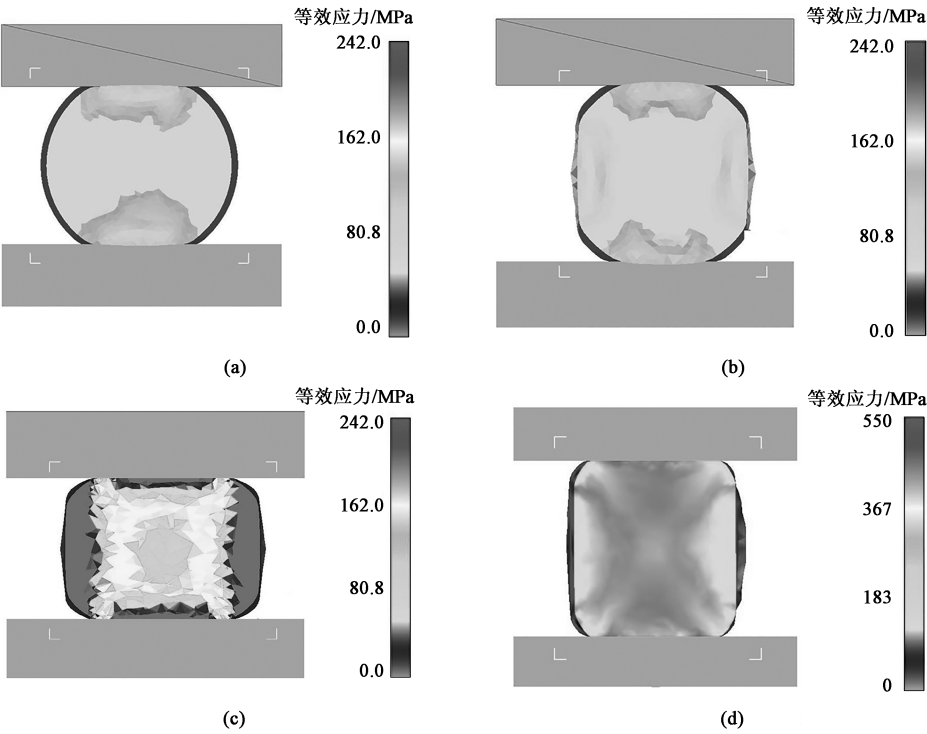


图 4 WHF 法的等效应力分布
(a) 第 1 趟拔方 (b) 第 2 趟拔方 (c) 第 3 趟拔方 (d) 第 4 趟拔方

Fig. 4 Distributions of equivalent stress with WHF method
(a) The first drawing square (b) The second drawing square (c) The third drawing square (d) The fourth drawing square

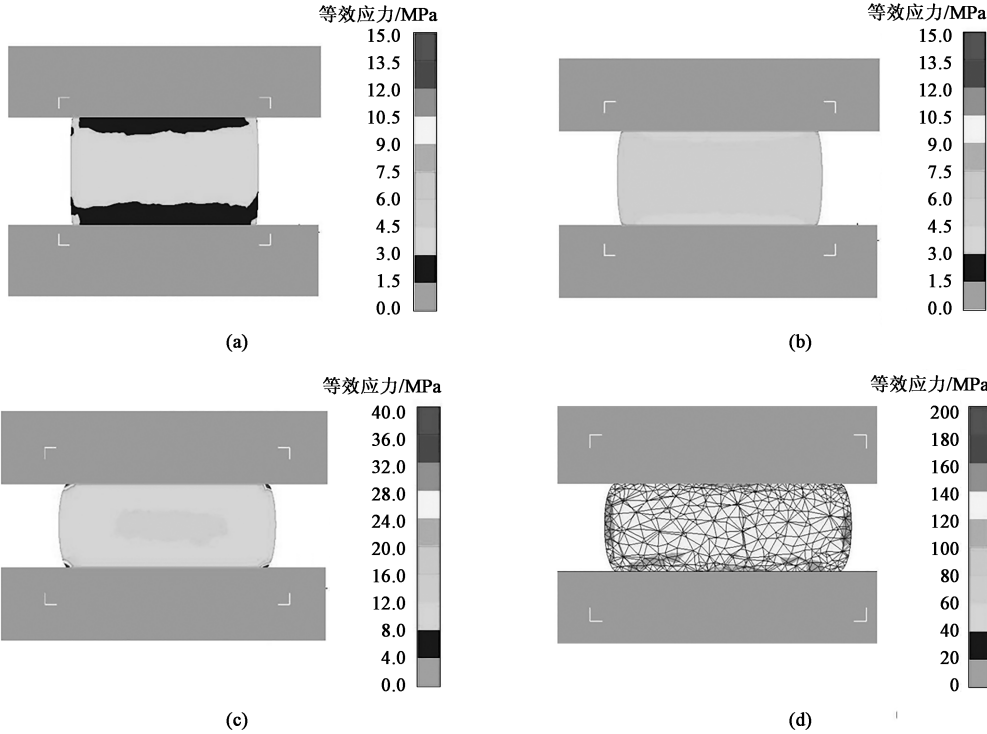


图 5 宽砧拔扁法等效应力分布
(a) 第 1 趟拔扁 (b) 第 2 趟拔扁 (c) 第 3 趟拔扁 (d) 最后 1 趟拔扁

Fig. 5 Distributions of equivalent stress with wide anvil flattening method
(a) The first flattening (b) The second flattening (c) The third flattening (d) The last flattening

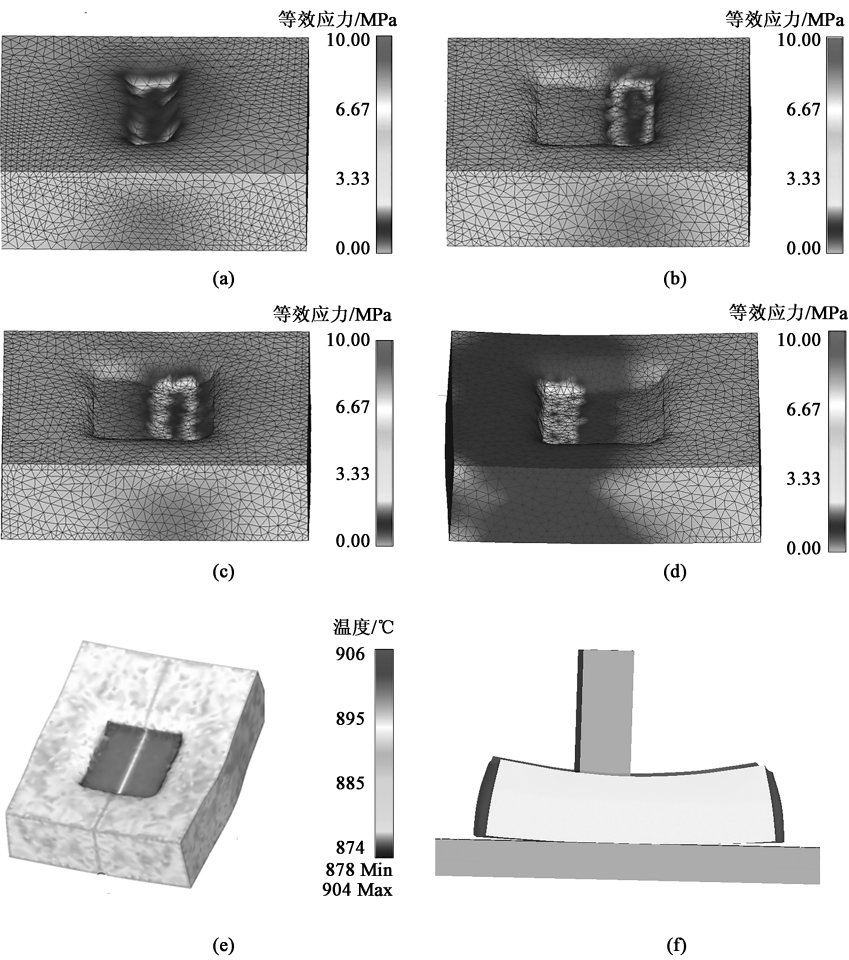


图 6 凹槽成形过程及质量

(a) 第 1 趟第 1 锤成形情况 (b) 第 1 趟压下量为 150 mm 的成形情况 (c) 第 2 趟第 1 锤成形情况
(d) 第 2 趟压下量为 120 mm 的成形情况 (e) 凹槽成形效果 (f) 凹槽成形后两端翘曲情况

Fig. 6 Forming process and quality of groove

(a) Forming effect of the first hammer in the first pass (b) Forming effect of reduction amount of 150 mm in the first pass
(c) Forming effect of the first hammer in the second pass (d) Forming effect of reduction amount of 120 mm in the second pass
(e) Forming effect of groove (f) Warpage at both ends after groove forming

均而打断内部金属纤维流线，保证了金属纤维流向。

综合上述分析，通过采用“首次 WHF 法拔长+二次 WHF 法拔长+宽砧拔扁下料+锻制凹槽”方法后，压应力能够传递至心部，且随着两次拔长及变形量的增加，心部铸态缺陷逐步得到了有效压实，中心凹槽尺寸可控，保证了金属内部金属纤维流线的延续性要求，并且，后续增加修整工序可消除两端翘曲和各部位尺寸不一致问题。

4 工艺方案及参数控制

结合塑料模具钢锻件技术指标、成形难点和模拟仿真分析结果，制定工艺方案的关键控制点和重要控制参数。

4.1 钢水冶炼控制

冶炼采用电炉初炼—精炼—真空脱气—真空浇注的工艺方案。为了确保钢锭足够纯净度，应注意：（1）电炉入炉料选用钢板料、返回料头、钢屑等；铁合金按照工艺要求进行烘烤，辅助材料入炉使用前须保持干燥，优先选用内壁质量良好的冒口，冒口使用次数 ≤ 1 次，冒口、锭模、底盘使用前残钢、残渣清理干净，选用精炼中间包浇注；（2）电炉出钢 $P \leq 0.005\%$ ，电炉出钢量满足计划钢水量要求，钢水量要有富余，电炉出钢不允许见渣；（3）精炼时，渣厚控制在 200~300 mm，精炼时间 ≥ 100 min，精炼过程加强脱氧， $[O] \leq 30$ ppm；（4）严格控制真空处理时钢水在高真空度状态下的保持时间，成分合格后，调整氩气流量软吹，以不裸露钢水为宜，

控制软吹时间；(5) 引流后控制好滑板压力，严禁氩气压力过大造成钢液裸露吸气、卷渣，浇高满足要求后继续浇注 50~100 mm 方可关包，尽可能避免见渣，破空后快速加入发热剂^[11-12]。

4.2 锻造工艺及生产操作控制

结合工艺方案分析和数值模拟仿真，确定总体成形工艺方案为：压钳口—均质化处理—WHF 法首次拔长—WHF 法二次拔长—宽砧拔扁下料—锻制凹槽—修整^[9-10]，关键参数控制如下。

(1) 均质化处理：温度控制在 1250~1270 ℃，保温时间不小于 30 h，保温后出炉进行主变形锻造。

(2) WHF 法首次锻拔：控制拔方比（拔方比为 2.6、拔长趟数为 10 趟），提高锻透压实效果；控制压下量和进砧量，每趟压下量按照 18%~20% 控制，砧宽比按照 0.6~0.8 控制；控制错砧和搭接量，避免变形“死区”，提高整体压实效果。

(3) WHF 法二次锻拔：模具钢锻件由于宽度尺寸大，后续宽砧拔扁时金属轴向流动速度明显优于横向，为了保证后续拔扁要求，采取 WHF 法 6 趟拔方（拔方比为 1.6），针对性地控制宽度尺寸。

(4) 拔扁下料：模具钢锻件由于纵、横向尺寸相差不大，为提高金属横向流动速度，进砧量控制较为关键。基于此选取宽砧直接拔扁，提高横向金属流动速度；采取 6 趟拔扁方、压下量按照 12%~15% 控制、每趟拔扁完成后翻转 180°。

(5) 锻制凹槽：结合凹槽深度和仿真分析，确定采用两趟锻造，工装采用上窄砧和下平台，第 1 趟压下量按照 150 mm 控制，第 2 趟压下量按照 120 mm 控制，确保合理错砧和锤头搭接量。

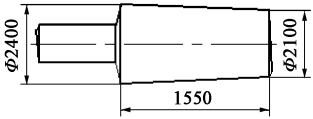
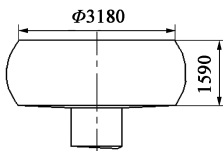
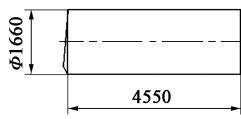
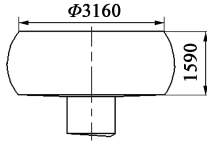
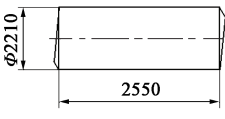
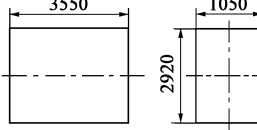
结合上述关键工序参数控制，对相关工序关键尺寸控制参见表 3。

4.3 锻后预备热处理

根据 P20 塑料模具钢多种热处理工艺和多种温度参数检测数据（金相组织和硬度），并比对锻后热处理对后续调质的影响效果，确定采用正火+高温退火+回火的效果最优，也有利于提高后续调质的综合力学性能。锻造完成后鼓风空冷至 400~450 ℃ 入炉，正火温度为 900~920 ℃、退火温度为 760~780 ℃、回火温度为 640~660 ℃、过冷保温温度为 280~320 ℃；正火保温后出炉鼓风冷却、风扇均匀布置、吹风时严禁吹向锻件、每隔 2 h 翻转 180°（保证各部位冷速一致性），待温度冷至 350~400 ℃ 入炉（测温以锻坯凹坑内温度为依据），炉冷至过冷温度保温^[13]。

表 3 关键过程控制参数

Table 3 Control parameters in key processes

步骤	成形工序	图示说明	加热温度/℃
1	压钳口 倒棱		1150±10
2	首次锻粗 拔方	 	1240±10
3	二次锻粗 拔方	 	1240±10
4	拔扁下料		1240±10

4.4 调质工序

根据锻件尺寸、结构、材质特性和力学性能指标确定 P20 塑料模具钢调质工艺为：(1) 淬火前加热保温采用分 3 段升温、加热和保温的工艺，处理方式采用水淬+油冷，淬火温度为 850~880 ℃，且升温起始温度不高于 200 ℃，每阶段升温速度不大于 60 ℃·h⁻¹，油冷时间不小于 180 min（图 7）；(2) 回火采用 2 段升温、保温的热处理方式，回火温度为 580~620 ℃，回火时间不小于 25 h（图 8）。

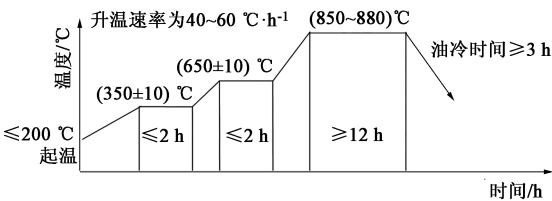


图 7 淬火工艺曲线

Fig. 7 Curve of quenching process

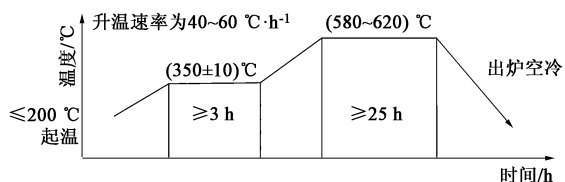


图8 回火工艺曲线

Fig. 8 Curve of temper process

5 生产试制及总结

结合上述工艺设计和模拟分析,严格各阶段工艺参数,进行试制生产,如图9所示。经后续毛坯尺寸检验、超声波探伤,力学性能指标均满足技术要求。

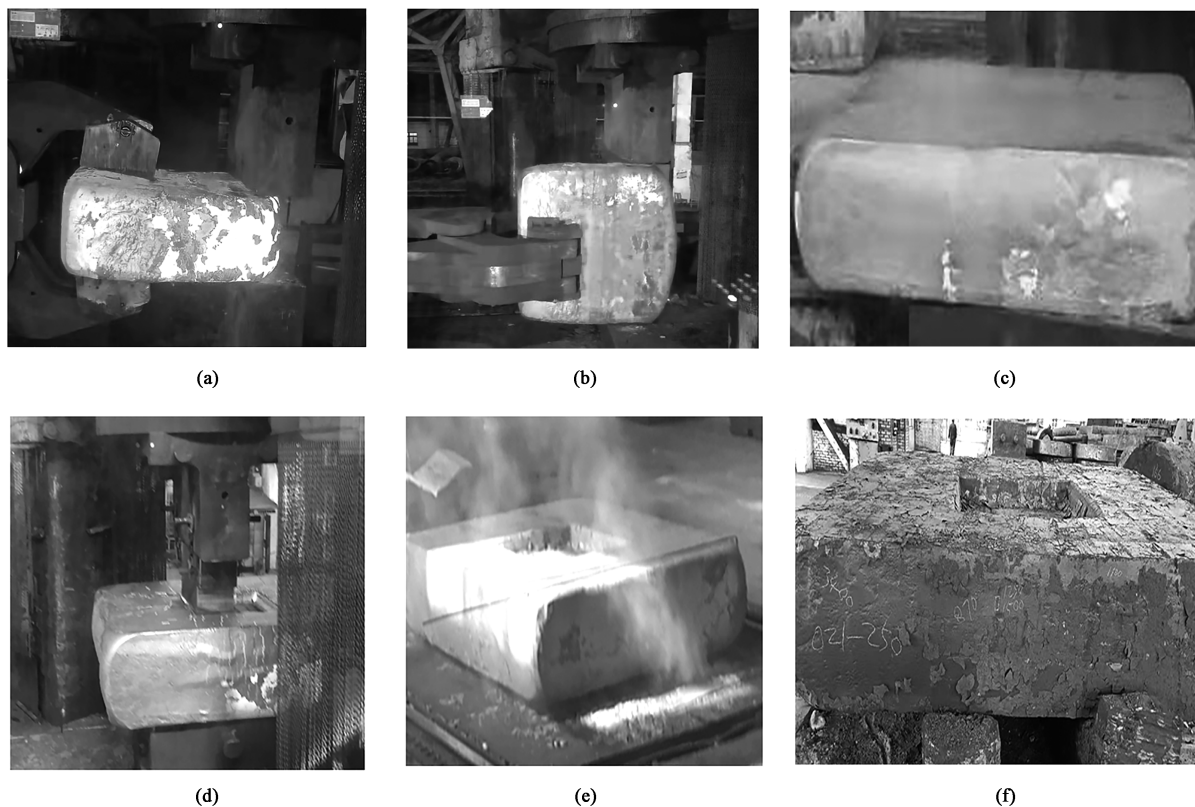


图9 P20 塑料模具钢试制过程及产品

(a) 拔扁 (b) 扁方修整 (c) 方形坯料 (d) 压凹槽 (e) 热态毛坯锻件 (f) 预备热处理后毛坯锻件

Fig. 9 Trial process and product of P20 plastics mold steel

(a) Flattening (b) Trimming of flat square (c) Square blank (d) Forging groove (e) Hot blank forgings (f) Blank forgings after pre-heating treatment

6 结语

通过 P20 塑料模具钢全流程制造过程仿真分析,并结合实际锻造生产,能够预测成形、压实效果,为试制生产提供理论和技术支持。在实际生产中,采用“首次 WHF 法拔长(10 趟)+二次 WHF 法拔长(6 趟)+宽砧拔扁下料(6 趟)+锻制凹槽”的工艺控制方式,利用近净成形控制技术,在优化工艺参数和精准设计制坯尺寸的情况下能够有效锻透心部、保证各部尺寸、提高模具钢锻件均质性,满足内部金属纤维流线延续性要求。

参考文献:

- [1] 史宇麟,宋玉冰,薛秋云. 大锻件两次墩拔锻造的工艺优化[J]. 热加工工艺, 2007, 36 (5): 51-53.
Shi Y L, Song Y B, Xue Q Y. Optimizing on forging process of two-time upsetting and stretching for large forgings [J]. Hot Working Technology, 2007, 36 (5): 51-53.
- [2] 崔天燮,刘鹏,陈建礼,等. P20 中厚板中心裂纹产生原因分析[J]. 山西冶金, 2010, (1): 9-11.
Cui T Y, Liu P, Chen J L, et al. Analysis about reasons of center-line cracks in mid-thick planks of plastic die steel P20 [J]. Shanxi Metallurgy, 2010, (1): 9-11.
- [3] GB/T 10561—2005, 钢中非金属夹杂物含量的测定标准评级图显微检验法[S].

- GB/T 10561—2005, Steel—Determination of content of non-metallic inclusions—Micrographic method using standards diagrams [S].
- [4] JB/T 5000.15—2007, 重型机械通用技术条件 第 15 部分: 锻钢无损检测 [S].
JB/T 5000.15—2007, Heavy mechanical general techniques and standards—Part 15: Non-destructive inspection of forged steel [S].
- [5] 张晓东. 异形块的近净成型工艺 [J]. 大型铸锻件, 2018, (3): 28-34.
Zhang X D. The near net forming process of heteromorphic block [J]. Heavy Casting and Forging, 2018, (3): 28-34.
- [6] 潘丽珍, 冯志云. 塑料模具钢 P20 的开发与研制 [J]. 山西冶金, 1998, (1): 38-39, 47.
Pan L Z, Feng Z Y. Development of plastic die steel P20 [J]. Shanxi Metallurgy, 1998, (1): 38-39, 47.
- [7] 王彩虹. 模具钢 P20 的研制与工艺优化 [J]. 宽厚板, 2017, (6): 16-19.
Wang C H. Research and process optimization of P20 mould steel [J]. Wide and Heavy Plate, 2017, (6): 16-19.
- [8] 陆璐, 王辅忠, 王照旭. 有限元方法在金属塑性成形中的应用 [J]. 材料导报, 2008, (6): 87-91.
Lu L, Wang F Z, Wang Z X, Application of finite element method in metal plastic forming [J]. Materials Review, 2008, (6): 87-91.
- [9] 左旭, 卫原平, 陈军, 等. 复杂体积成形三维有限元仿真的关键技术 [J]. 金属学报, 1999, 5 (3): 325-329.
Zuo X, Wei Y P, Chen J, et al. The key techniques of 3D FEM simulation in bulk forming [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1999, 5 (3): 325-329.
- [10] 杨合, 詹梅, 刘郁丽, 等. 面向叶片精锻过程的三维有限元模拟 [J]. 材料科学与工艺, 1999, (S1): 87-91.
Yang H, Zhan M, Liu Y L, et al. 3D FEM simulation for precision forging of blade [J]. Material Science and Technology, 1999, (S1): 87-91.
- [11] 高阳. P20 塑料模具钢的冶炼工艺实践 [J]. 大型铸锻件, 2018, (1): 5-6.
Gao Y. Smelting process and practice of P20 plastic mould steel [J]. Heavy Casting and Forging, 2018, (1): 5-6.
- [12] 马宏, 尹国辉, 薛永栋. 大型钢锭真空浇注水口吹氩技术研究与应用 [J]. 大型铸锻件, 2019, (3): 1-4.
Ma H, Yin G H, Xue Y D. Research and application of the technology of argon blowing at vacuum pouring head of large steel ingot [J]. Heavy Casting and Forging, 2019, (3): 1-4.
- [13] 张青学, 周文浩, 刘丹, 等. 模具钢 P20 热处理工艺数值模拟研究 [J]. 金属材料与冶金工程, 2017, (3): 23-28.
Zhang Q X, Zhou W H, Liu D, et al. Numerical simulation research on heat treatment process of P20 mould steel [J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2017, (3): 23-28.

锻压技术

DUANYA JISHU

FORGING & STAMPING TECHNOLOGY

我们藉行业 翘楚之势
为您搭建 广阔的信息桥梁

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告

1958年创刊。中国机械工业联合会主管，北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会塑性工程分会合办。

全国锻压行业会刊，全国中文核心期刊。中文核心期刊要目总览(北京大学)、中国科学引文数据库(核心版, CSCD)、中国科技期刊引证报告(GJCR)、中国学术期刊文摘数据库(核心版, CSAD-C)、中国学术期刊文摘数据库(英文版)、中国学术期刊综合评价数据库、中国学术期刊(光盘版)、中国知网、万方数字化期刊群、RCCSE中国核心学术期刊、美国剑桥科学文摘(CSA)、美国化学文摘(CA)、日本科学技术振兴机构数据库(JST)、俄罗斯文摘杂志(AJ)。

金属塑性工程行业专业技术(月刊)期刊 国内外公开发刊

地址: 北京市海淀区学清路18号 《锻压技术》编辑部 100083
电话: 010-62920652 82415085
E-mail: fst@263.net (稿件咨询) fst_linyutong@163.com (广告咨询)

发表文章请登录网站在线投稿 <http://www.fstjournal.net>

主要栏目

综 述	技 术 交 流
锻 造	节 能 技 术
模 具	摩 擦 与 润 滑
标 准 化	计 算 机 应 用
管 材 成 形	装 备 与 成 套 技 术
板 料 成 形	加 热 与 热 处 理
特 种 成 形	材 料 与 成 形 性 能
测 试 技 术	理 论 与 实 验 研 究

全国各地邮局均可订阅, 逾期未订上者可与编辑部联系邮购

- ◆ 国内邮发代号: 2-322
- ◆ 国外邮发代号: BM5549
- ◆ 国内定价: 25元/册, 300元/年
- ◆ 国内刊号: CN 11-1942/TG
- ◆ 国际刊号: ISSN 1000-3940
- ◆ 广告许可证: 京海工商广登号20170021号 杂志网站 微信公众号