

锻造

液压打桩锤 $\Phi 6.5$ m 砧铁锻件近净成形技术分析与应用

孙统辉^{1,2}, 师洪强^{1,2}, 张鹏豪^{1,2}, 张彦娟^{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: $\Phi 6.5$ m 砧铁属于特大型异形锻件, 在液压打桩锤工作过程中需承受强烈振动和交变载荷, 针对其采用传统自由锻工艺制造时存在的原材料损耗严重、三向性能差异大等问题, 提出了 $\Phi 6.5$ m 砧铁锻件近净成形技术, 总体工艺方案为自由锻制坯+胎膜锻成形。采用 Forge 锻造有限元仿真软件, 对 $\Phi 6.5$ m 砧铁锻件的充型过程进行仿真, 通过对载荷-行程曲线、充型效果、等效应变的点追踪、金属流动情况、应力状态、等效应变和动态再结晶的分析, 优化了成形关键工艺参数及方法, 经生产验证, 与传统自由锻工艺相比, 锻件减重 63770 kg, 单件节约钢锭 126000 kg, 解决了充型锻造压力超出设备极限载荷、锻件纤维组织流线不连续等问题, 实现了 $\Phi 6.5$ m 砧铁锻件的近净成形。

关键词: 液压打桩锤; 砧铁; 自由锻; 胎膜锻; 近净成形

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.06.001

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 06-0001-09

Analysis and application on near net shape technology for $\Phi 6.5$ m anvil iron forgings of hydraulic piling hammer

Sun Tonghui^{1,2}, Shi Hongqiang^{1,2}, Zhang Penghao^{1,2}, Zhang Yanjuan^{1,2}

(1. Luoyang CITIC Heavy Industries Casting and Forging, Luoyang 471039, China;

2. CITIC Heavy Industries Co., Ltd., Luoyang 471039, China)

Abstract: The $\Phi 6.5$ m anvil iron is super-large special-shaped forgings, which is subjected to strong vibration and alternating loads during the working process of hydraulic piling hammer. Therefore, for the problems of serious loss of raw material and large difference in three-dimensional properties in the traditional free forging process, a near net forming technology for $\Phi 6.5$ m anvil iron forgings was proposed, and the overall process scheme was to use free forging to blank and use loose tooling forging to form. The filling process of $\Phi 6.5$ m anvil iron forgings was simulated by finite element simulation software Forge. Then, through the analysis on load-stroke curve, filling effect, point tracking of effective strain, metal flow, stress state, equivalent strain and dynamic recrystallization, the key forming process parameters and methods were optimized. Finally, the production verification shows that, compared with the traditional free forging process, the weight of forgings is reduced by 63770 kg, and the steel ingot is saved by 126000 kg per piece, which solves the problems that the filling forging pressure exceeds the limit load of equipment and the fiber structure of forgings is not continuous, and the near net forming of $\Phi 6.5$ m anvil iron forgings is realized.

Key words: hydraulic piling hammer; anvil iron; free forging; lose tooling forging; near net forming

随着海上风电的迅速发展, 对沉桩作业技术及装备提出了更高的要求, 主流单桩基础直径为 $\Phi 6.5 \sim \Phi 7.5$ m, 特殊地质状况下, 打桩作业需使用 3000 kJ 以上的大型液压打桩锤。砧铁作为液压打桩锤的关键零部件, 一直被国外垄断, 进口设备价格昂贵、

供货时间长、维修周期长、维修费用高和技术支持较难保障, 这在很大程度上制约了国内海洋工程事业的发展, 直接影响了海洋风电资源的开发^[1]。目前, 对于 $\Phi 6.5$ m 以上特大型砧铁锻件的生产, 国外只有 JSW (日本制钢所) 公司一家有成功生产案例, 该公司在 140 MN 水压机上采用复合锻造技术实现了特大型砧铁锻件成形, 但详细锻造工艺技术对外保密, 相关报道及文献鲜见。在国内, 几大重机厂对 $\Phi 3$ m 以下小型砧铁有过成功制造案例, 均采用自由锻成形技术, 而对于 $\Phi 6.5$ m 以上砧铁锻

收稿日期: 2022-08-26; **修订日期:** 2022-11-10

基金项目: 工信部高技术船舶科研项目 (MC-202014-S01); 国家重点研发计划 (2020YFB2008400)

作者简介: 孙统辉 (1982-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: sunth2009@126.com

件的制造领域,只有中信重工机械股份有限公司涉足。

本文所述 $\Phi 6.5$ m 砧铁应用于 3000 kJ 液压打桩锤,为国产化最大规格砧铁,依托 185 MN 自由锻造油压机平台进行复合锻造工艺技术研发,并运用 Forge 数值模拟软件进行成形过程计算分析,开发出整锻式特大型砧铁锻造件净成形技术,成功锻造出 $\Phi 6.5$ m 整锻式砧铁。

1 工艺方案分析

液压打桩锤水下打桩的冲击系统由锤芯、砧铁和桩 3 个部分组成。在打桩过程中,将锤芯提升至一定高度后,通过活塞杆来推动锤芯,锤芯在推力和其自身重力的作用下,撞击砧铁,将自身的动能转化为打桩的冲击能量。砧铁为能量转化部件,将锤芯的动能转化为冲击能量,进而传递给桩。砧铁的能量传递效率即为打桩锤冲击系统的能量传递效率,因此,砧铁为整个液压打桩锤水下打桩冲击系统中的关键零件^[2], $\Phi 6.5$ m 砧铁的零件图如图 1 所示。鉴于此原因,砧铁锻件须具备较高的冲击韧性,因此,锻造工艺须考虑锻造流线的完整性。

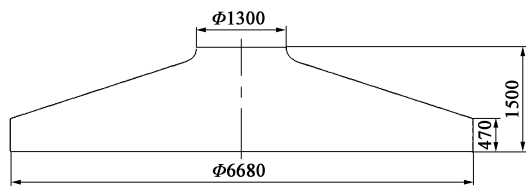


图 1 $\Phi 6.5$ m 砧铁零件图

Fig. 1 Part drawing of $\Phi 6.5$ m anvil iron

1.1 自由锻工艺

自由锻工艺中,锥面部分按多台阶锻出,机加工去除材料较多,而且锥面部分纤维流线被切断,但此处也为砧铁承受冲击过程中最关键的部位,因此,会影响砧铁的抗冲击性能。如图 2 所示,采用自由锻工艺成形的锻件质量为 309380 kg,而钢锭质量为 486000 kg,钢锭利用率为 63.6%。

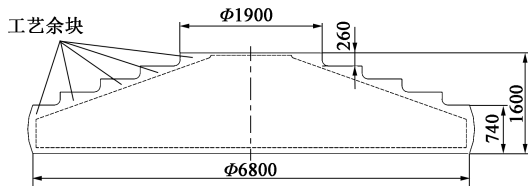


图 2 $\Phi 6.5$ m 砧铁自由锻锻件示意图

Fig. 2 Schematic diagram of $\Phi 6.5$ m anvil iron forging by free forging

成形台阶部位易出现内部质量问题,主要表现为超声波检测超标,通常为密集型缺陷,分布状态为平行于台阶成形面呈层状分布,这与锻造成形台阶过程中所运用的工艺方法关系密切^[3]。在锻造过程中,随着 H/D (其中, H 为台阶部位高度, D 为台阶直径)的不断降低,在静水压力区域内会出现较大的剪切变形,随着剪切变形的进一步加剧,可导致剪切变形剧烈部位出现锻造缺陷,即内部出现平行于台阶平面的微裂纹或夹杂性缺陷,因此,锻造工艺应主动控制夹杂物形貌,以保证最终砧铁锻件的内部质量^[4]。

该方案存在不足之处:(1)毛净比达到 1.74,锥面部分存在多处工艺余块,原材料损耗较大;(2)成形锥面部分多台阶不规整,易偏心,锻造余量大;(3)锥面部分锻造流线被切断,高应力区域的三向性能差异大,影响砧铁的最终服役寿命;(4)486000 kg 特大型钢锭锻造过程中的火次多、能耗高。

1.2 近净成形工艺

近净成形工艺设计需重点考虑以下两个方面:(1)锻件锥面部分按成品锥度锻造成形,减少了加工余量,缩短制造周期;(2)砧铁锥面高应力区域的锻造流线连续,提高了锻件的综合力学性能。总体工艺方案为自由锻制坯+胎模锻成形,如图 3 所示,采用自由锻工艺的锻件质量为 245610 kg,钢锭质量为 360000 kg,钢锭利用率为 68.2%。

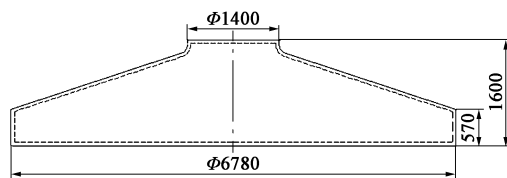


图 3 $\Phi 6.5$ m 砧铁近净成形锻件示意图

Fig. 3 Schematic diagram of $\Phi 6.5$ m anvil iron forging by near net forming

胎模在 185 MN 自由锻造油压机上锻造,使用放置于走料台上的单膛模具,将高温 (1210~1250 $^{\circ}\text{C}$) 坯料用自由锻工艺锻造成形为近似零件的形状及尺寸。本工艺结合自由锻主变形中的镦粗工序进行胎模锻造,在充分破碎铸态枝状晶组织的同时实现了锥面的近净成形,该工序制坯高径比 $H_0/D_0 = 1.6 \sim 1.8$ (其中, H_0 为坯料原始高度、 D_0 为坯料原始直径),镦粗比为 1.80~1.95。

该锻造方案可以克服传统自由锻工艺存在的不足之处,但也存在诸多难点:(1)胎模锻过程能否完全充型;(2)现有自由锻设备压力能否满足工艺

需要；(3) 锻件中心部位能否充分锻透；(4) 最后成形火次的动态再结晶是否充分；(5) 充型过程中小变形区域是否会出现晶粒粗大。本文针对上述关键技术难题，借助数值模拟技术，对 $\Phi 6.5\text{ m}$ 砧铁锻件的近净成形过程进行仿真研究，从而为充型过程中工艺参数的确定提供理论依据。

2 充型过程数值模拟

砧铁锻件属于特大型锻件，胎模成形时的金属流动情况复杂，压下量与充型情况不易被评估。借助数值模拟方法，进行 $\Phi 6.5\text{ m}$ 砧铁锻件的塑性成形过程的仿真，为压下量的确定、模具结构设计和缺陷预测提供理论依据^[5]。在金属体积成形过程中，金属的塑性变形远远大于弹性变形，因此，在充型过程中选用刚塑性数值模拟技术^[6-7]。本文主要对充型过程中的压力、金属流动速率、应力、等效应变、动态再结晶进行模拟分析^[8-9]，以评估近净成形工艺方案的合理性。

2.1 数值模拟参数设定

充型工序属于典型的三维非稳态塑性成形过程，不能简化为平面模型进行计算，选用 Forge 数值模拟软件对该工序进行 3D 仿真，选取特大型自由锻制坯参数建立数值模型进行计算分析^[10-11]。

坯料划分网格数为 15.5 万，坯料与上、下模接触面为剪切摩擦，摩擦因数均为 0.7，坯料温度为 1240 ℃。假设模具在锻造过程中不变形，上、

下模均设置为刚性体，上模为主动模具，压下速率为 $8\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

针对充型过程设计了以下两种工艺方案。

方案 1：

- (1) 预制圆柱坯，尺寸为 $\Phi 2640\text{ mm} \times 5050\text{ mm}$ ；
- (2) 将坯料放入最终成形胎模中，采用 900 mm 平整径向排砧分 4 道次将坯料镦粗至 2610 mm，1~4 道次的锻造参数如表 1 所示；

表 1 方案 1 中多道次锻造参数

Table 1 Multi-pass forging parameters in scheme 1

道次	1	2	3	4	5	6	7	8	9
压下高度/mm	4250	3610	3070	2610	2220	1890	1610	1370	1200
进砧量/mm	2130	1810	1540	1310	1110	950	810	690	600
布砧方法	径向	径向	径向	径向	切向	切向	切向	切向	切向

注：径向，平砧沿平行于坯料直径方向排砧，坯料沿垂直于平砧方向移动，平行移动距离为进砧量；切向，平砧沿坯料圆周切线方向排砧，每压 1 砧坯料旋转一定角度，1 圈压完后，坯料沿垂直于砧具方向移动，平行移动距离为进砧量，逐圈进砧直到压至坯料中心，1 个道次结束。

- (3) 采用 900 mm 平整切向排砧分 5 道次将坯料镦粗至 1600 mm，实现胎模内锻件的最终成形，5~9 道次的锻造参数如表 1 所示。

该方案按照传统胎模锻工艺设计思路，整个成形过程只需 1 套模具，成形过程示意图如图 4 所示。其中， α 为锻件成品锥面角， γ 为终成形模具锥面角， $\alpha = \gamma = 21.5^\circ$ 。

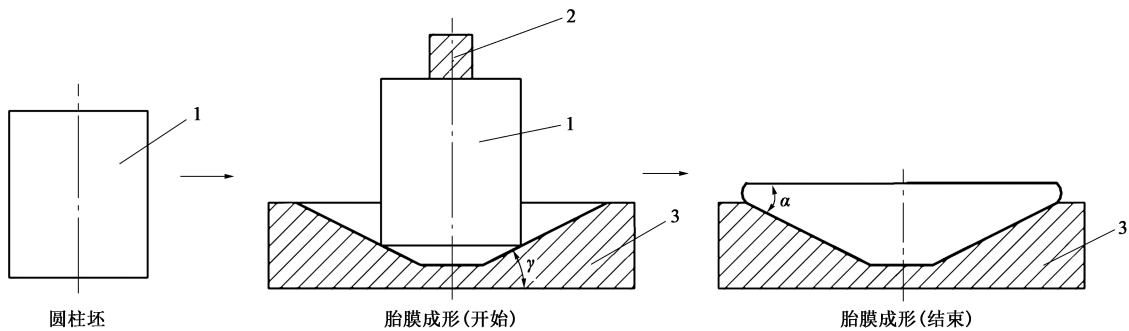


图 4 方案 1 成形示意图
1. 圆柱坯 2. 上平砧 3. 终成形模具
Fig. 4 Forming schematic diagram of scheme 1

方案 2：

- (1) 预制圆柱坯，尺寸为 $\Phi 2640\text{ mm} \times 5050\text{ mm}$ ；
- (2) 将坯料放入预成形胎模中，采用 900 mm 平整径向排砧分 4 道次将坯料镦粗至 2610 mm，预

制下底面锥度为 35° 的中间坯，1~4 道次的锻造参数如表 1 所示；

- (3) 将下模更换为终成形胎模，预制中间坯对正模具中心放置；
- (4) 采用 900 mm 平整切向排砧分 5 道次将坯

料镦粗至 1600 mm，实现胎模内锻件的最终成形，5~9 道次的锻造参数如表 1 所示。

该方案对充型工艺进行了创新，旨在解决充型困难、所需载荷过大等问题，整个成形过程需两套模具，首先预制底部带有大角度锥面的中间坯，坯料底部锥面角度大于终成形模具的锥面角度，放入

终成形模具后坯料与模具接触面积减少，从而实现降低载荷、利于终锻充型的目的。成形示意图如图 5 所示，其中，锻件成品锥面角 α 为 21.5° 、预成形模具锥面角 β 为 35° 、终成形模具锥面角 γ 为 21.5° ，即 $\beta > \gamma$ 、 $\alpha = \gamma$ ，因此，预制中间坯工序的预成形锥面角度较大。

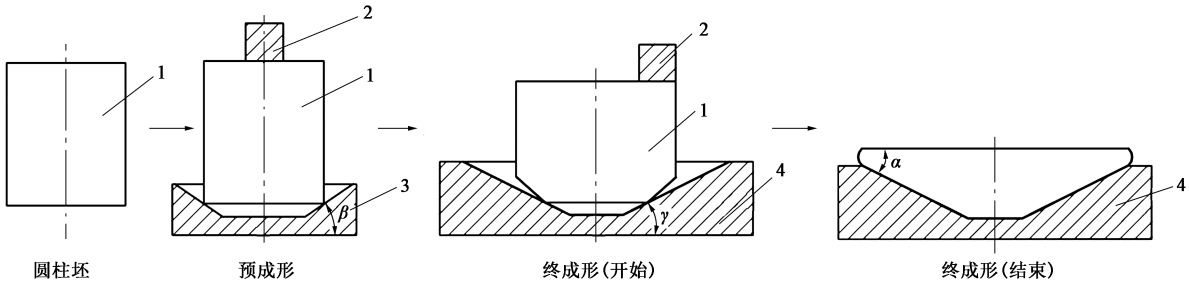


图 5 方案 2 成形示意图
1. 圆柱坯 2. 上平砧 3. 预成形模具 4. 终成形模具
Fig. 5 Forming schematic diagram of scheme 2

2.2 模拟结果与分析

2.2.1 充型过程工艺参数设定

坯料放置于模具锥面上，起始位置为坯料外圆与锥面整圈线接触处，盖板作为上模，坯料原始高度为 5050 mm，压下量为 2050 mm，设定上、下模间距 450 mm 为停止条件，在该过程中金属向模腔流动，同时直径增大。方案 1 建模如图 6 所示，方案 2 建模如图 7 所示。

2.2.2 载荷-行程曲线分析

方案 1：由于该方案中，模具与坯料的接触面积较小，容易出现受力不均现象，导致金属流动不

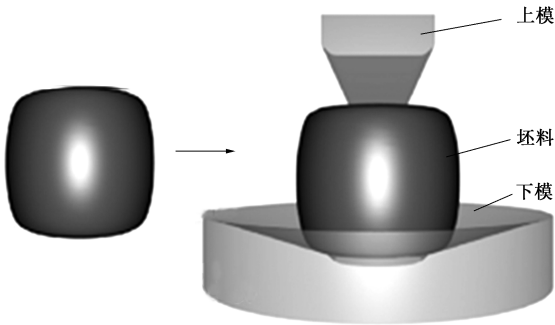


图 6 方案 1 建模图
Fig. 6 Modeling diagram of scheme 1

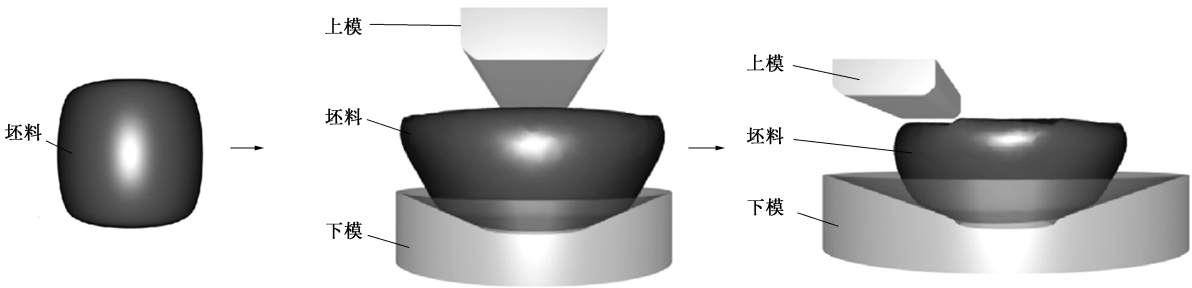


图 7 方案 2 建模图
Fig. 7 Modeling diagram of scheme 2

表 2 不同镦粗高度对应的镦粗力

Table 2 Upsetting forces corresponding to different upsetting heights

镦粗高度 L/mm		3000	2800	2600	2400	2200	2000	1800	1600	1400	1200
镦粗力/MN	方案 1	0	177.87	205.06	219.70	240.16	263.60	287.31	321.56	412.64	491.28
	方案 2	0	100.35	135.20	143.75	149.90	151.21	164.56	168.81	173.65	182.76

均匀。模拟过程中发现，坯料金属主要沿周向流动，表面呈椭圆形，这在实际生产中很难进行矫正，尺寸不易控制。以坯料底面中心为原点，不同镦粗高度对应的镦粗力见表 2，当镦粗高度为 2600 mm 时，镦粗力已经超过 185 MN，实现终锻成形所需的最大镦粗力达到 491.28 MN，远远超出压机实际锻造能力，其载荷-行程曲线如图 8 所示。

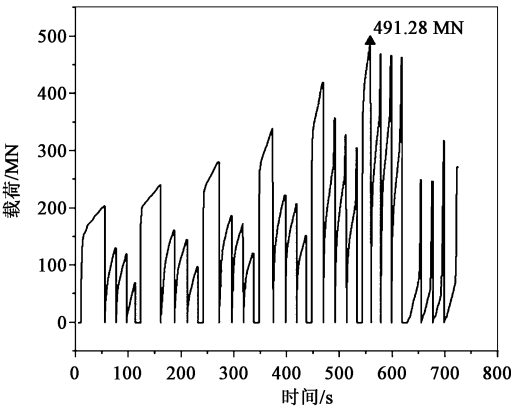


图 8 方案 1 的载荷-行程曲线
Fig. 8 Load-stroke curve of scheme 1

方案 2：充型工序分两步完成，须合理设计预成形镦粗高度，控制最大镦粗力。在预成形模具的预成形锥面中，增大模具锥面角度，所需载荷大幅降低，最大镦粗力为 164.56 MN，在预成形模具中进行终锻成形时，由于接触面的增大，模具作用力逐渐增大，最大镦粗力为 182.76 MN，如表 2 所示，其载荷-行程曲线如图 9 所示。

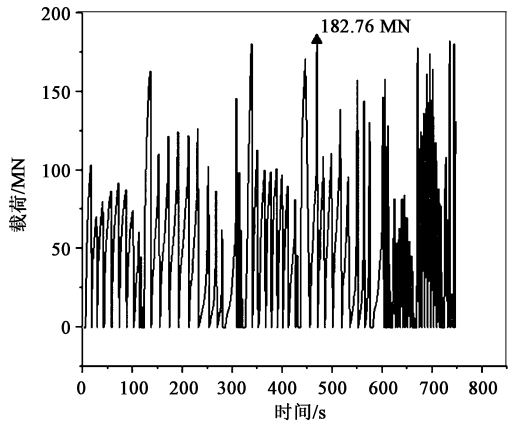


图 9 方案 2 的载荷-行程曲线
Fig. 9 Load-stroke curve of scheme 2

根据模拟结果，方案 1 所需锻造力已远远超出 185 MN 油压机的最大压力载荷，工艺方案不具有可执行性，其他模拟结果后文不再进行分析，充型方案选定方案 2。

2.2.3 充型效果分析

模拟总步数为 132 步，其中，第 1 步~第 63 步为预成形模具中预成形锥面过程，坯料上部直径增加较慢，金属主要向下部直径方向和底部型腔流动。从图 10 可以看出，锻造结束后型腔还未充满。第 72 步时，坯料底面与型腔接触，下模接触面积达到 $9.8\times 10^6\text{ mm}^2$ ，之后坯料向直径方向的流动速度加快，直径明显增大，中部出现鼓肚，坯料与锥面部分的接触面积迅速增加，坯料镦粗至 603 mm（柱面部分）时底部锥面完全充型，如图 11 所示，下模接触面积达到 $1.75\times 10^7\text{ mm}^2$ 。表 3 给出了充型过程中参数变化。



图 10 预成形锥面接触面积
Fig. 10 Contact area of preformed cone



图 11 终锻充型锥面接触面积
Fig. 11 Contact area of final forging cone

表 3 充型过程中参数变化
Table 3 Change of parameters in filling process

成形阶段	步数	柱面部分高度/ mm	坯料底面与模腔 间距/mm	下模接触面积/ ($\times 10^6\text{ mm}^2$)
预成形	18	2064	130	4.25
	36	1715	82.6	5.48
	54	1380	36.8	7.59
终成形	83	797	0.0	9.64
	106	598	0.0	15.80
	115	550	0.0	17.50
	132	420	0.0	30.60

从载荷-行程曲线、锻粗高度与充型的仿真数据中可以得出结论：传统胎模锻工艺（方案 1）所需锻造压力已远远超出设备极限能力，该工艺方案不具有可执行性，须对充型工艺进行创新；改进的胎模锻工艺（方案 2）所需载荷在设备极限内，且充型迅速、完全。下文按方案 2 来评估关键工艺参数的合理性。

2.2.4 方案 2 的关键工艺参数分析

（1）等效应变的点追踪结果分析

在坯料纵剖面选取 P_1 、 P_2 、 P_3 这 3 点，对其等

效应变进行追踪， P_1 点位于坯料上端面中心， P_2 点位于坯料正中心， P_3 点位于坯料下端中心，其等效应变值见表 4。图 12 为预成形模具预成形锥面锻造过程中 3 个点的等效应变曲线，从图 12 可以看到， P_2 点的最大等效应变值为 1.83。图 13 为终成形模具最终成形中 3 个点的等效应变曲线，从结果可以看到， P_2 点的等效应变值较大，达到 3.35。两个成形阶段中，中心部位 P_2 点的等效应变值均超过 0.80，表明充型过程中心部位的变形充分。

表 4 3 点在不同锻粗高度下的等效应变值

Table 4 Equivalent strain values for three points at different upsetting heights

锻粗高度/ mm	预成形							终成形		
	3000	2800	2600	2400	2200	2000	1800	1600	1400	1200
P_1	0	0.093	0.110	0.260	0.310	0.460	3.350	4.740	6.400	7.810
P_2	0	0.860	0.870	1.030	1.180	1.320	1.830	2.270	3.100	3.350
P_3	0	0.081	0.094	0.094	0.096	0.100	0.140	0.160	0.240	0.250

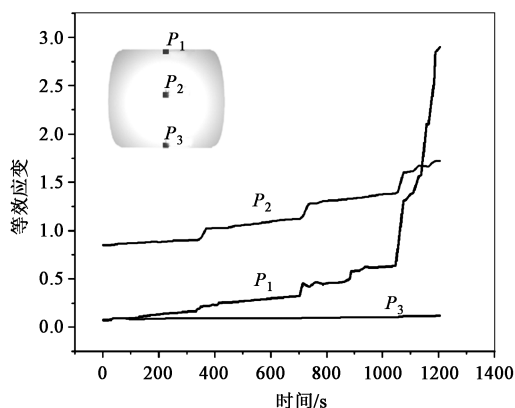


图 12 预成形中 3 个点的等效应变曲线

Fig. 12 Equivalent strain curves for three points in preforming

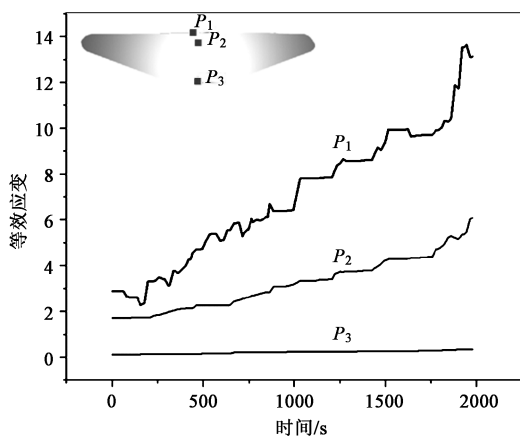


图 13 终成形中 3 个点的等效应变曲线

Fig. 13 Equivalent strain curves for three points in final forming

（2）金属流动情况分析

第 98 步时下模具型腔已经完全充满，坯料下部的金属流动速率降低，上部沿径向的金属流动速率加快。如图 14 所示， x 向的最大金属流动速率达到 $4.139 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。如图 15 所示， y 向的最大金属流动速率达到 $4.584 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。结果表明，型腔充满后坯料沿径向的金属流动速率显著提高，锻件直径尺寸增长较快。

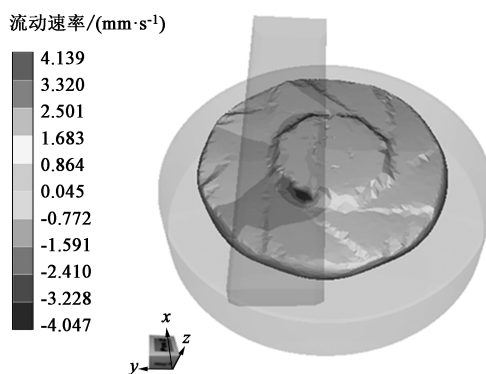


图 14 型腔充满后 x 向金属流动速率分布

Fig. 14 Metal flow velocity distribution in x -direction after cavity filling

（3）应力状态分析

图 16 为坯料的第一主应力分布状态，主要用来分析锻件成形过程中所受的拉应力情况（图 16 中正值区域）。从图 16 可以看出，由于芯部充型完毕，金属主要沿周向流动，呈现受拉状态，因此，容易在周向出现裂纹，这与实际情况较为吻合。图 17 为坯料的第三主应力分布状态，主要用来分析零

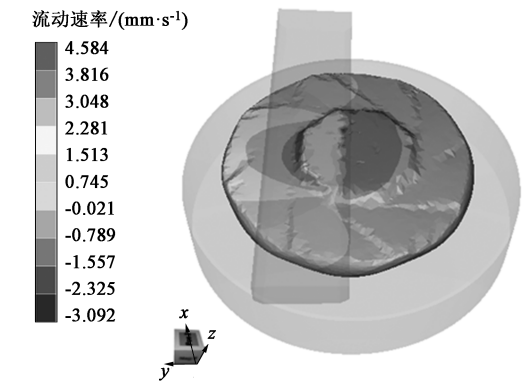


图 15 型腔充满后 y 向金属流动速率分布

Fig. 15 Metal flow velocity distribution in y-direction after cavity filling

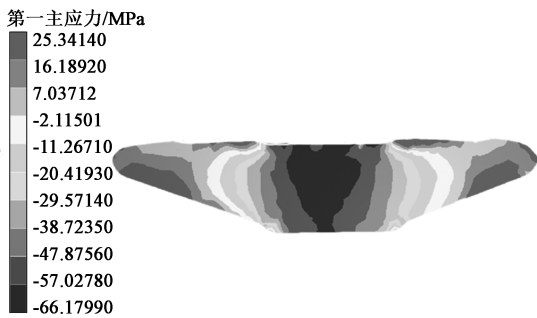


图 16 第一主应力云图

Fig. 16 Cloud diagram of the first principal stress

件所受压应力情况（图 17 中负值区域）。可以看出，成形过程中压应力分布贯穿整个坯料，芯部区

域应力最小值也在 61 MPa 左右，坯料所受拉、压应力值见表 5（只考虑大小），表明在充型过程中中心部位得到压实，锻透性较好，有利于打碎铸态支状晶组织。

（4）等效应变

如图 18 所示，在预成形模具中预成形锥面时，型腔附近坯料的最大等效应变为 0.150，因为压出台阶增大了坯料与模具的接触面积，芯部径向金属流动量较小。如图 19 所示，在终成形模具最终成形时，由于型腔附近还未充满，随着坯料直径的增大，芯部金属流动量也增大，型腔附近坯料的等效应变出现先增大后减小的变化趋势，说明坯料先向型腔流动，中心部位充型完成后，逐渐向周向流动，而此时锻件小端已充型部分后期无变形，小端易出现晶粒粗大，该工序须控制终锻温度不能过高。

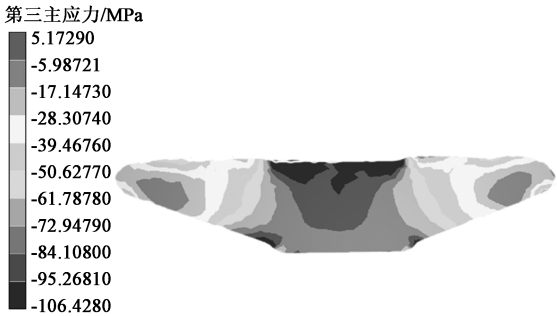


图 17 第三主应力云图

Fig. 17 Cloud diagram of the third principal stress

表 5 充型过程中所受拉、压应力值

Table 5 Tensile and compressive stress values in filling process

镗粗高度/mm	3000	2800	2600	2400	2200	2000	1800	1600	1400	1200
第一主应力/MPa	0	30.21	33.83	50.88	51.12	45.95	59.92	44.82	45.31	97.07
第三主应力/MPa	0	107.03	158.57	138.20	148.62	136.88	120.38	116.64	131.50	224.28

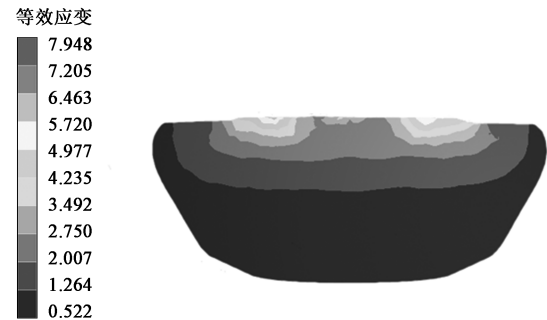


图 18 预成形的等效应变云图

Fig. 18 Equivalent strain cloud diagram during preforming process

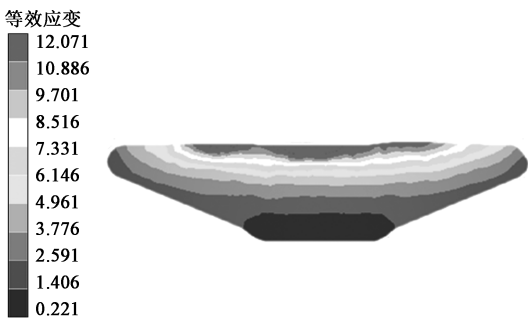


图 19 终成形的等效应变云图

Fig. 19 Equivalent strain cloud diagram during final forming process

(5) 动态再结晶分析

坯料在较高温度下达到临界变形量才会发生动态再结晶行为,如图 20 所示,锻造过程中发现,当墩比为 1.6 时,等效应变最大值为 0.810,在靠近模具位置开始发生动态再结晶行为。图 21 为最终充型结束后的再结晶晶粒尺寸云图,从图 21 可以看出,再结晶主要发生在坯料中心部位,最大晶粒尺寸约为 $165\ \mu\text{m}$,小于初始晶粒尺寸 $204\ \mu\text{m}$,中心部位晶粒得到了细化。

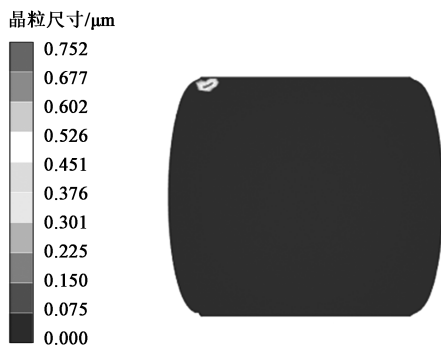


图 20 动态再结晶初始分布

Fig. 20 Initial distribution of dynamic recrystallization

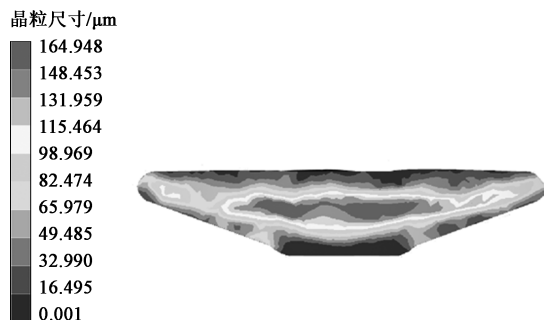


图 21 动态再结晶最终分布

Fig. 21 Final distribution of dynamic recrystallization

3 生产验证

结合模拟结果对工艺参数进行优化,依托 185 MN 自由锻造油压机平台,采用 360000 kg 双真空钢锭进行试制生产,锻件锥面部分的单边余量仅为 25 mm,最终成功实现 $\Phi 6.5\ \text{m}$ 砗铁锻件的近净成形,成品锻件如图 22 所示。



图 22 $\Phi 6.5\ \text{m}$ 砗铁锻件

Fig. 22 Forgings of $\Phi 6.5\ \text{m}$ anvil iron

在小端低应变区域和大端外圆区域分别切取切向试样以检测晶粒度,根据 GB/T 13320—2007^[12]进行评判。如图 23a 所示,小端晶粒度达到 3.5 级,如图 23b 所示,大端晶粒度达到 4 级,未出现晶粒粗大现象。

经外观尺寸检验可知,此锻件满足工艺设计要求,毛净比(毛重/净重)较自由锻工艺降低了 25.4%,单件节约钢锭质量 126000 kg,锻造余量大幅降低。经超声波探伤(按照 EN 10228-3^[13]进行评判)、晶粒度检验,内部质量满足图纸设计要求。锻件检验结果表明,近净成形方案的关键工艺参数设计合理。

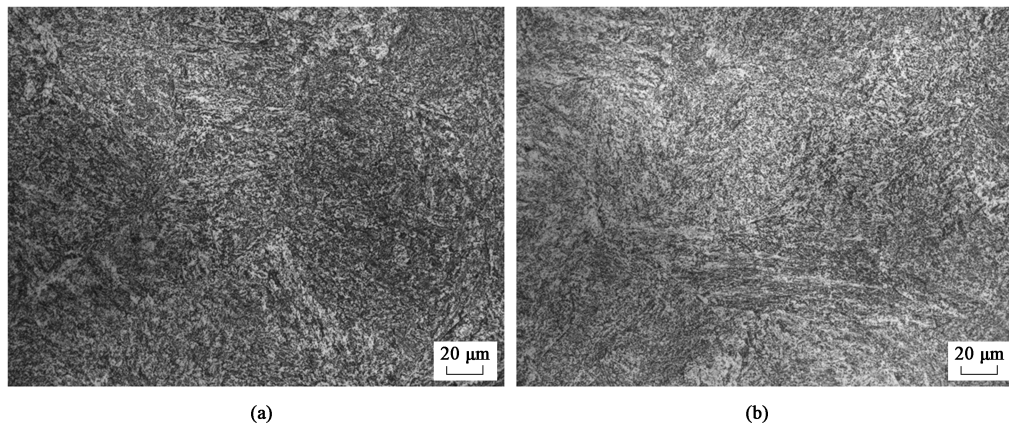


图 23 锻件小端 (a) 与大端 (b) 的金相组织

Fig. 23 Metallographic structures for small end (a) and large end (b) of forgings

4 结论

(1) 采用自由锻制坯+胎模锻成形的工艺方案, 与传统自由锻工艺相比, 锻件减重了 63770 kg, 节约钢锭质量 126000 kg, 毛净比较自由锻工艺降低了 25.4%, 锻件表面质量良好, 各部分尺寸满足工艺要求, 芯部充分锻透。

(2) 通过载荷-行程曲线分析, 传统胎模锻工艺的最大成形载荷远远超出最大自由锻设备的锻造压力, 通过预成形锥面制坯, 有效地解决了压力不足的问题。通过充型过程分析, 验证了预成形大角度锥面有利于最终锻件的近净成形, 同时解决了充型锻造压力超出设备极限载荷的问题。

(3) 通过对等效应变点追踪、金属流动、应力状态、等效应变和动态再结晶的分析可知, 改进后的工艺金属充型迅速, 有效地控制了锻件纤维组织流线的完整性, 中心部位充分锻透, 微观组织致密。

(4) 模拟结果与实际生产制造过程吻合, 验证了充型过程模拟的可靠性, 实现了特大型液压打桩锤锻件的近净成形。

参考文献:

- [1] 陈东华. 水下打桩锤冲击系统动力学分析及砧铁构型优化 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
Chen D H. Dynamic Analysis of Impact System of Underwater Pile Driving Hammer and Configuration Optimization of Anvil [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [2] 孙远韬, 骆礼福, 秦仙蓉, 等. 海洋液压冲击打桩锤机-液系统联合仿真分析 [J]. 中国工程机械学报, 2019, 17 (4): 329-334.
Sun Y T, Luo L F, Qin X R, et al. Co-simulation analysis of hydro-mechanical system for hydraulic impact piling hammer in off-shore engineering [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2019, 17 (4): 329-334.
- [3] 张晓旭, 郭海萍, 王志峰. 大型厚饼类锻件锻造工艺研究 [J]. 大型铸锻件, 2018, 186 (6): 24-25.
Zhang X X, Guo H P, Wang Z F. Research on forging process of heavy thick disk forgings [J]. Heavy Casting and Forging, 2018, 186 (6): 24-25.
- [4] 张发廷. 自由锻胎模锻联合锻造 5 t 加长直柄吊钩的工艺研究 [J]. 青海大学学报, 2010, 28 (3): 5-6.
Zhang F T. Research on the combined forging process with free forging-mold forging for 5 t lengthened straight shank hook [J]. Journal of Qinghai University, 2010, 28 (3): 5-6.
- [5] 韩彦龙. 基于 DEFORM 的坯料尺寸对法兰锻压性能影响的数值模拟 [J]. 承德石油高等专科学校学报, 2016, 18 (1): 16-19.
Han Y L. Finite element numerical simulation on effect for flange forging performance of billet size based on DEFORM [J]. Journal of Chengde Petroleum College, 2016, 18 (1): 16-19.
- [6] 赵玉琳, 王培吉, 闫利军, 等. 基于 DEFORM 数值仿真的钢质活塞塑性成形过程缺陷预测及模具优化 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (6): 87-92.
Zhao Y L, Wang P J, Yan L J, et al. Defect prediction and die optimization on steel piston plastic forming process based on DEFORM numerical simulation [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (6): 87-92.
- [7] 王琪, 赵耀, 陶丽佳, 等. 基于 Deform 的剥皮齿热锻过程仿真及工艺参数优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (7): 14-21.
Wang Q, Zhao Y, Tao L J, et al. Simulation of hot forging process and optimization on process parameters for peeling tooth based on Deform [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (7): 14-21.
- [8] 唐鹏, 于风洋, 刘倩男, 等. Sb 含量及热处理对 Al-11.5Si-9.5Mg 合金组织与性能的影响 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (4): 428-437.
Tang P, Yu F Y, Liu Q N, et al. Microstructure and properties of Al-11.5Si-9.5Mg alloy with sb addition and heat treatment [J]. Chinese Journal of Rare Metals. 2022, 46 (4): 428-437.
- [9] 何舒阳, 杨素媛. Mg-Y-Zn 合金高应变率下 LPSO 结构的变形机制 [J]. 稀有金属, 2021, 45 (3): 257-263.
He S Y, Yang S Y. LPSO in Mg-Y-Zn alloy deformation mechanism under high strain rate [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2021, 45 (3): 257-263.
- [10] 高桥金. 基于数值分析和试验对旋压残余应变的研究 [J]. 热加工工艺, 2013, 42 (17): 83-85.
Gao Q J. Study on redundant strains in spinning based on FE analysis and experiment [J]. Hot Working Technology, 2013, 42 (17): 83-85.
- [11] 康海鹏. 基于 Forge2D/3D 的阀体胎模锻模拟分析 [J]. 金属锻焊技术, 2012, 41 (1): 86-87.
Kang H P. Simulation of die-forging for valve based on forge 2D/3D [J]. Casting Forging Welding Hot Working, 2012, 41 (1): 86-87.
- [12] GB/T 13320—2007, 钢质模锻件 金相组织评级图及评定方法 [S].
GB/T 13320—2007, Metallographic grading atlas and assessing method for steel die forgings [S].
- [13] EN 10228-3: 1998, 钢锻件无损检验 第3部分 铁素体或马氏体钢锻件的超声波试验 [S].
EN 10228-3: 1998, Non-destructive testing of steel forgings—Part 3: Ultrasonic testing of ferritic or martensitic steel forgings [S].