

## DN1800 整锻管模拔长及空收成形技术

郭锐涛<sup>1,2</sup>, 胡振志<sup>1,2</sup>, 金 明<sup>1,2</sup>, 于保宁<sup>1,2</sup>, 李春辉<sup>1,2</sup>, 郭卫东<sup>1,2</sup>, 杨戈辉<sup>1,2</sup>

(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:** DN1800 特大整锻管模锻件相对壁厚极小、规格大、吨位重、火次多、拔长效率低、技术要求高, 且现有生产工装辅具不匹配, 在工艺设计、质量控制和生产组织方面难度极大。通过研究锻造拔长机理及过程, 提出控拔控压工艺方案、拔长效率提升控制方案和  $\Phi 1900$  mm 芯轴拔长+上平下 V 形砧空收+ $\Phi 2200$  mm 上圆弧下 V 形砧复合空收成形工艺方案, 并结合工艺性分析, 建立了塑性变形有限元分析模型, 不断优化工艺参数, 通过提出生产操作关键点, 细化空收工艺参数, 严格进砧量、压下量、温度和旋转角度的匹配控制, 成功完成特大整锻管模的试制生产, 验证了工艺参数及成形工艺的合理性, 积累了特大整锻管模特殊锻造成形经验。

**关键词:** DN1800 整锻管模; 拔长; 空收成形; 压下量; 进砧量; 旋转角度

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.11.010

**中图分类号:** TG316      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2022) 11-0070-08

## Drawing and retract hole forming technology for DN1800 overall pipe mould

Guo Ruitao<sup>1,2</sup>, Hu Zhenzhi<sup>1,2</sup>, Jin Ming<sup>1,2</sup>, Yu Baoning<sup>1,2</sup>, Li Chunhui<sup>1,2</sup>, Guo Weidong<sup>1,2</sup>, Yang Gehui<sup>1,2</sup>

(1. Luo Yang CITIC HIC Casting & Forging Co., Ltd., Luoyang 471039, China;

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

**Abstract:** DN1800 extra-large overall pipe mould forgings has relatively small wall thickness, large specification, heavy tonnage, many heat treatment times, low drawing efficiency and high technical requirements, and the existing production tooling and auxiliary tools do not match. It is extremely difficult in process design, quality control and production organization. Therefore, by studying the mechanism and process of drawing forging, the process scheme of control drawing and control pressure, the drawing efficiency improvement control scheme and the process scheme of mandrel drawing of  $\Phi 1900$  mm + retract hole forming with upper flat and lower V-shaped anvil + compound retract hole forming upper arc of  $\Phi 2200$  mm and lower V-shaped anvil were proposed, and combined with the process analysis, a finite element analysis model of plastic deformation was established. Furthermore, the process parameters were continuously optimized. By proposing key points of production operations, refining the process parameters of retract hole and strictly matching control of anvil amount, reduction amount, temperature and rotation angle, the trial production of extra-large overall pipe mould was successfully completed to verify the rationality of process parameters and forming processes, which accumulated the experience in special forging and forming of extra-large overall pipe mould.

**Key words:** DN1800 overall pipe mould; drawing; retract hole forming; reduction amount; anvil amount; rotation angle

管模是离心铸管机的关键部件, 系铸管行业中重要的成形模具。其工作环境恶劣, 承受高温铁水冲刷和极高旋转速度冲击, 不但要求具有较高的强度、塑性和韧性, 而且要求具备较高的抗氧化性和优异的综合力学性能, 以期满足足够的拔管支数的目的。

本次承制的 DN1800 管模要求整体锻造成形, 不允许任何局部补焊, 成形难度极大。而业界受制于工装辅具、锻造难度和成本控制等多重因素, DN1800 及以上口径管模基本采用分段锻造-焊接成形的工艺方案, 鲜有整锻成形的报道<sup>[1-2]</sup>。

由于整锻管模焊缝少、整体一致性好的特点, 特大型管模要求整锻成形的案例逐渐增多, 其中, 洛阳中重铸锻有限责任公司成功锻造的世界最大 DN2000 整体锻造管模创造了业界多个首次, 逐步掌握和积累了大型管模的拔长特点, 为特大型整锻管模试制提供了技术支撑。而本次承制的 DN1800 整锻管模无合适的工装辅具, 为减少投入和缩短制

收稿日期: 2021-12-07; 修订日期: 2022-03-09

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2020YFB2008400)

作者简介: 郭锐涛 (1985-), 男, 学士, 工程师

E-mail: hngt@163.com

通信作者: 胡振志 (1981-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: zhenzhi401@163.com

造周期, 采用 DN2000 管模整锻成形所用的工装辅具进行锻造, 在拔长效率、锻造工艺参数控制和成形工序方面进行重新设计, 基于此, 首次提出  $\Phi 1900$  mm 芯轴拔长+上平下 V 形砧空收 (预留收孔量)+ $\Phi 2200$  mm 上圆弧下 V 形砧复合空收成形的工艺方案。

本文结合 DN1800 特大整锻管模锻造特性和现有工装辅具, 制定可控工艺方案, 并结合数值模拟仿真分析, 重点研究整锻管模的复合空收成形工艺方案、拔长效率提升控制方案和控拔控压工艺方案, 在钢锭冶炼、锻造生产操作方面提出了具体的控制措施。

## 1 主要技术指标

本文研究的 DN1800 整锻管模锻件的重量为 72100 kg、最大直径为  $\Phi 2480$  mm、长度为 6940 mm, 属于细长、薄壁、套类锻件, 材质为 20CrMo 钢, 具体锻件图见图 1, 其主要技术要求为: ①成分按照 YB/T 4179—2008<sup>[3]</sup> 执行, 其中有害元素铅、锡、铋应满足质量分数  $\leq 0.010\%$ , 砷的质量分数  $\leq 0.015\%$ ; 成品气体应满足  $H \leq 1.5$  ppm、 $O \leq 20$  ppm、 $N \leq 60$  ppm; ②超声波探伤按照国家标准 GB/T 6402—2008<sup>[4]</sup> 中 III 级执行; ③酸浸试片低倍组织一般疏松和锭型偏析均不大于 3 级; 非金属夹杂物按照国家标准 GB/T 10561—2005<sup>[5]</sup> 中 ISO 评级图评级, A、B、C、D、Ds 各类夹杂物均不大于 2.0 级。

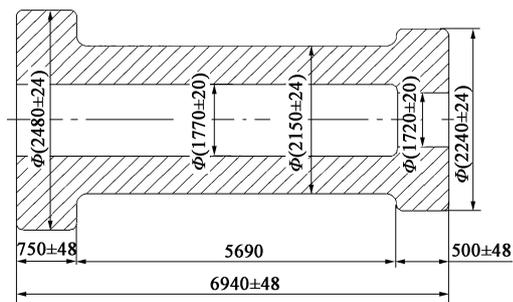


图 1 DN1800 管模锻件图

Fig. 1 Forgings drawing of DN1800 pipe mould

## 2 锻造成形难点分析

公司现有大规格芯轴  $\Phi 1600$  和  $\Phi 1900$  mm, DN1800 管模锻造缺少合适工装辅具, 结合 DN1800 薄壁管模结构特点和近净成形技术, 提出  $\Phi 1900$  mm 芯轴拔长+上平下 V 形砧空收+ $\Phi 2200$  mm 上圆弧下 V 形砧复合空收成形工艺方案。

该方案主要成形难点如下。

(1) 拔长效率极低、锻造火次多。DN1800 整锻管模锻件相对壁厚  $t/d=0.107$  (其中,  $t$  和  $d$  分别为空心件壁厚与内径),  $t/d$  值越小, 锻造成形时芯轴拔长外端对金属切向流动的限制力愈弱, 拔长效率愈低, 越不利于变形区金属轴向伸长。业界内, 长套类锻件  $t/d < 0.5$  已属于较难拔长锻件, 而该口径管模在实际生产中需要采用  $\Phi 1900$  mm 芯棒拔长, 实际拔长的  $t/d$  值更小 ( $t/d=0.1$ ), 进一步增加了锻造难度, 同时也增加了芯轴不同拔长阶段的拔长难度, 降低了成形效率 (表 1), 此外实际生产中缺少合适的圆弧砧工装辅具, 进一步制约了锻造效率的提升<sup>[6-8]</sup>。

表 1 不同拔长阶段拔长难度系数对比

Table 1 Comparison of drawing difficulty coefficients in different drawing stages

火次	$\Phi 1900$ mm 芯棒		$\Phi 1770$ mm 芯棒	
	外圆控制/mm	相对壁厚 $t/d$	外圆控制/mm	相对壁厚 $t/d$
I	$\Phi 2700$	0.210	$\Phi 2580$	0.229
II	$\Phi 2450$	0.145	$\Phi 2340$	0.161
III	$\Phi 2350$	0.118	$\Phi 2250$	0.136
IV	$\Phi 2280$	0.100	$\Phi 2150$	0.107

结合上述对比分析, 随着拔长的进行, 壁厚逐步减小,  $t/d$  值逐渐减小, 拔长难度逐渐增加; 而相同火次、不同芯棒拔长时,  $\Phi 1900$  mm 芯棒拔长的  $t/d$  值明显低于  $\Phi 1770$  mm 芯棒拔长的  $t/d$  值, 拔长难度相应增加。

(2) 工装辅具不匹配, 需要空收成形 (内孔无芯轴), 且空收量较大, 空收成形参数匹配难度较大。现有系列芯棒、圆弧砧工装辅具不能完全匹配拔长要求, 采用  $\Phi 1900$  mm 芯棒拔长时需要空收成形, 空收量为 130 mm, 空收量较大。在常规套类锻件空收成形中已掌握了空收量在 50 mm 以内的薄壁锻件成形, 且经验丰富, 而对于如此大的空收量尚属首次, 在进砧量、压下量、旋转角度和温度匹配控制方面难度较大; 此外, 空收外圆尺寸超出圆弧砧使用范围, 为保证质量空收成形采用两阶段收孔方案, 即第 1 阶段采用上平下 V 形砧进行预收孔, 第 2 阶段采用上圆弧下 V 形砧精准空收, 保证空收成形质量的可靠性<sup>[9]</sup>。

(3) 拔长工艺参数匹配控制。芯轴拔长关键控制参数进砧量、压下量、温度和旋转角度匹配, 工艺参数匹配程度影响拔长效率和锻件质量。预拔长

阶段,坯料壁厚较厚,宜采用高温、大压下量、大进砧量和较大的旋转角度,如果旋转角度较小,由于薄壁长套拔长时存在局部扩孔现象,极易出现内壁折叠裂纹和凹坑现象。终成形阶段由于变形量较小、壁厚薄、金属轴向流动助力大,宜采用较低温度,匹配小压下量、小进砧量和较小的旋转角度,降低金属轴向流动阻力<sup>[10-11]</sup>。

### 3 模拟仿真分析

#### 3.1 模拟参数设置

利用数值模拟仿真软件对相关参数进行设置,

网格划分采用三维四面体单元,模型工装辅具选用刚性材料,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,进而建立简化后的有限元模型如图2所示。

结合 DN1800 管模成形工艺的特殊性,重点模拟:①对比模拟两种芯棒( $\Phi 1900$  和  $\Phi 1770$  mm)的拔长效率;②特殊空收成形可靠性模拟分析。根据实际工艺过程,在模拟分析中取有限元计算参数为坯料初始网格数 120000,拔长温度为  $1240\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,空收成形温度为  $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,材料为 16CrMo4 钢,平均增量步长为 1 mm。毛坯与模具各部件之间的热摩擦因数均取  $m=0.7$ <sup>[12-13]</sup>。

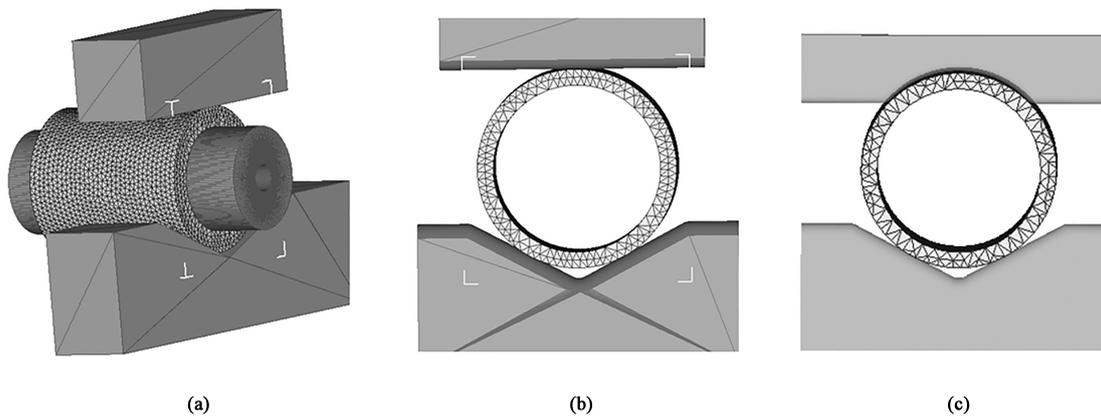


图2 有限元模型

(a) 芯棒拔长模型 (b) 上平下V形砧空收成形模型 (c) 上圆弧下V形砧空收成形模型

Fig. 2 FEM models

(a) Model of mandrel drawing (b) Retract hole forming model with upper flat and lower V-shaped anvil

(c) Retract hole forming model with upper arc and lower V-shaped anvil

#### 3.2 拔长效率对比分析

结合两种芯棒拔长特点,为便于对比分析,选取第1火次拔长后的坯料进行模拟对比,为节省时间,坯料尺寸分别设定为  $\Phi 2700$  mm $\times\Phi 1900$  mm $\times 3200$  mm

和  $\Phi 2500$  mm $\times\Phi 1770$  mm $\times 3200$  mm,压下量设定为 150 mm,进砧量为 1000 mm,旋转角度为  $35^{\circ}$ 。

经模拟对比(图3)发现(仅模拟一锤):采用  $\Phi 1900$  mm 芯棒拔长时,最短边长度增长量为

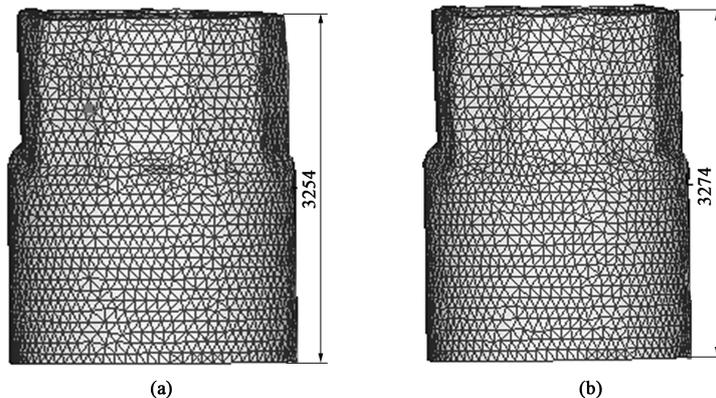


图3 两种芯棒管模拔长模拟对比

(a)  $\Phi 1900$  mm (b)  $\Phi 1770$  mm

Fig. 3 Simulation comparison of drawing for two kinds of mandrel pipe moulds

54 mm，而采用  $\Phi 1770$  mm 芯棒拔长时，最短边长度增长量为 74 mm，由于采用  $\Phi 1900$  mm 芯棒拔长时  $l/d$  值更小，不利于轴向拔长，拔长难度增加，效率更低。

此外，由于坯料壁厚较薄，外端金属对变形区金属的限制力较弱，以及工装辅具不匹配，导致拔长时坯料未能抱住芯轴，随着拔长的进行，局部扩

孔现象更加明显。如图 4 所示，在拔长初期芯轴与坯料间隙很小，随着拔长的进行，壁厚逐步减薄，金属切向流动的限制力更弱，间隙也逐渐增大，进一步降低了拔长效率<sup>[6]</sup>。

结合上述分析，采用  $\Phi 1900$  mm 芯棒拔长时增加了拔长难度和锻造火次，实际生产中宜采用相对较大的进砧量，提高拔长效率。

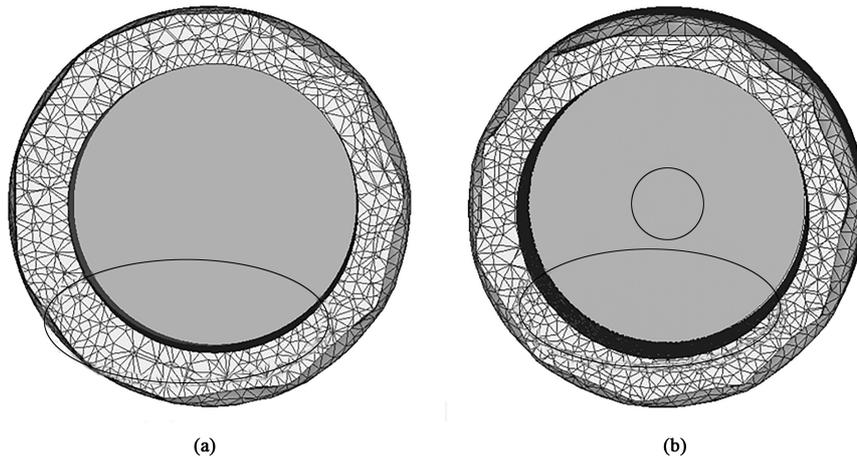


图 4 坯料与芯轴贴合度对比分析

(a) 芯轴拔长初期局部扩孔情况 (b) 芯轴终拔长后局部扩孔情况

Fig. 4 Comparison and analysis of fit degree between blank and mandrel

(a) Local reaming condition of initial stage for mandrel drawing (b) Local reaming condition of terminal stage for mandrel drawing

### 3.3 空收成形可靠性分析

#### 3.3.1 不同参数设置的仿真分析

空收成形主要涉及参数：压下量、进砧量、温度和旋转角度，根据生产实际和空收成形经验，压下量和旋转角度对空收成形效果的影响最大。DN1800 管模上平下 V 形砧总共空收量为 80 mm，

分道次模拟不同压下量的空收成形效果。

#### (1) 不同压下量的仿真分析

空收成形参数设置：温度为 1050 °C、进砧量为 600 mm、旋转角度为 25°。由图 5 和表 2 分析可知：随着压下量的增加，第 1 锤空收成形时“椭圆”的程度加大，当压下量为 20 mm 时，十字交叉方向直

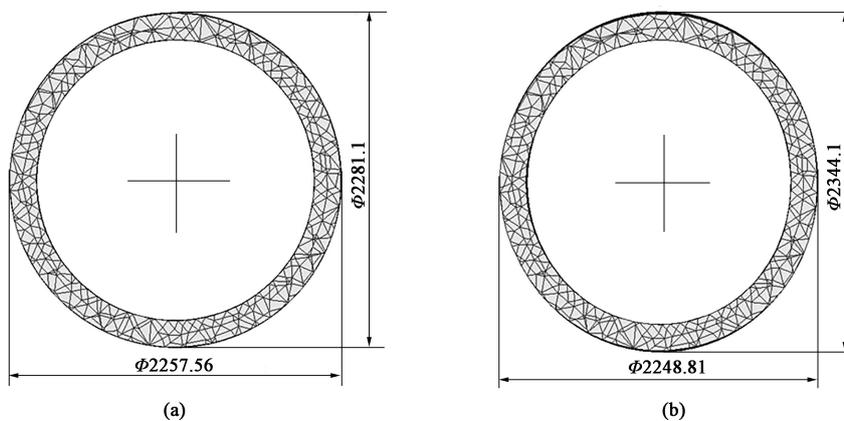


图 5 不同压下量下的十字交叉方向尺寸情况

(a) 压下量为 20 mm (b) 压下量为 80 mm

Fig. 5 Size conditions of different reduction amounts in cross direction

(a) Reduction amount of 20 mm (b) Reduction amount of 80 mm

表 2 不同压下量的空收成形数据对比

Table 2 Comparison of retract hole forming data with different reduction amounts

压下量/ mm	压后正向 直径/mm	压后十字 交叉方向 直径/mm	十字交叉 方向直径 差值/mm	直板情况	椭圆 情况
20	Φ2257	Φ2281	18	不明显	轻微
40	Φ2254	Φ2399	45	轻微	轻微
60	Φ2251	Φ2321	70	轻微	明显
80	Φ2248	Φ2344	96	明显	明显

径差为 18 mm, 翻转一定角度后最大压下量差值为 3.5 mm; 当压下量为 80 mm 时, 十字交叉方向直径差为 96 mm, 翻转一定角度后最大压下量差值为 16 mm。为达到相同空收直径的目的, 在不同方向必然采用参数不等的压下量, 且与锤头接触部位的压下量越大, “直板”现象越明显; 此外, 由于上平下 V 形砧总体空收量未超过 80 mm, 空收成形过程不会产生折叠缺陷, 因此, 上平下 V 形砧空收成形阶段, 为减少不同方向压下量差和控制“直板”

面积过大的问题, 每趟次空收量不宜大于 60 mm, 能够获得较好的外观质量<sup>[8]</sup>。

### (2) 不同旋转角度的仿真分析

空收成形参数设置: 温度为 1050 ℃、进砧量为 600 mm、匹配不同的旋转角度和压下量。由图 6 和表 3 分析可知: 当压下量为 20 mm、旋转角度不大于 40°时, 外圆表面几乎不存在“直板”、“椭圆”和局部“凸起”现象, 外圆弧面成形质量较好; 当压下量增大至 60 和 80 mm 时, 旋转角度较小时, 外圆弧面总体质量较好, 这是由于匹配较小的旋转角度, 锤与锤之间的搭接比较密集, 消除了压下量过大而产生的“直板”和“凸起”现象; 但随着旋转角度的增加, 由于锤与锤之间搭接量较小, 未能消除因压下量过大而产生的“直板”和局部“凸起”现象, 外观质量较差。实际生产中, 采用上平下 V 形砧空收成形时, 较小压下量可采用相对较大的旋转角度, 但压下量较大时, 即使旋转角度较小, 也不能获得理想的外圆弧面质量, 基于此, 上平下 V 形砧空收成形时的旋转角度不宜大于 35°。

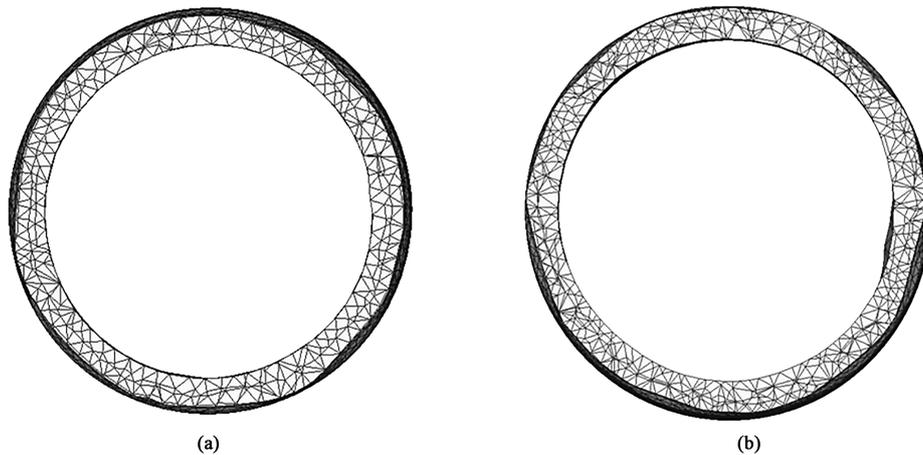


图 6 上平下 V 形砧空收成形模拟对比

(a) 压下量为 60 mm、旋转角度为 30° (b) 压下量为 80 mm、旋转角度为 30°

Fig. 6 Simulation comparison of retract hole forming with upper flat and lower V-shaped anvil

(a) Reduction amount of 60 mm and rotation angle of 30° (b) Reduction amount of 80 mm and rotation angle of 30°

表 3 不同旋转角度时空收成形质量对比

Table 3 Comparison of retract hole forming quality under different rotation angles

旋转角度/ (°)	压下量/mm			
	20	40	60	80
10	弧面很好	弧面很好	弧面很好	弧面较好
20	弧面很好	弧面较好	弧面较好	弧面一般
30	弧面很好	弧面较好	直板和凸起轻微	直板和凸起明显
40	弧面较好	弧面一般	直板和凸起明显	直板和凸起明显

### 3.3.2 空收成形的综合模拟分析

根据上述仿真结果和实际生产情况, 并结合上平下 V 形砧+上圆弧下 V 形砧复合空收成形工艺, 设定模拟参数: ①上平下 V 形砧的空收量为 80 mm (空收成形后直径为 Φ2200 mm), 采用两道次空收成形, 每道次压下量为 40 mm、锻造温度为 1050 ℃、进砧量为 600 mm、旋转角度为 30°; ②上圆弧下 V 形砧的空收量为 50 mm (空收成形后直径为 Φ2150 mm), 锻造温度为 1050 ℃, 首趟压下量为 30 mm、最后 1 趟的压

下量为 20 mm, 进砧量为 600 mm, 旋转角度为 45°。

结合模拟效果图(图 7)分析, 采用上平下 V 形砧空收成形后, 外圆存在局部“凸起”和“直板”现象, 采用上圆弧下 V 形砧空收成形后, 与 V 形砧接触部位仍存在局部“凸起”和“直板”现

象, 但与圆弧砧接触部位总体弧度较好(图 7a 中方框所示部位); 后续通过整圈往复旋转收孔后, 局部“凸起”和“直板”现象得到改善, 由于圆弧砧的弧形结构设计促使收孔部位接触面产生规则的弧形面, 外观质量较好(图 7b)。

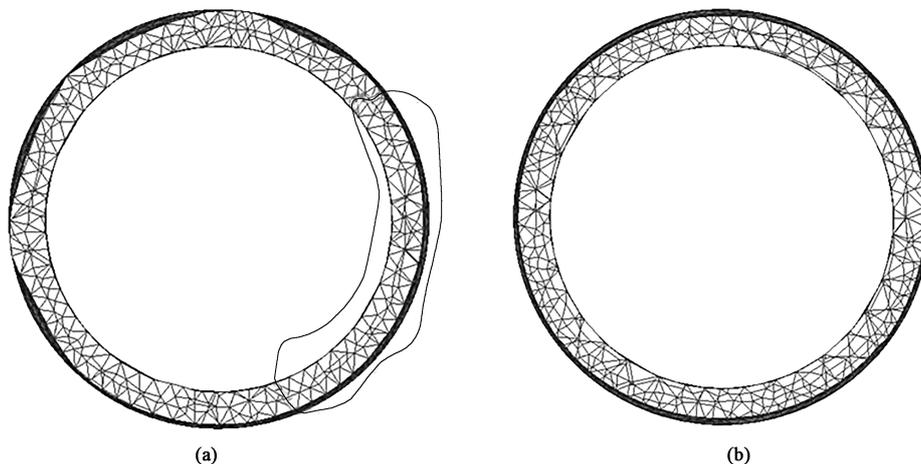


图 7 复合空收成形后模拟效果图

(a) 圆弧砧接触部位空收成形效果 (b) 总体空收成形后效果图

Fig. 7 Simulation effect diagrams after composite retract hole forming

(a) Effect of retract hole forming at arc anvil contact parts (b) Overall effect diagram after retract hole forming

## 4 工艺技术方案制定

针对上述生产难点和技术分析, 分别从钢锭冶炼、参数控制、生产操作等方面进行工艺方案制定, 并提出具体控制措施。

### 4.1 钢水冶炼控制

为保证钢锭纯净度, 采取 EBT 初炼—LF 精炼—VD 真空脱气—VC 真空浇注工艺方案。

(1) 优选炉料, 辅助材料入炉使用前需保持干燥, 优先选用内壁质量良好的冒口, 冒口、锭模、底盘使用前需将残钢、残渣清理干净;

(2) 电炉出钢  $P \leq 0.005\%$ , 电炉出钢量满足钢水量的要求, 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  $\geq 100$  min, 精炼过程加强脱氧,  $O \leq 30$  ppm;

(4) 真空处理时, 钢水在高真空状态下保持足够时间, 真空处理结束后确保温度满足出钢温度;

(5) 真空浇注严格控制钢锭浇注速度和脱模时间, 浇注完毕后脱模热送。

### 4.2 拔长过程控制

管模锻件采用  $\Phi 1900$  mm 芯棒, 拔长阶段按照 4 火次进行控制, 根据不同阶段匹配不同工艺参数, 如图 8 所示。

(1) 预拔长第 1 火次: 拔长至  $\Phi 2700$  mm  $\times$  3050 mm, 压下量为 150 mm、进砧量为 1200 mm、旋转角度为 40°, 采用大压下量和大进砧量提高拔长效率。

(2) 预拔长第 2 火次: 拔长至  $\Phi 2700$  mm  $\times$  550 mm +  $\Phi 2450$  mm  $\times$  3700 mm, 压下量为 150 mm、进砧量为 1200 mm、旋转角度为 40°。

(3) 预拔长第 3 火次: 拔长至  $\Phi 2700$  mm  $\times$  550 mm +  $\Phi 2350$  mm  $\times$  4450 mm +  $\Phi 2450$  mm  $\times$  370 mm, 压下量为 120 mm、进砧量为 900 mm、旋转角度为 35°。

(4) 终拔长: 拔长至  $\Phi 2700$  mm  $\times$  550 mm +  $\Phi 2260$  mm  $\times$  5650 mm +  $\Phi 2460$  mm  $\times$  370 mm, 压下量为 80 mm、进砧量为 700 mm、旋转角度为 30°, 修整两端法兰分别至  $\Phi 2600$  mm  $\times$  550 mm 和  $\Phi 2350$  mm  $\times$  550 mm, 该阶段壁厚极薄, 采用小进砧量改善金属轴向流动速度<sup>[9-10]</sup>。

### 4.3 空收成形过程控制

根据空收量 130 mm, 设定了终拔长各部分外圆控制尺寸, 为后续空收成形提供足够金属坯料<sup>[14-15]</sup>。

上平下 V 形砧空收成形阶段: 主要为后续上圆弧下 V 形砧空收成形做准备, 总空收量为 80 mm (外圆空收成形至直径为  $\Phi 2200$  mm), 采用小进砧量、小压下量和小旋转角度, 参数控制按照两道

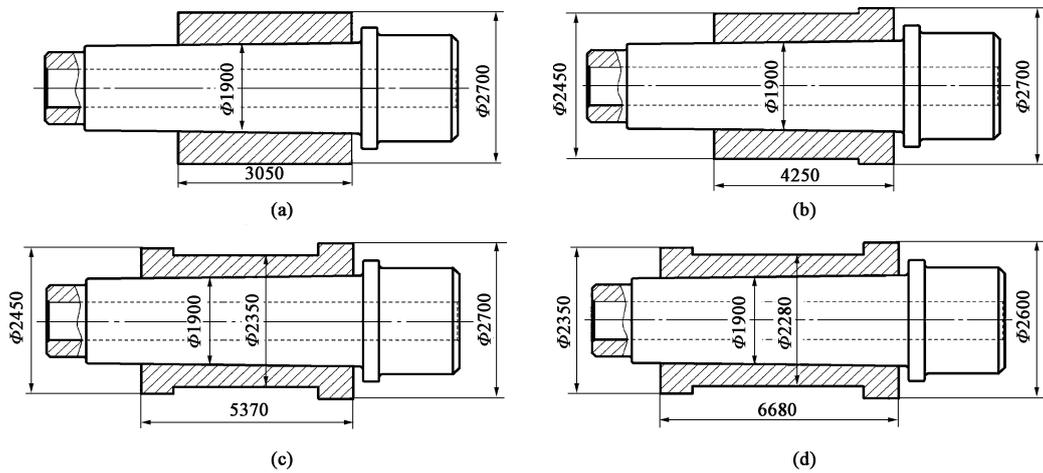


图 8 拔长过程控制

(a) 预拔长第 1 火次 (b) 预拔长第 2 火次 (c) 预拔长第 3 火次 (d) 终拔长

Fig. 8 Drawing process control

(a) The first firing of pre-drawing (b) The second firing of pre-drawing (c) The third firing of pre-drawing (d) Final drawing

次收孔、进砧量为 600 mm、压下量为 40 mm、旋转角度为  $30^\circ$ 、锻造温度为  $750\sim 1050\text{ }^\circ\text{C}$ 。

上圆弧下 V 形砧空收成形阶段：收孔前坯料尺寸不大于  $\phi 2200\text{ mm}$ ，空收量为 50 mm，首趟空收量为 30 mm，最后 1 趟空收量为 20 mm，旋转角度为  $45^\circ$ 。

## 5 生产试制

依据上述参数进行生产试制，如图 9 所示，验证合理性。

经生产试制，该支管模按照预定的控制参数，

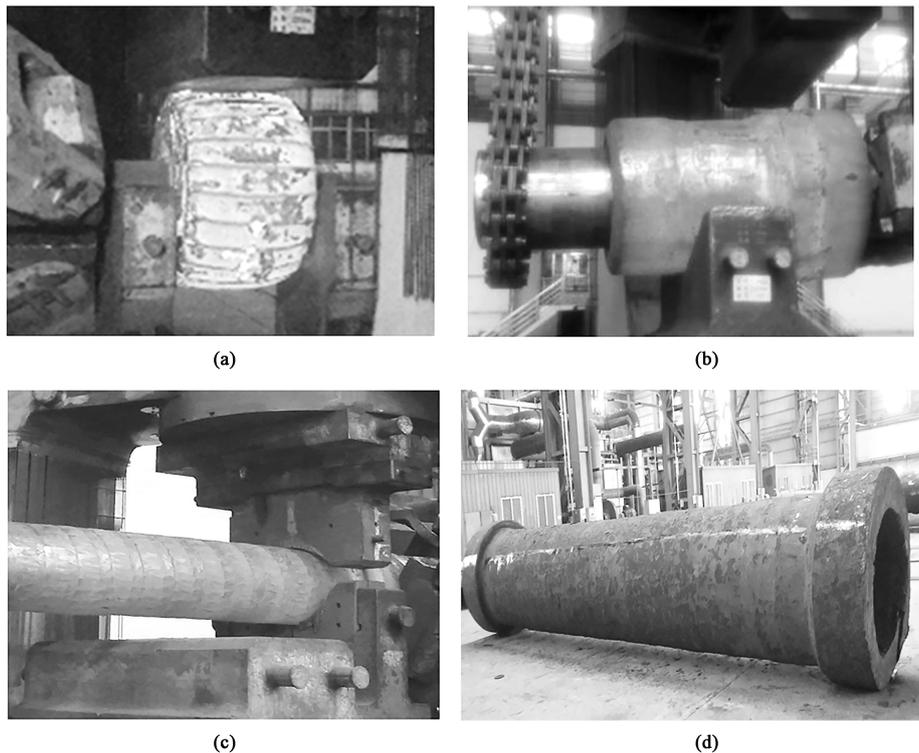


图 9 DN1800 整锻管模拔长及空收成形试制过程

(a) 扩孔阶段 (b) 芯轴拔长阶段 (c) 空收成形出成品阶段 (d) DN1800 管模毛坯

Fig. 9 Trial production process of drawing and retract hole forming for DN1800 overall pipe mould

(a) Stage of enlarging hole (b) Stage of mandrel drawing (c) Stage of finished product by retract hole forming (d) DN1800 pipe mould blank

拔长和空收环节采用 4 火次成形, 拔长效率较高, 满足仿真模拟预期和工艺设计要求, 该支管模预备热处理后各部分实际检验尺寸为:  $\Phi 2595 \text{ mm} \times \Phi 1770 \text{ mm} \times 760 \text{ mm} + \Phi 2155 \text{ mm} \times \Phi 1760 \text{ mm} \times 5670 \text{ mm} + \Phi 2240 \text{ mm} \times \Phi 1700 \text{ mm} \times 510 \text{ mm}$ , 满足后续加工要求, 且空收成形效果较好, 表面质量优良, 满足尺寸加工和超声波探伤要求。

## 6 结论

(1) 拔长时根据壁厚和内径确定最终拔长后控制尺寸, 保证后续收孔要求。

(2) 采用上平下 V 形砧和上圆弧下 V 形砧复合空收成形工艺方案, 能够获得可观的外观质量。

(3) 采用大口径芯轴拔长时, 进砧量、压下量、温度和旋转角度的匹配性至关重要, 预拔长阶段采用高温、大压下量、大进砧量和较大的旋转角度; 终拔长阶段采用较低温度, 匹配小压下量、小进砧量和较小的旋转角度, 能够提高拔长效率, 保证锻件质量。

### 参考文献:

- [1] 吕炎. 锻造工艺学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.  
Lyu Y. Forging Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 1995.
- [2] 丁明琦. 芯轴拔长变形规律及成形质量控制研究 [D]. 济南: 山东大学, 2019.  
Ding M Q. Study on Deformation Behavior and Quality Control of Mandrel Forging Process [D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [3] YB/T 4179—2008, 水冷金属型离心铸造球墨铸铁管管模 [S].  
YB/T 4179—2008, Water-cooled metallic tube mould for centrifugal ductile iron pipe [S].
- [4] GB/T 6402—2008, 钢锻件超声检测方法 [S].  
GB/T 6402—2008, Steel forgings—Method for ultrasonic testing [S].
- [5] 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].
- [6] 郭卫东, 胡振志, 任增海, 等. 提高 DN1000 管模锻造拔长效率的方法 [J]. 模具工业, 2016, 42 (6): 55-58.
- Guo W D, Hu Z Z, Ren Z H, et al. Methods for improving drawing efficiency of DN1000 tube sheet [J]. Die & Mould Industry, 2016, 42 (6): 55-58.
- [7] 胡振志, 梁晓朋, 董文斐, 等. 薄壁长套锻件拔长影响因素分析 [J]. 模具工业, 2016, 42 (4): 54-56.  
Hu Z Z, Liang X P, Dong W F, et al. Research on stretching of the large tube sheet with thin-wall [J]. Die & Mould Industry, 2016, 42 (4): 54-56.
- [8] 郭卫东, 胡振志, 孙统辉, 等. DN2000 特大型管模整体锻造成形技术研究 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (19): 159-161.  
Guo W D, Hu Z Z, Sun T H, et al. Research on integral forging technology of DN2000 extra-large tube die [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (19): 159-161.
- [9] 孙丽杰, 杨峰, 张兴铎. 管模内壁裂纹原因分析 [J]. 一重技术, 1998, (1): 62-63.  
Sun L J, Yang F, Zhang X D. The cause analysis of inner hole of the tube sheet [J]. CFHI Technology, 1998, (1): 62-63.
- [10] 许四海. 管模工艺的优化 [J]. 大型铸锻件, 2005, (4): 37.  
Xu S H. The optimization of the tube mold technology [J]. Heavy Casting and Forging, 2005, (4): 37.
- [11] 田仲可. 薄壁结构件塑性成形技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2002.  
Tian Z K. A Study of the Plastic Forming Technology of Thin-walled Structural Components [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2002.
- [12] 左旭. 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. The key techniques of 3D FEM simulation in bulk forming [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1999, 5 (3): 325-329.
- [13] 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.
- [14] 胡振志, 郭卫东, 彤亮, 等. DN2000 特大型整锻管模成形仿真分析与试验研究 [J]. 模具工业, 2017, 43 (11): 23-27.  
Hu Z Z, Guo W D, Rong L, et al. Simulation analysis and experiment research of forging processes for DN2000 tube sheet [J]. Die & Mould Industry, 2017, 43 (11): 23-27.
- [15] 陈英, 钟志平, 边翊, 等. 核电压力容器壳锻件芯轴拔长工艺 V 砧砧角的常温模拟研究 [J]. 塑性工程学报, 2000, 7 (3): 52-56.  
Chen Y, Zhong Z P, Bian Y, et al. Modeling research on the anvil angle of mandrel drawing for RPV forging at room temperature [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2000, 7 (3): 52-56.