

CuNi90/10 铜合金高颈法兰精辗成形数值模拟与试验研究

郑丛芳, 杨青云, 周铁柱, 马俊普, 郁 炎

(中国船舶集团有限公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471023)

摘要: 高颈法兰的颈部高度和底盘外径大, 采用锻造后机加工的方法制作生产效率较低。为提高生产效率, 通过对现有辗环工艺进行分析, 借助有限元软件建立了高颈法兰精辗模型, 并对典型规格的外径 $\Phi 159$ mm 的高颈法兰轧制成形过程进行了仿真分析, 研究了驱动辊转速、芯辊进给速度、毛坯形式对高颈法兰轧制成形过程的影响。结果表明: 增加驱动辊转速与芯辊进给速度可以减少轧制缺陷, 同时采用锥形内孔可以避免内孔产生蝶型缺陷。最终确定了法兰内孔形式为锥形内孔、驱动辊转速 $\omega = 5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 、芯辊径向进给速度 $V = 3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。最后设计配套模具进行试验验证, 完成了典型规格高颈法兰的产品试制, 验证了高颈法兰辗环成形工艺的可行性。

关键词: 铜合金; 高颈法兰; 辗环成形; 驱动辊转速; 进给速度; 锥形内孔

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.03.018

中图分类号: TG146.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 03-0132-07

Numerical simulation and test study on precision rolling of CuNi90/10 copper alloy for high neck flange

Zheng Congfang, Yang Qingyun, Zhou Tiezhu, Ma Junpu, Yu Yan

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China)

Abstract: The neck height and the outer diameter of chassis for high neck flange are large, and the production efficiency is low by the method of machining after forging. Therefore, in order to improve the production efficiency, through the analysis on the existing ring rolling process, the precision rolling model of the high neck flange was established by finite element software, and the rolling process of the high neck flange with an typical specification of the outer diameter of $\Phi 159$ mm was simulated and analyzed. Then, the influences of rotation speed of drive roller, feeding speed of core roller and blank forms on the rolling process of the high neck flange were investigated. The results show that increasing the rotation speed of drive roller and the feeding speed of core roller can decrease rolling defects, and the use of tapered inner hole can avoid butterfly defects in the inner hole. Finally, the inner hole form of flange is determined as a tapered inner hole, and the rotation speed of drive roller $\omega = 5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ and the feeding speed of core roller $V = 3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Furthermore, a supporting die is designed for test verification, and the trial production of the high neck flange with typical specification is completed to verify the feasibility of the high neck flange rolling process.

Key words: copper alloy; high neck flange; ring rolling; rotation speed of drive roller; feeding speed; tapered inner hole

CuNi90/10 白铜管材及管附件具有优良的耐腐蚀性能、抗海生物污损及其他综合性能, 是替代紫铜、不锈钢等应用于海水环境的理想材料, 在国内外造船业和海洋工程业中被大量采用^[1-4]。

高颈法兰又称对焊法兰, 是管道工程常用的附件之一, 如图 1 所示, 为整体式法兰, 其颈部的存在大大提高了法兰自身的刚性, 适用于压力和温度波动大或高温、高压及低温的管道^[5]。

高颈法兰的传统生产工艺主要有铸造和锻造两

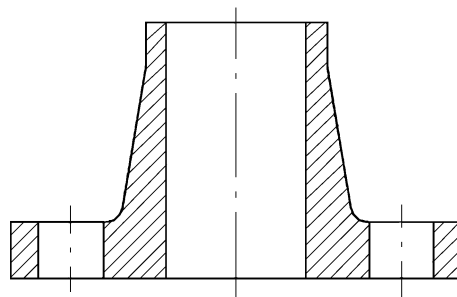


图 1 高颈法兰结构图

Fig. 1 Structure diagram of high neck flange

种方式: 铸造法兰组织疏松, 容易产生气孔、夹杂、裂纹等缺陷, 难以保证法兰成品的力学性能; 锻造法兰组织致密, 力学性能优良, 但其所需压机吨位高, 占用人员多, 模具损耗率高, 且毛坯形状不规

收稿日期: 2022-05-05; 修订日期: 2022-08-11

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB3700700)

作者简介: 郑丛芳 (1984-), 女, 硕士, 工程师

E-mail: lindy-fangfang@163.com

则,模腔成形容易产生折叠、裂纹、黑皮等缺陷,为了保证法兰成品质量,需要增大加工余量,故而材料利用率低下(50%~65%)。

辗环(又称轧环、环件辗扩或扩孔),是一种环保、节材、高效的塑性加工技术^[6]。利用辗环机使坯料产生连续的局部塑性变形,迫使坯料的壁厚减薄、直径扩大,通常用于无缝环形机械零件成形,辗制工艺的金属晶粒排列致密,生产效率高,设备能耗小,毛坯形状规则,表面质量好,材料利用率高。高颈法兰属于典型的异形截面环件,开展高颈法兰的一次精密辗制成形研究,能够显著降低材料成本、提升产品质量,具有理论意义和工程应用价值^[7-8]。

1 高颈法兰辗环工艺流程

金属塑性变形遵循体积不变定律,变形时金属沿最小阻力方向流动,辗制过程中法兰坯料以内、外径增大为主变形,高度方向变形很小。因此,只要提供合适的初始坯,且辗环工艺合理,就能够实现高颈法兰的精密辗制成形。高颈法兰辗环采用直径为 $\Phi 145$ 或 $\Phi 245$ mm的实心铸锭作为原材料,生产的基本工艺流程如图2所示。

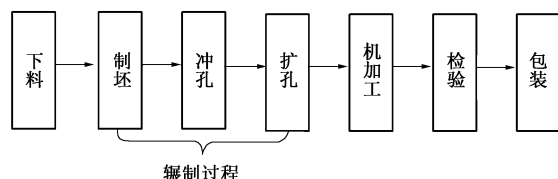


图2 法兰精密辗制工艺流程

Fig. 2 Flow of precision rolling process for flange

高颈法兰辗制过程主要包含3个步骤。

(1) 制坯。制坯的作用是便于扩孔时金属更好地充满型腔,可有效减少金属回流、折叠等缺陷,保证了产品质量。从外形上将高颈法兰分为底盘和颈盘两部分,按照金属塑性变形体积不变的原则,保留加工余量,对底盘和颈盘的体积进行分配,确定了初始坯的尺寸,制坯采取电液锤胎模成形方式,根据初始坯尺寸设计相应的锻模工装,胎模制坯相当于进行一次模锻,有助于细化组织、提高性能,冲孔在锻模内完成,不仅能保证初始坯的外形尺寸,还能进一步压缩晶粒。

(2) 冲孔。冲孔是将实心锻件转变为环形锻件的重要步骤,将坯料加热至一定温度后利用实心冲头冲出圆孔。

(3) 扩孔。扩孔是在芯辊直线运动和驱动辊旋

转运动的作用下,使坯料在封闭模腔内产生连续性变形的过程。直径不断扩大,当坯料与控制轮产生接触后表明已到达指定外径,辗环行为终止。扩孔辗环的具体原理如图3所示,其中, u 为辗压辊作为驱动辊的主动旋转运动转速箭头端运动方向。

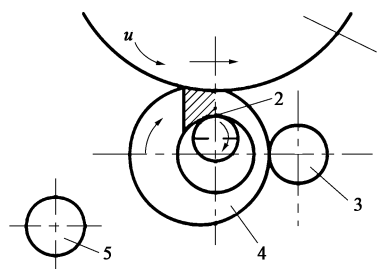


图3 辗环原理图

1. 辗压辊 2. 芯辊 3. 导向轮 4. 工件 5. 控制轮

Fig. 3 Principle diagram of ring rolling

辗扩比 K 为辗扩前毛坯的壁厚与辗扩后锻件的壁厚之比,即:

$$K = \frac{D_m - d_m}{D_n - d_n} \quad (1)$$

式中: D_m 为毛坯外径,mm; d_m 为毛坯内径,mm; D_n 为锻件外径,mm; d_n 为锻件内径,mm。

辗扩比直接影响锻件的尺寸、成形质量、生产效率等指标,选择合适的辗扩比主要依据辗环机尺寸、制坯方式、辗扩温度、芯辊强度等因素,本文采用轴向数控辗环机,故选择 K 为1.25~1.30^[9]。

2 有限元模型的建立

随着计算机技术的发展和有限元数值模拟的广泛应用,采用有限元数值模拟方法研究高颈法兰的辗制过程,优化坯料形状,制定辗制工艺,对于保证辗制过程的平稳顺利、确保成形质量具有重要意义。

2.1 几何模型的建立

本文选用EEMUA234—2016^[10]中规格外径为 $\Phi 159$ mm、壁厚为3.5 mm、压力等级为2.0 MPa的高颈法兰作为研究对象,基于有限元软件对高颈法兰辗制过程进行数值模拟。CuNi90/10铜合金是以镍、铁、锰为主要添加元素的一种白铜合金,其化学成分如表1所示,材料的流变应力本构方程如式(2)所示^[11]。

$$\dot{\epsilon} = 1.405 \times 10^{12} [\sinh(0.0135\sigma)]^{7.728} \times \exp(-305194/RT) \quad (2)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, s^{-1} ; σ 为真应力,MPa; R 为摩尔气体常数,取为 $8.314 J \cdot (mol \cdot K)^{-1}$; T 为热力学温度,K。

表 1 CuNi90/10 铜合金的化学成分 (%, 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of CuNi90/10 copper alloy (%, mass fraction)

Ni	Fe	Mn	P	S	C	Zn	Cu
10.0 ~ 11.0	1.5 ~ 2.0	0.5 ~ 1.0	<0.02	<0.02	<0.05	<0.2	余量

根据式 (2) 新建了 CuNi90/10 铜合金的材料模型。根据热成形模具结构, 在 AutoCAD 中分别绘制坯料和辗压轮的二维图形, 导入分析软件旋转生成三维实体, 芯轴直接在软件中输入直径和高度生成实体^[12]。设置坯料为塑性体, 辗压轮、芯轴为刚体, 输入网格控制参数自动生成网格, 网格大小设置为 25000, 根据成品尺寸定义毛坯的最终外径为 $\Phi 290$ mm, 毛坯网格划分如图 4 所示。

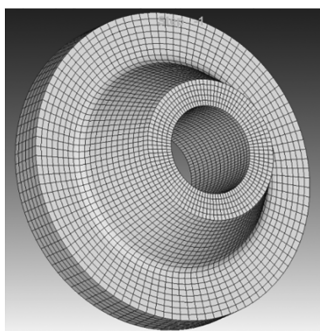


图 4 毛坯网格划分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of mesh generation for blank

2.2 环件轧制模拟参数设置

环件轧制过程中需要确定各工件与坯料的接触匹配关系, 驱动辊作为主动轮, 带动坯料做旋转运动, 坯料带动芯辊做旋转运动。基于以上匹配关系进行环件轧制模拟参数即摩擦因数和接触面的设置。

2.3 环件轧制终止条件设定

环件轧制模拟过程的终止条件可以通过设置轧环外径、芯辊移动距离和总的轧制过程持续时间来

确定, 终止条件设定完成后软件会自动计算轧制模拟的步长及增量。扩孔前坯料剖面图及有限元模型如图 5 和图 6 所示。

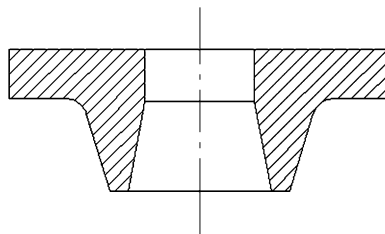


图 5 扩孔前坯料剖面图

Fig. 5 Section diagram of blank before reaming

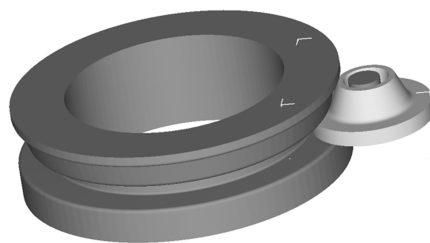


图 6 辗制有限元模型

Fig. 6 Finite element model of rolling

3 模拟结果与分析

3.1 轧制变形的影响因素

高颈法兰轧制的主要影响因素包括制坯尺寸、驱动辊转速、芯辊进给速度等, 分析不同工艺参数对高颈法兰轧制质量的影响。

3.1.1 制坯尺寸

制坯是将原始铸锭转化为环件轧制初始毛坯的过程, 轧制毛坯的结构形式对最终的环件轧制质量有重要的影响, 按照金属塑性变形体积不变的原则, 依据最终毛坯的尺寸对底盘和颈盘的体积进行分配, 设计了两种形式的初始坯的尺寸, 如图 7 所示。

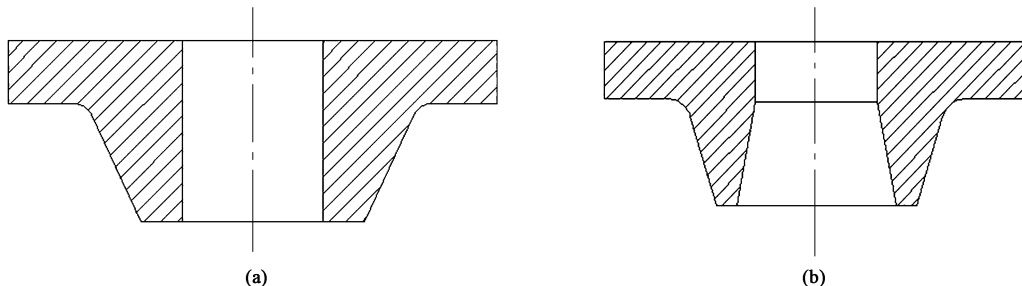


图 7 两种形式的初始坯对比

(a) 内部直孔 (b) 内部锥孔

Fig. 7 Comparison for two forms of initial blanks

(a) Internal straight hole (b) Internal taper hole

分别按照图7所示两种初始坯对高颈法兰轧制过程进行仿真。图7a为内部直孔,其结构简单,制造方便,具有较好的工艺性能,但会在轧制过程中产生缺陷,影响后续轧制。分析原因为: F_1 和 F_3 作用力存在高度差,会产生一个逆时针方向的转矩,使得颈部率先与驱动辊接触,产生蝶形缺陷^[13-14]。内部直孔坯料轧制示意图如图8所示,其中, F_1 、 F_2 、 F_3 为轧制过程中法兰毛坯所受的3个共同作用力, γ 为毛坯颈部与轧辊接触后产生的倾角, P 为在倾角 γ 的作用下产生的向下分力; w 为驱动辊转速; V 为芯辊进给速度。

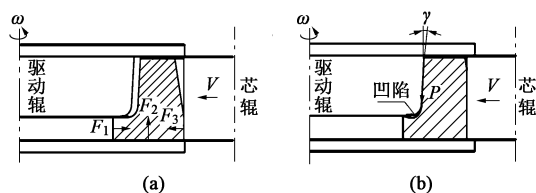
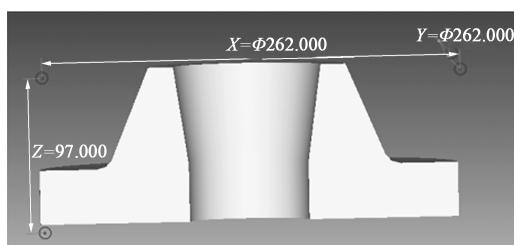


图8 内部直孔坯料的轧制示意图

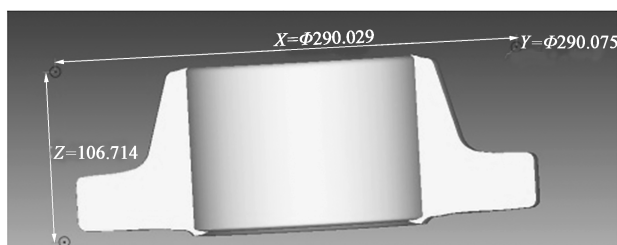
(a) 轧制初期 (b) 轧制中期

Fig. 8 Schematic diagram of rolling for blank with internal straight hole

(a) Initial stage of rolling (b) Middle stage of rolling



(a)



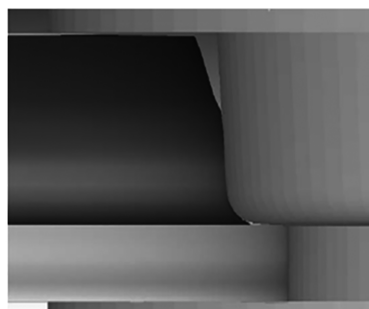
(b)

图10 内部锥孔坯料的轧制仿真分析

(a) 轧制毛坯 (b) 轧制产品

Fig. 10 Simulation analysis of rolling for blank with internal taper hole

(a) Rolling blank (b) Rolling product



(a)



(b)

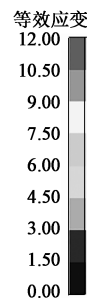


图11 不同驱动辊转速下轧件的等效应变云图

(a) $\omega = 2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ (b) $\omega = 5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 11 Equivalent strain cloud diagrams for rolled piece under different rotation speeds of drive roller

坯料采用内部锥孔形式,可以使得轧制过程中内、外表面受力均匀,且作用在同一高度,不产生转矩,有效避免了蝶形缺陷的产生,从而轧制出预期毛坯。内部锥孔坯料的轧制示意图及仿真分析结果如图9和图10所示。其中, α 为毛坯颈部预定的一个不等于驱动辊倾斜角的角度, α 远大于 γ ; X 、 Y 、 Z 分别为法兰轧制毛坯底盘截面的轴向直径、径向直径和高度。

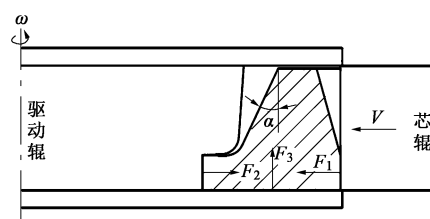


图9 内部锥孔坯料的轧制示意图

Fig. 9 Schematic diagram of rolling for blank with internal taper hole

3.1.2 驱动辊转速

设置芯辊进给速度恒定为 $3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 不同驱动辊转速时轧件的等效应变云图如图11所示。对比驱动辊转速分别为2、3、4和5 $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,轧制力矩随时间的变化曲线如图12所示。驱动辊转速对

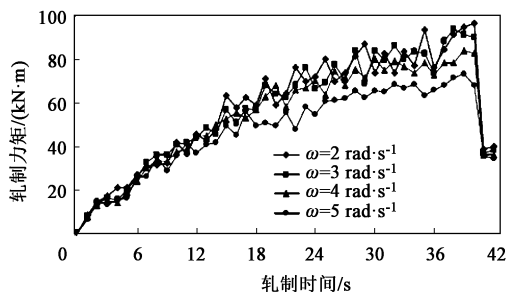


图 12 轧制力矩随时间的变化曲线

Fig. 12 Variation curves of rolling torque with time

轧制力矩的影响较小, 轧制初期轧制力矩基本不变, 随着轧制的进行, 驱动辊转速增加, 轧制力矩反而

减小。因此,在工业化生产中为了追求较小的力矩从而降低设备载荷,通常采用提高驱动辊转速的方法。驱动辊转速越快,相同时间内轧制圈数越多,越有利于轧制成形。

3.1.3 芯辊进给速度

设置驱动辊转速恒定为 $5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ，芯辊进给速度分别为 1 、 2 、 3 和 $4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时轧件的等效应变云图如图 13 所示，不同芯辊进给速度时轧制力矩随时间变化的曲线如图 14 所示。初始阶段轧制力矩快速上升，经过一段时间以后进入平台期，然后伴随着轧制的进行保持缓慢增加的趋势。芯辊进给

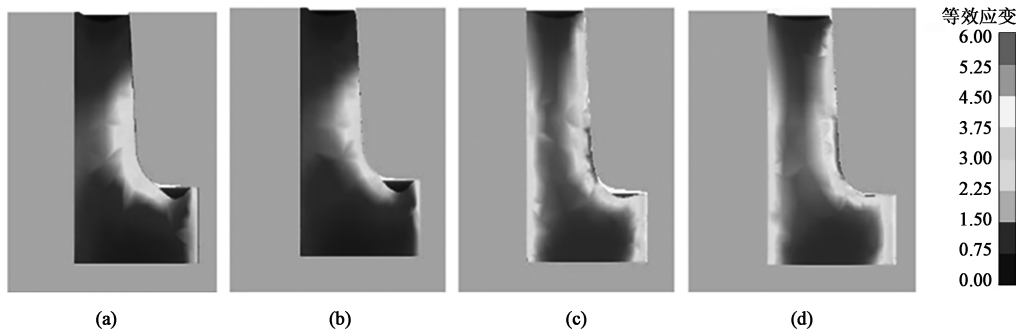


图 13 不同芯辊进给速度下轧件的等效应变云图

(a) $V=1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (b) $V=2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (c) $V=3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (d) $V=4 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 13 Equivalent strain cloud diagrams for rolled piece under different feeding speeds of core roller

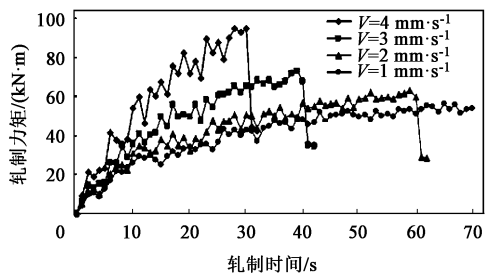


图 14 芯辊进给速度对轧制力矩的影响曲线

Fig. 14 Influence curves of feeding speed of core roller on rolling torque

速度越快, 轧制力矩越大, 当工件进入整圆阶段后, 由于芯辊不再进给, 轧制力矩快速降低。

芯辊进给速度越快, 出现鱼尾纹缺陷越轻, 其原因因为进给速度越快, 轧制力越大, 改善了锻透条件。

3.2 高颈法兰轧制模具的设计

综合考虑高颈法兰轧制外形尺寸和轧制设备参数,设计并制造了典型高颈法兰成形模具,其驱动辊和芯辊的尺寸结构如图 15 和图 16 所示。

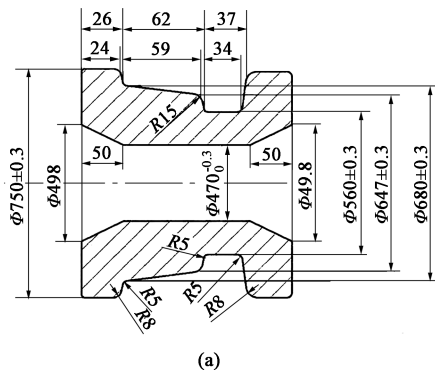


图 15 驱动辊尺寸 (a) 及实物图 (b)



Fig. 15 Dimensions (a) and physical diagram (b) of drive roller

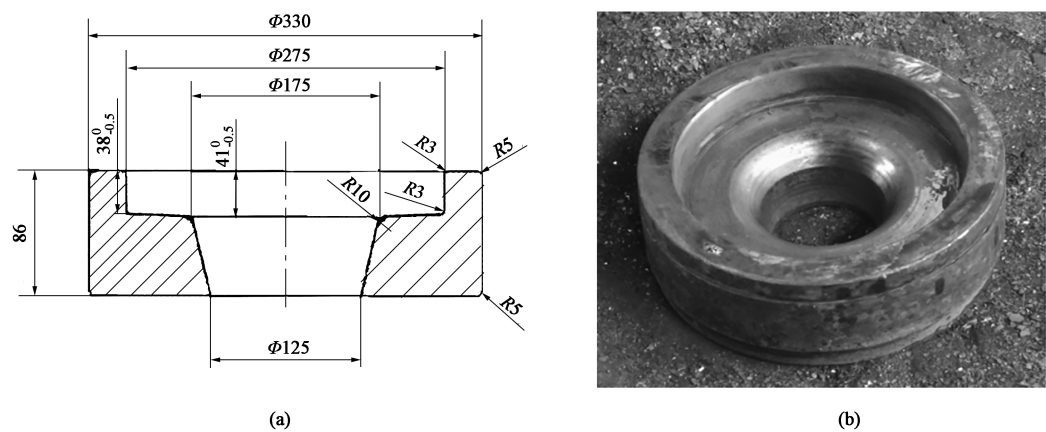


图 16 芯辊尺寸 (a) 及实物图 (b)
Fig. 16 Dimensions (a) and physical diagram (b) of core roller

4 试制及性能检测

4.1 试验

制坯在 1.5 t 空气锤或 1250 t 锻压机上进行, 制坯采用胎膜锻方式, 其优点是能够降低模具成本且操作便捷。首先对坯料进行墩粗, 墩粗过程中当在坯料侧面产生鼓形后, 应及时通过侧压将鼓形修直, 再继续墩粗, 从而防止折皱、裂纹等缺陷。墩粗时, 圆截面坯料的高径比不宜超过 3^[15]。

当金属充盈模腔后, 需要对坯料进行冲孔, 采用模内冲孔的方式, 不仅能保证初始坯的外形尺寸, 还能进一步压缩晶粒, 由于高颈法兰坯料较厚, 一般采用双面冲孔法^[16]。高颈法兰轧制毛坯及机加工成品图分别如图 17 和图 18 所示。

4.2 高颈法兰性能检测

为了验证辗环成形法兰的性能, 对毛坯进行破坏性取样分析, 对抗拉强度、屈服强度、断后伸长率、硬度及金相等项目进行检测, 检测项目及结果如表 2 所示。各项试验数据结果表明, 辗制成形的高颈法兰性能指标完全满足 EEMUA234—2016^[10] 的要求。

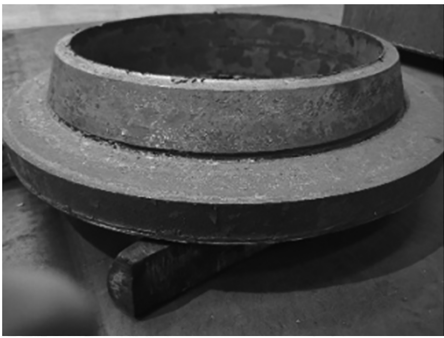


图 17 高颈法兰毛坯
Fig. 17 High neck flange blank



图 18 高颈法兰机加工成品
Fig. 18 Machined product of high neck flange

表 2 高颈法兰检测项目及结果
Table 2 Inspection items and results for high neck flange

试样	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%	布氏硬度/HBW
横向试样	318、323、327	140、137、138	44.0、46.5、47.5	92.5
纵向试样	325、317、321	142、136、143	44.5、43.5、48.5	94.0
EEMUA234—2016 ^[10]	≥280	≥105	≥30	≥70

5 结论

(1) 驱动辊转速越快, 不仅能够降低设备负荷, 同时能够提高轧制质量, 故选择 $\omega = 5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$; 芯辊进给速度越快, 设备负荷越大, 但能够减少鱼尾纹缺陷的产生, 综合考虑, 选择 $V = 3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; 锥形内孔有助于避免蝶形缺陷的产生。最终确定锥形内孔、 $\omega = 5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $V = 3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 为最优工艺组合。

(2) 通过结合数值模拟与物理模拟验证试制出符合要求的高颈法兰。

(3) 本文提出的方法也适用于 EEMUA234—2016 标准中的外径为 $\Phi 219 \sim \Phi 610 \text{ mm}$ 的高颈法兰的成形。

参考文献:

- [1] 张智强, 郭泽亮, 雷竹芳. 铜合金在舰船上的应用 [J]. 材料开发与应用, 2006, 21 (5): 43-46.
Zhang Z Q, Guo Z L, Lei Z F. Applications of copper alloy in shipbuilding [J]. Development and Application of Materials, 2006, 21 (5): 43-46.
- [2] 周铁柱, 马艳霞, 蒋鹏, 等. 铜合金弯头冷推成形影响因素分析及工艺参数优化 [J]. 材料开发与应用, 2018, 33 (2): 38-46.
Zhou T Z, Ma Y X, Jiang P, et al. Influencing factors and parameters optimization of cold push-bending for copper alloy elbow [J]. Development and Application of Materials, 2018, 33 (2): 38-46.
- [3] 梁晨, 周铁柱, 刘乐乐, 等. 铜合金三通内高压成形工艺优化探究 [J]. 材料开发与应用, 2018, 33 (5): 74-79.
Liang C, Zhou T Z, Liu L L, et al. Research on the optimization of internal pressure forming process for copper-nickel alloy tee [J]. Development and Application of Materials, 2018, 33 (5): 74-79.
- [4] 周铁柱, 张志远, 马艳霞, 等. 沉积铜箔用阴极辊钛环轧制驱动辊转速研究 [J]. 材料开发与应用, 2017, 32 (3): 39-45.
Zhou T Z, Zhang Z Y, Ma Y X, et al. Research on rotation speed of driving roll in the roll of titanium ring used for electrodeposited copper foil [J]. Development and Application of Materials, 2017, 32 (3): 39-45.
- [5] 肖旻. 高颈法兰封闭轧制成形关键技术研究 [D]. 宁波: 宁波大学, 2012.
Xiao M. Research on the Key Technologies of High Neck Flange Forming with Closed Ring Rolling Technology [D]. Ningbo: Ningbo University, 2012.
- [6] 华林, 韩星会. 环件轧制和摆动碾压精密成形技术 [J]. 精密成形工程, 2009, 1 (1): 21-26.
Hua L, Han X H. Precision forming technologies of ring rolling and rotary forging [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2009, 1 (1): 21-26.
- [7] 王志慧. 环件轧制技术现状和发展 [J]. 机械制造, 2003, (9): 31-33.
Wang Z H. Statusquo and development of ring rolling technology [J]. Machinery, 2003, (9): 31-33.
- [8] 张保军, 杨合, 郭良刚. 基于虚拟正交试验的 Inconel690 合金大口径壁厚管挤压工艺仿真 [J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42 (3): 488-493.
Zhang B J, Yang H, Guo L G. Virtual orthogonal experiment study on needle piercing extrusion process of Inconel690 alloy large-diameter thick-walled tube [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42 (3): 488-493.
- [9] 肖旻, 束学道, 孙宝寿. 高颈法兰封闭轧制成形的数值模拟研究 [J]. 现代制造工程, 2012, (4): 14-16.
Xiao M, Shu X D, Sun B S. Numerical simulation research on high-neck flange closed ring rolling [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2012, (4): 14-16.
- [10] EEMUA234—2016, 90/10 Copper nickel alloy piping for offshore applications specification (Incorporation EEMUA144, 145 and 146) [S].
- [11] 庞国华, 刘援朝, 孙康宁, 等. 高颈法兰成形新工艺的研究 [J]. 轧钢, 1994, (1): 21-24.
Pang G H, Liu Y C, Sun K N, et al. Study on the new forming technology of high-neck flange [J]. Steel Rolling, 1994, (1): 21-24.
- [12] 冷纪桐. 有限元技术基础 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
Leng J T. Finite Element Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [13] Lin T, Pillinger I, Hartley P. A finite-element simulation of profile ring rolling using a hybrid mesh model [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 80: 199-205.
- [14] 华林. 轧环机工作参数理论设计 [J]. 锻压装备与制造技术, 2000, (2): 8-10.
Hua L. Theoretical design of working parameters of ring rolling mill [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2000, (2): 8-10.
- [15] 杨文兵, 姜海峰. 基于 DEFORM 环件轧制塑性成形过程数字仿真 [J]. 土木工程与管理学报, 2006, (2): 56-58.
Yang W B, Jiang H F. Numerical simulate of ring rolling deforming process based on DEFORM [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2006, (2): 56-58.
- [16] 于华民, 董方, 吴运新, 等. 大型铝合金 C 形截面环轧制过程数值模拟和轧制区成形规律分析 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (11): 197-206.
Yu H M, Dong F, Wu Y X, et al. Numerical simulation on rolling process and analysis on rolling zone forming law for large aluminum alloy C-shaped cross-section ring [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (11): 197-206.