

# 大规格铜镍合金凸缘热挤压成形工艺

付利国, 周铁柱, 苑 伟, 马俊普, 周振亚, 王伟波

(中国船舶集团有限公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471023)

**摘要:** 传统大规格凸缘通常采用“锻造成形+机加工”的工艺生产, 锻造损耗较大, 为保证凸缘成品质量, 需要增大加工余量, 但这会导致材料利用率较低。针对此问题, 以 DN700 大规格铜镍合金凸缘为研究对象, 对其产品结构和成形工艺进行分析。利用有限元分析软件对 DN700 大规格凸缘成形过程进行模拟分析, 改进了现有生产工艺, 并设计制作了配套成形模具。最后进行了试验验证, 完成 DN700 大规格凸缘新工艺的试制, 获得了抗拉强度大于 280 MPa、屈服强度大于 105 MPa、伸长率大于 30% 的样件。结果表明, 采用挤压成形工艺成形 DN700 大规格铜镍合金凸缘大大降低了产品的生产成本、提高了材料利用率。

**关键词:** 铜镍合金; 大规格凸缘; 挤压; 损伤; 模具设计

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.04.022

**中图分类号:** TG146.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 04-0169-07

## Hot extrusion forming process of large-size copper-nickel alloy flange

Fu Ligu, Zhou Tiezhu, Yuan Wei, Ma Junpu, Zhou Zhenya, Wang Weibo

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

**Abstract:** The traditional large-size flanges are usually produced by the process of “forging+maching”, and the forging loss is relatively large. In order to ensure the quality of finished flange, it is necessary to increase the processing allowance which will lead to lower material utilization. Aiming at this problem, for DN700 large-size copper-nickel alloy flange, its product structure and forming process were analyzed, and the forming process of DN700 large-size flange was simulated and analyzed by finite element analysis software. Then, the existing production process was improved, and the matched forming mold was designed and made. The experimental verification results show that the trial production of new process of DN700 large-size flange is completed, and the samples with the tensile strength greater than 280 MPa, the yield strength greater than 105 MPa and the elongation greater than 30% are obtained. Thus, the extrusion forming process is used to form DN700 large-size copper-nickel alloy flanges, which greatly reduces the production cost of product and improves the utilization rate of material.

**Key words:** copper-nickel alloy; large-size flange; extrusion; damage; mold design

铜镍合金因具有良好的耐腐蚀性能<sup>[1-9]</sup>而广泛应用于舰船海水管路系统<sup>[10-14]</sup>和海洋工程平台<sup>[15-18]</sup>。凸缘又称法兰, 是法兰的一种形式, 如图 1 所示, 凸缘和钢制法兰配套使用被称为凸缘松套法兰, 是舰船海水管路系统和海洋工程平台管路系统连接部件的重要组成部分。随着船舶及海洋平台的大型化发展, 对大规格铜镍合金管件产品的需求量越来越大, 其中, 大规格铜镍合金凸缘管件作为管路连接的重要附件, 需求量也与日剧增。

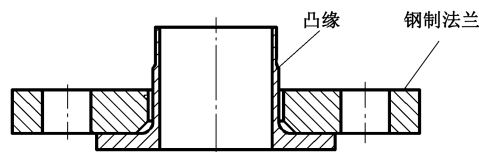


图 1 凸缘和钢制法兰示意图

Fig. 1 Schematic diagram of flange and steel flange

针对小规格凸缘通常采用棒材机加工成形的方法, 中型规格凸缘可根据凸缘的结构形式设计正挤压或反挤压成形模具。图 2 为大规格凸缘结构示意图。针对大规格凸缘, 由于尺寸较大, 通常采用“锻造成形+机加工”的工艺路线, 但由于大规格凸缘尺寸的限制, 采用锻造成形所需的成形设备吨位较大, 同时锻造损耗大, 为了保证凸缘的成品质量, 需要增大加工余量, 但会导致材料利用率降低。

收稿日期: 2023-02-22; 修订日期: 2023-03-28

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2021YFB3700700)

作者简介: 付利国 (1979-), 男, 学士, 高级工程师

E-mail: 1139591076@qq.com

通信作者: 周铁柱 (1989-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: aaronchow@163.com

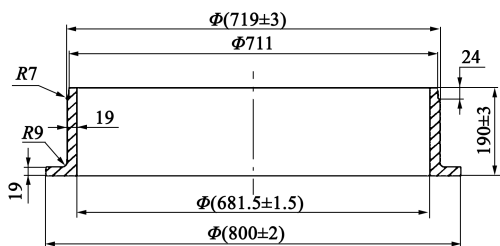


图 2 DN700 大规格凸缘结构示意图

Fig. 2 Structure schematic diagram of DN700 large-size flange

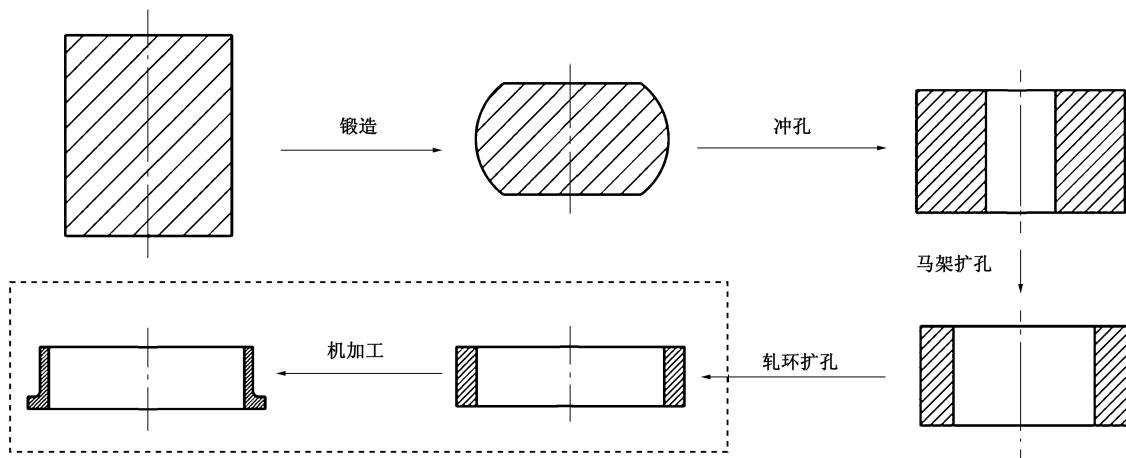


图 3 DN700 大规格凸缘现有工艺流程

Fig. 3 Existing process flow of DN700 large-size flange

的结构特点,凸缘上端(小径)部分尺寸与凸缘下端(大径)部分的尺寸相差较大。采用去除材料加工的方法会造成凸缘上端切削量过大,相应地增加了生产成本与生产周期。凸缘毛坯质量为 420 kg,而凸缘产品净重仅为 78 kg,材料利用率仅为 18.5%。

## 2 大规格凸缘挤压变形工艺

### 2.1 大规格凸缘挤压变形模具设计

根据大规格凸缘产品的结构特点,在保证产品变形量的同时,设计一种大规格凸缘局部镦挤成形模具以及成形方法,将现有工艺中的锻环直接机加工为产品的粗放式生产方法,转变为由模具直接成形凸缘产品毛坯的一种近净成形方法。改进后的大规格凸缘的生产流程如图 4 所示。

与现有的、粗放的环件毛坯到成品生产工艺相比,新工艺改为近似成品形状的毛坯到成品,切削余量大大减少。针对大规格凸缘主要受力部位——底盘,设计了一种成形模具,采用局部变形的方式进一步细化组织、增加强度。重新设计的成形模具设计结构如图 5 所示。

## 1 大规格凸缘锻造成形+机加工生产工艺

以 DN700 大规格凸缘的生产工艺为例,由于成形设备吨位以及尺寸的限制,无相应的大规格成形模具,通常采用铸锭—锻造—冲孔—扩孔—轧环扩孔—机加工的生产工艺,其工艺流程见图 3。

现有 DN700 大规格凸缘的生产工艺主要是采用“锻造成形+机加工”的方式,结合大规格凸缘产品

重新设计的成形模具主要包含压头、芯杆、下模、芯杆垫板、下模垫板 5 个部分。与传统模具中压头为凸形结构不同,新设计的模具中压头为中心通孔的平板式结构,压头上部设计有凹槽,凹槽通过与压机滑块固定连接,压机滑块带动压头做上下运动;压头向下运动挤压坯料上端局部变形,并向下运动形成凸缘底盘形状;坯料下端在下模与芯杆形成的模腔内被限制移动,并在压头的挤压下进一步填充模腔,以达到对坯料表面修整的作用;成形完成后,压机顶杆通过下模垫板的中心圆孔顶出芯杆垫板推出下模,完成坯料成形,由于模具中芯杆上部小端外径尺寸小于芯杆下部大端外径尺寸,从而在芯杆上形成了一定比例的成形斜度,成形后更有利于毛坯从芯杆上脱模。大规格凸缘压制成形过程示意图如图 6 所示,卸料过程如图 7 所示。

### 2.2 大规格凸缘挤压变形过程仿真模拟

为了进一步验证大规格凸缘挤压变形的可行性,同时,为了分析大规格凸缘在成形过程中坯料的流动状态以及成形损伤分布情况,采用有限元数值模拟方法,分析了大规格凸缘挤压变形过程。以 DN700 大规格凸缘为例,建立有限元仿真模型,并

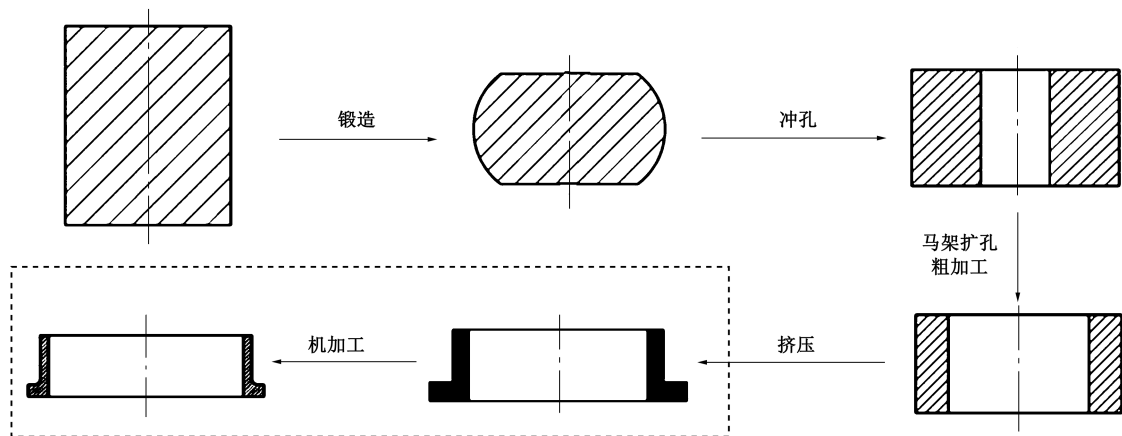


图4 改进后的 DN700 大规格凸缘工艺流程

Fig. 4 Modified process flow of DN700 large-size flange

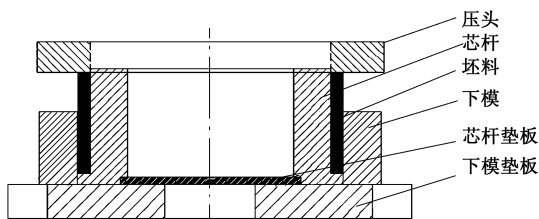


图5 DN700 大规格凸缘模具结构图

Fig. 5 Structure diagram of mold for large-size DN700 flange

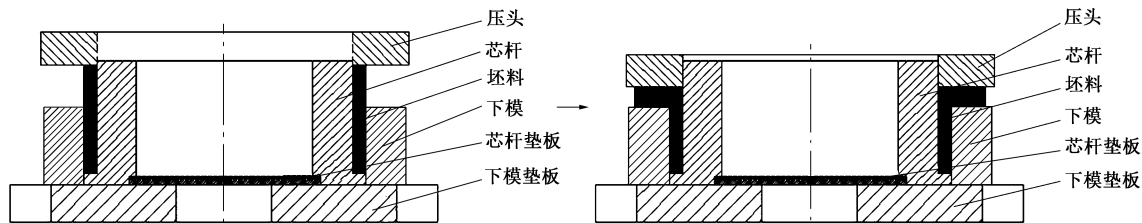


图6 DN700 大规格凸缘挤压成形过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of extrusion forming process for DN700 large-size flange

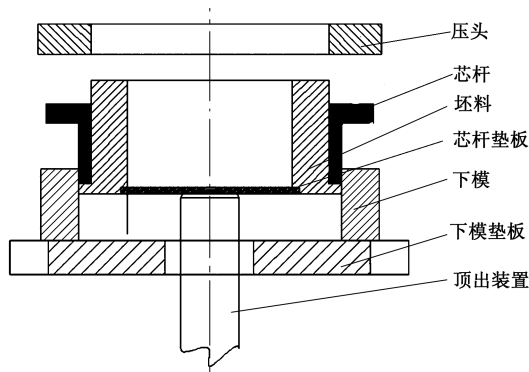


图7 DN700 大规格凸缘卸料过程示意图

Fig. 7 Schematic diagram of unloading process for DN700 large-size flange

定义模具与坯料之间的从属关系和边界条件。图8为大规格凸缘挤压变形有限元模拟装配示意图。图9为大规格凸缘挤压变形过程中坯料在模腔内流动填充变形云图。

从图9中可以看出,变形初始阶段,压头挤压坯料上部开始向下流动,坯料下部在压头的作用下开始填充模腔,待坯料下端完全填充模腔后,下端坯料不再流动,上端坯料在压头的作用下继续变

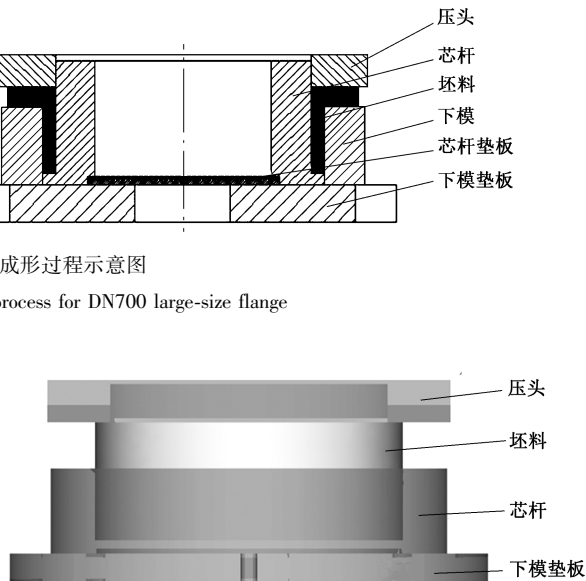


图8 DN700 大规格凸缘挤压变形有限元模拟装配示意图

Fig. 8 Assembly schematic diagram of finite element simulation for extrusion deformation of DN700 large-size flange

匀流动,从而变形成为凸缘毛坯底盘大径端。

图10为大规格凸缘挤压变形中的坯料损伤分布云图。从图10中可以看出,大规格凸缘挤压变形后,损伤主要分布在凸缘变形最为剧烈的底盘部位,

形,由于下模过渡圆角的存在,有利于坯料上部均

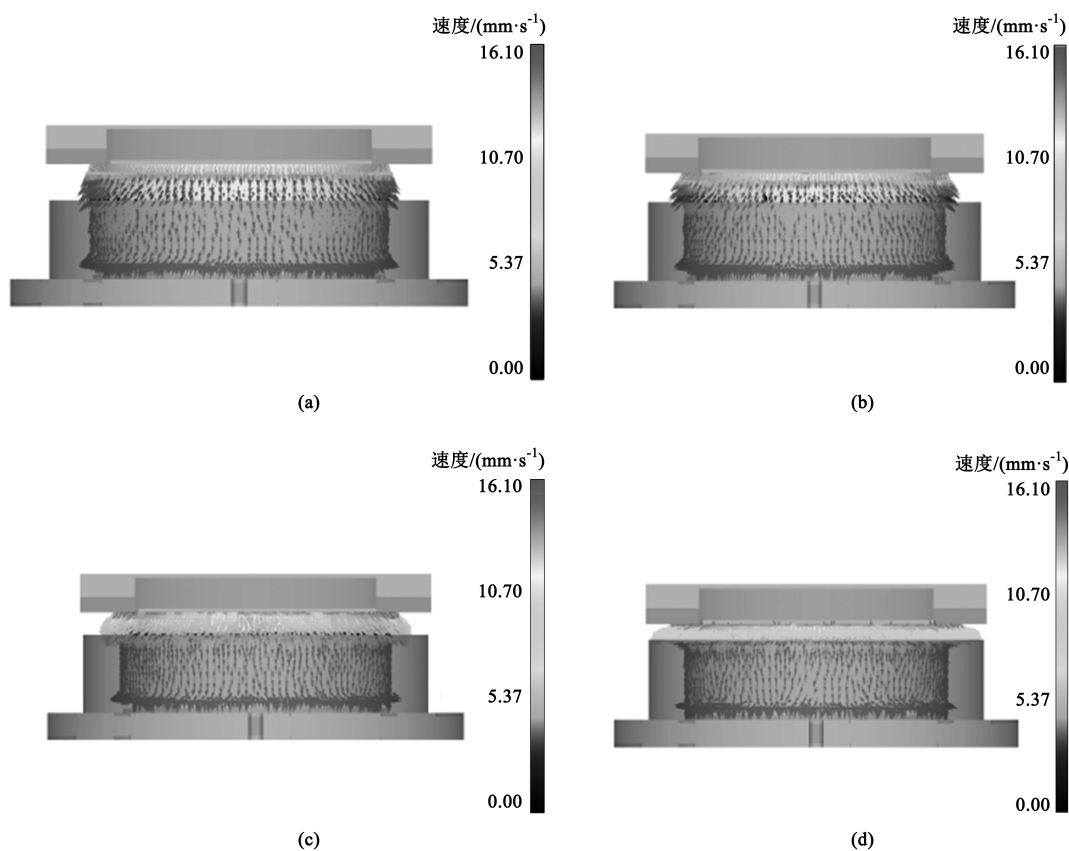


图 9 坯料在模腔内的流动填充示意图

(a) Step 40 (b) Step 80 (c) Step 120 (d) Step 160

Fig. 9 Schematic diagrams of flow and filling for blank in mold cavity

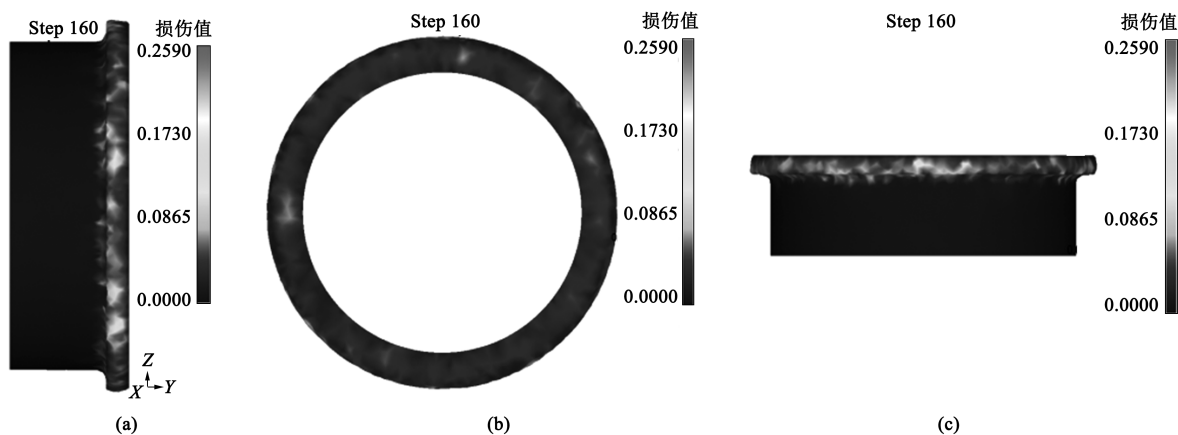


图 10 DN700 大规格凸缘挤压变形后的坯料损伤分布云图

(a) X 向视图 (b) Y 向视图 (c) Z 向视图

Fig. 10 Damage distribution nephograms of blank after extrusion deformation for DN700 large-size flange

(a) View of X direction (b) View of Y direction (c) View of Z direction

损伤主要分布在凸缘底盘最外侧，在后续的机加工中可以消除此类表面损伤；而凸缘坯料的下部变形量较小，损伤较小。

图 11 为大规格凸缘挤压变形过程中等效应力的变化云图。从图 11 可以看出：挤压变形初期，在压

头的作用下等效应力主要分布在坯料上半部分，坯料上半部分等效应力大于下半部分等效应力，在模具芯杆圆角过渡部分的等效应力分布较小；随着挤压的进行，凸缘底盘变形剧烈，等效应力主要集中于凸缘底盘；凸缘在经过环锻后，在挤压变形过程



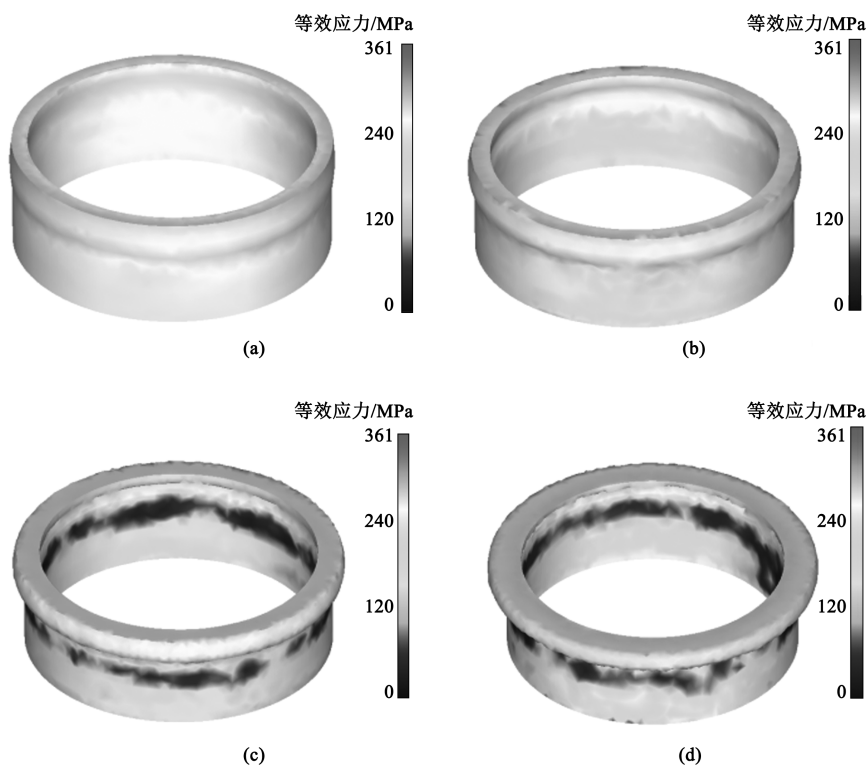


图 11 DN700 大规格凸缘挤压变形中的等效应力变化云图

(a) Step 40 (b) Step 80 (c) Step 120 (d) Step 160

Fig. 11 Equivalent stress changing nephograms of extrusion deformation for DN700 large-size flange

中再次变形，组织分布更为均匀、晶粒更加细化，有利于材料强度的提高。经过对大规格凸缘成形过程的仿真模拟，进一步验证了大规格凸缘挤压变形方案的可行性，为下一步产品试制提供了依据。

### 3 大规格凸缘挤压成形产品试制与性能检测

挤压成形前，将原材料经过反复镦粗拔长后获得凸缘锻件，锻件经过冲孔扩孔后得到凸缘环件，如图 12 所示。



图 12 改进工艺下 DN700 大规格凸缘环件示意图

Fig. 12 Schematic diagram of DN700 large-size flange loop in modified process

将锻造完成的凸缘环件放置于压机挤压成形模具中，进行挤压成形，如图 13 所示。



图 13 DN700 大规格凸缘成形件

Fig. 13 Formed part of DN700 large-size flange

成形完的凸缘经过加工后得到大规格凸缘成品，如图 14 所示。

采用挤压成形后的大规格凸缘以 DN700 为例，凸缘净尺寸：颈部外径为  $\Phi 719$  mm、颈部内径为  $\Phi 711$  mm、底盘外径为  $\Phi 800$  mm、底盘厚度为 19 mm、凸缘总高度为 190 mm。得出 DN700 凸缘毛坯尺寸为：颈部外径为  $\Phi 736$  mm、颈部内径为  $\Phi 666$  mm、底盘外径为  $\Phi 850$  mm、底盘厚度为 35 mm、凸缘总高度为 205 mm。由凸缘毛坯尺寸并



图 14 改进工艺下 DN700 大规格凸缘成品图

Fig. 14 Finished product diagram of DN700 large-size flange in modified process

加上一定比例的锻造烧损及冲孔余量计算出凸缘锻环毛坯尺寸为  $\Phi 729 \text{ mm}/\Phi 659 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$ 。单件下料质量由之前的 421 kg 减少为 230 kg，下料质量减少了近 45%，材料利用率大幅提高。为了进一步验证挤压成形凸缘工艺方案的可行性，对大规格凸缘产品进行了破坏性取样分析，对抗拉强度、屈服强度、伸长率、硬度项目进行检测，表 1 为凸缘产品取样检测项目及结果。各项试验数据结果表明：采用新设计的模具挤压成形的凸缘性能指标完全满足标准的要求。

表 1 DN700 大规格凸缘检测项目及结果  
Table 1 Inspection items and results for DN700 large-size flange

类型	检测项目			
	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	断后伸 长率/%	硬度/ HBW
标准值	$\geq 280$	$\geq 105$	$\geq 30$	—
凸缘横向试样平均值	325	136	45.3	90.5
凸缘纵向试样平均值	322	140	46.5	92.0

## 4 结论

(1) 对比了大规格凸缘不同的生产工艺，并在现有生产工艺基础上设计了大规格凸缘挤压成形模具及成形方法。

(2) 利用有限元方法分析了成形过程中坯料流动状态、等效应力分布以及成形损伤情况，验证了大规格凸缘挤压成形的可行性，以 DN700 大规格凸缘为例可推广到 DN800~DN900 大规格凸缘成形。

(3) 采用新设计的大规格凸缘挤压成形模具，实现了凸缘产品的挤压成形，原材料利用率大幅提

高，节省了原材料成本，并且成形的大规格凸缘的各项性能指标满足要求。

### 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. 铜镍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] 史冰洁, 谭振江, 曹东东, 等. 晶粒取向对铜镍合金腐蚀形貌的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2022, 32 (4): 1025-1035.  
Shi B X, Tan Z J, Cao D D, et al. Effect of grain orientation on corrosion morphology of copper-nickel alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32 (4): 1025-1035.
- [5] 宋翼, 陈守刚. 温度对厌氧环境中硫酸盐还原菌所致铜镍合金腐蚀行为的影响 [J]. 表面技术, 2022, 51 (3): 95-102.  
Song Y, Chen S G. Effect of temperature on corrosion behavior of copper-nickel alloys by sulphate-reducing bacteria in anaerobic environment [J]. Surface Technology, 2022, 51 (3): 95-102.
- [6] 金城焱, 杜兴嵩, 闫霏, 等. 铜镍合金的强韧化行为及其微观机制的研究进展 [J]. 材料导报, 2021, 35 (Z2): 372-375, 380.  
Jin C Y, Du X H, Yan F, et al. Research progress on strengthening-toughening behavior and the associated mechanisms of Cu-Ni alloys [J]. Materials Review, 2021, 35 (Z2): 372-375, 380.
- [7] 常钦鹏, 陈友媛, 安振东, 等. B30 铜镍合金表面植酸转化膜的制备工艺研究 [J]. 材料导报, 2019, 33 (23): 3876-3881.  
Chang Q P, Chen Y Y, An Z D, et al. Preparation process of phytic acid conversion film on B30 Cu-Ni alloy [J]. Materials Review, 2019, 33 (23): 3876-3881.
- [8] 高鑫, 武会宾, 刘明, 等. 多道次轧制不同变形量对铜镍合金管材组织和性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50 (11): 3819-3823.  
Gao X, Wu H B, Liu M, et al. Effect of deformation of multi-pass rolling on microstructure and properties of C71500 cupronickel alloy tube [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50 (11): 3819-3823.
- [9] 赵月红, 林乐耘, 崔大为, 等. 铜镍合金在我国实海海域的

- 局部腐蚀[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15 (11): 1786-1794.
- Zhao Y H, Lin L G, Cui D W, et al. Localized corrosion of Cu-Ni alloy in China marine [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15 (11): 1786-1794.
- [10] 王家明, 杨昊东, 杜敏, 等. B10 铜镍合金在高浓度  $\text{NH}_4^+$  污染海水中腐蚀研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2021, 41 (5): 609-616.
- Wang J M, Yang H D, Du M, et al. Corrosion of B10 Cu-Ni alloy in seawater polluted by high concentration of  $\text{NH}_4^+$  [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2021, 41 (5): 609-616.
- [11] 石常亮, 张欣, 李扬, 等. 船舶冷却系统铜镍合金管腐蚀穿孔原因 [J]. 理化检验: 物理分册, 2022, 58 (2): 53-57.
- Shi C L, Zhang X, Li Y, et al. Causes of corrosion perforation of copper-nickel alloy tube in ship cooling system [J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A: Physical Testing, 2022, 58 (2): 53-57.
- [12] 程德彬, 郭悦, 刘雪辉, 等. B30 铜镍合金换热管腐蚀与防护研究进展 [J]. 材料开发与应用, 2020, 35 (1): 84-90.
- Cheng D B, Guo Y, Liu X H, et al. Studies on corrosion and protection of heat exchange tubes of B30 copper-nickel alloy [J]. Development and Application of Materials, 2020, 35 (1): 84-90.
- [13] 邢少华, 杨光付, 刘广义, 等. 90/10 铜镍合金海水管路交流杂散电流腐蚀及控制研究 [J]. 装备环境工程, 2022, 19 (4): 95-100.
- Xing S H, Yang G F, Liu G Y, et al. AC stray current corrosion and control of 90/10 copper-nickel alloy seawater pipe [J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19 (4): 95-100.
- [14] 左承坤, 蒯文明, 胡安亚, 等. 铁含量对形变热处理 B30 铜镍合金电化学性能的影响 [J]. 热处理技术与装备, 2021, 42 (2): 5-12.
- Zuo C K, Kuai Z M, Hu A Y, et al. Effect of iron content on the electrochemical properties of B30 copper-nickel alloy after thermo mechanical treatment [J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2021, 42 (2): 5-12.
- [15] 罗旭, 辛颖, 李瑜, 等. 船舶海水管路腐蚀及修复技术研究进展 [J]. 弹性体, 2022, 32 (1): 80-84.
- Luo X, Xin X, Li Y, et al. Progress on corrosion and repair technology of marine seawater pipe [J]. China Elastomerics, 2022, 32 (1): 80-84.
- [16] 王利, 蔺存国, 苏艳, 等. 典型海域船舶用铜材表面生物污损与腐蚀性能研究 [J]. 装备环境工程, 2021, 18 (8): 52-58.
- Wang L, Lin C G, Su Y, et al. Study on the biological fouling and corrosion of copper surface in typical sea area [J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18 (8): 52-58.
- [17] 武兴伟, 聂垒鑫, 吴恒, 等. 几种典型管路材料在流动海水中的冲刷腐蚀行为 [J]. 材料保护, 2021, 54 (5): 7-12, 23.
- Wu X W, Nie L X, Wu H, et al. Erosion corrosion behavior of several typical pipeline materials in flowing seawater [J]. Materials Protection, 2021, 54 (5): 7-12, 23.
- [18] 彭文山, 段体岗, 侯健, 等. 室内与实海环境中 B10 铜镍合金海水全浸腐蚀研究 [J]. 装备环境工程, 2020, 17 (8): 63-69.
- Peng W S, Duan T G, Hou J, et al. Corrosion behavior of B10 copper-nickel alloy after full immersion in indoor simulated seawater and real seawater [J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17 (8): 63-69.

## 《锻压技术》杂志敬告新老广告客户

2023 年广告征集工作火热进行中。本刊主要承接锻造、冲压、旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧设备及锻压辅助设备, 仪器、仪表、模具工业、工业加热设备、热处理设备、加热技术、摩擦与润滑、工艺材料和锻件、冲压件、管件及其特种成形件(旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧)等广告; 各科研院所科技成果转让、企业介绍等与本行业相关的广告。您选择《锻压技术》进行广告宣传的理由:

### (1) 平台大, 宣传效果好:

- 全国中文核心期刊, 全国锻压行业会刊, 是锻压领域知名、精品期刊;
- 与中国机械总院集团北京机电研究所有限公司、中国机械工程学会塑性工程分会、全国锻压标准化技术委员会密切合作;
- 报道内容全, 发行量大。

### (2) 服务全, 广告费用低:

立体式全方位宣传, 杂志、网站和微信等纸媒和数字媒体宣传渠道。

请登录本刊网站, 点击“广告合作”查询具体广告价目。

为了使您的产品能够保持畅销的势头, 不断占领国内外市场, 请您抓紧时间安排贵公司在本刊刊登的广告计划。欢迎广大新老客户踊跃咨询、积极预定。需刊登广告者, 敬请与本刊联系。愿我们真诚的服务能为您创造良好的效益。

地址: 北京市海淀区学清路 18 号《锻压技术》编辑部 广告部 邮编: 100083

联系人: 林玉彤 手机: 18811346037 E-mail: fst\_linyutong@163.com

电话: 010-62920652 Http: //www.fstjournal.net

