

## 盾构机滚刀刀圈体轧环工艺研究及模具设计

许慧杰, 付明伟, 苏 昂, 王腾飞, 孙远航, 冯来庆

(郑州煤矿机械集团股份有限公司, 河南 郑州 450041)

**摘要:** 针对异形截面环件在实际轧制过程中影响因素较多、规律复杂、环件质量较难保证等问题, 结合径向轧环轧制特点, 提出径向封闭轧制成形工艺。以异形截面盾构机滚刀刀圈体为研究对象, 借助立式轧环机、1000 t 压机等设备, 从工艺方案制定、轧制工艺参数选择、坯料形状设计、模具结构设计、轧制孔型安装调试等方面对轧环质量的影响进行了分析。结果表明: 当轧制比为 1.2~4.0、环件毛坯与锻件体积近似相等、环坯各截面圆滑渐变、毛坯内孔上下端面设置倒角, 并且于轧制前将导向轮尽可能靠近环件、轧制后驱动辊多轧制几圈予以修型, 可以消除环件的毛刺缺陷, 提高了环件的综合力学性能、缩短生产周期、降低生产成本。

**关键词:** 径向轧环; 异形截面; 滚刀刀圈体; 径向封闭轧制; 模具设计

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.05.024

**中图分类号:** TG316.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 05-0161-06

## Research on ring rolling process and die design for hob ring body on shield machine

Xu Huijie, Fu Mingwei, Su Ang, Wang Tengfei, Sun Yuanhang, Feng Laiqing

(Zhengzhou Coal Mine Machinery Group Co., Ltd., Zhengzhou 450041, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of many influencing factors, complex laws and difficulty in ensuring the quality of the ring with special-shaped section in the actual rolling process, a radial closed rolling process was proposed by combining the characteristics of radial ring rolling. For the hob ring body of special-section shield machine, the influences of process scheme formulation, rolling process parameters selection, blank shape design, die structure design, rolling groove installation and debugging etc. on the rolling ring quality were analyzed by vertical ring rolling machine, 1000 t press and other equipments. The results show that when the rolling ratio is between 1.2 and 4.0, the volume of ring blank approximates to the forgings volume, the cross sections of ring blank are smooth and gradual, the upper and lower end faces of inner holes for blank are chamfered, the guide wheel is as close to the ring as possible before rolling, and the driving roller is rolled several times after rolling to be modified, the vertical thorn defect of ring can be eliminated, the comprehensive mechanical properties of ring is promoted, the production cycle is shorten, and the production cost is reduced.

**Key words:** radial ring rolling; special-shaped section; hob ring body; radial closed rolling; die design

异形截面环件封闭轧制过程是依靠驱动辊为主动辊, 做旋转轧制及径向直线进给运动, 芯辊为被动辊, 环件在驱动辊和芯辊的共同作用下, 不断咬入驱动辊和芯辊构成的封闭轧制孔型, 产生连续局部塑性变形, 驱动辊封闭型腔限制了金属的轴向流动, 使得环件壁厚减薄、直径扩大、截面轮廓成形。异形截面环件封闭轧制成形具有生产成本低、产品性能好、生产效率高的优点。基于环件轧制工艺的

诸多优点, 国内外学者在该领域做了大量研究, 但目前建立的环件成形理论主要基于开式轧制成形<sup>[1-2]</sup>, 研究对象也主要为矩形截面等简单形状的环形件, 且以径轴向轧制工艺<sup>[3-4]</sup>为主, 对异形截面等复杂形状环件的轧制过程研究较少。

滚刀刀圈体是盾构机在盾构掘进时采用的关键零件<sup>[5]</sup>, 即在刀圈体的外圆周镶嵌一圈合金齿。刀圈体转动时, 合金齿与岩土层碰撞进行盾构掘进, 工作时因与岩层长时间高速摩擦<sup>[6]</sup>、碰撞, 易导致刀圈体表面磨损、开裂严重<sup>[7]</sup>, 大大降低了滚刀刀圈体在使用时的强度和使用寿命<sup>[8]</sup>, 降低了盾构机的工作效率, 影响了盾构掘进工程的效率和成本。刀圈体常见的生产方式为模锻成形<sup>[9-10]</sup>, 机械强度、耐磨性和抗疲劳性能较差, 后续加工余量大, 生产

收稿日期: 2021-04-14; 修订日期: 2021-07-18

作者简介: 许慧杰 (1987-), 女, 学士, 工程师

E-mail: 15838151260@163.com

通信作者: 冯来庆 (1966-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: laiqing.feng@zmj.com

成本高,生产周期长。

本文提出采用径向封闭轧制<sup>[11]</sup>成形方式进行生产,通过不断调整坯料形状<sup>[12]</sup>、轧制工艺参数<sup>[13]</sup>、模具结构<sup>[14]</sup>、导向辊位置<sup>[15]</sup>及运动控制<sup>[16]</sup>等相关参数,克服了异形截面环件径向轧制时金属流动规律复杂、环件质量难控制的缺点,提高了环件的综合力学性能、降低了生产成本、缩短了生产周期。本文以图 1 所示的滚刀刀圈体为例,详细地阐述了整个设计开发过程,包括生产工艺方案制定、轧制工艺参数选择、坯料形状设计、模具结构设计、轧制孔型安装调试等。

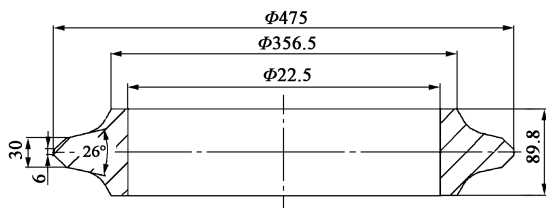


图 1 滚刀刀圈体零件二维图

Fig. 1 2D drawing of hob ring body part

## 1 试验方法

结合郑州煤矿机械集团股份有限公司生产实际及环件大小,制定如下生产工艺方案:加热(燃气炉)—制坯(1600 t 摩擦压力机)—冲孔(3 t 自由锻)—轧制(D51-500TK 立式轧环机)。该产品截面形状复杂、壁厚不均、轴向金属流动困难、综合力学性能要求高,若制坯时各部分体积分配不合理,将无法满足环件成形工艺要求,本次设计的关键点为制坯形状的确定。本次设计参考公司现有导向套设计,使用 PROE 软件三维造型。详细设计内容如下。

### 1.1 锻件图设计

考虑到零件的后续加工量和轧制成形工艺性,锻件图设计如图 2 所示。

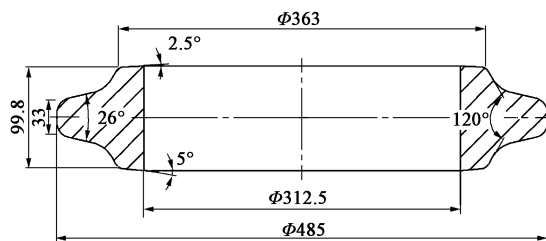


图 2 滚刀刀圈体锻件二维图

Fig. 2 2D drawing of hob ring body forgings

### 1.2 制坯形状设计

#### 1.2.1 初选制坯形状

初选刀圈体制坯尺寸主要包含轴向尺寸、制坯孔径、径向尺寸等,制坯形状示意图如图 3 所示。其中, $B_{00}$ 、 $B_{11}$  为轴向尺寸, $d_{00}$  为制坯孔径, $D_{00}$ 、 $D_{11}$  为径向尺寸(初选毛坯大环和小环外径)。

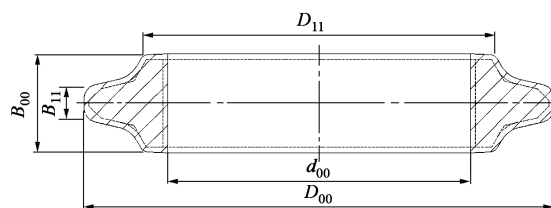


图 3 滚刀刀圈体制坯形状示意图

Fig. 3 Schematic diagram of blanking shape for hob ring body

#### (1) 制坯轴向尺寸

轧制中环件轴向尺寸基本不变,为了保证毛坯顺利进入驱动辊形槽,毛坯轴向尺寸应比锻件小 1~2 mm,取  $B_{00}=99$  mm。为了提高锻件端面质量,减小轧制比,在保证坯料能够顺利进入型槽且体积与锻件近似相等的前提下,适当加大轴向中间直面尺寸、缩小外径,本次设计取  $D_{00}$  锥面中间位置,取  $B_{11}=44$  mm。

#### (2) 制坯孔径

芯轴尺寸及制坯凸模孔径对应关系如表 1 所示,本次扩孔机芯轴选择标准芯轴  $\Phi 100$  mm,坯料孔径选择  $\Phi 105$  mm。

表 1 芯轴尺寸与制坯凸模孔径对应关系 (mm)

Table 1 Correspondence between core shaft size and hole diameter of blanking punch (mm)

扩孔机芯轴尺寸	$\Phi 80$	$\Phi 90$	$\Phi 100$	$\Phi 110$
制坯凸模孔径	$\Phi 85$	$\Phi 95$	$\Phi 105$	$\Phi 115$

#### (3) 制坯径向尺寸

图 4 为滚刀刀圈体锻件形状示意图,从图 4 可以看出,该产品在中间部分截面变化明显,根据体积相等原则,可将其体积近似分成 3 部分,分别为  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$ ,其中  $V_1=V_3$ ,根据体积不变条件初选毛坯大环和小环外径: $d_{00}=\Phi 105$  mm;因  $V_{22}=V_2$ ,故  $D_{00}=\sqrt{d_{00}^2+\frac{4 \times V_2}{B_{11} \times \pi}}=\Phi 374$  mm;因  $V_{11}=V_1$ ,故  $D_{11}=\Phi 251.5$  mm。其中, $V_{22}$  和  $V_{11}$  分别为  $V_2$  和  $V_1$  对应相同位置的制坯体积。

#### (4) 初选形状

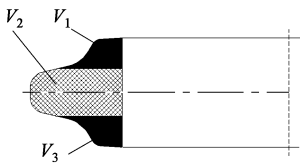


图 4 滚刀刀圈体锻件形状示意图

Fig. 4 Schematic diagram of forgings shape for hob ring body

根据以上计算，初选毛坯形状及尺寸如图 5 所示。

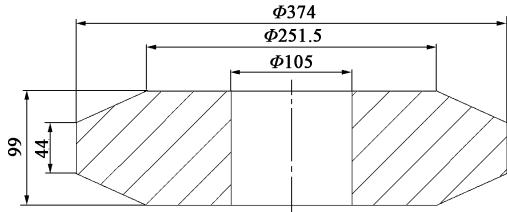


图 5 滚刀刀圈体初选制坯形状和尺寸

Fig. 5 Primary blanking shape and sizes of hob ring body

1. 2. 2 毛坯修正

毛坯修正包括以下几方面：（1）滚刀刀圈体件形状对称，冲孔直面应取中间部位；（2）毛坯在轧制时要保证最大外圆能够顺利进入驱动辊型槽；（3）设计时应根据体积相等原则确定修正毛坯形状；（4）由于公司径轴向轧制为封闭式，为防止轧制后期出现毛刺缺陷，设计时可在内孔设置倒角，保证轧制结束时内孔上、下部分刚刚接触芯轴；（5）由于坯料开始轧制时最大外圆与驱动辊不接触，故  $V_1$ 、 $V_3$  部位金属持续向  $V_2$  方向流动，故修正后的中间部位体积应小于初选制坯体积  $V_{22}$ 。

修正后毛坯如图 6 所示：

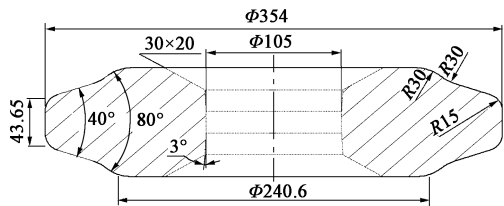


图 6 滚刀刀圈体修正后制坯形状和尺寸

Fig. 6 Revised blanking shape and sizes of hob ring body

1. 3 制坯模具及轧环模具的设计

1. 3. 1 制坯模具设计

滚刀刀圈体为圆周对称结构，设计时为了防止闭式模锻出刺，可将最大外圆设计成自由成形，即模具最大外圆型腔直径外扩 15~20 mm，考虑到其直径偏大，将分模面部位开通至模具外壁。综合考虑设备工装结构及热锻件等因素，制坯模具

设计如图 7 所示。

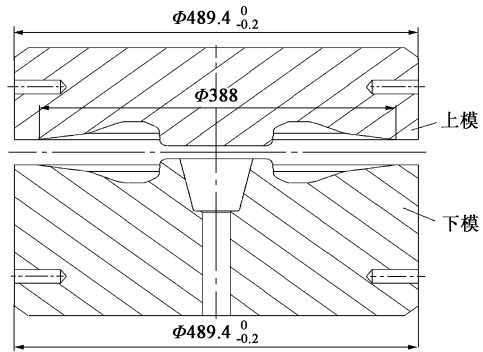


图 7 制坯模具二维图

Fig. 7 2D drawing of blanking die

1. 3. 2 轧环模具设计

轧环模具主要包括驱动辊、芯辊、导向辊和信号辊，它决定了轧制环件的截面轮廓形状，其设计依据为环锻件的热锻件图。

（1）驱动辊模具设计及材料选择

驱动辊受力一般，为节约成本，本次设计选用低成本的铸件，材质为 A148 115-95 钢或 ZG30Cr06A 钢，热处理硬度为 260~310 HBW，工艺路线为：铸造—粗加工—调质—精加工。轧制成形时，环件中心轴线与芯轴一般不同心，故驱动辊型腔深度设计时应比热锻件壁厚大，本次设计取壁厚差为 2 mm，即热锻件壁厚为 87.5 mm，驱动辊型腔深度为 89.5 mm。此外，考虑到轧制时，靠近轧环机外侧的环件端面常因环件壁厚与接触弧长的比值过大、轧制比过大或制坯中产生的原始凹痕等原因易形成凹心缺陷，因此，将此处平滑过渡并将斜度调大至 5°，靠近轧环机内侧的环件端面因有挡板限制，故斜度可适当放小，根据以往经验，此处设计成 2.5°，其余模膛尺寸按照收缩率 1.4% 设计，驱动辊形状及尺寸如图 8 所示。

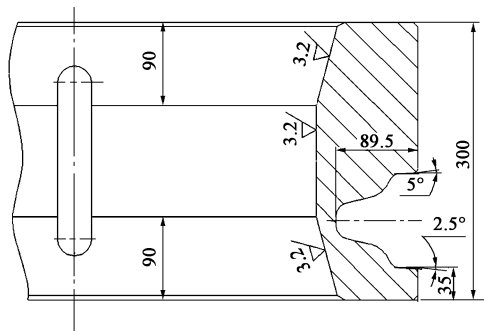


图 8 驱动辊模具二维图

Fig. 8 2D drawing of driving roll die

## (2) 导向辊和信号辊模具设计及材料选择

导向辊和信号辊对材料性能要求不高, 为便于组织生产, 原材料选用常用材质 30CrMnSi 钢,  $\Phi 200$  mm 的圆棒料直接加工而成, 不进行热处理, 工艺路线为: 下料—加工—调质。轧制时, 导向辊和信号辊为辅助辊, 只要保证轧制过程稳定可靠, 模具型槽深度可适当减小, 因该环件为对称件, 且截面积变化较大的部位为大环部分, 故导向辊和信号辊型腔深度在保证辅助稳定的前提下, 可适当减小。本次设计取锥面约一半部位, 即热锻件锥面厚度为 48.8 mm, 导向辊和信号辊型腔深度为 25 mm, 其余模膛尺寸按照收缩率 1.4% 设计, 导向辊和信号辊形状及尺寸如图 9 所示。

### 1.4 轧制孔型安装调试

只有正确安装调试好轧制孔型和导向辊、信号

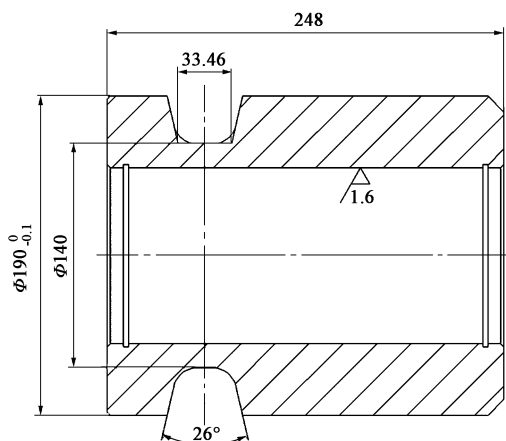


图 9 导向辊、信号辊模具二维图

Fig. 9 2D drawing of guide roll and signal roll dies

辊、挡板等, 才可轧制成形合格的环件锻件, 轧制模具安装示意图如图 10 所示。

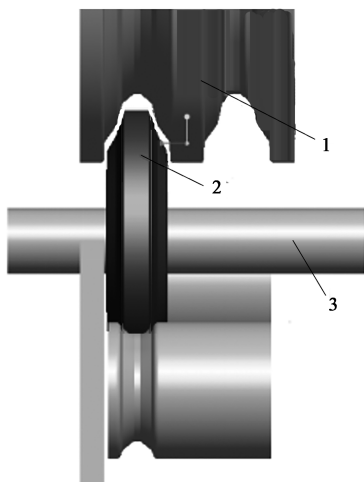


图 10 模具安装示意图

1. 驱动辊 2. 滚刀刀圈体 3. 芯轴 4. 信号辊 5. 导向辊

Fig. 10 Schematic diagram of die installation

#### 1.4.1 驱动辊

驱动辊除了做旋转轧制运动外, 还提供直线进给运动, 对轧制环件的质量影响较大, 所以, 驱动辊的安装调试需要特别重视。首先, 保证驱动辊空转平稳, 轴向跳动控制在 0.1~0.2 mm 以内, 否则, 环件会因驱动辊的不稳定而来回跳动, 最终导致环件报废; 其次, 孔型完全闭合时, 驱动辊在靠近芯辊的径向间隙应在 0.5~5.0 mm 范围内, 间隙太小容易压坏芯辊, 间隙太大须加深驱动辊型槽深度或调整导向辊等; 最后, 驱动辊的轴线要与芯辊轴线平行, 否则, 环件易出现锥度等质量缺陷。

#### 1.4.2 信号辊与导向辊

导向辊相对于驱动辊的位置非常重要, 靠的太

近环件不能顺利套入芯轴, 靠的太远环件轧制过程不稳定, 尤其是开始轧制时的振动较大, 环件易出现质量问题。故导向辊调整的原则为: 环件毛坯能顺利套入芯轴而不干涉, 且环件轧制转动 3~5 圈后即能接触导向辊。信号辊的调整方式以环件、导向辊、芯辊位置调整。

## 2 试验结果

### 2.1 第 1 次试验过程与分析

第 1 次试验后, 样件端面缺肉、有毛刺, 如图 11 所示。端面缺肉的主要原因在于: 如图 12 所示, 驱动辊原始型腔图中圆圈部位为尖角, 其截面积变

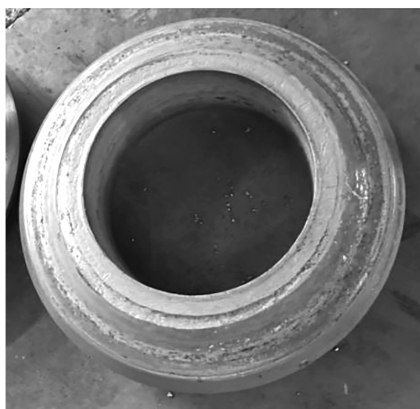


图 11 第1次试验样件

Fig. 11 Sample of the first test

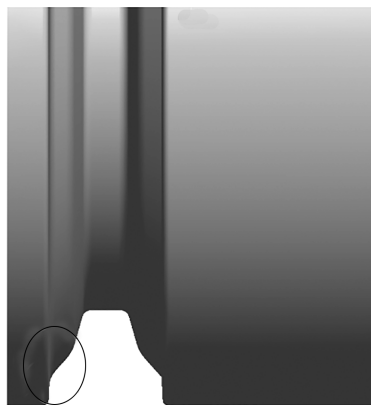


图 13 修正后驱动辊型腔

Fig. 13 Revised cavity of driving roll



图 12 驱动辊原始型腔

Fig. 12 Original cavity of driving roll

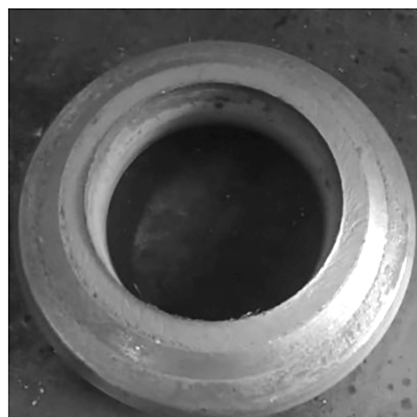


图 14 第2次试验样件

Fig. 14 Sample of the second test

化太大，尖角处金属流动不畅，此部位最终形成三角空腔，无法充填完全；其次为环件毛坯局部缺料。毛刺的主要原因在于：环件在驱动辊型腔充填不完全，而在闭式轧制中多余金属只能向外流动，最终形成毛刺缺陷。改进措施：修改驱动辊型槽尖角部位，将其截面从陡变过渡修改为渐变，并修制坯模，增加此部位体积，如图 13 所示。

## 2.2 第2次试验过程与分析

第2次试验后，端面局部毛刺如图 14 所示。主要原因在于：环件内孔上、下端面倒角为  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ，尺寸偏小，如图 15 所示。改进措施：修制坯模，内孔上、下端面倒角  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  修正为  $20\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 。最终，锻件缺陷得以消除，如图 16 所示，截止目前已试验成功并批量推广。

## 3 结语

综上所述，异形截面环件轧制时，为保证环件

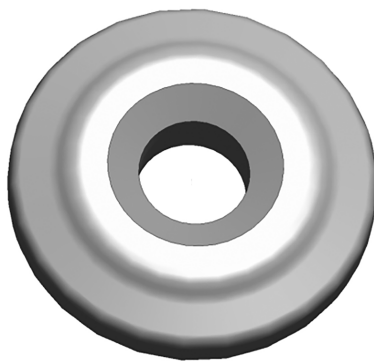


图 15 第2次制坯形状

Fig. 15 The second blanking shape

质量，设计及生产时建议如下：（1）轧制比取值范围为  $1.2 \sim 4.0$ ；（2）环件制坯形状应根据截面积不同进行体积划分，且每部分体积要保证与锻件近似相等；（3）环件毛坯各截面应圆滑渐变，以促进金属流动顺畅；（4）驱动辊型槽各截面之间应渐变，避免陡变，否则锻件无法充填完全；（5）为防止锻



图 16 最终样件

Fig. 16 Final sample

件轧制后期出现毛刺缺陷, 环件毛坯设计时可在内孔上、下端面倒角处理; (6) 生产前各模具调整时, 需要保证环件毛坯放置芯辊上时, 导向轮应尽可能靠近环件; (7) 轧制结束时, 不可迅速将驱动辊抬起, 应轧制几圈予以修型, 以保证环件圆度。

#### 参考文献:

- [1] 罗鸿飞, 卢熠, 吴永安. GH4169 合金低压涡轮机匣异形环锻件胀形工艺 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (7): 27-33.  
Luo H F, Lu Y, Wu Y A. Bulging process for GH4169 alloy low-pressure turbine casing profile ring forgings [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (7): 27-33.
- [2] 华林, 黄兴高, 朱春东. 环件轧制理论和技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.  
Hua L, Huang X G, Zhu C D. Theory and Technology of Ring Rolling [M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [3] 杨文兵, 姜海峰. 基于 DEFORM 环件轧制塑性成形过程数字仿真 [J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2006, 23 (2): 56-58.  
Yang W B, Jiang H F. Numerical simulate of ring rolling deforming process based on DEFORM [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2006, 23 (2): 56-58.
- [4] 王丹, 刘智, 王建国, 等. GH4738 高温合金异形环件组织与性能研究 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (5): 128-132.  
Wang D, Liu Z, Wang J G, et al. Study on microstructure and properties of shaped ring parts for super alloy GH4738 [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (5): 128-132.
- [5] 茹松楠, 温学军, 于庆增, 等. TBM 滚刀刀圈装配最优过盈量研究 [J]. 建筑机械化, 2021, 42 (2): 20-23.  
Ru S N, Wen X J, Yu Q Z, et al. Simulation calculation of the optimum interference of TBM cutter ring assembly [J]. Construction Mechanization, 2021, 42 (2): 20-23.
- [6] 赵家立. 模锻工艺下的新型 TBM 盘形滚刀刀圈的设计研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.  
Zhao J L. Research on the Design of the TBM's New Type Discutter-ring Under Die Forging [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [7] 李茂军, 刘光磊, 蒋文辉, 等. 深冷+固溶+时效复合处理对 A356 合金微观组织和力学性能的影响 [J]. 稀有金属, 2020, 44 (1): 100-106.  
Li M J, Liu G L, Jiang W H, et al. Effect of cryogenic+solid solution+ageing composite treatment on microstructure and mechanical properties of A356 alloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44 (1): 100-106.
- [8] 张小云, 夏婧怡, 仝磊, 等. TBM 盘形滚刀刀圈轧制成形数值模拟和试验研究 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (4): 53-58.  
Zhang X Y, Xia J Y, Tong L, et al. Numerical simulation and experimental study on rolling forming of TBM disc cutter ring [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (4): 53-58.
- [9] 王江伟. TBM 盘形滚刀刀圈的锻压成形工艺研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2014.  
Wang J W. Study on the Forging Process of TBM's Disc Cutter Ring [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [10] 王辉平. 盘形滚刀刀圈轧制数值模拟研究 [J]. 隧道建设, 2017, 37 (11): 1483-1487.  
Wang H P. Study on numerical simulation of rolling of disc cutter ring [J]. Tunnel Construction, 2017, 37 (11): 1483-1487.
- [11] 李旭, 王强, 牛文娟, 等. 热处理对冷喷涂 Al-Ni 沉积体组织和力学性能的影响 [J]. 稀有金属, 2020, 44 (11): 1153-1162.  
Li X, Wang Q, Niu W J, et al. Microstructure and mechanical properties of Al-Ni deposits with cold spraying by heat treatment [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44 (11): 1153-1162.
- [12] 魏辉, 兰箭. 铝合金异形截面大型环件胀形工艺及优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (8): 94-98, 105.  
Wei H, Lan J. Bulging technology and optimization on large ring with shaped section of aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (8): 94-98, 105.
- [13] 夏毅敏, 丛国强, 陈雷, 等. 成形工艺对刀圈组织和性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (1): 120-122.  
Xia Y M, Cong G Q, Chen L, et al. Effect of forming process on microstructure and properties of cutter ring [J]. Hot Working Technology, 2017, 46 (1): 120-122.
- [14] 赵正阳. 高品质 TBM 用盘形滚刀刀圈研制 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.  
Zhao Z Y. Development of High-quality Disc Cutter Rings Used in TBM [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.
- [15] 郝用兴, 张红艺, 王超峰, 等. 基于 ABAQUS 的导向辊运动优化控制 [J]. 河南科技, 2017, (1): 64-66.  
Hao Y X, Zhang H Y, Wang C F, et al. The optimal control of the guide roller motion based on ABAQUS [J]. Henan Science and Technology, 2017, (1): 64-66.
- [16] 王梦寒, 汪丰林, 王爽, 等. 大型环件径轴向轧制有限元模拟中导向辊运动控制 [J]. 热加工工艺, 2010, 39 (21): 89-91.  
Wang M H, Wang F L, Wang S, et al. Kinematic control of large ring guide rollers in radial-axial rolling based on FEM simulation [J]. Hot Working Technology, 2010, 39 (21): 89-91.