

## 轨道交通用车轴精密辊锻成形工艺

杨 勇<sup>1</sup>, 陈祥龙<sup>1</sup>, 张彬成<sup>1</sup>, 孙 越<sup>1</sup>, 侯惠敏<sup>1</sup>, 孙国强<sup>1</sup>, 王兴业<sup>2</sup>

(1. 北京机电研究所有限公司, 北京 100083; 2. 大同机车锻造有限责任公司, 山西 大同 037000)

**摘要:** 通过对轨道交通用 RE2B 型车轴锻件进行工艺分析, 设计开发了车轴两道次精密辊锻成形工艺。采用有限元技术, 确定了车轴精密辊锻模拟的相关参数, 对车轴精密辊锻过程进行了数值模拟。模拟结果显示: 采用精密辊锻成形车轴, 得到的辊锻件规整, 锻造流线流畅连续, 车轴各截面圆整度好, 且端头平整, 无凹凸和花瓣形状产生。在世界首台套 1600 mm 大型辊锻机上, 对 RE2B 型车轴精密辊锻成形进行工艺实验, 试制锻件外形规整, 各部位尺寸符合要求, 与数值模拟结果相一致。按铁路标准 TB/T 2945—1999 要求, 对试制的车轴进行热处理后的性能检测, 检测结果满足标准要求。

**关键词:** RE2B 型车轴; 精密辊锻成形; 轨道交通; 锻造流线; 圆整度

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.05.006

**中图分类号:** TG335.19

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 05-0033-05

## Precision roll forging process of axle for rail transit

Yang Yong<sup>1</sup>, Chen Xianglong<sup>1</sup>, Zhang Bincheng<sup>1</sup>, Sun Yue<sup>1</sup>, Hou Huimin<sup>1</sup>, Sun Guoqiang<sup>1</sup>, Wang Xingye<sup>2</sup>

(1. Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Ltd., Beijing 100083, China;

2. Datong Locomotive Forging Co., Ltd., Datong 037000, China)

**Abstract:** Through the process analysis of RE2B axle forgings for rail transit, the two-pass precision roll forging process for the axle was designed and developed. Then, the relevant parameters of the precision roll forging simulation for the axle were determined by finite element technology, and the precision roll forging process of the axle was numerically simulated. The simulation results show that the axle is formed by precision roll forging, the roll forgings is regular, and the forging streamline is smooth and continuous. Each section of the axle is well roundness, and the ends are flat without bump and petal shape. On the world's first set of 1600 mm large-scale roll forging machine, the process experiment of the precision roll forging for RE2B axles was carried out, the trial-produce forgings were regular in shape, and the size of each part met the requirements, which was consistent with the numerical simulation. According to the requirements of the railway standards TB/T 2945—1999, the performance test of the trial-produce axle was applied after heat treatment, and the test results met the specified requirements.

**Key words:** RE2B axle; precision roll forging; rail transit; forging streamline; roundness

轨道交通是我国国民经济和社会发展的主动脉, 在我国交通运输方式中一直处于首要地位。目前, 我国铁路和城市轨道交通营运总里程稳居世界第一, 2022 年中国铁路预计新增 3300 km, 城市轨道交通仍旧处于高位发展时期, 新增运营里程将突破 1000 km<sup>[1-2]</sup>。轨道交通的快速发展, 带动了机车车辆的市场发展。车轴是轨道交通车辆行走部分的关键零件, 具有广阔的市场前景<sup>[3-4]</sup>。

目前, 国内外车轴生产工艺主要采用快锻或

径向锻造。快锻方法生产车轴, 锻透效果好, 但生产效率低; 径向锻造生产效率高, 数控锻压能够保证产品具有更高的精度, 减少了后续工序的加工余量, 但锻造压力较小, 锻透效果差, 车轴锻件的端头呈内凹状, 易在端头形成沿轴向的拉应力, 端头锻后常有裂纹出现。而且, 这两种工艺的设备投资大、能耗高、污染重、劳动条件差。因此, 有必要对车轴生产工艺进行技术创新<sup>[5-6]</sup>。

本文以轨道交通用 RE2B 型车轴<sup>[7-8]</sup>为研究对象, 采用两道次精密辊锻成形, 通过理论分析、工艺设计并利用有限元软件对车轴精密辊锻成形工艺进行了模拟仿真<sup>[9-12]</sup>, 并通过现场工艺试验验证了其可行性。

收稿日期: 2022-03-21; 修订日期: 2022-05-10

作者简介: 杨 勇 (1982-), 男, 博士, 正高级工程师

E-mail: yy19821110@163.com

1 RE2B 型车轴精密辊锻成形

1.1 RE2B 型车轴锻件分析

车轴由轴颈、轮座、轴身和防尘座等结构组成，材质为 50 钢，最大截面在轮座部位，直径为  $\Phi 230\text{ mm}$ ，最小截面在轴颈，直径为  $\Phi 176\text{ mm}$ ，锻件总长度为 2350 mm，质量约为 600 kg，锻件形状呈左右对称，属于典型的长轴类锻件。图 1 为轨道交通用 RE2B 型车轴的结构简图。

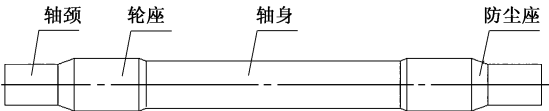


图 1 RE2B 型车轴锻件图  
Fig. 1 Forgings drawing of RE2B type axle

从图 1 中可以看出，车轴锻件质量大、尺寸长，

沿轴向截面变化较多。其精密辊锻成形技术特点为：（1）为保证后续加工时走刀均匀稳定，车轴最终辊锻件各截面的圆整度要求高；（2）辊锻件飞边和过渡区表面折叠缺陷的控制；（3）各主要截面沿轴向尺寸的控制、车轴长度公差以及最终辊锻件的直线度，尽可能地提高材料利用率。因此，工艺设计时孔型系的选择、各道次延伸系数的分配、压下量等工艺参数均要求进行优化。

1.2 精密辊锻成形工艺设计

利用三维造型软件，对车轴锻件进行截面积测量，测得最大截面轮座处的面积为  $41547.6\text{ mm}^2$ ，由于辊锻件不允许存在飞边，并按照大同机车锻造有限责任公司锻造车间的 RE2B 型车轴下料工艺要求，通过计算选取  $250\text{ mm}\times 250\text{ mm}$  的方料为初始坯料。采用两道次精密辊锻制坯，孔型系选用椭圆-圆形孔型，精密辊锻成形工步如图 2 所示。模具主要参数如表 1 所示。

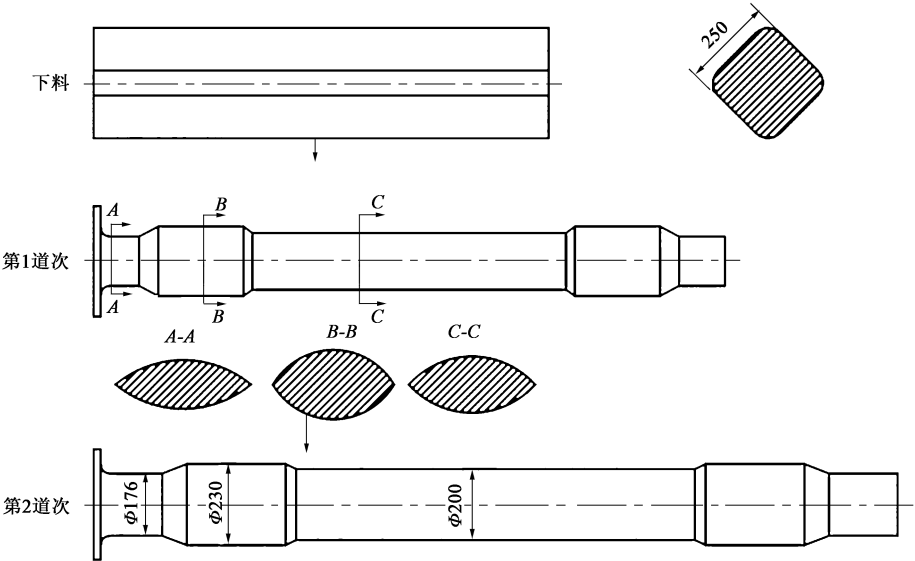


图 2 精密辊锻成形工步图  
Fig. 2 Diagram of process step for precision roll forging

表 1 车轴精密辊锻成形模具主要参数  
Table 1 Main parameters of precision roll forging die for axle

参数	道次	数值
模具宽度/mm	1	600
	2	600
有效型腔扇形角度/(°)	1	165
	2	220
上、下模中心距/mm	—	1600

2 车轴精密辊锻过程有限元分析

采用 Pro/E 三维造型软件构造车轴各工步辊锻模

的几何模型，保存为 STL 格式，导入有限元软件 DEFORM-3D 的前处理模块。将坯料设置为刚塑性体，选取 DEFORM-3D 软件材料库中的 AISI-1045 钢，加热温度为  $1180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，工件咬入端圆形截面设置垂直与水平方向速度为零，以模拟夹钳的夹持作用。模具采用刚性材料模型，毛坯与模具之间的摩擦类型采用剪摩擦，摩擦因子设置为 0.25。辊锻模温度为室温，轧辊的中心距为 1600 mm，锻辊的角速度为  $0.25\text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$ 。对流换热系数设置为  $0.02\text{ N}\cdot(\text{s}\cdot\text{mm}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$ ，热传导系数为  $11\text{ N}\cdot(\text{s}\cdot\text{mm}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$ 。对车轴锻件精密辊锻成形过程进行模拟分析。

2.1 车轴辊锻件外形有限元分析

图 3 为车轴辊锻件模拟图。从模拟结果可以看出：车轴辊锻件外形规整，过渡圆滑，无飞边、折叠等缺

陷。分别对轴颈、轮座、轴身部位截面（A-A、B-B、C-C）进行了分析，可以看到，每个截面的圆整度较好，测量发现最大直径和最小直径单边误差在 2 mm 以内。

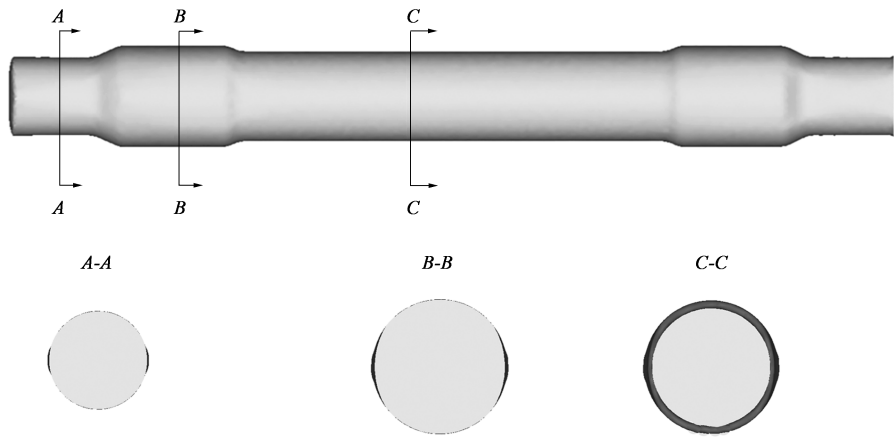


图 3 车轴辊锻件模拟图  
Fig. 3 Simulation diagram of axle roll forgings

2.2 车轴辊锻件端头有限元分析

图 4 为车轴精密辊锻端头与径向锻造端头对比。可以看出：采用径向锻造生产的车轴，端头有明显的凹坑和花瓣形状，凹坑和花瓣形状是造成端头锻后常有裂纹出现的原因，而且裂纹会在后续热处理过程中扩展，为此，采用径向锻造后需要将大部分端头坯料锯掉，造成了不必要的材料浪费。而采用精密辊锻成形技术，由于端头在辊锻成形时受到的应力为压应力，辊锻结束后轴颈端面平整（或有轻微凸起），辊

锻后车轴锻件端头可以避免裂纹缺陷的产生。

2.3 车轴辊锻件流线有限元分析

锻件在低倍组织中可见锻造流线，又称纤维组织。为了提高锻件的强度、疲劳和抗腐蚀性能，力求锻件的流线分布与零件外轮廓相符而不被切断。图 5 为车轴辊锻件流线分布模拟结果，从图 5 中可以看出，流线是连续均匀的，无断裂现象。

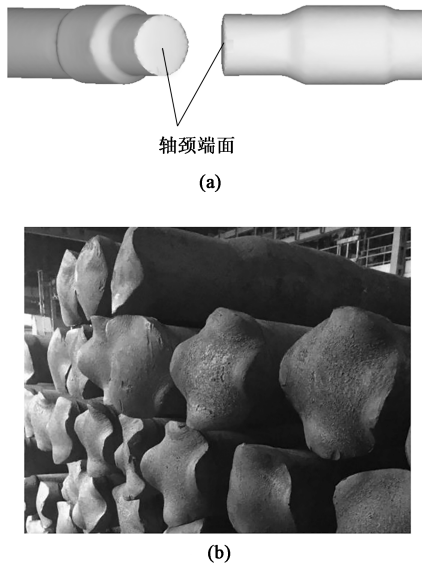


图 4 车轴端头对比  
(a) 精密辊锻成形 (b) 径向锻造  
Fig. 4 Comparison on ends of axles  
(a) Precision roll forging (b) Radial forging



图 5 车轴辊锻件流线分布模拟结果  
Fig. 5 Simulation result of flow line distribution for axle roll forgings

综合数值模拟结果可以看出，车轴采用精密辊锻成形技术时，辊锻件规整，锻造流线完整无断裂；车轴各截面圆整度好，且端头平整，无凹凸和花瓣形状产生。模拟结果显示，车轴精密辊锻成形有利于提高车轴辊锻件的质量，提高材料利用率，减少后续机加工量。

3 实验验证

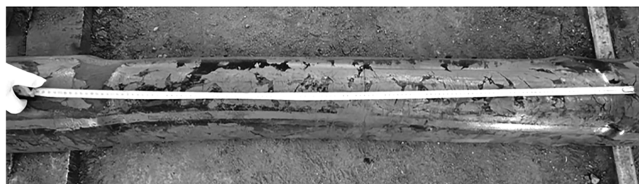
在世界首台套 1600 mm 大型辊锻机上，对 RE2B 型车轴精密辊锻成形进行工艺实验，工艺流程为：下料→加热（步进式燃气炉）→两道次精密辊锻（辊锻机）→热处理→检验。图 6 为车轴精密辊锻成形试制锻件，对锻件的各部位进行测量，结果显示：车轴精密辊锻成形锻件的外形规整，各部

位尺寸符合生产要求,与数值模拟结果相一致。表 2 为按 TB/T 2945—1999<sup>[13]</sup>要求对试制车轴进行热处理后性能检测及与快锻工艺经济性指标对标分

析的结果,检测结果满足标准规定要求,材料利用率和生产效率均较现有厂家车轴生产工艺有了显著提高。



(a)



(b)

图 6 车轴精密辊锻成形锻件

(a) 第 1 道次 (b) 第 2 道次

Fig. 6 Precision roll forgings of axle

(a) The first pass (b) The second pass

表 2 车轴辊锻件性能检测结果及经济指标对比

Table 2 Comparison of performance test results and economic indexes for axle roll forgings

试样	力学性能				经济指标	
	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	断面收缩率/%	材料利用率/%	生产节拍/(件·h <sup>-1</sup> )
TB/T 2945—1999 要求	≥360	≥650	≥20	≥37	—	—
现有车轴	355~375	690~720	22~25	39.0~46.5	58~65	10
精密辊锻车轴	370	710	23	42.5	70	24

## 4 结论

(1) 车轴采用精密辊锻成形技术,锻件外形规整,锻造流线连续均匀无断裂;过渡圆滑,各部位截面的圆整度较好,最大直径和最小直径单边误差在 2 mm 以内;车轴端头平整,无凹凸和花瓣形状产生。

(2) 在世界首台套 1600 mm 辊锻机上对车轴精密辊锻成形进行的工艺实验结果显示,车轴精密辊锻成形锻件的外形规整,各部位尺寸符合生产要求,与数值模拟结果相一致。按 TB/T 2945—1999 的要求对试制的车轴性能进行检测,检测结果满足标准规定要求。

### 参考文献:

- [1] 郑书华. 空心列车轴多楔同步轧制形性控制理论与实验研究 [D]. 宁波: 宁波大学, 2018.  
Zheng S H. Study on Forming and Performance Theory and Experiment of Railway Hollow Shafts in Multi-Wedge Synchrostep Cross Wedge Rolling [D]. Ningbo: Ningbo University, 2018.
- [2] 薛振峰, 郑毅, 赵兴龙, 等. 高速 EA4T 车轴钢低温性能研

究 [J]. 机械工程与自动化, 2021, (6): 114-116.

Xue Z F, Zheng Y, Zhao X L, et al. Research on low temperature performance of high speed EA4T axle steel [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2021, (6): 114-116.

- [3] 陈玲, 马跃. EA4T 车轴坯锻后表面开裂机理研究 [J]. 铁道机车与动车, 2020, (4): 34-37, 6.

Chen L, Ma Y. Study on surface cracking mechanism of EA4T axle blank after forging [J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2020, (4): 34-37, 6.

- [4] 初俊林. 高速列车轴轴坯新型成形工艺与设备的理论研究 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2018.

Chu J L. Theoretical Study on New Forming Process and Equipment of High Speed Train Axle Billet [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2018.

- [5] 张伟. 10 MN 快锻机在重载车轴生产线中的应用技术 [J]. 机械工程与自动化, 2017, (5): 193-195.

Zhang W. Control techniques of high speed oil hydraulic forging machine for heavy load axle production line [J]. Mechanical Engineering and Automation, 2017, (5): 193-195.

- [6] 李志刚. 列车车轴楔横轧精制坯新设备与新工艺 [D]. 长春: 吉林大学, 2010.

Li Z G. The New Equipment and Technology on Cross Wedge Rolling Precision Performing of Railway Axles [D]. Changchun: Jilin University, 2010.

- [7] 尹凌风. 列车车轴楔横轧后热处理残余应力研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.  
Yin L F. Research on Heat Treatment Residual Stress in Train Axle after Cross Wedge Rolling [D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2020.
- [8] 夏卫明, 寻宝明, 程玉. 大直径薄壁钢管缩径成形工艺研究 [J]. 锻造与冲压, 2022, (3): 52-56  
Xia W M, Xun B M, Cheng Y. Research on the reducing diameter process of a large-diameter and thin-walled steel pipe [J]. Forging & Metalforming, 2022, (3): 52-56.
- [9] 朱帅, 奚建胜. 基于 DEFORM 的重型汽车前轴成形工艺及模具设计 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (5): 194-200.  
Zhu S, Xi J S. Forming process and die design for heavy duty truck front axle based on DEFORM [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (5): 194-200.
- [10] 张雪莉. 汽车后桥半轴塑性成形工艺设计与数值模拟研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- Zhang X L. Design and Numerical Simulation Research on Plastic Forming Process of Automobile Rear Axle Half Shaft [D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [11] 王星, 刘宁, 潘琪琛, 等. 某重型卡车前轴精密辊锻工艺设计与优化 [J]. 模具工业, 2021, 47 (3): 47-49, 60.  
Wang X, Liu N, Pan Q C, et al. Process design and optimization of precision roll forging on heavy truck front axle [J]. Die & Mould Industry, 2021, 47 (3): 47-49, 60.
- [12] 汽车轴类件楔横轧近净成形关键技术与应用 [R]. 北京: 北京科技大学, 2018.  
Key technologies and applications of automotive shaft parts wedge cross rolling with near net forming [R]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.
- [13] TB/T 2945—1999, 铁道车辆用 LZ50 钢车轴及钢坯技术条件 [S].  
TB/T 2945—1999, Specification of LZ50 steel axles and billets for railway vehicles [S].

+++++

(上接第4页)

- [3] 宋长辉, 杨永强, 王赟达, 等. CoCrMo 合金激光选区熔化成型工艺及其性能研究 [J]. 中国激光, 2014, 41 (6): 58-65.  
Song C H, Yang Y Q, Wang Y D, et al. Research on process and property of CoCrMo alloy directly manufactured by selective laser melting [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41 (6): 58-65.
- [4] 田甜, 余占海, 高勃. 激光快速成形钴铬合金的生物安全性评价 [J]. 实用口腔医学杂志, 2012, 28 (2): 151-155.  
Tian T, Yu Z H, Gao B. Biological safety of Co-Cr alloy fabricated by laser rapid forming method [J]. Journal of Practical Stomatology, 2012, 28 (2): 151-155.
- [5] 赵铭, 郑启新. 人工关节材料的研究进展 [J]. 生物骨科材料与临床研究, 2004, 1 (7): 53-56.  
Zhao M, Zheng Q X. Research progress on materials of prosthesis [J]. Orthopaedic Biomechanics Materials and Clinical Study, 2004, 1 (7): 53-56.
- [6] Vidal C V, Munoz A I. Effect of physico-chemical properties of simulated body fluids on the electrochemical behaviour of CoCrMo alloy [J]. Electrochimica Acta, 2011, 56 (24): 8239-8248.
- [7] Hiromoto S, Onodera E, Chiba A, et al. Microstructure and corrosion behaviour in biological environments of the new forged low-Ni Co-Cr-Mo alloys [J]. Biomaterials, 2005, 26 (24): 4912-4923.
- [8] Julian L C, Munoz A I. Influence of microstructure of HC CoCrMo biomedical alloys on the corrosion and wear behaviour in simulated body fluids [J]. Tribology International, 2011, 44 (3): 318-329.
- [9] Yamanaka K, Mori M, Chiba A, et al. Nanoarchitected Co-Cr-Mo orthopedic implant alloys: Nitrogen-enhanced nanostructural evolution and its effect on phase stability [J]. Acta Biomaterialia, 2013, 9 (4): 6259-6267.
- [10] Niinomi M, Narushima T, Nakai M. Advances in Metallic Biomaterials-Processing and Applications [M]. Springer Series in Biomaterials Science and Engineering, 2015.
- [11] 林莺莺, 唐志今, 林海, 等. 钴铬钼合金的精密锻造工艺研究 [J]. 航空材料学报, 2011, 31 (Z1): 19-21.  
Lin Y Y, Tang Z J, Lin H, et al. Precision forging technology of CoCrMo alloy [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31 (Z1): 19-21.
- [12] 王以华, 吴振清, 陈修琳, 等. 型砧几何尺寸对大锻件锻造孔隙闭合的影响 [J]. 金属加工: 热加工, 2013, (1): 22-25.  
Wang Y H, Wu Z Q, Chen X L, et al. Effect of anvil geometry size on forging pore closure of large forgings [J]. Metal Working: Hot Working, 2013, (1): 22-25.
- [13] ISO 5832. 12—2019, 外科移植 金属材料 第12部分: 锻造钴铬钼合金 [S].  
ISO 5832. 12—2019, Implants for surgery—Metallic materials—Part 12: Wrought cobalt-chromium-molybdenum alloy [S].
- [14] 徐海峰, 曹文全, 俞峰, 等. 国内外高氮马氏体不锈钢轴承钢研究现状与发展 [J]. 钢铁, 2017, 52 (1): 53-63.  
Xu H F, Cao W Q, Yu F, et al. Current research status and development of domestic and foreign high nitrogen martensitic stainless bearing steel [J]. Iron & Steel, 2017, 52 (1): 53-63.
- [15] 徐海峰, 史智越, 俞峰, 等. 高氮不锈钢轴承钢的微观组织与性能研究 [J]. 特殊钢, 2021, 42 (1): 71-76.  
Xu H F, Shi Z Y, Yu F, et al. Study on microstructure and properties of high nitrogen stainless bearing steel [J]. Special Steel, 2021, 42 (1): 71-76.
- [16] 陈修琳, 陈岩. 铍青铜薄壁管径向锻造工艺研究 [J]. 锻压技术, 2018, 43 (8): 23-26, 34.  
Chen X L, Chen Y. Study on radial forging process of beryllium bronze thin-walled tube [J]. Forging & Stamping Technology, 2018, 43 (8): 23-26, 34.