

# 配电柜连接器锻造工艺研究及数值模拟分析

邵超<sup>1</sup>, 邱建新<sup>1</sup>, 胡晓峰<sup>2</sup>, 王雷刚<sup>2</sup>

(1. 昆山惠众机电有限公司, 江苏 昆山 215331;  
2. 江苏大学 材料科学与工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** **目的** 研究曲面分模工艺在配电柜连接器成形中的可行性。**方法** 针对配电柜连接器结构有高筋的特点, 设计出一套曲面分模工艺方案。同时根据其合模过程中出现的错位现象, 设计出一套带有锁扣装置的模具。另外通过增加坯料长度和圆角, 解决实际生产中出现的折叠缺陷。最后通过有限元模拟软件 DEFORM-3D, 模拟了成形过程, 获得成形过程的金属流动情况、等效应变分布以及成形载荷变化情况, 并根据模拟结果进行了生产试验。**结果** 通过模拟结果及工艺试验结果显示, 该零件的两侧高筋可以成形完全, 同时未出现折叠等缺陷。**结论** 验证了曲面分模工艺在配电柜连接器成形中的可行性。

**关键词:** 连接器; 分型线; 锁扣; 折叠; 有限元模拟

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.06.031

**中图分类号:** TG312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)06-0182-05

## Forging Technology and Numerical Simulation of Distribution Cabinet Connector

SHAO Chao<sup>1</sup>, QIU Jian-xin<sup>1</sup>, HU Xiao-feng<sup>2</sup>, WANG Lei-gang<sup>2</sup>

(1. Kunshan Huizhong Machine Co., Ltd., Kunshan 215331, China;  
2. School of Material Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to study the feasibility of curved surface parting technology in the forming of distribution cabinet connector. A set of process method for parting curved surface was designed based on high tendons of distribution cabinet connector. Meanwhile, a set of die with locker was designed according to the dislocation phenomenon in die assembly. In addition, folding defects in actual production were solved by increasing blank length and fillet. At last, the forming process was simulated with the finite element simulation software DEFORM-3D and flow of metal, equivalent strain distribution and forming load changes were obtained. In addition, the production test was carried out according to the simulation results. Both of the simulated results and industrial test showed that high tendons on both sides of the component could be formed completely, and there were no folding defects. The feasibility of surface parting process in connector forming of power distribution cabinet is verified.

**KEY WORDS:** connector; parting line; locker; folding; finite element simulation

低压配电柜<sup>[1-3]</sup>是一种广泛运用于工业、家庭电路的配电装置,一般都安装在相应的配电室,是配电系统的末级设备,其主要功能是把上一级配电设备某一电路的电能分配给就近的用电器。我国低压配电柜通过不断发展,从一开始的功能较少、体积很大、性能差、容量也很小,逐步改善为多功能、小体积、高

性能、大容量的智能化设备。在未来,低压配电柜将逐渐运用到机电一体化相关领域,推动电网运行质量的提高。配电柜连接器是配电柜的关键零件,用于连接电气元件,其综合性能对配电柜的使用有着很大的影响。通过锻造的方法可以有效提高零件的力学性能,从而提高零件的使用寿命。

收稿日期: 2017-09-22

作者简介: 邵超(1986—),男,工程师,主要研究方向为锻造工艺与有限元数值分析。

文中针对该零件外形中的高筋结构设计了曲面分模，同时为了防止产品在锻造时产生错移，设计了带有锁扣装置的上、下模，另外为了解决实际生产中出现的折叠等缺陷，增加了坯料的长度和圆角。最后通过有限元模拟软件 DEFORM-3D 进行数值模拟分析，分析了成形过程和金属流动等特点，为实际生产提供了理论基础与指导，并最终通过生产验证了数值模拟的可靠性。

## 1 连接器结构及工艺分析

### 1.1 零件结构分析

研究对象为低压配电柜的连接器，其造型见图1。材料为铅黄铜 HPb59-1<sup>[4]</sup>，有良好的力学性能，可切削性好，能承受冷、热压力加工，易焊接，钎焊性好，对一般腐蚀有良好的稳定性，锻造性能优良<sup>[5]</sup>。连接器的几何尺寸见图2，该零件是一个较为复杂的结构，两侧的高筋部分厚度约为5 mm，零件上端主体部分为一个圆形的凸台，整体是一个对称结构。

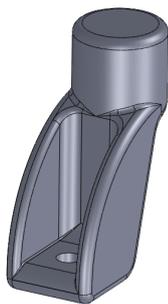


图1 连接器三维造型

Fig.1 Three-dimensional model of connector

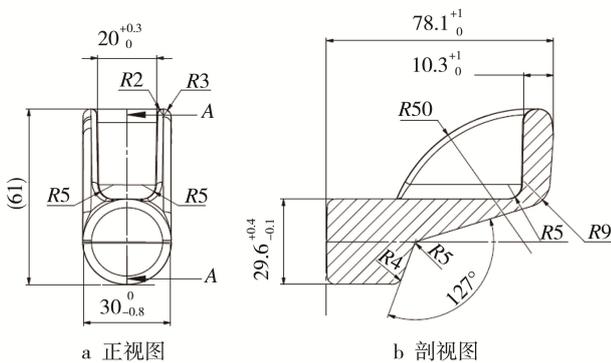


图2 连接器几何尺寸

Fig.2 Geometries of connector

### 1.2 成形工艺分析

#### 1.2.1 分模面的确定

模锻件是在可分离的模腔中锻造而成。模具上下型腔模块的接触面称为“分模面”；分模面的设计，对

锻件的成形与出模、材料利用率等有非常重要的影响。确定分模面的基本原则为：使锻件外形与零件尽量相同，使锻件容易脱模，使锻件以镦粗形式填充。所以，分模面一般设计在锻件最大水平投影尺寸处<sup>[6]</sup>。

该零件是一个对称结构，但是由于两侧的高筋以及零件的形状，考虑到直线分模不合适，故采用曲线分模，来达到充填完整的目的<sup>[7]</sup>。经过多方面考虑，并根据实际生产经验，设计的分模面根据零件外形一共分成4个部分，具体位置见图3，由分模线形成的分模面见图4。

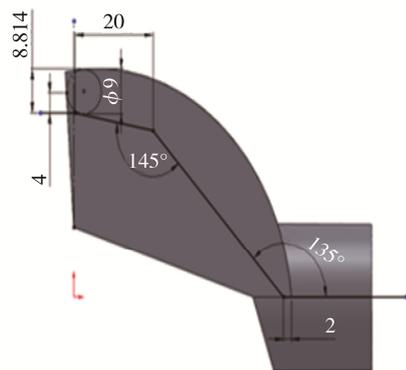


图3 分模线位置

Fig.3 Location of parting line

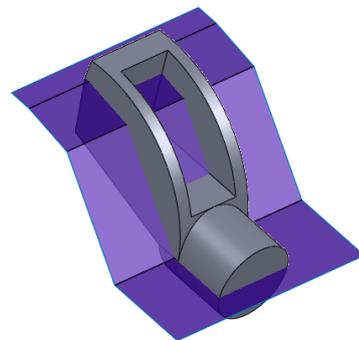


图4 分模面示意

Fig.4 Location of parting surface

#### 1.2.2 锁扣装置的设计

锁扣是一种将上下锻模加工出凸凹相配的凸台和凹档<sup>[8]</sup>。主要作用是为了当分模面不在同一平面上时，平衡产生的错移力，以此来减少成形过程中出现的开裂等倾向，另外也起到了导向模具运动的作用，便于上下模块的调整，提高生产率<sup>[9]</sup>。

由于该零件的分模面是曲面的关系，在实际锻造过程中，上下模具在闭合时有可能发生错位（见图5），影响产品的锻造精度以及产品的质量，所以针对该模具结构，特地在模具上增加了锁扣装置，以此保证锻造出精度高、质量好的锻件，设计好的带有锁扣装置的上下模具见图6。

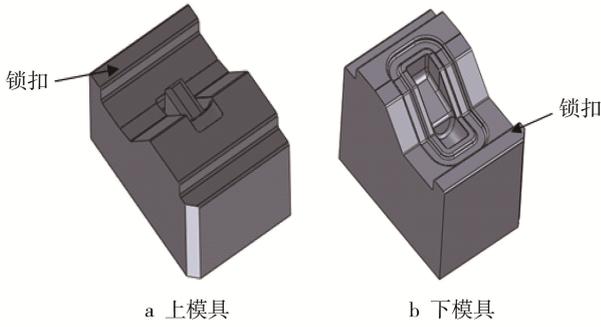


图5 带有锁扣装置的模具  
Fig.5 Die with locker

### 1.2.3 折叠缺陷的产生与解决方案

折叠是金属变形过程中表层金属通过某种特定的方式汇集到一起而形成的。这种特定的方式可以分为以下4种：①一股快速流动的金属带着相邻的金属而产生折叠；②两股及以上的金属相碰撞而产生折叠；③变形金属的弯曲和回流产生折叠；④部分局部变形的金属，压入到另一部分金属内而产生折叠。

该零件筋较薄，两筋间间距较短，故折叠易发生在两筋与底板的连接处，实际生产中就出现了很明显的折叠现象，零件在使用过程时有可能会在折叠处发生应力集中，降低产品寿命，折叠部位见图6。



图6 折叠部位  
Fig.6 Location of folding area

根据理论分析及生产实践经验，初步判断为坯料设计不合理。随着变形程度的增加，由于两筋较薄且较高，上部筋充满时会和底板交界处会出现空穴，此时筋上的金属和底板的金属会进行相对碰撞，形成折叠<sup>[10]</sup>，因此以尽可能不要增加工序，降低成本为原则，在原先坯料

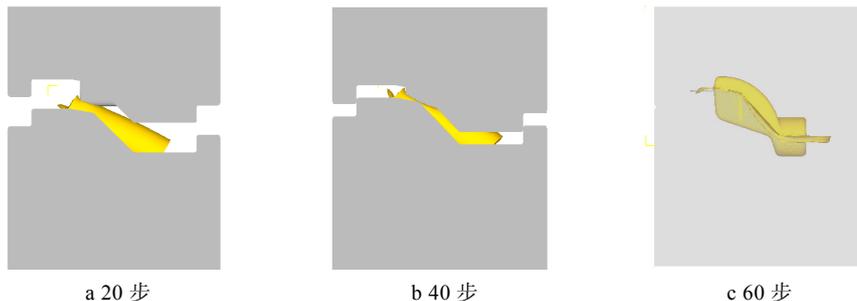


图8 连接器成形过程  
Fig.8 Forming process of connector

尺寸  $\Phi 30\text{ mm} \times 86\text{ mm}$  的基础上增加了长度，最终确定为坯料尺寸为  $\Phi 30\text{ mm} \times 90\text{ mm}$ 。同时对坯料进行边缘倒圆，在符合产品要求的情况下，增大了筋和底板交界处的凸模圆角半径，以此来消除折叠缺陷。

## 2 数值模拟

数值模拟是通过有限元模拟软件 DEFORM-3D 对成形过程进行模拟，分析产品成形过程中各个因素的变化情况，降低成本，为实际生产提供良好的理论基础<sup>[11-14]</sup>。

### 2.1 有限元建模

坯料的尺寸为  $\Phi 30\text{ mm} \times 90\text{ mm}$ ，设置成塑性体，材料选择为铅黄铜 HPb59-1，坯料初始温度选择为  $600\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[15]</sup>，模具材料为 H13 模具钢，锻造过程中变形量较小，因此设置成刚性体，初始温度为  $150\text{ }^\circ\text{C}$ ，上模速度选择  $40\text{ mm/s}$ ，摩擦因数取  $0.3$ ，坯料与模具之间的导热系数为  $5\text{ N}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ 。连接器锻件的有限元模型见图7。

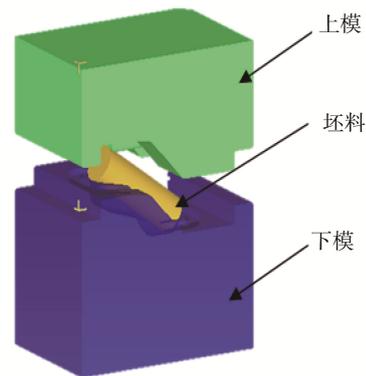


图7 有限元模型  
Fig.7 Finite element model

### 2.2 成形过程分析

根据有限元模拟结果可知，上模的凸模首先接触到坯料，首先成形的是连接器两侧的高筋结构，如图8a所示<sup>[16]</sup>。随着上模的继续向下运动，开始成形连接器的圆柱部分，如图8b所示。进行到第60步时，基本成形完成，周围有飞边，说明零件已充填完整，如图8c所示。

### 2.3 折叠倾向分析

连接器的筋和底板的金属流动情况见图9，可以看出，此时两侧高筋和底板的金属流动都是同一方向，且没有发生类似碰撞回流等情况，说明改变坯料的形状以及增大筋处的圆角半径，可以有效降低零件表面上出现的折叠等缺陷，提高产品质量。

### 2.4 等效应变分析

连接器的等效应变分布见图10，图10a所示为上模压力作用于凹槽中，此时成形两边的薄壁，可以看出，在两侧高筋和底板接触的部分出现应变，最大等效应变值约为2.6。图10b为50步时等效应变分布图，圆柱部分和凹槽部分已经基本成形，此时的等效应变分布在凹槽内壁以及圆柱部分的飞边处，最大等效应变值约为3.4。图10c所示的是零件已经基本成形的等效应变分布，此时的等效应力基本分布在零件的外形

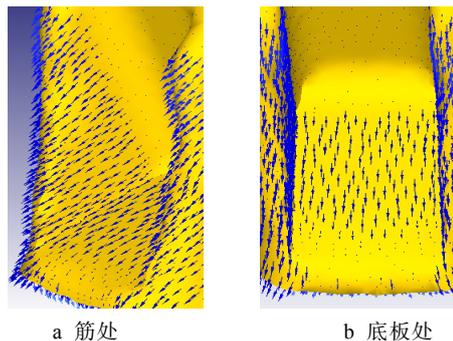


图9 连接器成形的金属流动  
Fig.9 Metal flow of connector forming

轮廓四周和凹槽内壁，整体应力处于较均匀分布状态，底部飞边处应变较大，最大等效应变约为5.2。

可以得出：通过新的生产工艺，模拟结果中基本没有出现应变很大的部位，也就是说整个零件可以较好地成形完全，且没有出现开裂等缺陷。

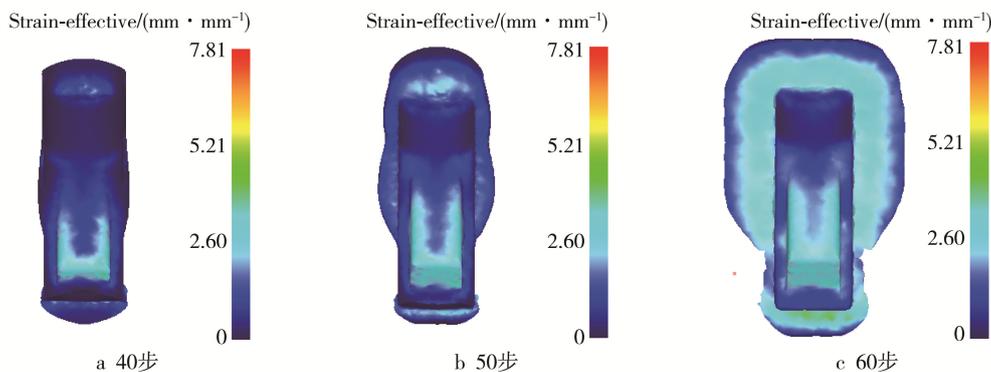


图10 连接器成形的等效应变分布  
Fig.10 Equivalent strain distribution of connector forming

### 2.5 成形载荷分析

上模的载荷-行程曲线见图11，可以看出上模向下运动时，随着不断接触坯料，成形载荷不断增加，一开始载荷处于缓慢上升的阶段，载荷曲线也是缓慢上升，但从0.9s左右开始载荷曲线急速上升，说明零件已经处于成形的最后阶段，在1.06s时完成成形，此时最大成形载荷为3330kN。

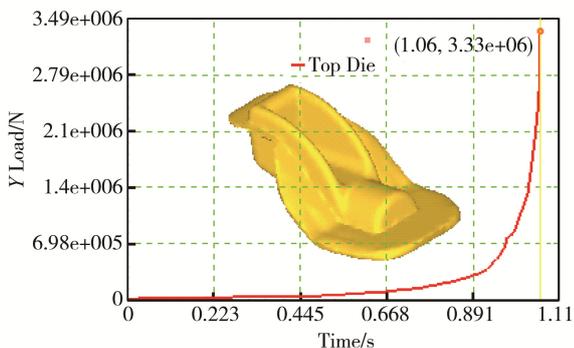


图11 连接器成形时上模的载荷-时间曲线  
Fig.11 Load-time curve of punch during connector forming

## 3 生产验证

根据上述模拟的结果，结合锻件工艺设计并制造模具，接着进行成形试验，试验设备为16000kN的摩擦压力机，实际生产的已经切边的连接器锻件和上、下模具见图12，可以看出，该零件已经成形完全，另外零件外形表面没有出现折叠等缺陷，验证了该成形工艺的可行性。

## 4 结论

- 1) 根据零件外形结构以及材料利用率，针对两侧薄壁部分设计了四段折线形成的曲面分模面，有效解决了产品填充不足的问题。
- 2) 根据曲面分模面，设计出了带有锁扣装置的上下模具，有效解决了在合模时发生错位的情况，提高了产品精度，保证了产品质量。
- 3) 针对实际生产中出现的折叠等缺陷，通过增加坯料长度和圆角有效的解决了该问题。

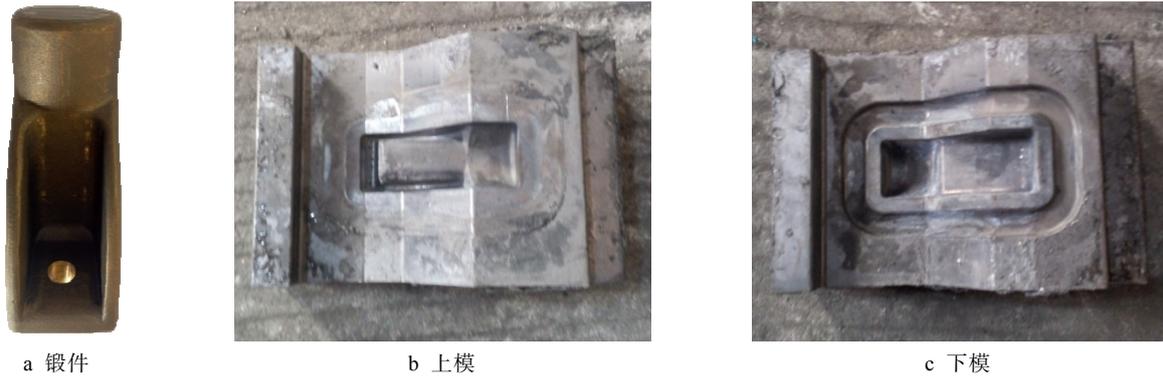


图12 试生产实物

Fig.12 Objects by trail production

4) 通过有限元模拟软件 DEFORM-3D 模拟锻造工艺, 得到锻造过程中的金属流动情况, 等效应变分布及成形载荷变化情况, 并根据模拟结果进行了生产验证, 制造了模具, 试生产得到合格零件, 大幅降低了研发成本和生产周期。

#### 参考文献:

- [1] 叶丽萍. 低压配电柜的开发与应用探讨[J]. 实用科技, 2007(9): 233—234.  
YE Li-ping. A Study about the Development and Application of Low-voltage Distribution Cabinet[J]. Practical Technology, 2007(9): 233—234.
- [2] 吴霞明. 浅谈低压配电柜的技术创新与发展[J]. 科技与创新, 2016(6): 69—71.  
WU Xia-ming. Discussion on the Technological Innovation and Development of Low-voltage Distribution Cabinet[J]. Science and Technology & Innovation, 2016(6): 69—71.
- [3] 支艳华. 中低压配电柜数字化技术[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 158—160.  
ZHI Yan-hua. Digital Technology of Low-voltage Distribution Cabinet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 158—160.
- [4] 卜建荣. HPb59-1 黄铜减压阀热挤压工艺及模具[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(12): 1308—1310.  
BU Jian-rong. Hot Extrusion Process and Design of Die for HPb59-1 Brass Reducing Valve[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2015, 35(12): 1308—1310.
- [5] 钟启俊. 探讨锻造技术与应用进展[J]. 科技创新导报, 2012(26): 38—40.  
ZHONG Qi-jun. Discussion on the Progress of Forging Technology and Application[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2012(26): 38—40.
- [6] 姚泽坤. 锻造工艺学与模具设计[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2013.  
YAO Ze-kun. Forging Technology and Mold Design[M]. Xi-an: Northwestern Polytechnical University Press, 2013.
- [7] 杨海. 三缸曲轴曲线分模成形工艺探究[J]. 热加工工
- [8] 吕炎. 锻模设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.  
LYU Yan. Forging Die Design Manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [9] 李志广. 锤锻模平面锁扣的结构设计及其应用[J]. 锻压技术, 1996, 23(2): 51—54.  
LI Zhi-guang. Structural Design and Application of Hammer Forging Die with Flat Locking[J]. Forging & Stamping Technology, 1996, 23(2): 51—54.
- [10] 黄进城. 锻件折叠缺陷、产生成因及预防方法[J]. 企业技术开发, 2014, 33(32): 104—105.  
HUANG Jin-cheng. Forging Folding Defects, Causes and Pre-control Methods[J]. Technological Development of Enterprise, 2014, 33(32): 104—105.
- [11] LI Jian-guo, TANG Wen-cheng. 3D FEM Simulation of Precision Forging Automobile Clutch Damping Spindle Sleeve[J]. CADDM, 2008: 73—76.
- [12] OU H. An FE Simulation and Optimization Approach for the Forging of Aeroengine Components[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004: 208—216.
- [13] LI Xia-fan. 3D Finite Element Modeling and Analysis of Radial Forging Processes[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2014: 329—334.
- [14] CHOI S K. Optimization of Open Die Forging of Round Shapes Using FEM Analysis[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006: 88—95.
- [15] 刘百宣, 孙红星, 刘华. 基于 DEFORM-3D 的汽车转向器输入轴锻造成形研究[J]. 金属铸锻焊技术, 2012, 41(9): 129—131.  
LIU Bai-xuan, SUN Hong-xing, LIU Hua. Research on Forging Process for Automotive Steering Input Shaft Based on DEFORM-3D[J]. Casting Forging Welding, 2012, 41(9): 129—131.
- [16] SHAN De-bin. Defect Analysis of Complex-shape Aluminum Alloy Forging[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006(16): 1574—1579.