

基于MBC工具箱的触头座温挤成形工艺参数优化

纪帅¹, 赵佳², 王安平¹, 符严平¹, 赵飞¹

(1. 平高集团有限公司金属材料成型及热处理实验室, 河南 平顶山 467001;

2. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘要: 以高压开关用触头座的温挤压为例, 分析了摩擦系数、模具下压速度、坯料外径尺寸对纯铜温挤压成形性能的影响。基于MATLAB软件中的MBC(model-based calibration)工具箱建立了工艺参数(摩擦系数、模具下压速度、预成型件外径尺寸)与目标函数(成形载荷、最大损伤值)之间的数学模型, 并借助于MBC工具箱中的CAGE优化模块对目标函数进行多目标优化, 得到最佳的工艺参数组合, 即摩擦系数为0.34, 坯料外径尺寸为83.5 mm, 模具下压速度为30~40 mm/s。生产实践结果表明多目标优化后的工艺参数能够获得形貌完整的触头座挤压件, 并且能够有效地降低挤压件的成形载荷及最大损伤值, 而且显著地提高了材料的利用率。

关键词: 触头座; 温挤压; MBC工具箱; 多目标优化

Optimization Design of Warm Extrusion Forming Process Parameter for Contactor Socket Based on Model-based Calibration Toolbox

Ji Shuai¹, Zhao Jia², Wang Anping¹, Fu Yanping¹, Zhao Fei¹

(1. Metal Materials Forming and Heat Treatment Laboratory, Pinggao Group Co., Ltd., Henan Pingdingshan 467001, China;

2. College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Taking the warm extrusion of contactor socket used in high voltage condition as an example, the effects of technology parameters such as friction coefficient, speed of die pressing, billet size on the warm extrusion formability of pure copper are analyzed. A mathematical model is established by taking the process parameters (friction coefficient, speed of die pressing, billet size) as variables while the simulation results (forming load, maximum damage) as responses, based on model-based calibration(MBC) toolbox in MATLAB software. The optimum process parameters are achieved by the CAGE optimization module in MBC toolbox, namely, the friction coefficient is 0.34, the billet diameter is 83.5 mm, the speed of die pressing is 30~40 mm/s. Production practice shows that the process parameters after multi-objective optimization can get contactor socket without any defects on surface, what is more, it can reduce the maximum damage and forming load effectively, the utilization of material is also improved obviously.

Key words: contactor socket; warm extrusion; model-based calibration toolbox; multi-objective optimization

0 引言

温挤压是将金属毛坯放入模具型腔内, 在室温以上再结晶温度以下迫使金属成形的塑性加工方法。温挤压件具有材料力学性能好、表面光洁度高的优点, 目前已广泛运用于有色金属回转体零部件

的制造。触头座是高压开关的主要工作零部件, 对导电、导热、机械性能都有很高的要求, 通常采用先挤压出坯料, 再进行机加工的方法制造^[1-2]。影响温挤压成形的因素主要有摩擦系数、模具下压速度、坯料尺寸等。华凯旋等采用Deform软件对20MnNiMo高压容器左封头进行了热模锻有限元数

收稿日期:2018-05-24; 修回日期:2018-07-27

基金项目:2016年优秀青年科技基金项目(PGKQ2016-009)。

Project Supported by Excellent Youth Fund of Pinggao Group(PGKQ2016-009).

值模拟,分析了始锻温度、摩擦因子、锻造速度等工艺参数对锻件成形性能的影响,最终获得了合理的工艺参数范围^[3];张跃等借助于Dynaform软件及正交分析,确定了纬纱板的最佳成形工艺参数^[4];陈学文等采用有限元模拟与优化分析相结合的方法以零件毛坯的初始高径比为设计变量,以最大损伤值为目标,对齿轮毛坯非等温热锻成形工艺参数进行了优化^[5];刘静等采用响应面法建立了冲裁速度、冲裁间隙、凸模圆角半径、凸台高度、凸台宽度与光洁率和塌角率之间的影响模型,并结合遗传算法求解出了最佳的工艺参数^[6]。因此采用将有限元模拟技术与优化分析相结合的方法,能够有效的为生产提供合适的工艺参数。

触头座是典型的小轴径比、回转体零部件,很适合采用温挤压的方法成形^[7-10]。文中将有限元分析软件Deform与MATLAB软件中的MBC工具箱相结合,建立了触头座温挤压成形工艺参数与成形载荷及最大损伤值之间的数学模型,并通过MBC工具箱优化得到了温挤压的工艺参数优化表,为实际生产中工艺参数的优选提供了有效的参考。

1 触头座温挤压成形的工艺分析

触头座及坯料三维图见图1。图1(a)中,触头座的外形为带凸缘管形,其材料为纯铜,通常情况下采用两道工序挤压成形。考虑到触头座凸缘尺寸与壁厚相差较小,铜的塑性也较好,文中采用空心坯料一次镦挤复合成形。其工艺路线为:下料—预热模具—涂覆润滑剂—加热坯料—挤压—冷却—检验;图1(b)为触头座挤压成形所需要的空心坯料,根据等体积原则即可确定空心形坯料的体积,空心坯料的外径尺寸对触头座的成形性能有很大的影响,外径尺寸过大,触头座容易出现成形载荷大、充型不完整的缺陷;外径尺寸过小,触头座在挤压的过程中容易出现折叠缺陷,由于触头座凸缘和凸出部分的外径分别为104 mm和68 mm,根据工作经验坯料外径尺寸的范围选为81~85 mm^[11-14]。

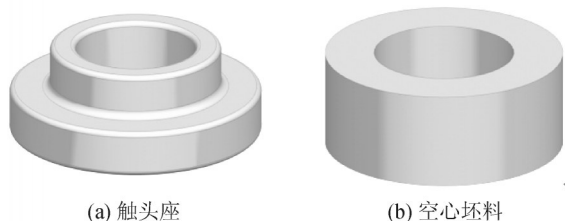


图1 触头座及坯料三维图

Fig. 1 The three-dimensional figure of contactor socket and its billet

2 挤压过程有限元建模

2.1 有限元几何模型的建立

挤压的几何模型包括坯料、凸模和凹模。为了方便在Deform软件中定位,把设计好的坯料和模具模型在UG中固定好位置,然后以STL的格式导入到Deform软件中。由于触头座形状为轴对称,选择零件的1/4模型进行有限元数值模拟见图2,以提高模拟效率^[15]。

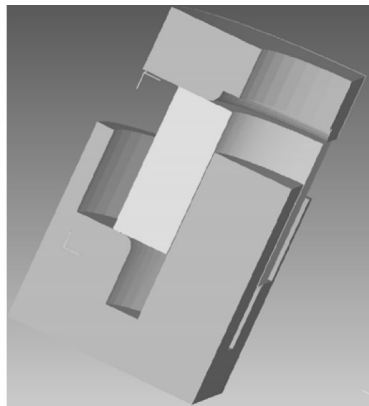


图2 有限元几何模型

Fig. 2 The geometry model for finite element analysis

2.2 模拟参数的设置

为了防止坯料放入模具后,温度大幅度下降,不利于材料的成形,将模具的预热温度设为200℃,坯料的挤压温度设为350℃。坯料的材料选择为Brass CDA110。为保证模拟精度,坯料网格的最小单元尺寸设为1 mm,尺寸比为3,步长设为最小单元尺寸的1/3^[16-17]。凸模的下压速度在15~100 mm/s选取,模具与坯料之间的接触采用常剪应力摩擦模型,摩擦系数从0.1~0.5中选取。

3 数学建模及优化

较低的成形载荷既能够减少液压机的能耗又能减少模具的磨损,延长液压机和模具的使用寿命^[18-20];挤压件的损伤值对挤压件的力学性能、导电性能以及表面光洁度都有非常重要的影响。因此降低触头座的成形载荷及触头座的损伤值在实际生产中均有着非常重要的意义。通常情况下需要依靠长时间的工作经验和试模来达到以上目的。文中采用数学统计分析的方法,建立能够充分考虑到不同工艺参数组合关系的实验设计方案,并建立能够反映工艺参数与挤压件成形载荷、损伤值之间关系的数学模型,进而采用数学优化方法确定最合适的温挤压工艺参数。

3.1 实验设计及模拟结果统计

采用MBC工具箱中的Two-stage模块进行数学建模,模型由局部模型和全局模型组成。文中将模具下压速度 v 、摩擦系数 u 设为全局变量,利用MATLAB软件空间填充法中的拉丁超立方(LHS)进行抽样,得到10组全局变量的参数组合,其抽样结果见图3。同时将坯料尺寸设为局部变量,其取值分别为81、82、83、84、85。依次改变局部变量得到50组数据,再利用Deform软件对不同工艺参数组合进行有限元模拟,将由数值模拟所获得的不同工艺参数下的成形载荷、最大损伤值进行统计保存以用于接下来数学模型的建立。

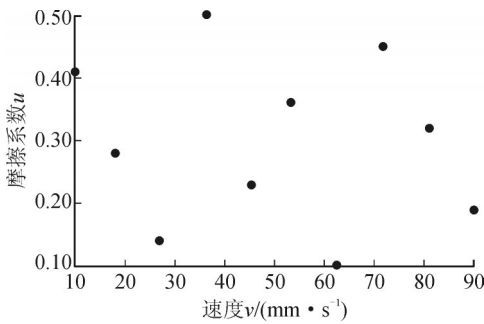


图3 全局变量的抽样组合结果

Fig. 3 Results of sampling for global variable

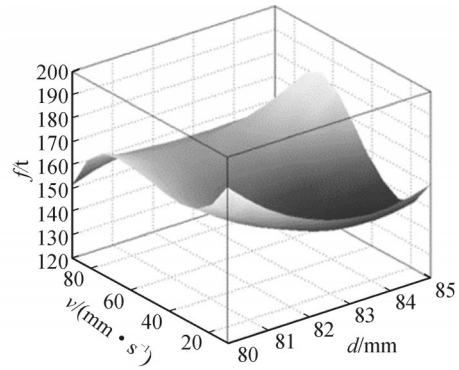
3.2 数学模型的建立

局部变量坯料尺寸 d 与目标函数成形载荷 f 和最大损伤值 s 之间的二次多项式模型即为局部模型,其表达式为

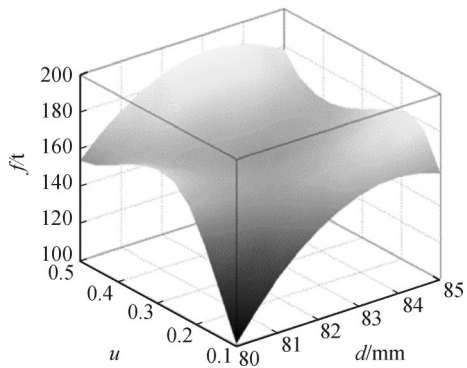
$$(f, s) = a \times d^2 + b \times d + c \quad (1)$$

式(1)中, a 、 b 、 c 为二阶多项式的回归系数,回归系数与全局变量之间的关系可以采用线性的径向基函数表示。表达所有变量(v 、 u 、 d)与目标函数(f 、 s)之间关系的数学模型即为全局模型,最终可以建立能够表示成形载荷 f 及最大损伤值 s 与各工艺参数之间关系的数学模型见图4、5。而且由模型的残差分布可知,成形载荷 f 及最大损伤值 s 模型的残差值都均匀分布在0的两侧,而且误差都控制在2%以内,因此表明了所建立的数学模型能够有效的预测成形载荷 f 及最大损伤值 s 与各工艺参数之间的相互关系。由图4(a)可知,当摩擦系数为0.3时,成形载荷随着模具下压速度的增加呈现出先降低后增加的趋势,这是因为一方面模具下压速度的增加会产生有利于材料塑性变形的热效应,另一方面也会增加材料的硬化程度;由图4(b)可知,当模具的下压速度为50 mm/s时,同时降低坯料的尺寸及摩擦系数能够有效的降低成形载荷。由图5(a)可知,当摩

擦系数为0.3时,较小的坯料外径尺寸及较大的模具下压速度虽然能够降低材料的损伤值,但是损伤值对于工艺参数的敏感性很强,不利于材料的均匀性。因此坯料外径尺寸及模具下压速度取中间值时比较合适;同样,由图5(b)可知,当模具的下压速度为50 mm/s时,坯料的外径尺寸及摩擦系数也是取中间值比较合适。



(a) 当 $u=0.3$ 时



(b) 当 $v=50$ mm/s时

图4 成形载荷与工艺参数之间的模型

Fig. 4 The model for forming load and technology parameters

3.3 优化

文中的目的是获得能够同时降低触头座成形载荷及表面最大损伤值的工艺参数。在上述已建立的数学模型的基础上,利用MATLAB软件MBC工具箱的GAGE模块进行优化分析。优化过程中以不同的模具下压速度为固定变量值,以坯料外径尺寸和摩擦系数为自由变量进行优化。最终可获得不同模具下压速度所对应的最适合的坯料外径尺寸及摩擦系数见图6。当模具下压速度为40 mm/s时,触头座挤压的成形载荷及最大损伤值随工艺参数的变化情况见图7。由图7可知,为当模具下压速度为40 mm/s时,模具的坯料尺寸选择83.516 mm,摩擦系数选择0.339能够同时获得较小的成形载荷 f 及最大损伤值 s 。

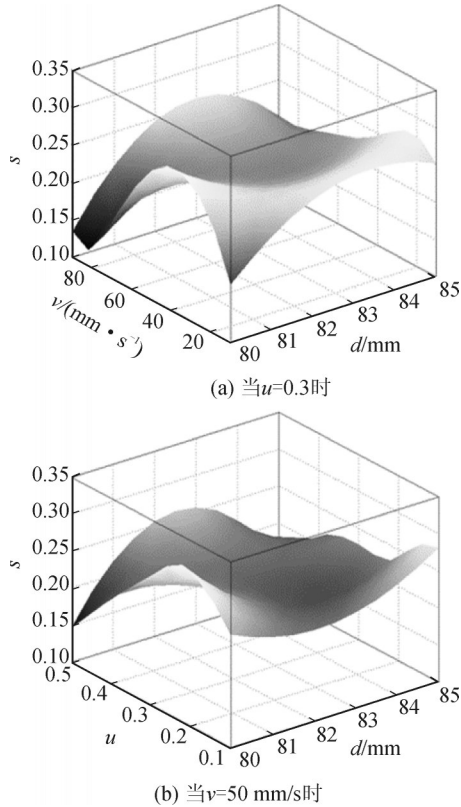


图5 最大损伤值与工艺参数之间的模型

Fig. 5 The model for maximum damage and technology parameters

Run	Accept	d/mm	u	$v/(mm \cdot s^{-1})$	f	s
1	<input checked="" type="checkbox"/>	83.705	0.358	10	1.508	0.279
2	<input checked="" type="checkbox"/>	84.467	0.365	20	1.397	0.286
3	<input checked="" type="checkbox"/>	85.000	0.375	30	1.142	0.275
4	<input checked="" type="checkbox"/>	83.516	0.339	40	1.496	0.225
5	<input checked="" type="checkbox"/>	82.727	0.324	50	1.569	0.216
6	<input checked="" type="checkbox"/>	82.857	0.217	60	1.665	0.203
7	<input checked="" type="checkbox"/>	81.000	0.100	70	1.178	0.235
8	<input checked="" type="checkbox"/>	85.000	0.491	80	1.530	0.170
9	<input checked="" type="checkbox"/>	85.000	0.100	90	0.491	0.259

图6 不同模具下压速度对应的优化结果

Fig. 6 The optimal results under different pressing speed of die

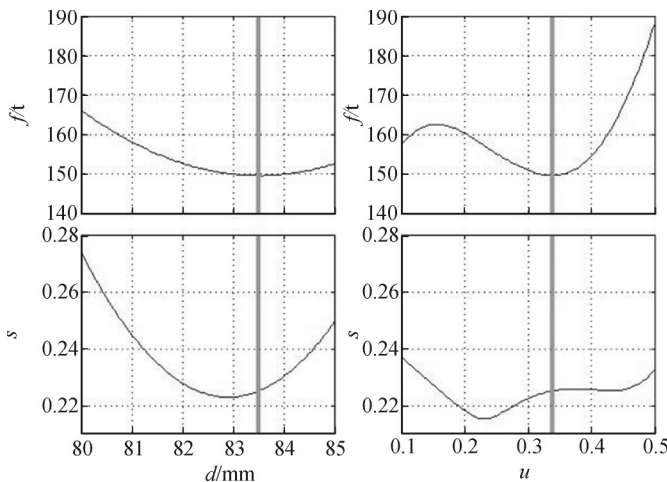


图7 模具的成型载荷及最大损伤值随工艺参数的变化

Fig. 7 The change of forming load and maximum damage with varying technological parameters

4 验证

根据本厂的液压机生产情况, 模具的下压速度为 35~40 mm/s, 因此, 由图 7 的优化分析结果可知, 当坯料外径尺寸选择为 83.5 mm, 摩擦系数取 0.34 时, 能够同时有效的降低触头座挤压件的成形载荷及表面的最大损伤值。将以上的工艺参数运用于 Deform 软件中进行有限元分析, 优化后的模拟结果见图 8。由图 8 的结果可知, 当选取以上工艺参数时材料的成形载荷和最大损伤值分别为 147 t 和 0.20, 与数学模型预测结果非常接近。因此最终确定了触头座的温挤压成型工艺参数, 实际生产中所使用的温挤压模具见图 9, 经实际生产验证, 当选取以上工艺参数时, 能够获得成形完整、表面损伤很小的挤压件见图 10; 而且采取以上参数时, 由于材料的成形载荷较低, 减小了液压机的能耗, 提高了模具的使用寿命; 此外, 由于文中采用空心坯料一次锻挤复合成形极大的提高了触头座的材料利用率和生产效率。

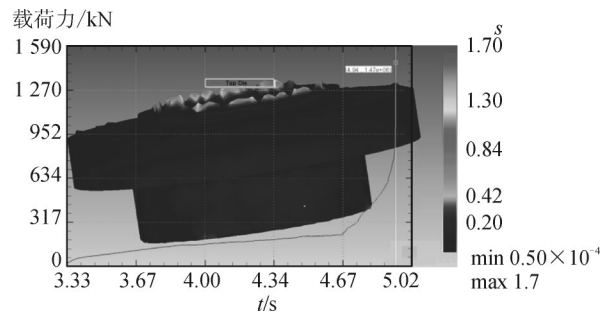


图8 优化后的模拟结果

Fig. 8 The results of simulation after optimization



图9 温挤压模具

Fig. 9 The die used for warm extrusion

5 结论

文中通过采用 Deform 软件进行有限元数值模拟研究了不同工艺参数下触头座的成形情况, 通过



图10 触头座挤压件

Fig. 10 The contactor socket made by warm extrusion

采用MATLAB软件,分析了工艺参数与挤压件成形载荷及最大损伤值之间的相互关系,最终得到以下结论。

1)针对触头座的形状及力学性能要求,提出了采用管形坯料一次镦挤复合成形的温挤压成形工艺。

2)基于Deform软件及MATLAB软件,建立了触头座挤压件成形载荷、最大损伤值与工艺参数之间的数学模型,并利用MATLAB软件获取了最佳的成形工艺参数组合。

3)通过数值模拟和实际生产证明了所选取的工艺参数能够有效的降低触头座的成形载荷及最大损伤值,而且提高了材料利用率和触头座的生产效率。

参考文献:

- [1] 郜建新,赵培峰,宋克兴.非回转体触头座挤压成形工艺与模具设计[J].模具工业,2013,39(7):60-63.
GAO Jianxin,ZHAO Peifeng,SONG Kexing. Extrusion process of non-rotator contact pedestal and its die[J]. Die and Mould Industry,2013,39(7):60-63.
- [2] 郜建新,苏娟华,周伯楚.高压开关触头座热挤压模设计[J].模具工业,2007,33(2):20-22.
GAO Jianxin,SU Juanhua,ZHOU Bochu. Development of hot extrusion die for ZF16-252 contact pedestal used in high voltage switch[J]. Die and Mould Industry,2007,33(2):20-22.
- [3] 华凯旋,余小鲁,王柯智,等.20MnNiMo高压容器左封头热模锻数值模拟[J].热加工工艺,2016,45(9):132-136.
Hua Kaixuan,YU Xiaolu,WANG Kezhi, et al. Numerical simulation of hot die forging for 20MnNiMo steel high pressure vessel left head[J]. Hot Working Technology,2016,45(9):132-136.
- [4] 张跃,葛启月,辛梓阳,等.基于Dynaform的纬纱板成形过程模拟及正交分析[J].热加工工艺,2015,44(23):175-178.
ZHANG Yue,GE Qiyue,XIN Ziyang, et al. Simulation and orthogonal analysis on forming process of vesa plate based on dynaform[J]. Hot Working Technology,2015,44(23):175-178.
- [5] 陈学文,王进,陈军,等.基于最小损伤值的齿轮毛坯锻造成形过程工艺参数优化设计[J].上海交通大学学报,2005,39(7):1070-1072.
CHEN Xuewen,WANG Jin,CHEN Jun, et al. The technological parameter optimization of gear billet hot forging process with damage minimization[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2005,39(7):1070-1072.
- [6] 刘静,张明,陈浩,等.基于响应面法的台阶式凸模冲裁工艺参数优化[J].塑性工程学报,2016,23(3):52-57.
LIU Jing,ZHANG Ming,CHEN Hao, et al. Parameters optimization of step-shaped-punch blanking based on response surface methodology[J]. Journal of Plasticity Engineering,2016,23(3):52-57.
- [7] 孙正力,李振红,由爽,等.圆柱齿轮闭式温锻模具结构数值模拟优化分析[J].热加工工艺,2016,45(3):117-120.
SUN Zhengli,LI Zhenhong,YOU Shuang, et al. Optimization analysis of numerical simulation of warm closed forging die structure for cylindrical gears[J]. Hot Working Technology,2016,45(3):117-120.
- [8] 张旸.高压开关静触头成形工艺分析与挤压模设计[J].模具工业,2010,36(10):63-65.
ZHANG Yang. Analysis of forming process and design of die for high-voltage static switching contact[J]. Die and Mould Industry,2010,36(10):63-65.
- [9] 邢军伟,孙长平,刘恒.动触头挤压成型模具设计[J].河南科技,2014(9):107-107.
XING Junwei,SUN Changping,LIU Heng. The design of extrusion forming mould for moving contact[J]. Journal of Henan Science and Technology,2014(9):107-107.
- [10] 任发才,赵国群,王广春.活塞温挤压成形工艺分析及其成形过程数值模拟[J].锻压装备与制造技术,2007,42(5):61-63.
REN Facai,ZHAO Guoqun,WANG Guangchun. Warm extrusion process analysis and numerical simulation of piston[J]. China Metal Forming Equipment and Manufacturing Technology,2007,42(5):61-63.
- [11] 李兵,张春.冷挤压工艺有限元模拟参数灵敏度分析[J].湖北汽车工业学院学报,2012,26(1):34-36.
LI Bing,ZHANG Chun. Parameters sensitivity analysis of cold extrusion based on FEM[J]. Journal of Hubei Automotive Industries Institute,2012,26(1):34-36.
- [12] 尹甜甜,杨永顺,虞跨海,等.影响反向冷挤压凹模径向压力的因素研究[J].河南科技大学学报,2012,33(6):6-10.
YIN Tiantian,YANG Yongshun,YU Kuahai, et al. The research in the effect factor on the radius stress of cold extru-

- sion mould[J]. Journal of Henan University of Science and Technology, 2012, 33(6): 6-10.
- [13] 赵 军, 马世博, 马 进, 等. 工矿及采矿用截齿温挤压精密成形工艺研究[J]. 精密成形工程, 2009, 1(3): 25-29.
ZHAO Jun, MA Shibo, MA Jin, et al. Research on precise warm extrusion of pick used in engineering and mining[J]. Journal of Netshape Forming, 2009, 1(3): 25-29.
- [14] 彭茂公, 亢若谷, 王云坤, 等. 高强高导弥散强化铜材料可锻性研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2003, 26(1): 23-28.
PENG Maogong, KANG Ruogu, WANG Yunkun, et al. Study of forgeability of dispersion-strengthened copper material with high strength and high conductivity[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2003, 26(1): 23-28.
- [15] 秦升学, 邢国良, 娄淑梅. 基于DEFORM-3D的空心铝型材挤压过程有限元分析[J]. 热加工工艺, 2013, 42(5): 81-82.
QIN Shengxue, XING Guoliang, LOU Shumei. Finite element analysis on extrusion process of hollow aluminum profile based on DEFORM - 3D[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(5): 81-82.
- [16] 张 博, 颜银标. 基于DEFORM-3D的铝合金支架挤压成形分析[J]. 热加工工艺, 2015, 44(7): 167-171.
ZHANG Bo, YAN Yinbiao. Analysis of extrusion forming of aluminum alloy bracket based on DEFORM - 3D[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(7): 167-171.
- [17] 王麟平, 王明哲, 张治民, 等. 基于DEFORM-3D的某车型转向支架优化分析[J]. 热加工工艺, 2013, 42(5): 111-112.
WANG Linping, WANG Mingzhe, ZHANG Zhimin, et al. Optimization analysis of a car steering bracket based on DEFORM - 3D[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(5): 111-112.
- [18] 夏玉峰, 杨显红, 郑晓凯, 等. 基于响应面法的钩尾框渐进热弯曲工艺多目标优化[J]. 中南大学学报, 2014, (9): 2977-2984.
XIA Yufeng, YANG Xianhong, ZHENG Xiaokai, et al. Multi-object optimization of incremental hot bending process of hook tail frame based on RSM[J]. Journal of Central South University, 2014, 45(9): 2977-2984.
- [19] 陈邦华, 夏玉峰, 杜婉婉, 等. 汽车盘毂冷挤压成形数值模拟与模具设计[J]. 热加工工艺, 2014, 43(15): 151-153.
CHEN Banghua, XIA Yufeng, DU Wanwan, et al. Numerical simulation and die design of cold extrusion forming of automobile disc hub[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(15): 151-153.
- [20] 杨立权, 吕青青, 赵 磊. 基于DEFORM-3D的衬套冷挤压成形优化分析[J]. 热加工工艺, 2011, 40(23): 123-125.
YANG Liqun, LYU Qingqing, ZHAO Lei. Optimization analysis of bush cold extrusion forming based on DEFORM-3D[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(23): 123-125.

纪 帅(1988—), 男, 硕士, 主要研究方向为塑性成形工艺及模具设计。

(上接第 197 页)

- Overvoltage protection and insulation coordination for AC electrical installation; DL/T 620—1997[S]. Beijing: China Electric Power Press, 1997.
- [26] 龙梦妮, 曾子轩. 新型喷射气流防雷灭弧间隙的机理研究[J]. 电气开关, 2013, 51(2): 32-36.
LONG Mengni, ZENG Zixuan. Research on new-type jet airflow lightning protection arc extinction mechanism[J]. Electric Switcher, 2013, 51(2): 32-36.
- 张华骅(1990—), 男, 硕士研究生, 从事高电压与绝缘技术工作。
- 王巨丰(1956—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代防雷技术等。
- 王学彬(1988—), 男, 硕士研究生, 从事高电压与绝缘技术工作。
- 丰 德(1991—), 男, 硕士研究生, 从事高电压与绝缘技术工作。
- 冯 凯(1989—), 男, 硕士研究生, 从事高电压与绝缘技术工作。