

复杂连接块成形工艺有限元分析及模具设计

薛克敏, 宋健, 王成国, 刘雨生

(合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009)

摘要: **目的** 采用理论分析、计算机有限元分析和物理实验的方法对某复杂连接块温挤压成形技术进行研究,根据有限元分析结果设计出模具并成形该零件。**方法** 通过调节不同的参数,对该零件的成形进行数值模拟。**结果** 有限元分析结果表明,该零件在成形过程中等效应力应变分布不均匀,两端凸台位置较难充填。**结论** 根据以上分析结果,在设计模具和实验的时候,提高成形温度及成形速率,优化润滑条件,降低了成形载荷,并在实验室现有的 1000 t 液压机上进行了物理实验。实验结果与数值模拟结果相吻合,为该零件的批量化生产提供了指导。

关键词: 温挤压; deform-3D; 模具; 数值模拟

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.01.003

中图分类号: TG375⁺41

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2014)01-0015-06

Finite Element Analysis and Mould Design of Complex Connecting Block Forming

XUE Ke-min, SONG Jian, WANG Cheng-guo, LIU Yu-sheng

(School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

ABSTRACT: **Objective** To research the warm extrusion of a complex connection piece, using theoretical analysis, finite element analysis and physical experiments, and to design and make a mold according to the results of finite element analysis. **Methods** By adjusting the parameters, the finite element analysis of components forming was carried out. **Results** The results of finite element analysis showed that medium stress and strain distribution of the parts during forming were uneven, and it was difficult to fill the bosses. **Conclusion** According to the results, in the process of mold design and testing, molding temperature and rate are improved, lubrication condition is optimized, the forming load is reduced, and physical experiments were carried out on the 1,000 t of hydraulic machines in the laboratory. The experimental results are in reasonable agreement with the numerical simulation results, which provides guidance for the mass production of the parts.

KEY WORDS: warm extrusion; deform-3D; mould; numerical simulation

该复杂连接块是某产品关键部件连接零件,每个关键部件至少需要 170 个左右此类零件。随着现代制造工业的迅速发展,对该类零件的机械性能提出了更高的要求,传统的机械切削加工工艺切断了金属流线,降低了零件的强度,已无法满足其使用要求。近年来,温挤压技术作为一种高效、低消耗的生产技术,

在此类产品生产中的应用逐渐增加。青岛理工大学田福祥采用浮动的上凹模与下凹模对合结构,温挤压成形了 3Cr13 马氏体不锈钢液压机阀瓣;燕山大学张立玲等人采用热机耦合弹塑性有限元法,温挤压成形了 20CrMnTi 轿车等速万向节滑套;广东阳春轴承厂黄觉亮利用温挤压与冷精冲复合工艺,成形了

收稿日期: 2013-12-02

作者简介: 薛克敏(1963—),男,安徽蚌埠人,博士,教授、博士生导师,主要研究方向为精密塑性成形及控制。

W208PPB5 外球面方孔轴承。于沪平等采用塑性成形模拟软件 DEFORM, 结合刚粘塑性有限元罚函数法, 对平面分流模的挤压变形过程进行了三维模拟, 得出了挤压过程中铝合金的应力、应变、温度以及流动速度等的分布特点和变化规律^[1-5]。

1 材料可锻性分析及锻件图

在本次工艺制定过程中, 选用温挤压成形工艺来成形该零件。温挤压不仅具有冷挤压的高精密成形尺寸, 成形过后基本不需要机械加工, 并且可以减少工步, 减小成形吨位, 同时避免热挤压时造成的坯料氧化、脱碳表面粗糙等情况, 比较适合该零件成形^[6]。

根据温挤压工艺, 设计相应锻件图, 在不宜充填的端面加 2 mm 余量留待挤压后精整。锻件图见图 1, 增加余量的同时在尖角处设置 2 mm 圆角, 以利于金属流动和增加模具寿命^[7]。

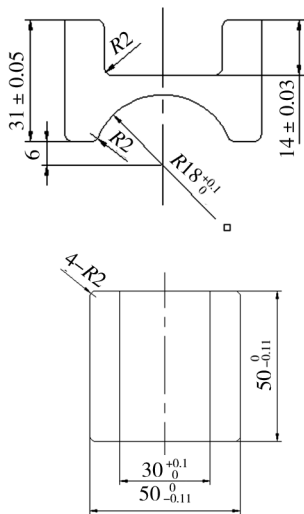


图 1 连接块锻件

Fig. 1 The forging drawing of connecting block

该零件的材料标号为 5A06-H112, 5A06 铝板具有较高的强度和腐蚀稳定性, 在退火和挤压状态下塑性尚好。其力学性能: 屈服强度为 152 MPa, 延伸率为 35%, 硬度为 65HBS; 材料加工特征: 退火温度为 415 °C, 热加工温度为 315 ~ 480 °C^[8]。从材料性能来看属于中硬度, 中等塑性材料, 热加工温度范围较大(在该零件的挤压过程中, 温度降低较快, 热加工范围较大, 有利于成形)。

2 Deform-3D 模拟

为了进一步探讨温挤压成形在该连接块成形中的可行性和实用性, 现对复杂连接块零件进行有限元模拟分析, 制定出可行性方案, 并进行工艺分析, 从而验证工艺的可行性。从锻件图上可以看到, 零件共有上下 4 个尖角, 下尖角成形的困难在于, 尖角与圆弧面连接, 连接处较难以填充; 上尖角由于较大的高径比, 且成形方式为反挤压, 金属较难以流动填充。所以在设计模具的时候, 需要在下尖角与圆弧过渡处设计较大的圆角过渡, 在上尖角处模具增加一个斜度, 以便于金属填充。同时坯料表面要做好润滑工作。

2.1 连接块有限元模型建立

根据相应的工艺及分析设计出如图 2 所示的模拟有限元模型, 有限元模型由上模、坯料及下模 3 个部件构成, 上模及下模视为刚性体。为研究各项参数对成形的影响, 分别设置 3 组模拟: 第 1 组, 上模下行速度设置为 0.5 mm/s, 坯料的初始温度为 350 °C; 第 2 组, 上模下行速度设置为 2 mm/s, 坯料的初始温度为 350 °C; 第 3 组, 上模下行速度设置为 2 mm/s, 坯料的初始温度为 400 °C。冲头温度为 20 °C, 凹模温度为 100 °C^[3]。材料选择 5056 (LF6 5A06)。摩擦条件设为温成形摩擦, 摩擦因数为 0.25^[9], 传热系数为 2。

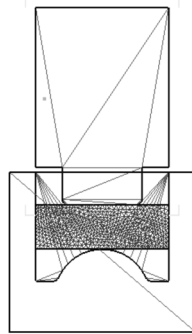


图 2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model of mold

2.2 连接块数值模拟结果分析

2.2.1 等效应力场分析

图 3 为 50% 变形量及 100% 变形量下的等效应

力分布云图(第3组模拟)。如图3a所示,坯料在成形过程中等效应力分布不均匀,应力主要集中在下尖角与圆弧面连接处,这与工艺分析基本一致。坯料中心上端面及弧面之间的金属受到模具的挤压作用,产生应力集中现象,因此该区域的等效应力值较其他区域要大,坯料的凸台上端面没有接触到上模,因此其等效应力值较小。图3b为坯料最终成形结果,坯料在三向压应力的作用下,等效应力分布较均匀^[10]。

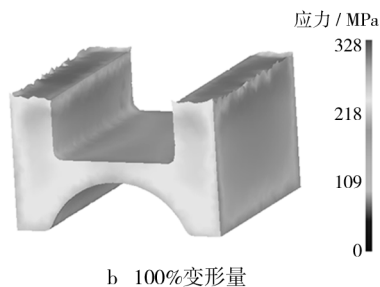
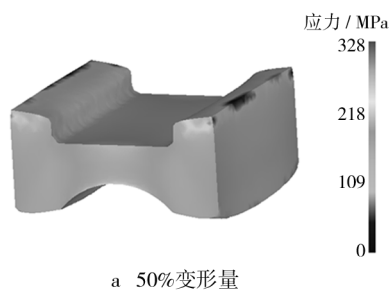


图3 等效应力分布

Fig.3 Equivalent stress distribution

2.2.2 等效应变场分析

第3组模拟的等效应变分布如图4所示。从图4a中可以看出,等效应变主要集中在弧面附近及转角区域,因此该区域的金属变形量较大。由于在成形过程中,凸台的上端还没有接触到上模,凸台在反挤压过程中保持向上刚性平移,因此该区域的等效应变值基本为0。坯料转角处的等效应变值较大,这是由于该区域的金属需向上流动,造成了较大的剪切变形,因此该区域的金属变形量也较大。图4b为最终成形后坯料的等效应变分布云图,可以看到应变主要集中在下圆弧以及零件中间部位,圆弧面处是由平面成形为圆弧,因此应变较大;零件中间处主要是由于上尖角为反挤压成形所得,金属反挤填充模具上尖角处,零件整体金属充填完整^[11]。

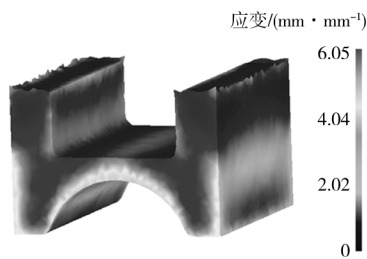
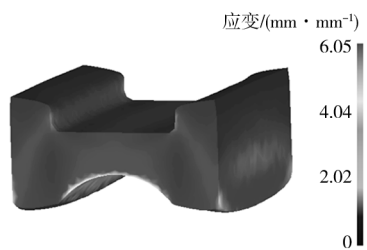


图4 等效应变分布

Fig.4 Equivalent strain distribution

2.2.3 缺陷分析

第3组模拟的金属损伤分布如图5所示。由图5可以看到,零件成形状态较好,基本没有金属损伤以及缺陷,最大的损伤只有0.8,基本不影响零件的性能。通过金属损伤分析可以看到,温挤压工艺并未损伤金属流线,可以很好地保证零件的强度,适应该零件的应用条件^[12]。

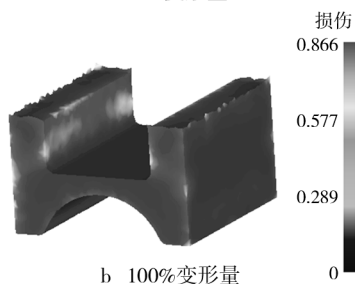
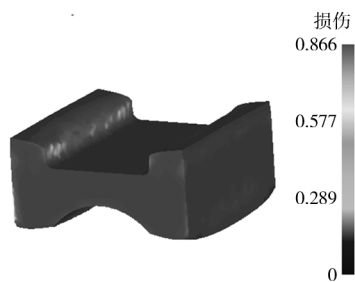


图5 金属损伤分布

Fig.5 Metal damage distribution

2.2.4 金属流动速率分析

如图6a所示,刚开始反挤压上尖角时,金属流动速率基本均匀,由于此时冲头载荷并未急剧上升,所以金属受到均匀的三向应力;图6b中上尖角及下尖角与圆弧处的金属流动速率较大,原因是此时冲头载荷到达最大值,金属开始填充最难成型的位置,因此局部的金属流动速率达到最大值,零件中间部位的金属开始向这些难以填充的位置流动。金属流动速率增大会增加变形抗力,可以通过增大圆角、改善摩擦条件、提高温度来降低变形抗力^[13]。

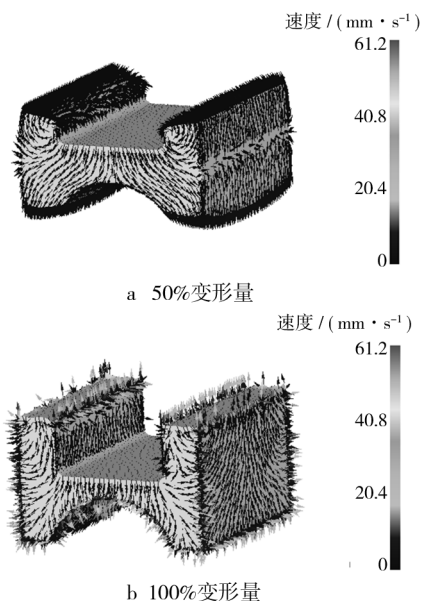


图6 成形时金属流向

Fig. 6 Metal flow in forming

2.2.5 不同参数对成形结果的影响

温挤压是将毛坯加热到金属再结晶温度以下,在适当的温度进行挤压。铝合金温挤压温度一般在250~400℃范围内。在此温度下进行挤压,由于加

热,毛坯的变形抗力明显减小,成形容易,而且可以延长模具的寿命;同时材料成形后得到强化。从图7上可以看出4个尖角成形较好,上端2个尖角稍有毛刺,在设计锻件图时留有余量,可以用机加方式去除^[14]。同时由于反挤的存在,冲头载荷在成形上端2个尖角时呈直线上升趋势。

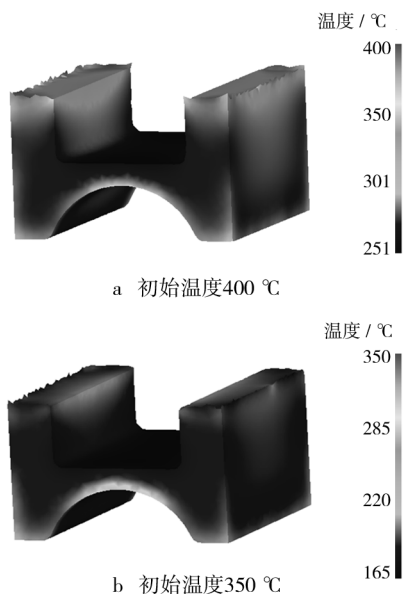


图7 锻造成形结束锻件的温度场

Fig. 7 Temperature of the forging after forming

图8为3种不同参数下的成形载荷。对比图8a,b,发现提高成形温度可以降低成形载荷;对比图8b,c,可以发现提高成形速率可以降低成形载荷。虽然等效应力会随等效应变速率的增大而增大,但是成形载荷也会相对增大。由于成形速率的提高缩短了成形过程的时间,因此成形温度不会下降得太快,从而造成变形抗力的急速上升,可见提高成形速率在一定成形条件下可以降低成形载荷。

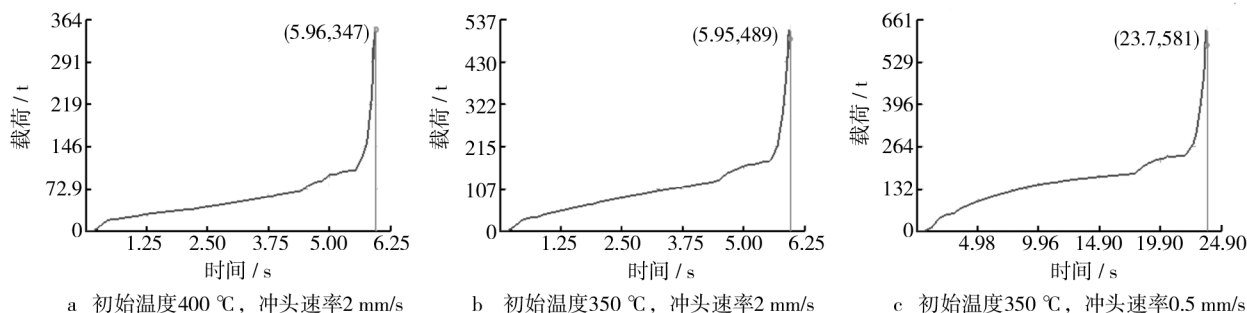


图8 不同温度下的成形吨位

Fig. 8 Forming tonnage at different temperatures

同时为了降低合模力,考虑对凹模加热,形成简单的等温模锻,使坯料具有较低的变形抗力,在实际生产中可通过对凹模加保温圈的方法实现。

3 挤压模具设计

设计凹模时,凹模外径由挤压件尺寸和材料性能,变形程度和挤压力大小,以及其负荷大小确定。凹模外径一般取其内径的4~6倍,甚至达到8倍。凹模厚度尺寸的确定主要考虑挤压中实际内压作用区域及两侧非内压作用区域的情况,凸模导向和卸料要求以及模具的结构和闭合高度。结构仍采用双层凹模结构。

凸模设计时要注意实际生产时凸模所受应力的方向和大小,以及当使用细长凸模时,可能出现的失稳问题。造成失稳的因素有:模具或挤压设备本身的对中精度;挤压操作上的问题,如凸模松动、初始对中不好、使用坯料上下断面不平行等;凸模的长径比也影响凸模的稳定性,用模具钢做凸模时,长径比不应大于3。上部圆柱形部分通过固定圈与垫板连接,凸模整体长径比在2左右,符合常用要求。凸模与预应力圈过盈配合处斜角取 3° ^[15]。

最终模具设计结果如图9所示。

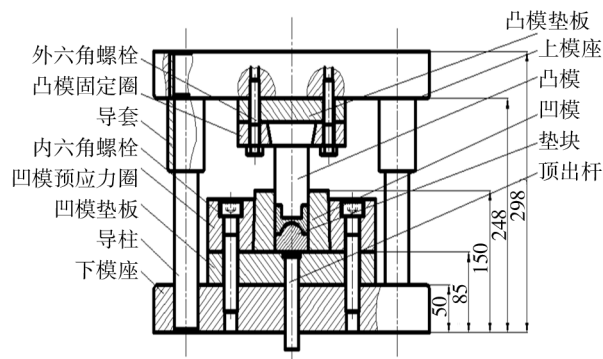


图9 挤压模具工装图

Fig.9 Extrusion die assembly drawing

4 实验加工

4.1 实验方案与设备

实验采用铝合金5A06块体材料,坯料尺寸为49 mm×49 mm×19 mm(考虑到热烧损及毛刺坯料尺

寸,稍微放大了一些),将坯料加热到120℃并在表面涂石墨润滑。

4.2 实验过程以及与模拟结果的对比

实验中首先将块坯料加热到400℃,放入到图10所示的模具中进行挤压成形,坯料在模具中的成形过程如图11所示。可以看到金属首先成形了较为容易成形的下方的正挤压的2个尖角,然后上方的2个反挤压尖角通过坯料中心的金属流动补充成形。

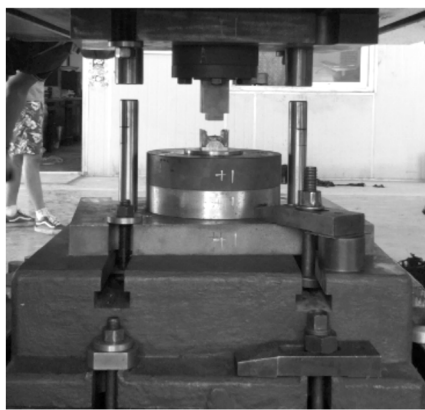


图10 实验模具

Fig.10 The experimental die

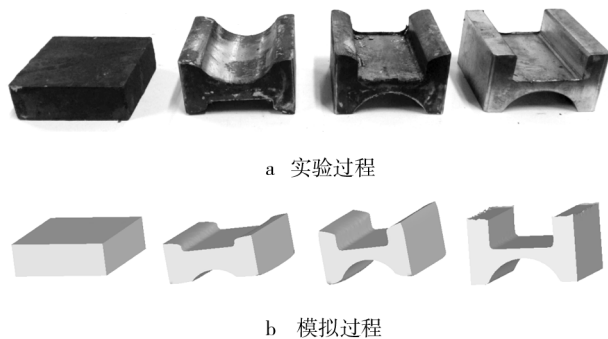


图11 零件成形过程与模拟过程对比

Fig.11 The comparison of the forming process and simulation

4.3 实验结果及讨论

如图11所示,上部凸台充填饱满,圆弧形端面金属流线完整,大幅提高了零件的强度,材料利用率由原来机加工的50%提高到90%以上,仅在台阶处前后端面有少量飞刺,可以通过机械加工方式进行修整。

5 结论

针对某产品用复杂连接块零件,传统机加工工艺存在的材料利用率低和生产效率低的缺陷,提出采用温挤压成形工艺生产该类零件。通过对零件结构特点的分析,采用有限元模拟分析方法研究了连接块成形过程中的等效应力场、应变场、温度场和成形载荷的分布规律,研究了不同参数对成形载荷的影响;设计了连接块温挤压成形模具,并结合实验对实际生产起到了指导作用,对企业生产技术的提升起到了积极的推动作用。

参考文献:

- [1] 李东浩,庞丹,孙锋,等. 浅谈深筒锥形件温挤压成形工艺技术[J]. 精密成形工程,2012,4(5):93—96.
LI Dong-hao, PANG Dan, SUN Feng, et al. Discussion on Warm Extrusion of Deep Cylinder Conical Parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 4(5): 93—96.
- [2] DOEGE E, BOHNSACK R. Closed Die Technologies for Hot Forging[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000(98):165—170.
- [3] 杨光,张宝红,李国俊,等. 某铝合金筒形壳体的温挤压成形工艺[J]. 热加工工艺,2011,40(3):105—106.
YANG Guang, ZHANG Bao-hong, LI Guo-jun, et al. Warm Extrusion Process for Aluminum Alloy Cylinder Sharped Shell[J]. Casting Forging Welding, 2011, 40(3):105—106.
- [4] 赵军,马世博,马进. 径向分模轴向挤压精密成形柔性模具系统[J]. 塑性工程学报,2011,18(1):63—66.
ZHAO Jun, MA Shi-bo, MA Jin. Flexible Die System of Precision Forming for Radial Die Parting Axial Extrusion[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2011, 18(1): 63—66.
- [5] 刘展鸿,徐宏佳. 铝型材模拟等温挤压工艺的有益探索[J]. 机电工程技术,2008,37(5):16—18.
LIU Zhan-hong, XU Hong-jia. Aluminum Simulating the Beneficial Exploration of Isothermal Extrusion Process[J]. Mechanical and Electrical Engineering Technology, 2008, 37(5): 16—18.
- [6] 张水忠. 挤压工艺及模具设计[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- [7] ZHANG Shui-zhong. The Extrusion Process and Die Design[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009.
- [7] 武恭. 铝及铝合金材料手册[K]. 北京:科学出版社,1994:193—195.
- [8] WU Gong. Handbook of Aluminum and Aluminum Alloy Materials[K]. Beijing: Science Press, 1994:193—195.
- [8] 魏鹏,关玲,刘龙龙,等. 杯形件温挤压成形工艺研究[J]. 精密成形工程,2012,4(5):11—14.
- [8] WEI Peng, GUAN Ling, LIU Long-long, et al. Study on Warm Extrusion of Cup-sharp Part[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 4(5): 11—14.
- [10] 洪慎章. 温挤压工艺的应用[J]. 模具技术,2004,4(3):43—46.
- [10] HONG Shen-zhang. Application of the Warm Extrusion Technology[J]. Die and Mould Technolgy, 2004, 4(3): 43—46.
- [11] 栗育琴,张安民. 基于 deform 的温挤压模具塑性变形失效分析[J]. 锻压技术,2011,36(6):141—144.
- [11] SU Yu-qin, ZHANG An-min. Plastic Deformation Failure Analysis of Warm Extrusion Die Based on Deform[J]. Forming and Stamping Technolgy, 2011, 36(6): 141—144.
- [12] 赵军,胡庆华,朱世凤. 机匣体毛坯等温挤压工艺的研究[J]. 精密成形工程,2011,3(2):73—76.
- [12] ZHAO Jun, HU Qing-hua, ZHU Shi-feng. Study of Isothermal Extrusion Process for Receiver Blank[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 3(2): 73—76.
- [13] 王长林,陈俊之,赵志翔,等. 深锥形壳体温挤压成形工艺与模具[J]. 精密成形工程,2010,2(5):57—60.
- [13] WANG Chang-lin, CHEN Jun-zhi, ZHAO Zhi-xiang, et al. Warm Extrusion Technology and Die of Deep Tapered Shell[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 2(5): 57—60.
- [14] 罗国军,袁子良. 6061 铝合金温挤压工艺[J]. 热加工工艺,2012,41(1):178—180.
- [14] LUO Guo-jun, YUAN Zi-liang. Warm Extrusion Technology for 6061 Aluminium-alloy[J]. Casting Forging Welding, 2012, 41(1): 178—180.
- [15] 肖华,李保成,张星. 铝合金温挤压用润滑剂实验研究[J]. 热加工工艺,2011,40(5):110—114.
- [15] XIAO Hua, LI Bao-cheng, ZHANG Xing. Experiment Study of Lubricant for Warm Extrusion of Aluminum Alloy[J]. Casting Forging Welding, 2011, 40(5): 110—114.