

# 发动机泵体精密热模锻成形工艺研究

郭巨寿, 于霞, 李爱平, 孙晓飞, 张宝荣, 任晓峰

(北方通用动力集团有限公司, 山西 大同 037036)

**摘要:** 目的 为了提高发动机泵体综合机械性能和降低制造成本, 采用精密热模锻技术来实现泵体的精确成形。**方法** 通过确定锻件分模面位置, 建立了泵体精密热模锻几何实体模型; 在此基础上, 建立了泵体热模锻过程三维有限元模型和模拟参数, 实现了精密热模锻过程有限元模拟模型。**结果** 通过数值模拟, 获得了成形过程中坯料的速度场、等效应变场和温度场及载荷-行程曲线, 揭示了泵体热模锻过程中金属充填模具型腔的情况及其变形机理, 获得了温度场应变分布以及载荷、打击能量随行程的变化规律, 优化了预成形时拍方坯料长度等参数, 为确定成形工艺参数提供了科学依据。**结论** 经试验验证, 新工艺成形的锻件非加工外形面尺寸精度达到了零件要求, 数值模拟结果与实验结果一致。

**关键词:** 泵体; 成形机理; 数值模拟; 试验验证

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.06.018

中图分类号: TG316

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2014)06-0111-05

## Precision Hot-die Forging Process of Engine Pump Body

GUO Ju-shou, YU Xia, LI Ai-ping, SUN Xiao-fei, ZHANG Bao-rong, REN Xiao-feng

(North General Power Group Co., Ltd, Datong 037036, China)

**ABSTRACT: Objective** In order to improve the mechanical properties and to decrease the production cost of engine pump body, precision hot forging process was employed to manufacture the part. **Methods** Based on the determination of parting face position of the part, the solid geometric model was established for the precision hot-die forging of pump body. A 3D finite-element model and the simulation parameters for the forging process were built, and the finite element simulation model for precision hot-die forging was achieved. **Results** The distributions of velocity field, equivalent Mises plastic strain field and temperature field, as well as the curves of load and blow energy with displacement were obtained through numerical simulation. The results revealed the metal filling of the mold cavity during the hot-die forging process of the pump body and the deformation mechanism. The strain distribution of temperature field and the variation laws of the load and the blow energy with displacement were obtained. The process parameters during the preforming process such as the length of the square billets were optimized, which provided scientific reference for the determination of forming process parameters. **Conclusion** The accuracy of the non-working surface of the forgings formed with the new process could meet the requirements as verified by experiments, and the results of numerical simulation were consistent with those of experiments.

**KEY WORDS:** pump body; forming mechanism, numerical simulation; experimental verification

泵体作为发动机上一个重要零件,目前多采用棒材整体切削生产,生产效率与材料利用率低,产品成本高,且坯料经切削加工后,金属纤维的连续性遭到破坏。随着对发动机要求越来越高,对泵体性能和加工效率均提出了更高的要求,迫切需要寻找新工艺改进坯料质量。精密模锻<sup>[1]</sup>是一种少无切削的工艺,具有提高材料利用率、部分取消或减少切削加工、合理的流线分布等优点,适合于较高承载要求的复杂零件成形<sup>[2-3]</sup>,如传动轴<sup>[4]</sup>、连杆<sup>[5]</sup>、齿轮<sup>[6-7]</sup>、其他异性锻件<sup>[8]</sup>等,因此精密模锻工艺是泵体锻件的首选成形方式。

泵体形状复杂,在热模锻过程中极易产生充填不满、折叠等缺陷,这些缺陷的产生与塑性变形时流动规律密切相关<sup>[9]</sup>。文中采用数值模拟手段分析预制坯在塑性变形时的流动规律,以便确定适当的成形工步和合理的坯料尺寸,实现锻造工艺的优化,使锻件顺利成形。

## 1 工艺分析与设计

泵体锻件三维造型初步设计如图 1 所示,其中双耳及方形区域形状复杂,要求不加工,而该区域在水平方向拥有最大截面积,因此分模面设置在这个最大水平截面的上方;为了便于脱模,在分模面上方坯料给了  $3^\circ \sim 5^\circ$  的拔模斜度,最终的锻件设计如图 2 所示。

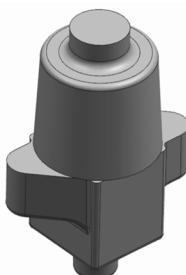


图 1 泵体锻件三维造型

Fig. 1 3D model of pump forging

图 2b 部分尺寸精度为 0.4 mm 和 0.5 mm,泵体锻件为精密级锻件,需采用摩擦机或机械压机成形,根据车间设备情况,选用摩擦压力机。锻件总变形面积在垂直方向上的投影约为  $15\ 015\text{ mm}^2$ ,依据经验公式<sup>[10]</sup>,摩擦压力机吨位需求为 924 t,故选用 1000 t 摩擦压力机。

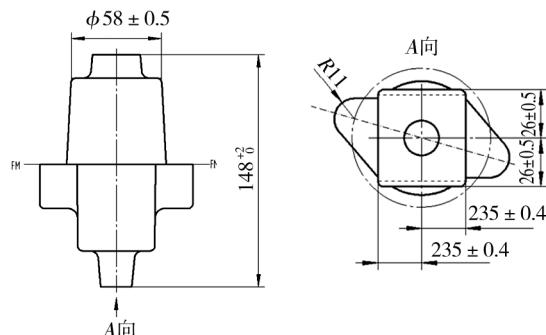


图 2 泵体锻件

Fig. 2 Drawing of pump forging

依据锻件几何特点,初步设计的终成形模具主体结构如图 3 所示,模具采用了“整体导向”方法,确保上下模错移小于 0.5 mm,并通过上下模套将成形模固定在压机上。

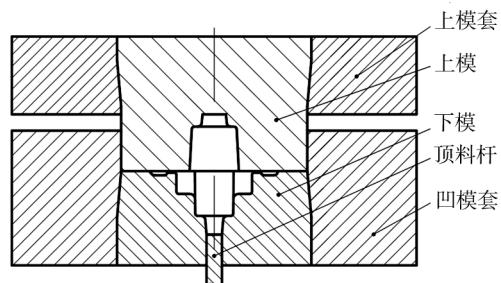


图 3 模具主体结构

Fig. 3 Principal structure of dies

下面根据模腔尺寸确定坯料尺寸。从图 2 中可以看出,按下模模腔尺寸,坯料外径最大为  $\phi 47\text{ mm}$ ,那么高度为  $240\text{ mm}$ ,高径比超过了 5.1,成形过程易失稳,所以采用直径为  $\phi 47\text{ mm}$  的坯料不合理。若按上模尺寸,坯料外径最大可为  $\phi 58\text{ mm}$ ,考虑到晶粒异常长大等因素,需确保上模中坯料镦粗变形量达到 15% 以上<sup>[11]</sup>,依此数值,确定坯料直径为  $\phi 54\text{ mm}$ ,等体积换算后,坯料长度为  $179.5\text{ mm}$ 。如果将坯料拍方(尺寸约为  $(45 \sim 47)\text{ mm} \times (50 \sim 52)\text{ mm}$ )后放置于凹模内,镦粗变形的坯料高度约为  $180\text{ mm}$ ,高径比小于 3.3,考虑到坯料外径与上模模腔尺寸(图 2 中的  $\phi 58\text{ mm}$ )接近,可避免镦粗失稳。按照上述分析,坯料先要拍方后放置于凹模内进行镦挤成形,因此泵体锻件制备流程为:下料→加热→预成形(拍方)→终锻→切边→其他后续处理。其中,由空气锤完成预成形工序,由摩擦压力机完成终

锻工序。

## 2 有限元模拟分析

对塑性成形过程进行数值分析是锻造工艺设计的基础<sup>[12]</sup>,根据成形过程的塑性流动过程特点<sup>[13]</sup>和相应的速度场、温度场<sup>[14—15]</sup>等,初步优化和选择合理的模具及锻件预制坯几何形状。

### 2.1 有限元模拟模型

根据工艺流程,泵体成形有限元模型由2个部分组成,一是预成形,二是终成形。预成形主要是将坯料拍方,过程较为简单,因此文中主要研究终成形过程的场参数分布。泵体成形有限元模拟主要参数设置:坯料材料为40CrMnMo,开锻温度为1150℃,预成形和终成形模具温度为250℃,环境温度为20℃;坯料与环境之间热交换系数为2W/(m<sup>2</sup>·K),成形时坯料与模具之间传热系数为8kW/(m<sup>2</sup>·K);摩擦压力机打击速度为0.8m/s。

坯料需要拍方的长度初步定为100mm,拍方后的坯料形状通过预成形模拟获得。终成形有限元模拟模型采用的模具、坯料几何形状如图4所示。

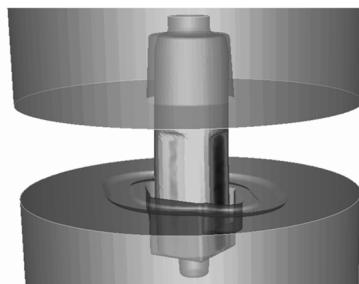


图4 终成形过程有限元模型

Fig. 4 FEM model of finial forging

### 2.2 模拟结果分析

#### 2.2.1 坯料充型

图5是下行行程分别为10,40,80,75mm时坯料流动速度矢量图。变形开始时,坯料与模具有少量接触,坯料主要以自由镦粗变形为主,主要充填上模型腔,如图5a所示;随着上模继续下压,当行程为40mm时,坯料自由变形区域仍以镦粗变形方式为主,同时坯料与上模接触面高度占据上模型腔高度的50%左右,如图5b所示;当行程达到65mm时,

坯料已经充填上模型腔(凸台除外),此时坯料充型方式由自由镦粗变形转为镦挤充填下模型腔,同时,拍方形成的压痕进入镦挤变形区域,如图5c所示的红色部分;当行程达到75mm时,拍方压痕形成的折叠完全进入飞边槽内,坯料继续充填下模型腔,如图5d所示,此时坯料水平方向的流动速度达到了1500mm/s。当上下模接近打靠时(完全打靠时行程为83mm),飞边槽内坯料水平方向流动速度非常高,促使坯料在型腔内快速充型,如图5e所示。并且从整个模拟过程来看,需要拍方的坯料长度应该限制在90~100mm,这样才能确保拍方压痕形成的折叠流入飞边槽内,该长度适合于生产现场空气锤制坯。

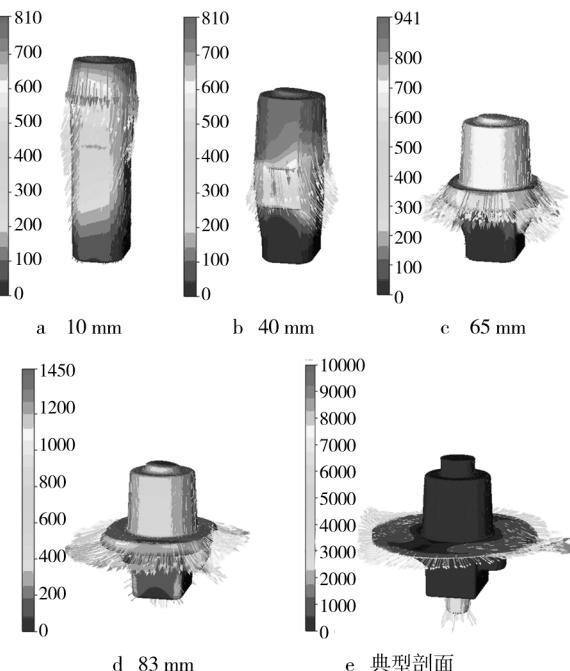


图5 典型行程下坯料的流动速度矢量图(mm/s)

Fig. 5 Flowing velocity vector diagram of typical strokes

#### 2.2.2 等效塑性应变

图6是不同压下量下坯料的等效应变分布云图。在变形初期,等效应变最大值集中在坯料表面区域;随着压下量的增加,坯料由自由镦粗变形转为镦挤充型,流入飞边的坯料最大等效塑性应变达到了5.0,如图6b,c,d所示;对锻件沿着图1中的2个R11圆心联线的垂直剖面上的等效应变分布如图6e所示;从图6d,e中可以看出,锻件本体最小等效塑性应变为0.24,恰好避免了晶粒异常长大的问题,表明设计的坯料尺寸合理。

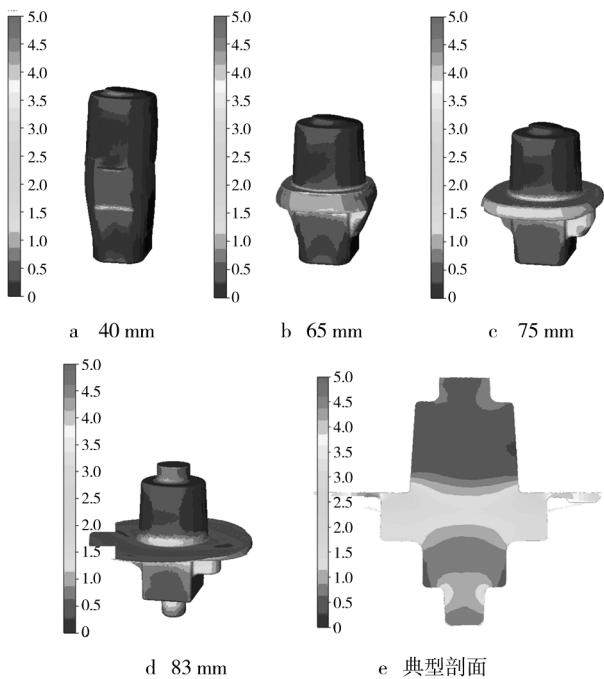


图 6 典型行程下坯料的等效塑性应变

Fig. 6 Equivalent plastic strain diagram of typical strokes

### 2.2.3 温度场

图 7 是不同压下量下坯料温度场分布图。变形开始时,坯料上下表面最先与模具接触,随着接触压应力增加,坯料在接触区域表面温度急速下降,如图

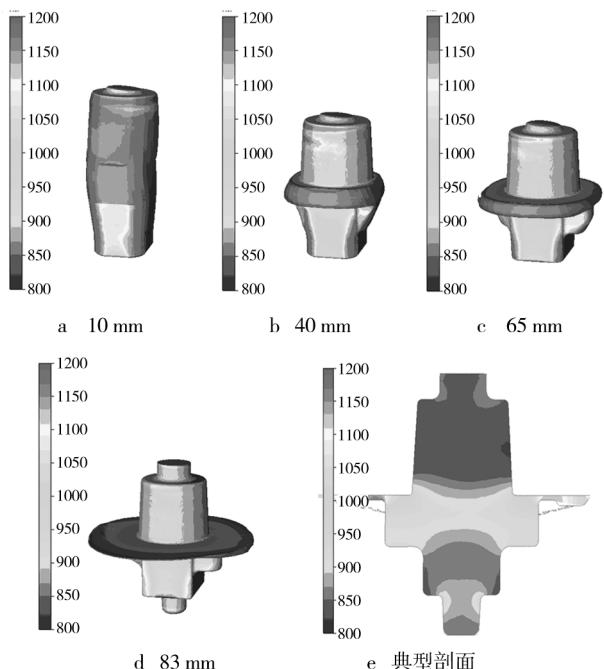


图 7 不同行程下坯料的温度分布

Fig. 7 Temperature distribution of typical strokes

7a,b,c,d 所示;随着变形量的增加,在坯料未接触表面温度迅速上升,最大温度达到了 1200 °C,如图 7d 所示;同时,随着压下量的增加,温度分布不均匀程度增加(如图 7e 所示(剖面位置同图 6e)),由于靠近毛边锻件等效应变增加,变形热效应增加,导致坯料的最高温度集中在镦挤变形区附近,因此锻件上下端温度比镦挤变形区附近低 250 °C。

### 2.2.4 成形力及打击能量分析

图 8 和 9 分别给出了成形力、打击能量随上模行程的变化曲线。从图 8 和 9 可以看出,变形开始时,模具承受的载荷及耗费打击能量随模具压下量的增加而缓慢增加。因为变形初期,坯料处于自由镦粗阶段,坯料和模具的接触面积较小,所以变形力及所需的打击能量较小;当自由镦粗阶段转为镦挤充型阶段(即压下量达到 65 mm 时),导致坯料和模具间接接触面积增大,并且坯料表面温度下降较大,如图 7c 所示,导致金属流动困难,模具承受的载荷迅速增加;当压下量达到 75 mm 时,坯料大量流入飞边槽,由于受到飞边槽的阻力作用,导致载荷和打击能量急剧增加;有限元模拟获得的最大载荷为 1200 t,耗费的打击能约为 55 kJ。从成形力及打击能量来看,选用 1000 t 螺旋压力机满足泵体成形需求。

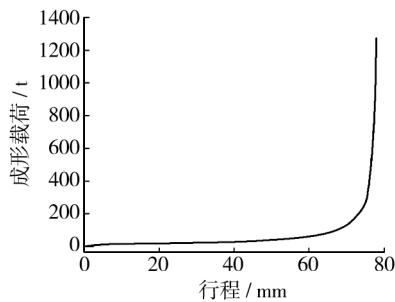


图 8 成形力-行程曲线

Fig. 8 Forming force-stroke curve

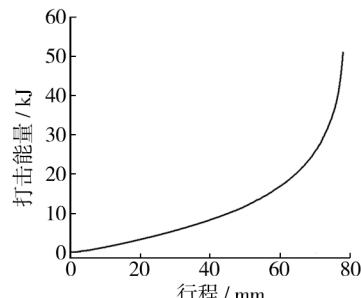


图 9 打击能-行程曲线

Fig. 9 Blow energy-stroke curve

### 3 工艺试验

在工艺设计和模拟分析的基础上,开展了泵体精密模锻工艺试验,试验在1000 t螺旋压力机上进行,模具结构及工艺参数与文中一致。坯料采用工频感应加热,考虑到烧损率,模拟获得的坯料体积需增加1%。图10为试验获得的泵体锻件,锻件没有塌角、折叠等缺陷,非加工外表面的尺寸精度达到了图纸要求,试验结果与数值模拟结果一致。

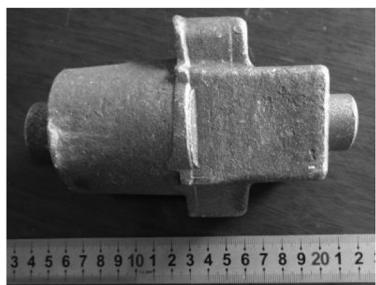


图10 泵体成品锻件

Fig. 10 Forged part of pump body

### 4 结论

1) 应用有限元技术分析坯料在变形过程中的速度矢量场,得出了坯料在自由镦粗、镦挤充型时的流动规律和变形机理。

2) 分析了所设计坯料尺寸在终成形等效塑性应变分布,满足了预定要求,根据成形载荷曲线,优选了成形设备。

3) 经试验验证,精密热模锻工艺获得的锻件非加工外形面尺寸精度达到了零件要求,数值模拟结果与实验结果一致。

### 参考文献:

- [1] 肖景容. 精密模锻 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.  
XIAO Jing-rong. Precision Die-forging [M]. Beijing: China Machine Press, 1985.
- [2] BEHRENS B A, DOEGER E, REINSCH S, et al. Precision Forging Processes for High-duty Automotive Components [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 185:139-146.
- [3] GRONOSTAJSKI Z, HAWRYLUK M. The Main Aspects of Precision Forging [J]. Archives of Civil and Mechanical

Engineering, 2008, 8(2):39—55.

- [4] 冀东生, 夏巨谌, 朱怀沈, 等. 汽车传动轴叉形件精密模锻工艺研究 [J]. 锻压技术, 2010, 35(6):14—18.  
JI Dong-sheng, XIA Ju-chen, ZHU Huai-shen, et al. Investigation of Precision Die Forging Process for Fork Parts Used in Automotive Propeller shaft [J]. Forging & Stamping Technology, 2010, 35(6):14—18.
- [5] 詹辉. DK20 连杆高能螺旋压力机精密模锻工艺 [J]. 锻压技术, 2013, 38(4):1—5.  
ZHAN Hui. Precision Die Forging Technology Using High Power Screw Press for DK20 Connecting Rod [J]. Forging & Stamping Technology, 2013, 38(4):1—5.
- [6] 杨赛, 于见华, 王凤家, 等. 铝合金圆柱直齿齿轮精锻成形试验研究 [J]. 精密成形工程, 2012, 4(4):23—21.  
YANG Sai, YU Jian-hua, WANG Feng-jia, et al. The Research of the Forging Experiment of Aluminum Alloy Columned Straight Ring [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2012, 4(4):23—21.
- [7] DOEGER E, NÄGELE H. FE Simulation of the Precision Forging Process of Bevel Gears [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1994, 43(1):241—244.
- [8] 林军, 李祖荣, 陈强, 等. 具有非加工面的钢质锻件精密成形工艺分析及设计 [J]. 精密成形工程, 2012, 4(5):1—6.  
LIN Jun, LI Zu-rong, CHEN Qiang, et al. Analysis and Design of Precision Forging Process of Steel Forging Piece with Non-machined Surface [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2012, 4(5):1—6.
- [9] MERKLEIN M, KOCH J, OPEL S, et al. Fundamental Investigations on the Material Flow at Combined Sheet and Bulk Metal Forming Processes [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2011, 60(1):283—286.
- [10] 吕炎. 锻模设计手册(第2版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.  
LYU Yan. Forging Die Design Handbook (2th) [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [11] 吕炎. 锻件组织性能控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.  
LYU Yan. Control of Microstructure and Mechanical Properties of Forged Parts [J]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988.
- [12] ALTAN Taylan, VAZQUEZ Victor. Numerical Process Simulation for Tool and Process Design in Bulk Metal Forming [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 1996, 45(2):599—615.

(下转第 126 页)

- [3] GAIN A K, CHAN Y C, WONG N B, et al. Interfacial Microstructure and Shear Strength of Ag Nano Particle Doped Sn-9Zn Solder in Ball Grid Array Packages [J]. *Microelectronics Reliability*, 2009, 49(7): 746—753.
- [4] LIU B, TAI F, GUO F, et al. Research of New Sn-Ag Based Lead-free Composite Solders Containing Nano-structured Reinforcements [J]. *Journal of Material Engineering*, 2009, (8): 38—39.
- [5] AMAGAI M. A Study of Nanoparticles in Sn-Ag Based Lead Free Solders [J]. *Microelectronics Reliability*, 2008, 48(1): 1—16.
- [6] HASEEB A S M A, LENG T S. Effects of Co Nanoparticles Addition to Sn<sub>3.8</sub>Ag<sub>0.7</sub>Cu Solder on Interfacial Structure after Reflow and Aging [J]. *Intermetallics*, 2011, 19(5): 707—712.
- [7] HASEEB A S M A, Arafat M M, Johan M R. Stability of Molybdenum Nanoparticles in Sn<sub>3.8</sub>Ag<sub>0.7</sub>Cu Solders During Multiple Reflow and Their Influence on Interfacial Intermetallic Compounds [J]. *Materials Characterization*, 2012, 64: 27—35.
- [8] TAY S L, HASEEB M A, JOHAN MR, et al. Influence of Ni Nanoparticle on the Morphology and Growth Intermetallic Compounds between Sn<sub>3.8</sub>Ag<sub>0.7</sub>Cu Lead-free Solder and Copper Substrate [J]. *Intermetallics*, 2013, 33: 8—15.
- [9] CHENG Fang-jie, GAO Feng, ZHANG Jian-you, et al. Tensile Properties and Wettability of SAC0307 and SAC105 Low Ag Lead-free Solder Alloys [J]. *Journal of Materials Science*, 2011, 46(10): 3424—3429.
- [10] 魏秀琴, 周浪, 黄惠珍. 氧化对 Sn-Zn 系无铅焊料润湿性的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(1): 175—178.
- [11] WEI Xiu-qin, ZHOU Lang, HUANG Hui-zhen. Effects of Oxidation on Wettability of Sn-Zn Alloys [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2009, 19(1): 175—178.
- [12] ZHANG S S, ZHANG Y J, WANG H W. Effect of Oxide Thickness of Solder Powders on the Coalescence of SnAgCu Lead-free Solder Pastes [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 487(1-2): 682—686.
- [13] LUO Xin, DU Wen-hui, LU Xiu-zhen, et al. Surface Oxide Analysis of Lead-free Solder Particles [J]. *Soldering and Surface Mount Technology*, 2013, 25(1): 39—44.
- [14] 杜长华, 陈方. 电子微连接技术与材料 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [15] DU Chan-hua, CHEN Fang. Electronic Micro-connection Technology and Materials [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2008.
- [16] LAURILA T, VUORINEN V, KIVILAHTI J K. Interfacial Reactions between Lead-free Solders and Common Base Materials [J]. *Material Science and Engineering R*, 2005, 49(1-2), 49: 1—60.
- [17] HARCUBA P, JANACEK M. Microstructure Changes and Physical Properties of the Intermetallic Compounds Formed at the Interface between Sn-Cu Solders and a Cu Substrate Due to a Minor Addition of Ni [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2010, 39(12): 2553—2557.
- [18] 刘朋, 郭福, 何洪文, 等. 颗粒增强 Sn-Ag 基无铅复合钎料显微组织与性能 [J]. 电子元件与材料, 2007(06): 28—30.
- [19] LIU Peng, GUO Fu, HE Hong-wen, et al. Microstructure and Properties of Particle Reinforced Sn-Ag Based Lead-free Composite Solders [J]. *Electronic Components and Materials*, 2007(6): 28—30.

(上接第 115 页)

- [13] ZHAN Mei, YANG He, LIU Yu-li. Deformation Characteristic of the Precision Forging of A Blade With A Dumper Platform Using 3D FEM Analysis [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 150(3): 290—299.
- [14] OSAKADA K, WANG X, HANAMI S. Precision Forging

- Process with Axially Driven Container [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 71(1): 105—112.
- [15] POLITIS D J, LIN J, DEAN T A, et al. An Investigation into the Forging of Bi-Metal Gears [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(11): 2248—2260.