

工艺优化设计

发动机连杆热锻模具结构分析及优化设计

刘雅辉, 刘淑梅, 何文涛

(上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620)

摘要: **目的** 以1KD发动机连杆的热锻模具为研究对象, 对其进行结构分析和优化设计。**方法** 采用DEFORM3D模拟1KD连杆热锻成形过程, 重点关注与模膛布局相关的中心飞边仓深度、模膛的中心距和旋转角度等3个参数, 对成形载荷、锻件折叠和模具磨损的影响。**结果** 采用两次预锻加终锻的生产工艺, 可以达到分配坯料质量、降低载荷的目的; 模膛中心距和模膛旋转角是影响成形载荷的主要因素, 而中心飞边仓深度对模具磨损有显著的影响。**结论** 最终获得了3个参数的优化组合: 模膛中心距为32 mm, 模膛旋转角为 12° , 中心飞边仓深度为10 mm, 对模具设计和实际生产有一定的参考价值。

关键词: 连杆; 热锻成形; 正交试验; 数值模拟; 模具优化设计

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2014.04.001

中图分类号: TG316

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2014)04-0001-05

Die Structural Analysis and Design Optimization of Engine Conrods

LIU Ya-hui, LIU Shu-mei, HE Wen-tao

(College of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

ABSTRACT: **Objective** In this paper, forging die of 1KD engine conrods was chosen as the study object, for which structural analysis and design optimization were performed. **Methods** Simulation of 1KD conrods hot forging process was carried out by using DEFORM 3D, focusing on the effects of the three parameters associated with the cavity layout: the center flash groove depth, die cavity centre distance and rotation angle on the forming load, folding and forging die wear. **Results** The purpose of allocating blank quality and reducing the load could be achieved by using the production processes with two pre-forgings and final forging. Die cavity centre distance and rotation angle were the main factors affecting the forming load, and the center flash groove depth significantly influenced the tool wear. **Conclusion** Eventually the optimal combination of three parameters was obtained: the die cavity centre distance, rotation angle and the center flash groove depth were 32 mm, 12° and 10 mm, respectively, which has a certain reference value for the mold design and actual production.

KEY WORDS: conrods; hot forging; orthogonal test; numerical simulation; die design optimization

连杆是汽车发动机的关键部件之一,其作用是 将活塞的往复直线运动转换为曲轴的旋转运

收稿日期: 2014-05-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51301105);上海工程技术大学科研创新项目(13KY0516)

作者简介: 刘雅辉(1988—),男,河南洛阳人,硕士研究生,主要研究方向为模具CAD/CAE/CAM。

动^[1-2]。连杆的生产工艺包括热锻、粉末锻造和铸造等^[2-6]。中国市场每年对连杆的需求超过 70 亿美元,其中超过 90% 是热锻连杆,其余为粉末锻件和铸件。中国有超过 200 家公司能够生产热锻连杆^[7-8],专业的连杆锻造生产线大约有 30 条。

锻造连杆以其优良的产品质量、合理的生产成本、成熟的工艺为优势,一直以来占据着发动机连杆市场的主要地位^[2,5,9]。连杆锻造过程的数值模拟技术主要用于预测锻造过程中工件和模具的塑性变形行为,包括应力、应变和变形带来的微观组织变化。数值模拟技术不仅涉及材料成分、结构和工艺参数的研究,还涉及到最终产品的性能和设计^[10-11]。具体地讲,模拟技术可以预测成形载荷和锻造所需的能量,预测金属填充模具过程中经常发生的流动缺陷以及这些缺陷对工件最终性能的影响^[12-13],这为连杆锻造过程的理论研究和实际生产带来了巨大便捷。

文中以汽车发动机 1KD 连杆的热锻模具为研究对象,并对其进行结构分析和优化设计。采用 DEFORM 软件模拟 1KD 连杆热锻成形过程,重点关注中心飞边仓深度、模膛的中心距和旋转角度等 3 个参数对成形载荷、锻件折叠和模具磨损的影响。

1 连杆热锻工艺过程

连杆的热锻生产工艺分为一模一件^[12-13]和一模两件^[14]。一模一件是指锻模在压力机的作用下一次合模成形得到一支连杆。一模两件是指一次合模成形得到两支连杆。根据连杆的精度要求,选择不同个锻造工艺和裂解工艺^[13-15]。精度要求较高的轿车发动机连杆需要采用一模一件的锻造工艺,以保证连杆的质量公差和流线,精度要求相对较低的连杆则采用一模两件的锻造工艺,以提高锻造效率^[16]。热锻连杆的工艺流程如图 1 所示。

研究的 1KD 连杆材料为 SVDH20S1,锻件质量为 1150 g,质量公差 ± 40 g,采用一模两件的热锻工艺。同时,可以减少辊锻制坯工序,中频加热之后直接进入模锻工序^[16]。1KD 连杆采用杆和盖分开锻造的成形方式,锻造工艺采用预锻 1+预锻 2+终锻的方式。模具材料为 H13 钢。

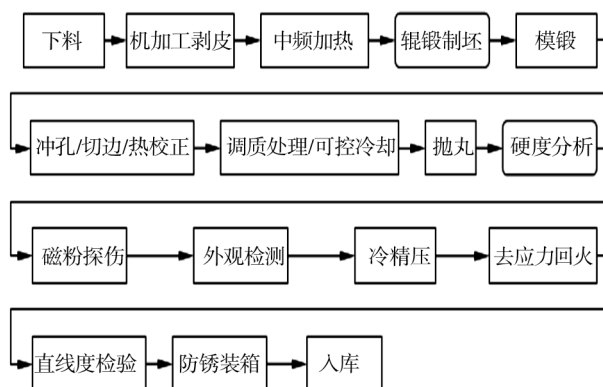


图 1 热锻连杆的工艺流程

Fig. 1 Hot forging process of conrods

2 锻模结构设计参数

图 2 为连杆锻模的拓扑结构,其中的模具中心为点 O ,两连杆大小孔圆心分别为 A, B, C, D ,连杆大小孔的中心距为 AD 和 BC ,连杆小孔到模具中心线的距离为 DM 和 CN ,模膛中心距为 OE 和 OF ,模膛旋转角为 $\angle BAD$ 和 $\angle ABC$ 。模膛的原始直角坐标系为 xoy ,旋转后的坐标系为 x_1oy_1 。可设模膛的中心距 OE 为 d ,模膛旋转角 $\angle BAD$ 为 α ,两者是连杆锻模的主要设计参数。为了体现模膛的旋转效果,图中还给出了模具的轮廓。模具中心飞边仓的结构设计如图 3 所示。

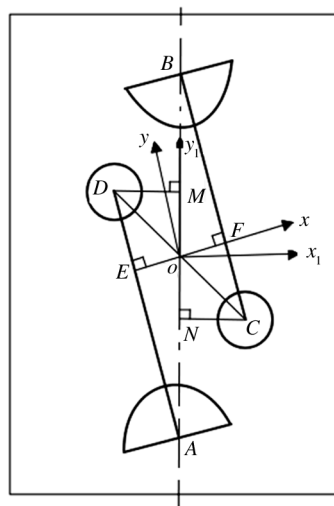


图 2 连杆锻模的拓扑结构

Fig. 2 Topology structure of the forging die for conrods

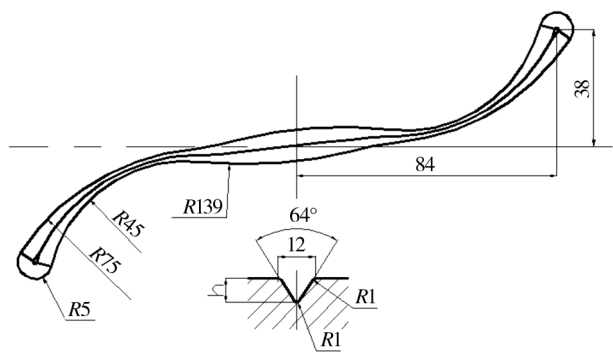


图3 模具中心飞边仓的设计
Fig. 3 Design of die center groove

3 正交试验设计及模拟结果分析

3.1 正交试验设计

建立模拟的正交试验方案,研究3个主要参数:模膛中心距 d 、模膛旋转角 α 和中心飞边仓的深度 h 等,对热锻成形的金属流动、成形载荷、锻件折叠和模具磨损的影响。正交试验方案设计如下。

1) 试验指标、因素及其水平的设置。试验指标为成形载荷、折叠角和模具磨损深度。根据经验可得因素水平: $30\text{ mm}\leq d\leq 35\text{ mm}$,取32 mm和30 mm;

$10^\circ\leq\alpha\leq 13^\circ$,取 12.5° 和 12° ; $5\text{ mm}\leq h\leq 15\text{ mm}$,取10 mm和8 mm,3个因素无交互作用,见表1。

表1 正交试验方案

Table 1 Orthogonal test table

试验号	模膛中心距 d/mm	模膛旋转角 $\alpha/(^\circ)$	中心飞边仓 深度 h/mm
1	32	12.5	10
2	32	12.0	8
3	30	12.5	8
4	30	12.0	10

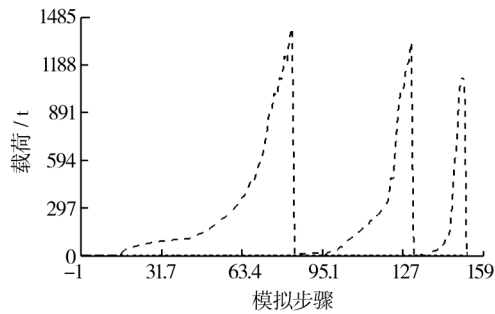
2) 采用四因素三水平 $L_4(2^3)$ 正交表。试验后对数值进行方差分析。由于该正交表无空列,在方差分析时将偏差平方和较小的因素转化为空列处理。

3.2 数值模拟及结果分析

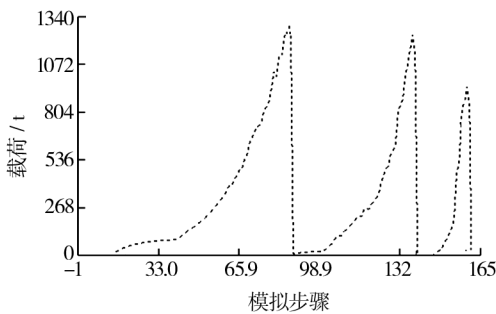
基于 DEFORM 3D 软件对正交试验方案进行数值模拟,对模具划分网格,坯料尺寸 $\phi 68\text{ mm}\times 280\text{ mm}$,温度为 $1220\text{ }^\circ\text{C}$,模具温度为 $180\text{ }^\circ\text{C}$,设备为 2500 t 曲柄压力机,摩擦因数为 0.3,采用 Archard 磨损模型,输入参数为: $a=b=1, c=2, k=2.0\times 10^{-6}$ 。

3.2.1 成形载荷分析

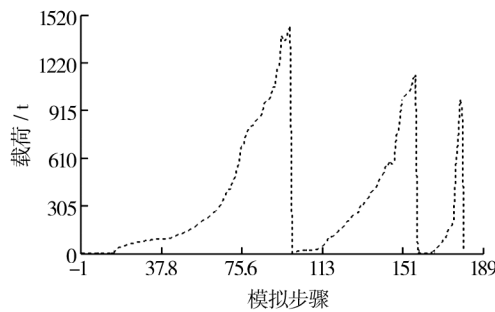
图4为4个正交试验的成形载荷曲线,可见4



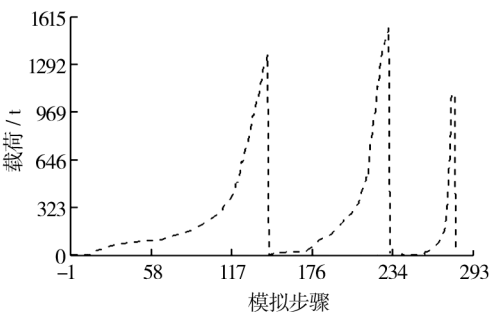
a 试验1



b 试验2



c 试验3



d 试验4

图4 成形载荷曲线对比

Fig. 4 Comparison of forming load curves

个正交试验的预锻 1、预锻 2 和终锻的成形载荷依次降低,故最大载荷出现在预锻 1 工序,只有试验 4 的预锻 2 不适合这一规律,这是由试验 4 的预锻 1 工序中锻件变形不充分造成的。

3.2.2 折叠缺陷分析

1KD 连杆采用错开布置的模膛形式,模膛之间倾斜的 S 型带状区域在热锻成形过程中成了多余金属的外溢“通道”。S 型带状区域两侧的金属除了水平流动之外,还需要沿着模膛垂直于分型面流动,这使得 S 型带状区域边缘的容易出现汇流现象,进而成为锻件折叠的隐患。

图 5 为试验 4 的锻件折叠角分析,可见试验 4 中锻件严重折叠的位置在飞边上,这对锻件质量不产生影响。然而,连杆的小端出现了折叠,连杆大端有折叠倾向。

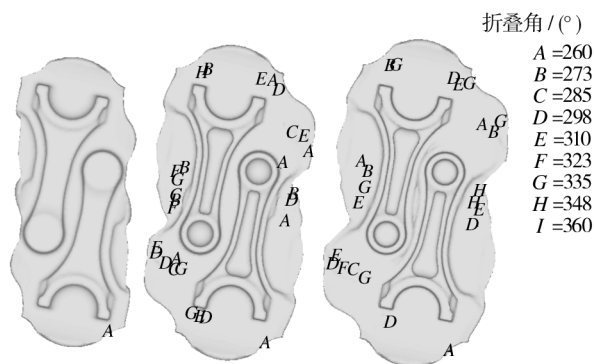


图 5 试验 4 各道工序锻件的折叠角

Fig. 5 Folding angle of forging part in each process of test 4

图 6 为试验 4 各工序成形末期的速度场,可见模具中央的 S 型带状区域金属流动速度相对两侧较大,多余金属在外溢到连杆小端的时候与模膛中外溢的金属汇合,形成连杆小端部位的金属折叠。其中,尤以预锻 2 的金属流动最为典型。

3.2.3 模具磨损分析

4 个试验中,预锻 1 上模的磨损最严重,最大磨损深度依次为 0.0247, 0.0404, 0.0424, 0.0374 mm, 预锻 1 下模的磨损深度次之,分别为 0.0214, 0.0394, 0.0429, 0.0317 mm。图 7 为试验 4 中预锻 1 上下模具的磨损深度分布,可见磨损主要分布于模膛周围的飞边桥。这是由于金属在充填模膛的过程中与模膛壁强烈摩擦造成的。

采用点追踪的方法,在试验 4 预锻 1 上模表面

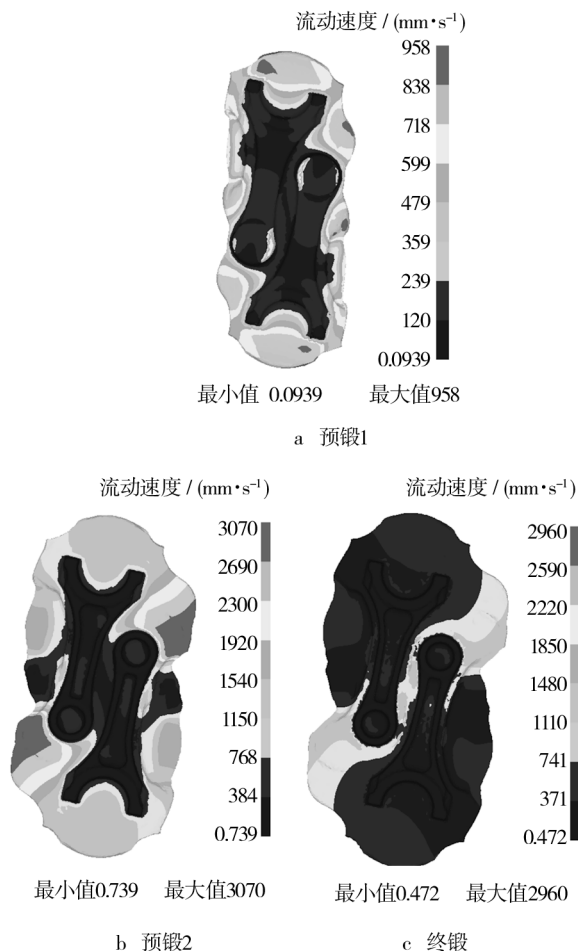


图 6 试验 4 各工序的金属流动速度

Fig. 6 Metal flowing vector in each process of test 4

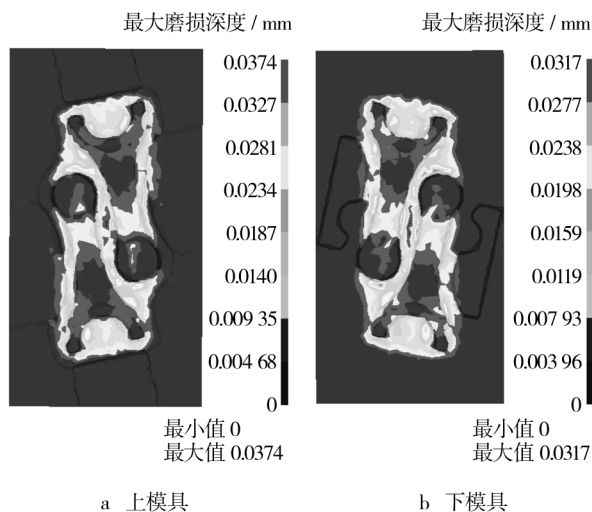


图 7 试验 4 的磨损深度对比

Fig. 7 Wear depth in each process of test 4

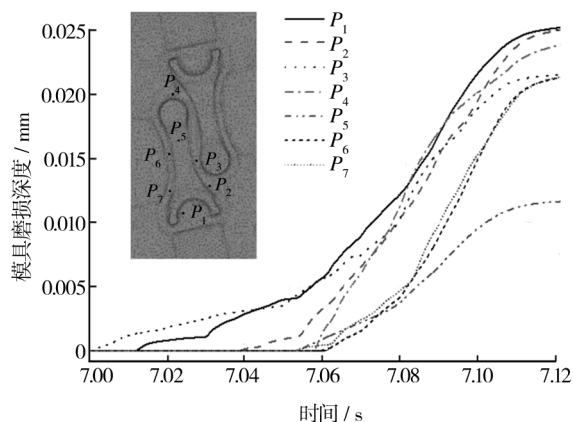


图8 试验4预锻1上模表面7个点的磨损深度-时间曲线
Fig.8 Wear depth-time curves of 7 points on the surface of test 4 pre-forging 1 top die

选定7个点。图8为7个点磨损深度随锻造行程时间的变化曲线。根据磨损深度随时间的变化规律可将曲线划分为4个梯度:点 P_1 和点 P_3 属于第1梯度;点 P_2 和点 P_4 属于第2梯度;点 P_6 和点 P_7 属于第3梯度;点 P_5 属于第4梯度。这4个梯度反映了金属流动对模具表面不同区域磨损影响的不同。

3.3 正交试验结果的方差分析

对正交试验结果进行极差分析和方差分析,最优组合汇总见表2,可见主要的影响因素为B和C,即模膛旋转角和中心飞边仓深度,其次是A,即模膛中心距。在确定最终方案时,先考虑主次顺序第一位,可见只有 B_2 和 C_1 两个因素水平;其次,考虑主次顺序第2位,除了B和C两个因素的水平,仅有 A_1 一个因素水平,由此确定最终方案为 $A_1B_2C_1$,对应于模膛中心距为32 mm,模膛旋转角为 12° ,中心飞边仓深度为10 mm。

表2 正交试验的最优参数组合

Table 2 Optimal parameter combination of orthogonal test

指标	成形载荷			预锻1 折叠	磨损深度	
	预锻1	预锻2	终锻		上模	下模
优组合	$B_2A_1C_2$	$C_2B_1A_1$	$C_2B_1A_2$	$B_2C_2A_1$	$C_1A_1B_1$	$C_1A_1B_1$

3.4 批量生产验证

实际生产的1KD连杆锻件如图9所示,可见锻

件的形状与数值模拟结果一致,且产品质量合格。



图9 连杆锻件产品
Fig.9 Conrods forging part

4 结语

通过数值模拟分析了1KD连杆热锻模具结构设计参数对成形载荷、锻件折叠角和模具磨损的影响。设计了正交试验方案,并进行了数值模拟和分析,结果表明:采用两次预锻加终锻的生产工艺,可以达到分配坯料质量、降低载荷的目的;模膛中心距和模膛旋转角是影响成形载荷的主因素,而中心飞边仓深度对模具磨损有显著的影响。最终确定的模具设计方案为:模膛中心距为32 mm,模膛旋转角为 12° ,中心飞边仓深度为10 mm。

参考文献:

- [1] LUO Q. Progressing in Connecting Rods Forging[J]. Metal Form, 2000, 4: 1—3.
- [2] MULLER M, LEI J. Forging Technology and Equipment for Connecting Rods[J]. Metal Form, 1995, 3: 43—45.
- [3] OH S I, LAHOTI G D, ALTAN T. Application of FEM to Industrial Metal Forming Processes [M]. Swansea: Pineridge Press Ltd, 1982: 145—153.
- [4] OH S I, LAHOTI G D, ALTAN T. ALPID—A General Purpose FEM Program for Metal Forming[C]//9th NAMRC Proceedings, 1981: 83—88.
- [5] MULLER M, LEI J. Forging Technology and Equipment for Connecting Rods[J]. Metal Form, 1995 (3): 43—45.
- [6] WANG Q, YUAN W S, LU F Q. Automatic Precision Forging Production Line for Connecting Rods[J]. Heavy Mach, 2002 (2): 19—21.
- [7] LUO Q L. Improved Production Technology of Motorcycle Forgings[J]. Metal Form, 1997 (2): 3—7.

- Microparts for Electronics [J]. Production Engineering, 1994, 2(1): 15—18.
- [2] 谢延敏, 于沪平, 阮雪榆. 微成形技术的研究现状[J]. 中国机械工程, 2005, 16(10): 935—939.
- XIE Yan-min, YU Hu-ping, RUAN Xue-yu. Development and Future of Metal Micro-forming Technology[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(10): 935—939.
- [3] ENGEL U, ECKSTEIN R. Microforming from Basic Research to Its Realization[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 125: 35—44.
- [4] 董湘怀, 王倩, 章海明, 等. 微成形中尺寸效应研究的进展[J]. 中国科学, 2013, 43(2): 115—130.
- DONG Xiang-huai, WANG Qian, ZHANG Hai-ming, et al. Progress in the Study of the Size Effect in Micro Forming[J]. Science China, 2013, 43(2): 115—130.
- [5] 郭斌, 周健, 单德斌, 等. 黄铜箔拉伸屈服强度的尺寸效应[J]. 金属学报, 2008, 44(4): 419—422.
- GUO Bin, ZHOU Jian, SHAN De-bin, et al. Size Effects of Yield Strength of Brass Foil in Tensile Test[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(4): 419—422.
- [6] GEIGER M, VOLLERTSEN F. Fundamentals on Manufacturing of Sheet Metal Microparts[J]. CIRP Ann-Manuf Tech, 1996, 45: 277—282.
- [7] ARMSTRONG R W. On Size Effects in Polycrystal Plasticity[J]. Mech Phys Solids, 1961, 9: 196—199.
- [8] FEAUGAS X, HADDOU H. Grain-size Effects on Tensile Behavior of Nickel and AISI 316L Stainless Steel[J]. Metal Mater Trans A, 2003, 34: 2329—2340.
- [9] FLECK N A, HUTCHINSON J W. A Reformulation of Strain Gradient Plasticity[J]. J Mech Phys Solids, 2001, 49: 2245—2271.
- [10] NIX W D, GAO H. Indentation Size Effects in Crystalline Materials: A Law for Strain Gradient Plasticity[J]. J Mech Phys Solids, 1998, 46: 411—425.
- [11] 孟庆当, 李河宗, 董湘怀, 等. 304 不锈钢薄板微塑性成形尺寸效应的研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(2): 280—283.
- MENG Qing-dang, LI He-zong, DONG Xiang-huai, et al. Investigation of Size Effects of 304 Stainless Steel Foils in Microforming Processes[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(2): 280—283.
- [12] WANG Q, DONG Xiang-huai. Constitutive Model for Thin Sheet Metal with One or Several Grains Across Thickness in Micro-forming[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2013, 23: 1428—1434.
- [13] 王匀, 董培龙, 许桢英, 等. 微薄板塑性成形本构关系研究[J]. 功能材料, 2008, 39(10): 1641—1645.
- WANG Yun, DONG Pei-long, XU Zhen-ying, et al. Constitutive Relation of Thin Sheet of Plastic Forming[J]. Journal of Functional Materials, 2008, 39(10): 1641—1645.
- [14] GEIGER M, MEBNER A, ENGEL U. Production of Microparts—size Effects in Bulk Metal Forming[J]. Production Engineering, 1997, 4(1): 55—58.
- [15] MICHEL J F, PICART P. Size Effects on the Constitutive Behaviour for Brass in Sheet Metal Forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 141: 439—446.

(上接第5页)

- [8] MAO X C, YAO J H, CHEN L, et al. Current Production Situation and Development Counter Measures of Connecting Rod Forging[J]. J Zhejiang Univ Technol, 2001(2): 156—160.
- [9] JOHNSON W. Plane Strain Slip Fields[M]. Arnold, 1970.
- [10] BRAMLEY A, OSMAN F. The Upper Bound Method[M]. Numerical Modelling of Materials and Deformation Processes. Springer Verlag, 1992.
- [11] WANHEIM T. Physical Modelling of Metal Forming Processes[M]. Process Modelling. Proceedings of ASM Process Modelling Sessions, Materials and Processing Congresses, 1979.
- [12] HATZENBICHLER T, BUCHMAYR B. Vorformoptimierung Für Das Gesenkschmieden Mittels Numerischer Simulation [J]. Buchmayr, 2008(11): 413—417.
- [13] KIMA H S, KIM T G, CHUNG C T J, et al. Fatigue Characteristics of High Strength C70S6 and SMA40 Steels[J]. Materials Science and Engineering: A, 2010, 527(12): 2813—2818.
- [14] BARIANI P F, BRUSCHI S. Modelling the Forging and Post-forging Cooling of C70S6 Conrods[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167(2-3): 529—535.
- [15] FUKUDA S, ETO H. Development of Fracture Splitting Connecting Rod[J]. JSAE Review, 2002, 23(1): 101—104.
- [16] 刘雅辉, 刘淑梅, 于秋华. 轿车连杆热锻模具结构设计改进[J]. 锻压技术, 2014, 39(3): 108—112.
- LIU Ya-hui, LIU Shu-mei, YU Qiu-hua. Structure Design Improvements of Hot Forging Die for Automobile Connecting Rod[J]. Forging and Stamping Technology, 2014, 39(3): 108—112.