

应用技术

汽车发动机曲轴疲劳性能分析研究

张帷, 王晓辉, 王长彭, 黄文明

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 汽车发动机曲轴在疲劳实验的过程中, 经常会出现非正常疲劳裂纹, 裂纹从轴颈末端的油孔槽开始起源, 造成曲轴轴颈的扭转强度达不到要求。有必要对汽车发动机曲轴的疲劳性能进行研究。**方法** 通过疲劳、拉伸、金相实验以及疲劳断口 SEM 手段, 对曲轴疲劳试样进行了分析。**结果** 汽车曲轴疲劳实验在循环基数为 1×10^7 次下, 弯矩的疲劳极限为 607.5 Nm; 曲轴轴颈的中部所受到的疲劳极限压力为 96.7 MPa; 该 40Cr 曲轴断口为典型的韧窝和台阶混合断裂。**结论** 曲轴的钻油孔在轴颈内壁造成的应力集中, 比较容易产生缺陷; 曲轴轴颈在交变应力的作用下, 很容易产生疲劳裂纹并扩展, 导致曲轴的早期断裂。

关键词: 汽车曲轴; 弯曲疲劳; 裂纹扩展

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2015.01.014

中图分类号: TG115.5⁺7

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2015)01-0072-06

Investigation of Fatigue Performance of Automobile Engine Crankshaft

ZHANG Wei, WANG Xiao-hui, WANG Chang-peng, HUANG Wen-ming

(Southwest Institute of Technical Engineering, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: During fatigue testing of the automobile engine crankshaft, abnormal fatigue cracks often occur. The cracks originate from the oil hole slot at the end of the crankshaft journal, which leads to the unqualified torsional strength of the shaft journal. It is necessary to have a research on the fatigue performance of automobile engine crankshaft. The crankshaft fatigue sample was analyzed by fatigue test, tensile test, OM, and fatigue fracture SEM. The fatigue limit of the lower moment was 607.5 Nm at the circulation base of 1×10^7 times in the fatigue test of automotive crankshaft. The fatigue limit pressure was 96.7 MPa at the middle of crankshaft journal. The fracture of the 40Cr crank was the typical dimple and step mixed fracture. Due to the stress concentration in the inner wall of the shaft journal caused by the drill hole of crankshaft, the defects occurred easily. On the other hand, under alternating stress, fatigue cracks occurred easily in the crankshaft journal and expanded, causing early break of the crankshaft.

KEY WORDS: automotive crankshaft; bending fatigue; crack propagation

曲轴是汽车发动机的重要零部件, 无论在汽车曲轴的研发还是实际生产阶段, 都需要对汽车曲轴的疲劳性能进行测试。在汽车发动机实际运行的过

程中, 曲轴所要承受的载荷形式为弯曲和扭转载荷, 所以实际案例表明, 汽车曲轴的主要失效形式为弯曲疲劳破坏。另外如果发动机曲轴的输出功率较

收稿日期: 2014-11-10

作者简介: 张帷(1983—), 男, 辽宁人, 工程师, 主要从事金属力学研究。

大,所产生的扭矩较大,就会产生一定程度的扭转疲劳破坏。早期的汽车发动机曲轴所使用的材料为40Cr和42CrMo等中碳调质钢。然而,自从20世纪90年代以来,大量的汽车曲轴开始广泛使用非调质钢,尤其是对于重型汽车的发动机曲轴的生产,所采用的材料主要包括了48MnV和C38N2,这种材料与中碳调质钢相比,在保证强度相同的情况下,省略了很多调质工序。最近几年以来,采用球墨铸铁生产的汽车曲轴具有更好的机械加工性能和弯曲疲劳强度,尤其在重载发动机的使用上表现出了很好的应用前景。

汽车曲轴在设计、原材料的选择、锻造、机械加工以及热处理和表面强化的各个环节,如果在任何一个环节出现失误就会造成汽车曲轴的失效。文中通过对相关参考文献的阅读和分析,结合本公司的实际曲轴生产案例,介绍和分析汽车发动机曲轴的常见失效形式和内在的原因。

1 材料与实验方法

1.1 试样样品来源

由某公司提供的汽车发动机曲轴装配成型件,并确认为合格的试样件。弯曲疲劳试样为整根曲轴上截取的单拐,如图1所示,疲劳试样的总个数为12个。疲劳强度实验参照GB/T 3075—2008《金属材料疲劳试样轴向控制方法》。

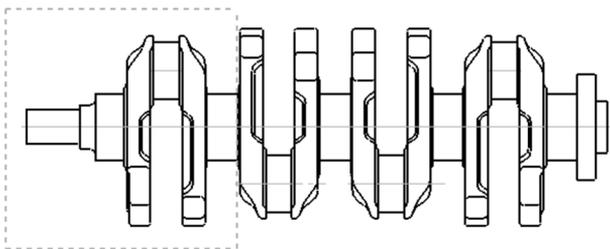


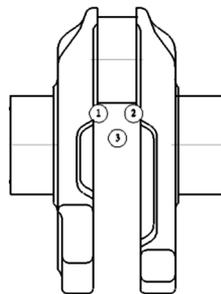
图1 疲劳试样样品取样示意图

Fig. 1 Sampling diagram of fatigue specimens

1.2 疲劳实验条件

疲劳试样在试件连杆轴颈两侧圆角处各贴1 mm×1 mm的应变片1片,轴颈中部贴2 mm×2 mm的应变片1片,如图2所示。贴片方向平行于曲轴的轴线,从而测定试样在动载荷作用下的弯曲应力。本次曲轴疲劳实验采用拉-压加载对称循环疲劳,设

备为谐振式曲轴疲劳弯曲实验机,载荷循环基数为 1×10^7 次,疲劳实验加载波形为正弦波。采用升降法进行实验,疲劳实验设备见图3。曲轴疲劳试样参照QC/T 637—2000《汽车发动机曲轴弯曲疲劳实验方法》进行实验弯矩加载和数据分析处理。



1,2位置为轴颈圆角处,3为轴颈中部

图2 曲轴样品贴应变片位置示意图

Fig. 2 Position of strain gauges attached to the crankshaft sample



图3 电动谐振式曲轴疲劳实验机

Fig. 3 Electric Resonant Crankshaft Fatigue Testing Machine

2 数据分析

2.1 疲劳实验数据处理和分析

汽车曲轴弯曲疲劳实验数据按照升降法进行配对处理。然后按照式(1)得出试样的中值疲劳强度(也称为存活率为50%的疲劳强度)。

$$\sigma_{50} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n v_i \sigma_i \quad (1)$$

式中: σ_{50} 为存活率为50%的疲劳强度(MPa); N 为有效试样总数; n 为应力等级数; v_i 第*i*级应力水平实验的次数; σ_i 为第*i*级应力水平(MPa)。

曲轴样品的疲劳实验结果见表1,图4为实验结果的升降图。通过计算分析可得到:本次曲轴疲劳实验在循环基数为 1×10^7 次下,弯矩的疲劳极限为607.5 Nm,标准偏差为24.7 Nm。

表1 发动机曲轴疲劳实验结果

Table 1 Engine crankshaft fatigue test results

试样 编号	弯矩 /Nm	圆角应 力/MPa	循环 周次	断裂 部位
1 [#]	730	790	620 400	1
2 [#]	695	750	826 100	1
3 [#]	660	714	2 944 200	1
4 [#]	625	677	6 888 300	1
5 [#]	590	639	10 000 000	未断
6 [#]	625	677	2 380 700	2
7 [#]	590	639	3 594 700	2
8 [#]	555	601	10 000 000	未断
9 [#]	590	639	10 000 000	未断
10 [#]	625	677	6 372 000	1
11 [#]	590	639	10 000 000	未断
12 [#]	625	677	10 000 000	未断

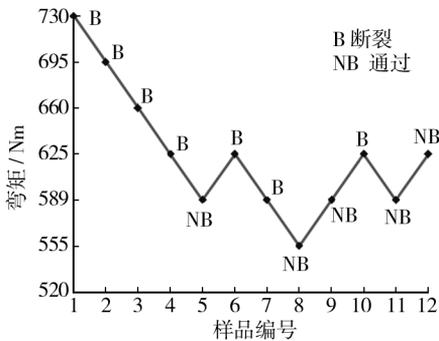


图4 曲轴疲劳实验升降图

Fig. 4 Lift diagram of crankshaft fatigue test

2.2 应力测量结果

经过测量可以得到,每 100 Nm 弯矩在试样曲轴轴颈中部和圆角处所产生的应力分别为 16.11 MPa 和 108.3 MPa,疲劳极限弯矩所对应的曲轴圆角疲劳极限压力为 650 MPa,曲轴轴颈的中部所受到的疲劳极限压力为 96.7 MPa,曲轴应力集中系数为 6.72。

2.3 安全系数计算

依据 QC/T 637—2000《汽车发动机曲轴弯曲疲劳实验方法》规定计算发动机曲轴的名义工作弯矩,该发动机最大爆发力 $P_{\max} = 9.5$ MPa,气缸直径 $D = 78$ mm,再将曲轴有关结构参数代入计算方程,从而可以得到发动机曲轴的名义工作弯矩为 404 Nm,从而可以计算出。存活率为 50% 时的安全系数:

$$n_{50\%} = \frac{607.5}{404} = 1.50$$

存活率为 99.9% 时的安全系数:

$$n_{99.9\%} = \frac{607.5 - 3.05 \times 1.063}{404} = 1.31$$

3 金相组织及断口分析

利用线切割从曲轴疲劳断口附近切割合适大小的试样,经过研磨和抛光以后,使用 4% 的硝酸酒精溶液进行侵蚀,可以明显看出曲轴材料的显微组织为回火索氏体+铁素体+少量贝氏体。按照 GB/T 13320—2007《钢质模锻件 金相组织评级方法》标准,评定曲轴材料的组织为 1 级,符合标准中所规定的 1-4 级技术标准。说明该曲轴 40Cr 经过调质处理后的金相组织属于正常组织,可以推断出曲轴的断裂并不是由于组织发生异常而引起的。

从图 6 和图 7 的扫描电镜分析可知,断裂的裂纹起始于样品表面,裂纹源有台阶,断口为韧窝和撕裂棱的混合断裂。从图 8 和图 7 可以明显地看出,样品断口的扩展区为准解理和撕裂棱的混合断裂,有少量垂直于裂纹扩展方向的二次裂纹,有明显的疲劳贝纹线特征;其中瞬断区的断口为典型的韧窝断裂,如图 9 所示。从图 5 可以看出,在疲劳裂纹源附近并不存在夹杂物,所以可以判断疲劳裂纹源的产生并不是由夹杂物产生的。

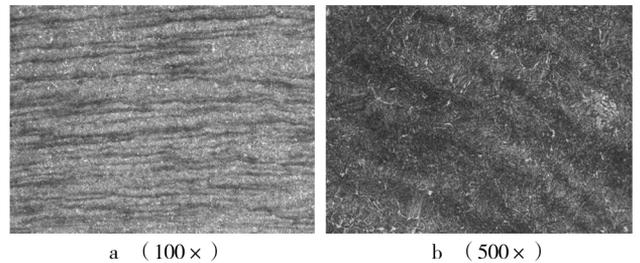


图5 裂纹源附近的样品金相组织

Fig. 5 Metallurgical microstructure of the sample near the cracking source

从曲轴裂纹的 SEM 宏观和微观扫描图片可以看出,将曲轴沿着裂纹打开,可以明显地看见疲劳纹理,见图 6。疲劳条带主要集中于有空内壁一点,此处为疲劳裂纹源,而且疲劳源有着比较明显的加工沟槽。尤其是在扭转应力的循环载荷作用下,加工沟槽处会产生比较严重的应力集中。当所产生的应力超过材料的疲劳极限时,裂纹就会失稳,快速地扩展至宏观裂纹,直至断裂。

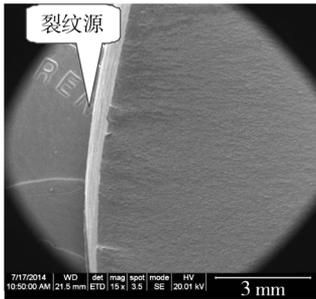


图6 断口宏观形貌(15×)

Fig. 6 Macroscopic morphology of the fracture (15×)

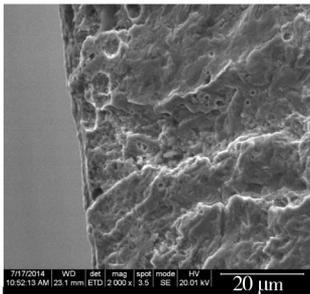


图7 裂纹源形貌(2000×)

Fig. 7 Morphology of the cracking source (2000×)

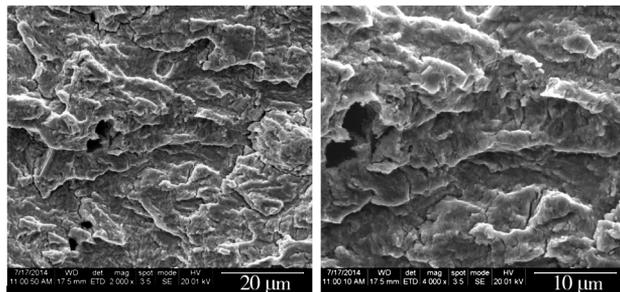
4 影响曲轴弯曲疲劳因素分析

目前影响汽车曲轴疲劳强度的因素主要包括了零件轴颈处的应力集中、尺寸、表面状态以及环境介质等因素。在上述的所有因素中以应力集中和尺寸以及表面状态最为重要。影响曲轴应力分布的因素主要包括了曲轴的设计形状和材料的基本性质。可以通过改变材料的种类以及尺寸形状来提高曲轴的弯曲疲劳强度,但是这样一来就会大大增加材料的制造成本。在实际应用过程中通常采用表层强化工艺来提高曲轴疲劳强度,汽车曲轴在变载荷的作用下,由于曲轴轴颈处的形状发生突变,所以最大应力应该会出现在轴颈圆角附近的一个范围内。图10为曲轴疲劳实验后典型断裂部位。



图10 曲轴疲劳实验轴颈圆角处断裂

Fig. 10 Fracture at the journal fillet in the crankshaft fatigue test

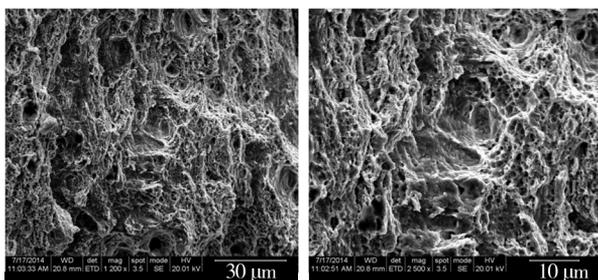


a 2000×

b 4000×

图8 扩展区断口形貌

Fig. 8 Fracture morphology of the extension zone



a 1200×

b 2500×

图9 瞬间断裂区断口形貌

Fig. 9 Fracture morphology of the instant fracture zone

可以看出,在一定程度上,并没有必要提高整个曲轴的表面强化,只要在曲轴轴颈应力集中的部位采取一定的表面强化工艺即可。

4.1 化学成分分析

曲轴用40Cr钢的化学成分C, Mn, Si, Cr, S, P元素的分析结果(质量分数)分别为0.42%, 0.80%, 0.29%, 1.16%, 0.010%, 0.012, 标准值分别为0.38%~0.44%, 0.5%~0.8%, 0.17%~0.37%, 0.39%~1.20%, ≤0.040%, ≤0.040。可以看出其成分符合GB/T 3077—1999《合金结构钢》标准中对40Cr材料的技术要求。说明所使用的40Cr材料是符合规定要求的,所以可以进一步推断出曲轴的疲劳断裂并不是曲轴材料化学成分异常所引起的。

4.2 曲轴拉伸力学性能测试

在距离曲轴轴颈5 mm的地方沿着轴颈方向切取拉伸试样和冲击试样,试样的尺寸按照GB/T 228—2010《金属材料拉伸实验第1部分:室温实验

方法》进行试样切取,然后进行力学性能实验。该曲轴材料各项力学性能测试结果分别为:抗拉强度为 914 MPa,屈服强度为 756 MPa,断后延伸率为 19%,断面收缩率为 63%,冲击值为 140 J,各项力学性能指标均满足实际标准值(分别为 ≥ 860 MPa, ≥ 665 MPa, $\geq 15\%$, $\geq 48\%$, ≥ 63 J),可以判定曲轴的疲劳断裂并不是力学性能的不合格所导致的。

表 2 轴颈部位表面淬火结果

Table 2 Surface hardening results of the journal site

	轴颈淬硬 层深度/mm	圆角淬硬 层深度/mm	圆角淬硬 层深度/mm	凸台淬硬 层深度/mm	凸台淬硬 层深度/mm	表面硬 度/HRC
实验结果	5.15	3.6	3.01	3.73	3.73	50
标准值	≥ 2.29	≥ 1.78	≥ 1.78	≥ 0.76	≥ 0.86	45 ~ 50

从表 2 的数据可以看出,轴颈淬硬层的深度和表面硬度均满足使用要求,可以排除这一因素的影响。

4.4 提高曲轴轴颈弯曲疲劳强度的方法

研究实验结果表明,疲劳裂纹的形成和扩展与应力状态的集中分布有着密切的关系。当曲轴所受到的平均应力为压应力时,能够在一定程度上提高应力的幅度水平。在曲轴的轴颈部位引入一层残余压应力,能够大幅度地提高零件地疲劳强度。

从图 10 可以看出,断口裂纹主要起源于曲轴轴颈圆角偏平衡块的一侧,裂纹主要以最短的路径扩展到连杆劲处。这个断裂区域的疲劳条带呈现出新月形,并逐渐向外围扩展,为比较明显的疲劳裂纹扩展区。最后的疲劳裂纹瞬断区所占到的断口的面积比较小,几乎与疲劳扩展区相互垂直,呈现出很粗糙的表面状态,见图 6 中白色箭头所指向的区域。另外一个方面曲轴圆角的淬火工艺不当,也会导致轴颈处成为裂纹扩展的起源。对于球铁类的曲轴,一般会采用滚压强化或者是氮化工艺进行强化处理。曲轴的弯曲疲劳断裂应该要引起足够的重视,对于曲轴内部的油孔和加工槽等能够引起应力集中的部位,应采取相关的措施进行补救。

5 结论

1) 汽车曲轴疲劳实验在循环基数为 1×10^7 次下,弯矩的疲劳极限 607.5 Nm;曲轴轴颈的中部所受到的疲劳极限压力为 96.7 MPa,曲轴应力集中系数为 6.72,疲劳实验过程中存活率为 99% 时的安全

4.3 轴颈表面感应淬火效果分析

在裂纹所在的轴颈部位取出表面淬火试样,按照 GB/T 5157—2005《钢的淬火试样表层硬化深度测定标准》进行相关测定,采用硬度梯度法来确定该曲轴轴颈表面淬火试样的淬硬层深度,测量结果如表 2 所示。

系数为 1.31。

2) 从 40Cr 曲轴轴颈处的金相组织和裂纹断口的 SEM 组织分析可知,40Cr 调质处理后的显微组织为回火索氏体+铁素体+少量贝氏体,符合相关标准。断口分析可知,该 40Cr 曲轴断口为典型的韧窝和台阶混合断裂,并无明显的夹杂物。

3) 从材料化学成分和拉伸性能以及轴颈表面硬化层分析可知,曲轴疲劳断裂的原因可以排除以上因素的影响。

4) 曲轴的钻油孔在轴颈内壁造成的应力集中,比较容易产生缺陷;曲轴轴颈在交变应力的作用下很容易产生疲劳裂纹并扩展,导致曲轴的早期断裂。

参考文献:

- [1] 冯美斌,付斌,黄德锐. 发动机球铁曲轴扭转疲劳强度的实验研究[J]. 汽车工艺与材料,2003(7):12—14.
FENG Mei-bin, FU Bin, HUANG De-ru. Experimental Study of Fatigue Strength Engine Ductile Iron Crankshaft Torsional[J]. Automotive Technology and Materials, 2003(7):12—14.
- [2] 冯美斌,徐家焱,王小培. 电动谐振式曲轴扭转疲劳实验装置的研制[J]. 汽车工程,1995(2):120—125.
FENG Mei-bin, XU Jia-chi, WANG Xiao-pei. Electric Resonant Crankshaft Torsional Fatigue Testing Device Developed[J]. Automotive Engineering, 1995(2):120—125.
- [3] 陈黄浦. 大型柴油机曲轴断裂失效分析[J]. 机械材料,2007,31(9):76—78.
CHEN Huang-pu. Failure Analysis of Large Diesel Engine Crankshaft Fracture[J]. Mechanical Engineering Materials, 2007,31(9):76—78.
- [4] 秦会常,贾波,王宝起,等. 车轴热轧裂纹分析[J]. 精

- 密成形工程,2013,5(2):47—50.
- QIN Hui-chang, JIA Bo, WANG Bao-qi, et al. Analysis on Hot Rolling Fracture of Trailer Axle[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2013, 5(2):47—50.
- [5] 刘光华. 球墨铸铁曲轴应用前景的评估[J]. 现代铸铁, 2005, 25(1):1—7.
- LIU Guang-hua. Assess the Prospects of Ductile Iron Crankshaft[J]. Modern Cast Iron, 2005, 25(1):1—7.
- [6] 张国庆, 黄伯超, 浦耿强, 等. 基于动力学仿真和有限元分析的曲轴疲劳寿命计算[J]. 内燃机工程, 2006, 27(1):41—44.
- ZHANG Guo-qing, HUANG Bo-chao, PU Geng-qiang, et al. Analysis on Fatigue Life of Crankshaft Based on Dynamics Simulation Analysis and Finite Element Dynamic Analysis[J]. Internal Combustion Engine Engineering, 2006, 27(1):41—44.
- [7] 叶晓琰, 张军辉, 蒋小平, 等. 基于 ANSYS-FATIGUE 的曲轴疲劳寿命计算[J]. 流体机械, 2011, 39(4):44—47.
- YE Xiao-yan, ZHANG Jun-hui, JIANG Xiao-ping, et al. The Crankshaft Fatigue Life Calculation Based on ANSYS-FATIGUE[J]. Fluid Machinery, 2011, 39(4):44—47.
- [8] 秦会常, 胡亚民, 孟祥岩, 等. 40 Cr 重载车轴断裂失效分析[J]. 精密成形工程, 2014, 6(4):63—68.
- QIN Hui-chang, HU Ya-min, MENG Xiang-yan, et al. Fracture Failure Analysis of 40Cr Heavy Automobile Axle[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2014, 6(4):63—68.

(上接第 45 页)

- [10] CHEN Dyi-cheng, SYU Sheng-kai, WU Cing-hong, et al. Investigation into Cold Extrusion of Aluminum Billets Using Three-dimensional Finite Element Method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192/193:188—193.
- [11] ZHAO Chun-mei, HU Hong-yan, ZHOU Ye-fei, et al. Experimental and Numerical Investigation of Residual Stresses Around Cold Extrusion Hole of Ultrahigh Strength Steel[J]. Materials & Design, 2013, 50:78—84.
- [12] 唐超, 郑伟刚, 王进同. 基于 QFORM 2D/3D 的杯形件冷挤压工艺研究[J]. 煤矿机械, 2012, 33(9):144—146.
- TANG Chao, ZHENG Wei-gang, WANG Jin-tong. Cold Extrusion Technology Research of Cup Shell Based QFORM 2D/3D[J]. Mining Machinery, 2012, 33(9):144—146.
- [13] CHEN Qiang, XIA Xiang-sheng, YUAN Bao-guo, et al. Microstructure Evolution and Mechanical Properties of 7A09 High Strength Aluminium Alloy Processed by Backward Extrusion at Room Temperature[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 588(12):395—402.
- [14] ONUH S O, EKOJA M, ADEYEMI M B. Effects of Die Geometry and Extrusion Speed on the Cold Extrusion of Aluminum and Lead Alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 132(1/2/3):274—285.
- [15] 任国成, 王广春, 徐淑波, 等. 深杯形件冷挤压工艺分析及变薄拉深模具设计[J]. 锻压技术, 2007, 32(3):68—69.
- REN Guo-cheng, WANG Guang-chun, XU Shu-bo, et al. Cold Extrusion Process Analysis and Thinning Drawing Die Design of Deep Cup[J]. Forging & Stamping Technology, 2007, 32(3):68—69.
- [16] 吴耀金, 张治民. 深孔筒形件挤压成形有限元分析[J]. 锻压技术, 2007, 32(4):135—138.
- WU Yao-jin, ZHANG Zhi-min. Finite Element Analysis of Extrusion Forming of Deep Hole Tubular Workpiece[J]. Forging & Stamping Technology, 2007, 32(4):135—138.

(上接第 71 页)

- [10] GANDHI A H, RAVAL H K. Analytical and Empirical Modeling of Top Roller Position for Three-roller Cylindrical Bending of Plates and Its Experimental Verification[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 197(1-3):268—278.
- [11] ZENG Jun, LIU Zhao-heng, CHAMPLIAUD H. FEM Dynamic Simulation and Analysis of the Roll-bending Process for Forming a Conical Tube[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 198(1—3):330—343.
- [12] FENG Zheng-kun, CHAMPLIAUD H, DAO T-M. Numerical Studying of Non-kinematical Conical Bending with Cylindrical Rolls[J]. Journal of Simulation Modeling Practice and Theory, 2009, 17:1710—1722.
- [13] FENG Zheng-kun, CHAMPLIAUD H. Three-stage Process for Improving Roll Bending Quality[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2011, 19:887—898.
- [14] CAI Zhong-yi, LI Ming-zhe, LAN Ying-wu. Three-dimensional Sheet Metal Continuous Forming Process Based on Flexible Rollending: Principle and experiments[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(1):120—127.
- [15] WANG Mi, CAI Zhong-yi, SUI Zhou, et al. Numerical Investigation of Continuous Roll Forming for Three-Dimensional Surface Parts[J]. Advanced Materials Research, 2014, 849:287—290.