气门座圈粉末锻造工艺的数值模拟与实验

牛彤，陈文琳，雷远

（合肥工业大学 材料科学与工程学院，合肥 230009）

摘要：目的 研究气门座圈的粉末锻造工艺，提高产品的致密度。**方法** 通过建立气门座圈粉末锻造数值模型，分析锻造过程中相对密度的变化过程，研究预制毛坯初始相对密度、锻造加热温度和成形速度对致密化的影响。在此基础上进行粉末锻造实验，并与模拟结果比较。**结果** 随着预制毛坯初始致密度、加热温度的增加以及成形速度的降低，粉末锻造致密度化所需的成形力降低；预制坯初始密度对锻件密度均匀性影响最为显著。经过粉末锻造后的气门座圈，密度从 6.6 g/cm^3 提高到 7.46 g/cm^3，致密度达到 96.4%。**结论** 相比传统压制-烧结工艺，粉末锻造可以大幅度提高气门座圈的致密度。

关键词：气门座圈；粉末锻造；相对密度；数值模拟

DOI：10.3969/j.issn.1674-6457.2017.05.024

中图分类号：TF124；TG316 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-6457(2017)05-0160-06

Numerical Simulation and Experiment on Powder Forging Process of Valve Retainer

NIU Tong, *CHEN Wen-lin*, *LEI Yuan*

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

ABSTRACT: The paper aims to study the powder forging process of valve retainer to improve the density of product. The relative density of powder sintered blanks, the effects of forging heating temperature and forming speed on the densification were studied by establishing a numerical model for forging the valve retainer and analyzing the changing process of relative density in the forging process. On this basis, the powder forging experiment was carried out and compared with the simulation results. The forming force required for the density of the forging of the powder reduced with the decrease of initial density of the preform blank, the increase of forging heating temperature and the decrease of the forging speed. The initial density of powder sintered blanks had the most significant effect on the density uniformity of forgings. The density of valve retainer after powder forging increased from 6.6 g/cm^3 to 7.46 g/cm^3, and its relative density reached 96.4%. Compared with the traditional P/M process, powder forging can improve the density of valve retainer greatly.

KEY WORDS: valve retainer; powder forging; relative density; numerical simulation

气门座圈是汽车发动机配气机构中的关键零件，经常处于高应力和高温度的工作环境中，其失效表现为磨损严重，进而降低发动机的工作效率[1—2]。传统粉末冶金气门座圈由于其低密度与疏松性，降低了零件的热硬度与耐磨性，限制了其广泛应用[3]，因此，粉末冶金制品的致密化已经成为粉末冶金技术发展的必然趋势。

粉末锻造是减少粉末烧结材料内部孔洞，提高粉末冶金零件密度，进而提高其综合机械性能的有效方法[4]。该工艺是以金属粉末为原料，经过压制、烧结得到预制坯，再通过模锻进行锻造成形，显著地提高了产品致密度，改善了微观组织结构，提高了零件的

收稿日期：2017-07-31

作者简介：牛彤（1993—），男，硕士研究生，主要研究方向为精密成形过程与控制。

通讯作者：陈文琳（1963—），女，教授，主要研究方向为模具 CAD/CAE 与先进材料加工技术。

力学性能[5—6]。

有限元模拟已经成为研究塑性成形工艺的有效手段，国内外学者对粉末烧结体的塑性成形进行了大量研究[7—11]。文中通过建立气门座圈粉末锻造有限元模型，通过数值模拟的方法揭示烧结预制坯在模锻过程中的相对密度变化过程，进一步分析锻造温度、成形速度以及预制毛坯初始相对密度对成形过程中致密度的影响，最后通过实验验证工艺方案的可行性。

1　工艺方案

零件材料成分为 Fe-1.9Ni-0.5Mo-0.6C，原有成形工艺为粉末压制-烧结，密度仅为 6.8 g/cm^3，相对密度为 90%左右。为了提高致密度，得到高力学性能的气门座圈零件，在粉末压制-烧结得到预制坯的基础上，再经过一次热锻变形。

气门座圈粉末锻件的外形尺寸见图 1。零件外径为 Φ37.8 mm，内径为 Φ26.8 mm，高为 8.4 mm，最大壁厚为 5.5 mm。由于预制毛坯在闭式模锻成形过程中体积不断缩小，密度逐渐增大，故遵循质量不变条件[12]，即：

$$Vd = V_0 d_0 \tag{1}$$

式中：V, d 为粉末锻件的体积和密度；V_0, d_0 为预制毛坯的体积和密度。

一般铁基制品预制坯密度在 6.2~6.6 g/cm^3[13]，因此预制毛坯的初始相对密度取 0.8，可以得到预制毛坯的尺寸见图 2，变形量为 29.2%，锻后理论相对密度为 0.97。

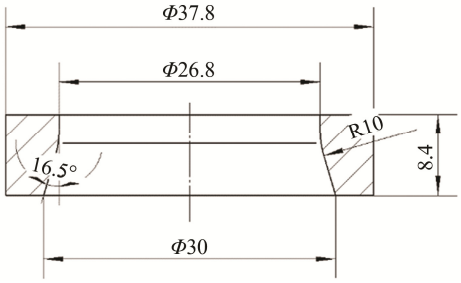


图 1　气门座圈锻件

Fig.1 Forging drawing of valve seat

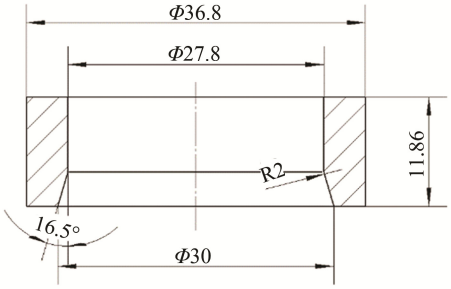


图 2　气门座圈预制毛坯

Fig.2 Preform blank drawing of valve seat

2　有限元模型

根据上述方案建立的气门座圈粉末锻造有限元模型见图 3。预制毛坯定义为多孔材料，网格划分数为 400；模具定义为刚性体。采用剪切摩擦模型用于定义模具与坯料间的摩擦条件，摩擦因数为 0.3，坯料温度为 1050 ℃，模具温度为 200 ℃，环境温度为 20 ℃，上模压下速度为 20 mm/s。

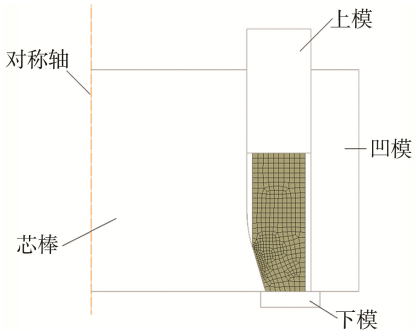


图 3　气门座圈粉末锻造有限元模型

Fig.3 FM model of the powder forging of valve seat

3　模拟结果分析

气门座圈粉末锻造过程中相对密度分布与演化见图 4，不同下压量 S 的等效应变分布见图 5。随着上模下压量增大，气门座圈的相对密度逐渐增加，锻造结束后大部分致密度都在 0.95 以上，平均相对密度为 0.975。对比图 5 可以看出，相对密度与等效应

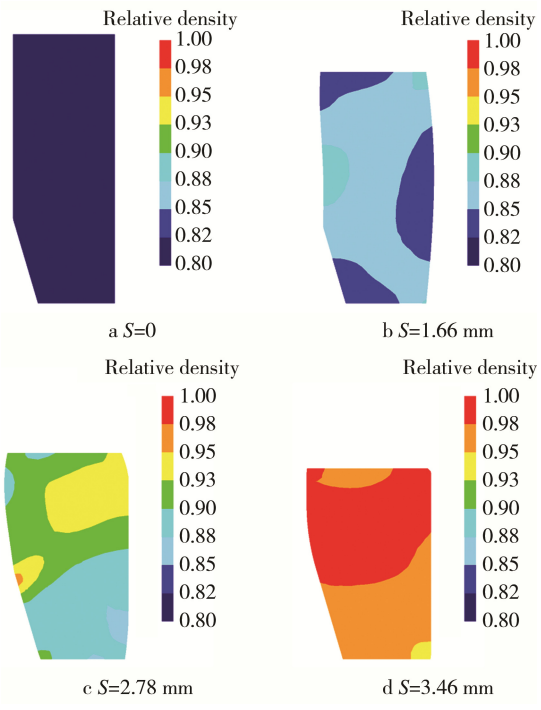


图 4　不同下压量 S 的相对密度分布

Fig.4 Relative density distribution under different lower limit S

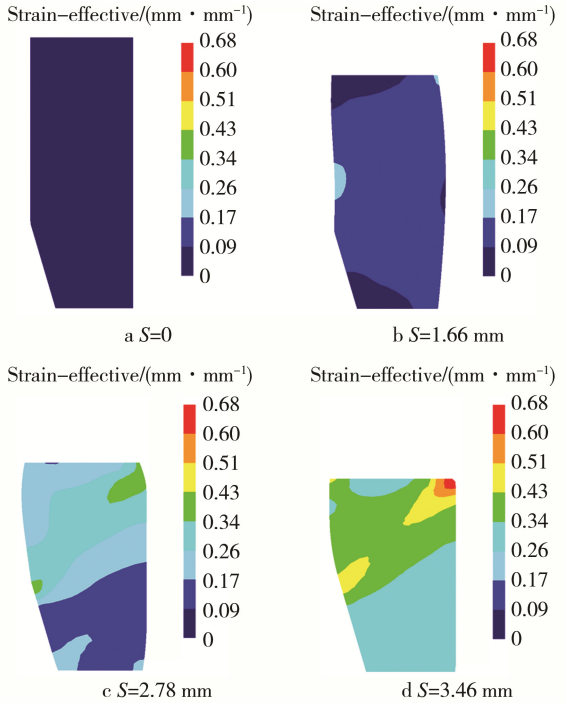


图 5 不同下压量 S 的等效应变分布

Fig.5 Effective strain distribution under different lower limit S

变具有相似的分布规律，这也说明了塑性变形是引起致密的重要原因。从相对密度的分布来看，心部致密情况大于边缘区域，这是由于金属在镦粗过程中，心部未受到模具限制，金属容易流动，因此塑性变形首先集中在该区域。上下端面与模具接触，由于热传导而使温度下降，降低了金属的塑性；而中部区域未与型腔接触，因此沿上下端面到心部的金属更容易被压实致密。

4 工艺参数对致密度的影响

4.1 预制坯初始致密度

为了研究预制坯的初始致密度对粉末锻造致密化的影响，设定预制坯初始相对密度为 0.78, 0.8, 0.83, 0.85。不同初始致密度的毛坯变形力与锻件致密度的关系见图 6。随着变形力增加，致密度也随之增加，但致密速度逐渐变缓。不同初始致密度的预制毛坯随着变形进行，致密度的差距越来越小，在变形后期几乎可以达到相同的致密水平。一般来说，预制坯的屈服点随相对密度的减小而减小[14]，因此密度较低的预制坯在较低的变形力下就会产生塑性变形；随着相对密度逐渐增加，变形抗力也随之增加，当相对密度达到 95%以上时，必须用很高的锻造力才能进一步致密。由于孔隙的存在，低致密度的毛坯更容易在锻造过程中开裂，因此，提高预制毛坯的相对密度更有利于粉末锻造致密化。

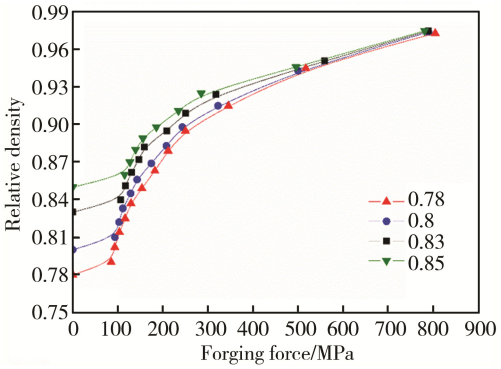


图 6 不同初始致密度变形力与锻件致密度的关系

Fig.6 Relationship between forging force and relative density at different initial density

4.2 加热温度

毛坯初始相对密度为 0.85，锻造速度为 20 mm/s，不同加热温度下的成形力-相对密度曲线见图 7。变形力相同时，随着温度升高，致密度增加；在 1100 ℃下，达到 0.975 相对密度时所需的变形力最小。粉末多孔材料塑性成形通常都是在较高的温度下进行的，这样不仅可以提高基体材料的塑性，也能减小其变形抗力，从而减小锻造所需载荷，降低出现裂纹的可能性，使粉末材料能在较低的压力下成形高致密度的零件。

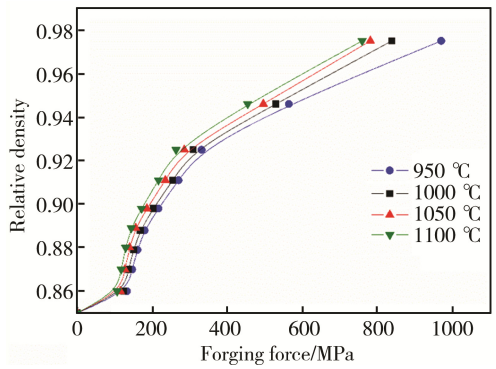


图 7 不同锻造温度下变形力与致密度的关系

Fig.7 Relationship between forging force and relative density at different forging temperature

4.3 锻造速度

变形速度影响了材料的流动应力，进而影响了粉末锻造的致密行为。毛坯初始相对密度为 0.85，锻造加热温度为 1100 ℃，不同锻造速度下的相对密度与变形力的关系见图 8。变形力相同时，随着锻造速度降低，致密度增加，锻造速度为 20 mm/s，达到 0.975 致密度所需的变形力最小。较小的变形速度大大降低了坯料的变形抗力，显著提高了材料的塑性，进一步提高了材料锻造时的致密效果。

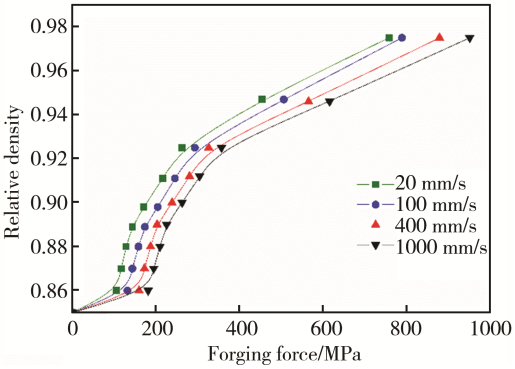


图 8　不同锻造速度下变形力与致密度的关系

Fig.8 Relationship between Forging force and relative density at different forging speed

4.4　正交试验

粉末锻造的致密效果受到预制毛坯密度、锻造温度以及成形速度等多因素的综合影响，锻件密度分布的均匀性影响了材料的力学性能。为了更全面分析工艺参数与致密效果的关系，以正交试验的方法对不同工艺参数进行数值模拟，对比各工艺组合下气门圈相对密度极差 $\delta(\delta=d_{max}-d_{min})$。

正交模拟各因素的极差分析结果见表 1，从表 1 及图 7 可知，工艺参数对粉末锻造气门座圈相对密度均匀性的影响程度如下：坯料初始相对密度＞锻造速度＞坯料加热温度。坯料初始相对密度越大，达到锻件要求密度所需的时间就越短，从而均匀性越好；锻造速度越快，坯料的等效应力和应变增加趋势越快，当某区域处于低密度时，周围的材料能及时向该处流动，使其成形时得到有效的材料补充，从而使得坯料密度更为均匀。坯料的初始温度下降，锻造时温度梯度减小，对变形抗力影响越不明显，因此致密均匀程度增加。

表 1　正交模拟各因素的极差分析结果

Tab.1 The range analysis of each factor by orthogonal simulation

影响因素	参数	同一水平综合结果	极差
初始相对密度	0.78	0.044	0.007
	0.80	0.042	
	0.83	0.038	
	0.85	0.037	
加热温度/℃	950	0.039	0.002
	1000	0.04	
	1050	0.04	
	1100	0.041	
锻造速度/(mm·s^{-1})	20	0.044	0.005
	100	0.042	
	400	0.040	
	1000	0.039	

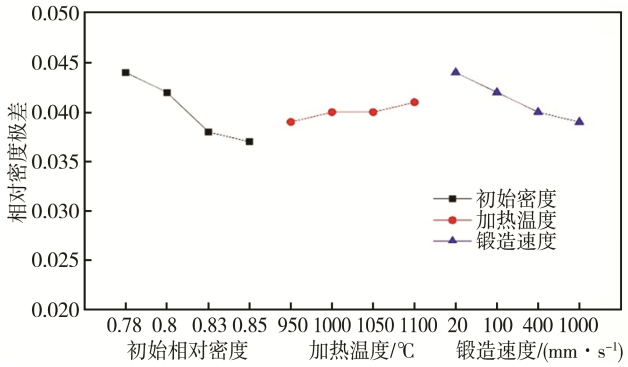


图 9　不同工艺参数对锻后相对密度分布均匀性的影响曲线

Fig.9 Influence curves of relative technological parameters on relative density distribution uniformity after forging

5　实验验证

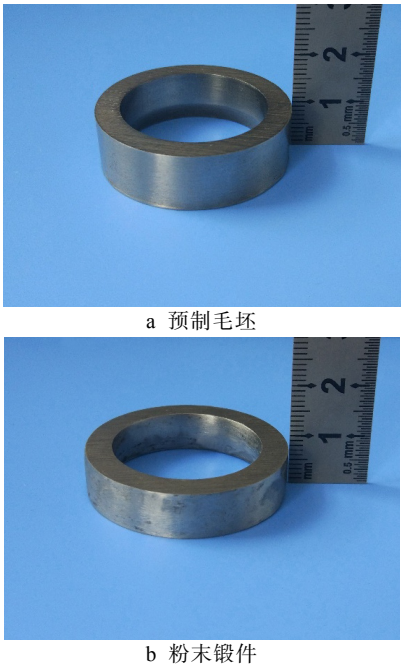
实验材料以水雾化铁粉为基体，与质量分数为 1.9%的 Ni、0.5%的 Mo、0.6%的石墨粉以及 0.6%的硬脂酸锌粉末混合均匀，在手动压片机下进行压制得到生坯，压力为 500 MPa；生坯在管式炉中进行烧结，烧结温度为 1120 ℃，保温时间 1 h，烧结气氛为高纯氮气；锻造时将烧结毛坯重新加热到 1100 ℃，模具预热温度为 200 ℃；在表面涂覆一层玻璃防护润滑剂，防止毛坯在加热时氧化严重。密度测试采用阿基米德排水法。



图 10　粉末锻造实验模具

Fig.10 Experimental die of powder forging

烧结毛坯初始高度为 11.02 mm，密度为 6.6 g/cm^3（相对密度为 85%），经过热锻后高度为 8.4 mm，其整体密度为 7.47 g/cm^3（相对密度为 96.4%），与数值模拟结果（相对密度为 97.5%）是比较吻合的，误差为 1.13%。将气门圈烧结毛坯与锻件取断面并打磨抛光，观察孔隙分布，可以看出经过粉末锻造得到的气门座圈孔隙数量明显降低。

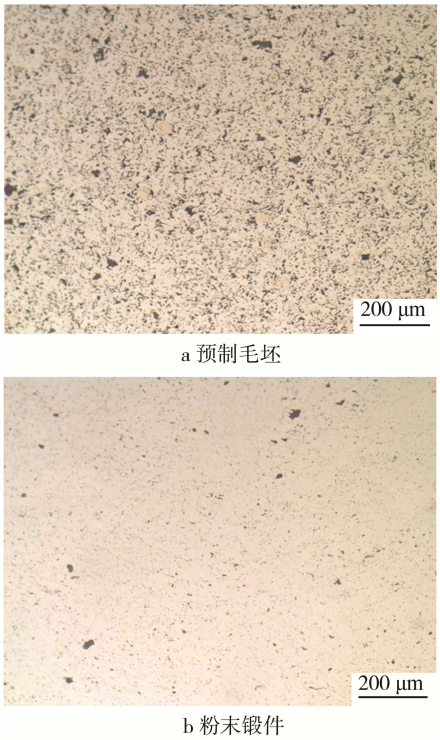


a 预制毛坯

b 粉末锻件

图 11 预制毛坯与粉末热锻后的气门座圈

Fig.11 Valve seat of powder sintered blanks and powder forging



a 预制毛坯

b 粉末锻件

图 12 粉末热锻前后的孔隙形貌（100×）

Fig.12 Pore morphology before and after powder forging (100×)

6 结论

1) 建立了气门座圈粉末锻造有限元模型，在该模型基础上，分析了不同工艺参数对粉末锻造过程中致密过程的影响规律，即提高预制毛坯的初始密度，较高的加热温度以及降低锻造速度均有利于减小锻造成形力。

2) 通过正交试验的方法模拟了坯料初始密度、锻造加热温度以及锻造速度 3 组参数对粉末锻件密度分布的影响，对锻件密度分布均匀性的影响程度分别为：锻造速度＞坯料初始密度＞坯料加热温度。提高预制毛坯的初始密度，降低加热温度以及提高锻造速度有利于提高粉末锻件相对密度的均匀性。

3) 粉末锻造工艺可以明显提高气门座圈的致密度，从烧结后的 6.6 g/cm^3 提高到 7.47 g/cm^3，致密度达到 96.4%。与数值模拟相比，误差为 1.13%，验证了气门座圈粉末锻造数值模型的可靠性。

参考文献：

[1] 傅茂林, 高洪林, 郭兰. 现代发动机气门座圈材料的发展[J]. 汽车技术, 2001(4): 24—27.
FU Mao-lin, GAO Hong-lin, GUO Lan. Development of Valve Seat Materials for Modern Engines[J]. Automobile Technology, 2001(4): 24—27.

[2] 朱远志, 尹志民, 曾渝, 等. 重型发动机气门座圈磨损机理与材料[J]. 内燃机工程, 2004, 25(4): 78—82.
ZHU Yuan-zhi, YIN Zhi-min, ZENG Yu, et al. Material and Wear Mechanism of Heavy Duty Engine Valve Seat[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2004, 25(4): 78—82.

[3] 李应, 宣天鹏, 戴泽玉, 等. 制备工艺对铁基粉末冶金气门座圈致密性和性能的影响[J]. 金属热处理, 2015(5): 102—106.
LI Ying, XUAN Tian-peng, DAI Ze-yu, et al. Effects of Preparing Process on Density and Properties Ofiron-based P/M Valve Seat[J]. Heat Treatment of Metals, 2015(5): 102—106.

[4] RATHORE S S, SALVE M M, DABHADE V V. Effect of Molybdenum Addition on the Mechanical Properties of Sinter-forged Fe-Cu-C Alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 649: 988—995.

[5] LIU S, HU J, WANG H, et al. A Study on Microstructures and Properties of P/M Valve Seats of Hot Forging by Laser Irradiation[J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(4): 758—762.

[6] 杨硕, 肖志瑜, 关航健, 等. 烧结和锻造态 Fe-2Cu-0.5C-0.11S 材料的组织与力学性能研究[J]. 粉末冶金技术, 2017, 35(1): 23—28.
YANG Shuo, XIAO Zhi-yu, GUAN Hang-jian, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Sintered and Forged Fe-2Cu-0.5C-0.11S Materials[J]. Powder Metallurgy Technology, 2017, 35(1): 23—28.

[7] 李萍, 薛克敏. 纯钼烧结体弹/塑性力学行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(4): 805—808.
LI Ping, XUE Ke-min. Study on Elasto-plastic Mechanical Behavior for Sintered Pure Mo Powder[J]. Rare Metal

Materials and Engineering, 2013, 42(4): 805—808.

[8] HUANG C C, CHENG J H. Forging Simulation of Sintered Powder Compacts Under Various Frictional Conditions[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44(3): 489—507.

[9] 周明智, 李萍, 薛克敏. 粉末烧结体镦粗成形过程热力耦合有限元分析[J]. 塑性工程学报, 2005, 12(6): 11—16.
ZHOU Ming-zhi, LI Ping, XUE Ke-min. Coupled Thermos-mechanical FEM Analysis of the Sintered Powder during Upsetting Process[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2005, 12(6): 11—16.

[10] 王宁, 李健, 关志军, 等. 工艺参数对钼粉烧结体近等温包套锻造成形过程中应变的影响[J]. 材料工程, 2015, 43(6): 46—51.
WANG Ning, LI Jian, GUAN Zhi-jun, et al. Effect of Processing Parameters on Strain Distribution During Near-isothermal Canned Forging for Molybdenum Powder Sinter[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(6): 46—51.

[11] ZHANG W, YONG L I U, LI W, et al. Numerical Simulation and Physical Analysis for Dynamic Behaviors of P/M TiAl Alloy in Hot-packed Forging Process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(4): 901—906.

[12] KIM K S. Analysis of the Powder Forging Processes for Vehicle Timing Belt Pulley by Finite Element Analysis[J]. Indian Journal of Science and Technology, 2015, 8(S1): 511—516.

[13] 庄武豪, 秦训鹏, 金秋. 内燃机连杆粉末锻造过程中致密性演化规律分析[J]. 精密成形工程, 2016, 8(3): 15—20.
ZHUANG Wu-hao, QIN Xun-peng, JIN Qiu. Evolution Laws of Relative Density of Connecting Rod Forged by Powder Forging Process[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 8(3): 15—20.

[14] 华林, 秦训鹏, 毛华杰, 等. 可压缩粉末烧结材料塑性变形与屈服条件[J]. 塑性工程学报, 2003, 10(6): 62—65.
HUA Lin, QIN Xun-peng, MAO Hua-jie, et al. The Plastic Deformation and Yield Criterion for Compressible Sintered Powder Materials[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2003, 10(6): 62—65.

[15] 黄永强, 申小平, 潘诗琰, 等. 粉末热锻凸轮的数值模拟[J]. 粉末冶金工业, 2016(2): 50—57.
HUANG Yong-qiang, SHEN Xiao-ping, PAN Shi-yan, et al. Numerical Simulation of Powder Hot Forging Cam[J]. Powder Metallurgy Industry, 2016(2): 50—57.