

内燃机连杆粉末锻造过程中致密性演化规律分析

庄武豪^{1,2}, 秦训鹏^{2,3}, 金秋³

(1. 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 武汉 430070; 2. 武汉理工大学 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 武汉 430070; 3. 武汉理工大学 汽车工程学院, 武汉 430070)

摘要: **目的** 提高内燃机连杆粉末锻造过程中连杆相对密度的均匀性。**方法** 首先提出了内燃机连杆烧结预制坯的设计方法,建立了内燃机连杆粉末锻造有限元模型。在该模型的基础上,揭示了内燃机连杆粉末锻造过程中的相对密度演化规律,进一步分析了烧结预制坯初始温度和成形速度对连杆相对密度演化的影响规律。**结果** 随着成形速度的增大和坯料初始温度的降低,连杆相对密度标准差有所降低。**结论** 降低烧结预制坯初始温度和增大成形速度能够提高连杆粉末锻造过程中连杆相对密度分布的均匀性。

关键词: 内燃机连杆; 粉末锻造; 相对密度; 有限元模拟

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.03.004

中图分类号: TG316 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2016)03-0015-06

Evolution Laws of Relative Density of Connecting Rod Forged by Powder Forging Process

ZHUANG Wu-hao^{1,2}, QIN Xun-peng^{2,3}, JIN Qiu³

(1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology of Automotive Parts, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

ABSTRACT: This study aimed to investigate the evolution laws of relative density of connecting rod forged by powder forging process. Firstly, the design method of preformed forge was proposed, and the evolution of relative density was analyzed using the FE simulation method. Then, the influences of initial temperature of the preformed forge and the forging speed on the relative density distribution were revealed. The results showed that, with increasing forging speed and decreasing initial temperature of the preformed forge, the relative density of connecting rod decreased. Therefore, the density homogeneity of connecting rod could be improved by decreasing the initial temperature of the preformed forge and increasing the forging speed.

KEY WORDS: connecting rod; powder forging process; relative density; FE simulation

内燃机连杆是内燃机中动能传输的关键零件,必须具有很高的动力学性能,因此通常要求采用锻造工艺进行制坯。目前普遍采用的连杆锻造工艺路线为:下料—坯料加热—多道次辊锻制坯—预锻成形—终锻成形—切边—校直,该工艺所获得的连杆存在着重

量一致性差、内部组织不均匀性大、后续装机调整困难等缺点,内燃机连杆难以满足高档次内燃机的配套质量要求。近年来,随着粉末锻造技术的发展,粉末锻造制坯已被越来越多地应用到连杆制造过程中。粉末锻造工艺是以金属粉末为原料,经预成形压制、

收稿日期: 2016-02-18

基金项目: 湖北省自然科学基金(2013CFA136)

作者简介: 庄武豪(1989—),男,江苏连云港人,博士研究生,主要研究方向为汽车零部件锻造成形工艺。

热烧结作为预制坯,再通过模锻进行锻造成形,有效地控制了产品重量离散度,改善了微观组织结构,提高了连杆的动力学性能,成为高性能连杆主要制造工艺方法,使得内燃机连杆粉末锻造成形工艺成为高性能内燃机连杆制造技术的重点发展方向^[1-2]。

目前,国内外众多学者已经在粉末锻造技术方面开展了大量工作。首先,国内外学者针对粉末锻造塑性成形理论展开了大量的研究,例如S.M. Doraivelu等学者对粉末材料的塑性理论和屈服条件进行了研究^[3],J.J. Park对粉末冶金材料的本构方程的建立进行了探讨^[4],华林等人基于粉末烧结材料广义塑性理论,研究和建立了粉末锻造中变形力和工件密度、尺寸计算公式^[5-6]。秦训鹏等人建立了粉末烧结材料广义塑性屈服条件^[7-8]。同时有关学者也对粉末锻造成形工艺开展了研究^[9-10]。此外,有关学者采用有限元分析技术研究了粉末烧结体在锻造过程中的变形行为以及致密性演化过程^[11-15]。然而,上述研究均局限于粉末材料塑性理论和形状简单的圆柱圆环粉末锻造成形工艺,对形状复杂的内燃机连杆粉末锻造的成形规律研究却尚未报道。因此,本文以某内燃机连杆为研究对象,提出内燃机连杆烧结预制坯的结构设计方法,建立内燃机连杆粉末锻造过程有限元模型。通过有限元模拟方法揭示烧结预制坯在模锻过程中的相对密度演化规律,进一步分析烧结预制坯温度以及成形速率对相对密度演化过程的影响规律。

1 连杆烧结预制坯设计方法

烧结预制坯的设计对粉末锻造连杆的成形效果和成形性能具有至关重要的影响。根据质量不变原则,提出了一种内燃机连杆烧结预制坯设计方法,其设计思路如下。

为尽可能提高材料利用率,将烧结预制坯的上下表面设计成与连杆终锻件相同的尺寸。

根据质量不变原则,在分型面区域设计备料层。该备料层的截面形状及尺寸为终锻件的分型面锻件截面形状及尺寸,备料层厚度可按照式(1)进行计算。

$$\Delta h = \frac{(\rho_1 - \rho_0)(V + V_f)}{\rho_0 \cdot S} \quad (1)$$

其中: Δh 为备料层厚度; ρ_0 为烧结预制坯的密度; ρ_1 为全致密连杆的密度; S 为分型面面积; V 为连杆终锻件体积; V_f 为飞边体积。

在烧结预制坯模锻过程中,备料层的金属将逐渐被压入模腔,从而使得连杆体的密度逐渐升高,最终

被压实。多余的金属将形成飞边。



图1 连杆烧结预制坯设计原理示意

Fig.1 Schematic diagram of the connecting rod preform design method

2 有限元模型

在Deform-3D有限元模拟软件平台上,建立了连杆粉末锻造成形有限元模型。在Deform-3D有限元软件中,烧结预制坯被设置为多孔型材料(porous object),该种材料类型在运算过程中被近似为可压缩刚粘塑性材料,但其在运算公式中包含了材料密度计算参数。该材料的应力应变参数需按照全致密状态下的金属属性进行设置,在运算过程中相对密度将被动态赋予每个网格单元,从而实现相对密度的近似运算。建立的连杆粉末锻造有限元模型如图2所示,由于该模型具有平面对称性,为减少运算量,建立1/2模型进行有限元模拟。该模型中,烧结预制坯材料为AISI-5140,模具材料为H13。对烧结预制坯采用四面体网格进行网格划分,总网格数为100 000,并且对上下模具进四面体网格划分,总网格数为60 000,该网格用于温度场的计算。此外,采用剪切摩擦模型用于定义模具与坯料间的摩擦条件,摩擦因子为 $m=0.3$ 。内燃机连杆粉末锻造成形的主要模型参数及工艺参数:坯料初始温度为1000℃,初始相对密度为0.8,上模进给速度为10 mm/s,模具初始温度为300℃,模具与坯料间热交换系数为11 000 W/(m²·℃),摩擦因子为0.3。



图2 内燃机连杆粉末锻造成形有限元模型

Fig.2 FM model of the powder forging of connecting rod

3 相对密度分布与演化规律分析

图3为连杆粉末锻造成形过程中的相对密度分布

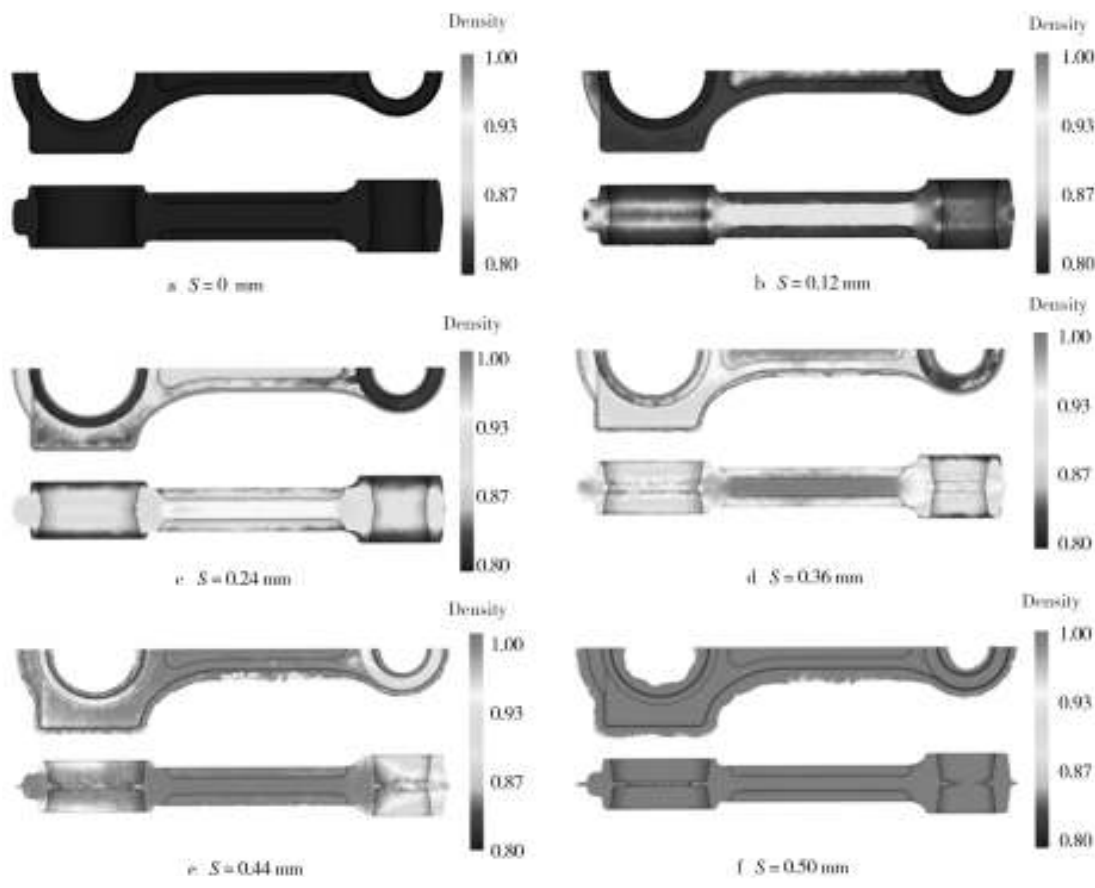


图3 不同上模压下量下连杆的相对密度分布云图

Fig.3 Relative density distribution on the connecting rod under different lower limit of upper die pressure

与演化云图。从图3中可以看出,随着上模的逐渐下压,连杆绝大部分区域的相对密度均逐渐增大,最终均能被压实(相对密度为1)。其中,中间杆部区域的相对密度增大最为迅速并且首先被压实,大端区域相对密度增大速度次之,小端区域的增大速度最小并且最后被压实。该现象与各部位的厚度存在差异有关,厚度差异导致了塑性变形程度的差异,如图4中的等效应变云图所示。对比图3和图4可以发现,相对密度分布和等效应变具有相似分布规律。由于中间杆部区域的厚度最小,因此应力最容易穿透,塑性变形累计最快,从而最早被压实。相反,小端区域的截面厚度最大,应力最难穿透,塑性变形在该区域累计最慢,因此相对密度增幅最小,该区域最难被压实。

从相对密度沿厚度方向的分布与演化规律可以看出,芯部区域的相对密度增长速度明显大于上下端面金属的相对密度增长速度。芯部区域首先被压实,上下端面最晚被压实。导致该现象的原因是,中部区域由于未受到模具型腔的限制,金属容易流动,因此塑性变形首先集中在该区域。并且从图6的粉末锻

造过程中温度与演化云图可以看出,由于上下端面区域与模具型腔接触,因热传导而导致温度明显下降,降低了金属的塑性;而中部区域的未与型腔接触,且由于变形产热而使得温度出现升高趋势,进一步提高了金属的塑性,因此沿厚度方向(从上下端面到中部区域)金属越容易被压实。

为了揭示连杆粉末热锻过程中压实程度和压实均匀性演化规律,研究了连杆相对密度平均值和标准差的演化趋势,如图6所示。从图6中可以看出,在锻造过程中,连杆相对密度平均值基本呈线性增长趋势,该曲线说明,随着上模压下量的增大,坯料逐渐被压实,且压实速率较为平稳。然而,相对密度标准差曲线呈现先逐渐增大而后迅速减小趋势。产生该现象的原因是:在锻造过程中,连杆各位置的压实程度并不均匀,从而导致连杆的相对密度均匀性逐渐降低。当局部区域被压实后,连杆整体相对密度标准差开始逐渐减小,直至连杆被全部压实。连杆压实程度的不均匀会造成连杆组织的不均匀分布,并且容易引起连杆内部出现潜在裂纹等缺陷,因此应设法提高粉

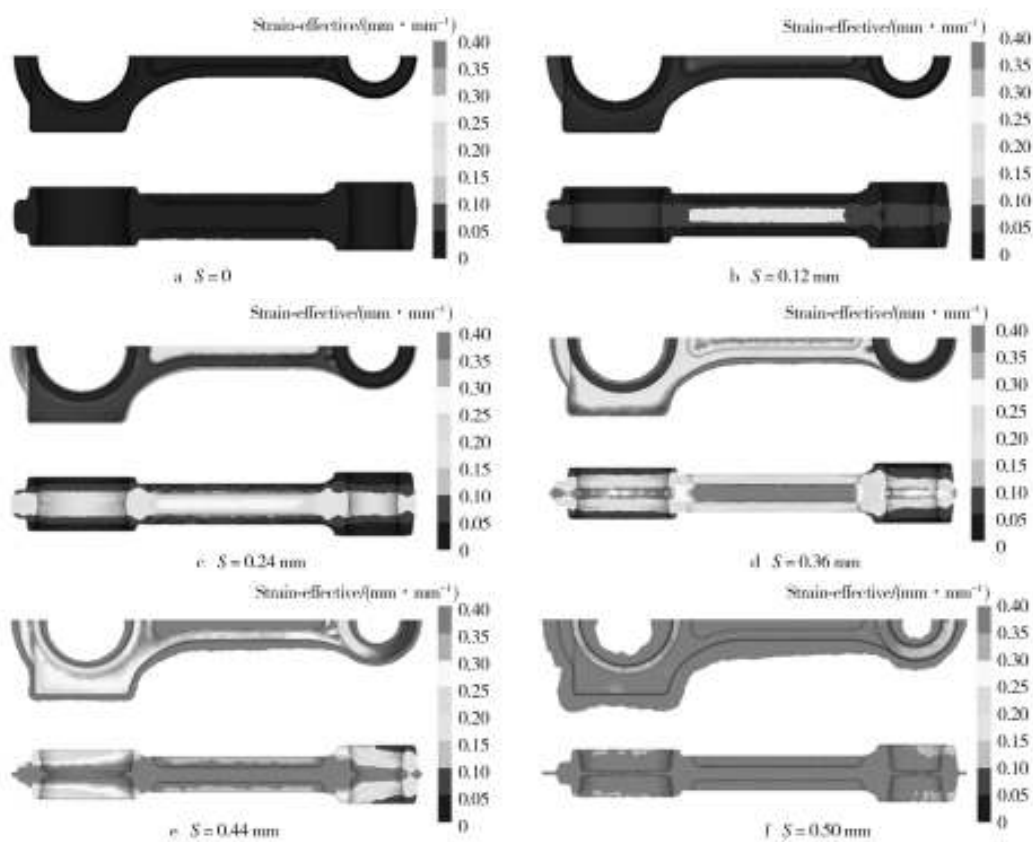


图4 不同上模压下量下连杆的等效应变分布云图

Fig.4 Effective strain distribution on the connecting rod under different lower limit of upper die pressure.

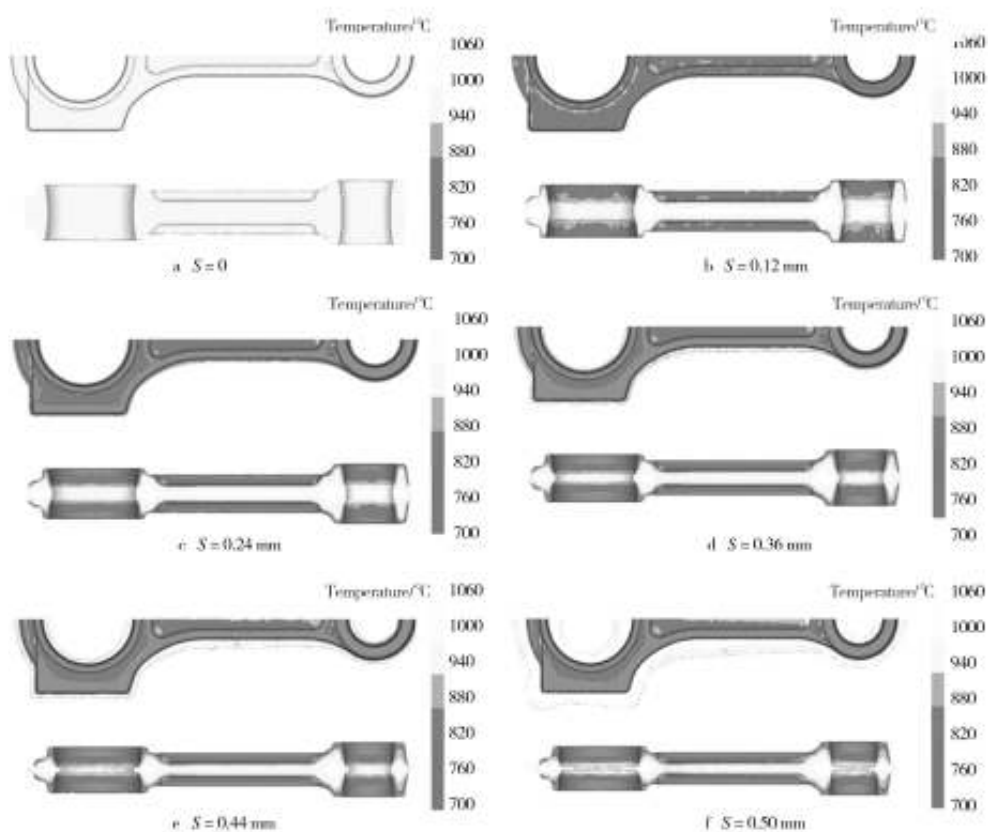


图5 不同上模压下量下连杆的温度分布云图

Fig.5 Temperature distribution on the connecting rod under different lower limit of upper die pressure

末锻造过程中相对密度的均匀性。

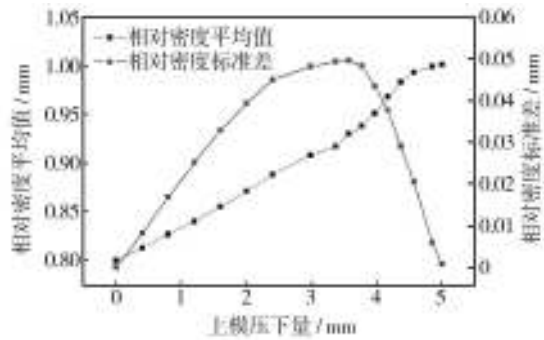


图6 相对密度平均值与标准差演化曲线

Fig.6 Average value and standard deviation of relative density

4 工艺参数对相对密度影响规律

在上述究的基础上,进一步研究了初始温度和成形速度对连杆相对密度的影响规律。对应的研究方案如下。

方案1:为研究初始温度 t 对连杆相对密度的影响规律,选取 t 为900, 950, 1000, 1050, 1100 $^{\circ}\text{C}$,其余参数同第3节有限元模型参数,进行模拟计算。

方案2:为研究成形速度 v 对连杆相对密度的影响规律,选取 v 为6, 8, 10, 12, 14 mm/s,其余参数同第3节有限元模型参数,进行模拟计算。

4.1 初始温度对相对密度影响规律

为研究初始温度对粉末冶金连杆压制成形锻件相对密度的影响规律,揭示了不同初始温度下的相对密度平均值和标准差的演化曲线,如图7和图8所示。从图7可以看出,随着初始温度的升高,锻件的相对密度平均值曲线差异不大,说明初始温度对连杆压实程度影响甚微。随着初始温度的降低,连杆相对密度标准差却呈减小趋势,如图8所示。产生该现象

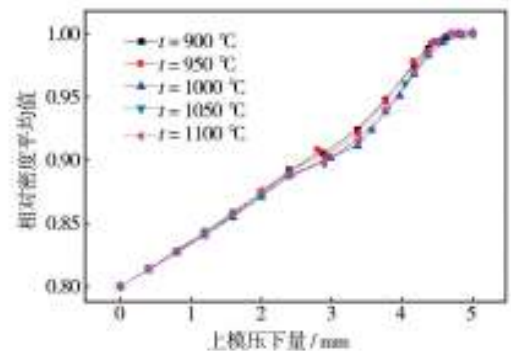


图7 初始温度对连杆相对密度均值的影响曲线

Fig.7 Influence of t on the average value of relative density of the connecting rod

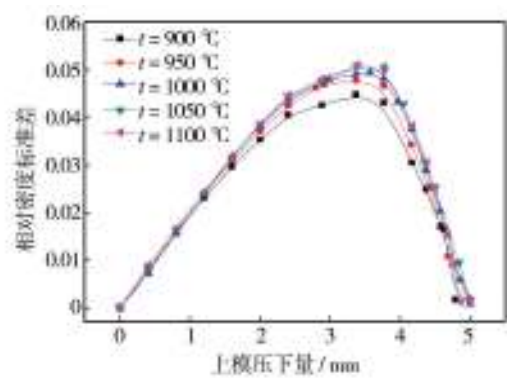


图8 初始温度对连杆相对密度标准差的影响曲线

Fig.8 Influence of t on the standard deviation of relative density of the connecting rod

的原因是,较高的烧结预制坯初始温度,导致较大的模具与坯料间的温差,从而导致较大的热传导散热,使得坯料的温度梯度有所提高。增大的温度梯度导致锻件表面与芯部的金属塑性差异性增大,从而导致金属不均匀变形加剧,最终导致连杆相对密度均匀性降低。图9为不同 t 下连杆小端某截面上沿厚度方向的温度分布曲线。从图9可以直观地看出随着 t 的增大,该截面上沿厚度方向的温度差有所提高,从而证实了上述推论。

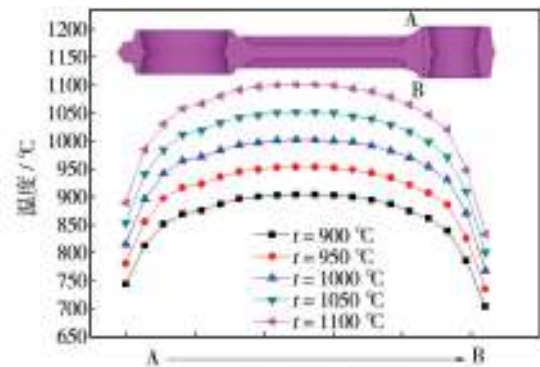


图9 不同初始温度下连杆厚度方向上的温度分布曲线

Fig.9 Temperature distribution along the thickness of the connecting rod at different t

4.2 成形速度对相对密度影响规律

图10、图11分别为不同成形速度下连杆相对密度平均值和相对密度标准差的演化规律。从图10可以看出,不同成形速度下连杆相对密度平均值无明显变化,说明成形速度对连杆整体压实程度无明显影响。然而,成形速度对锻造过程中的连杆相对密度标准差的演化过程却有明显影响。随着成形速度的增大,连杆相对密度标准差有所降低,这是因为较大的成形速度使得成形时间缩短,导致因热传导而造成的坯料表面的降温幅度减小,坯料芯表温差有所降低,温度分布

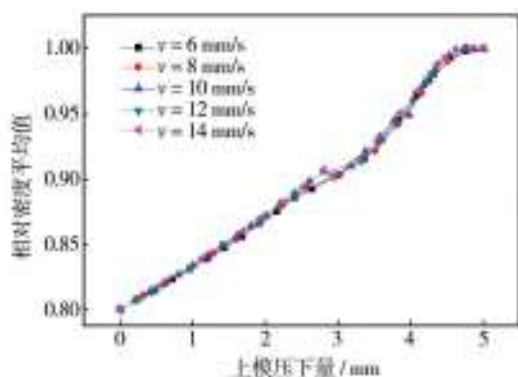


图10 成形速度对连杆相对密度均值的影响曲线

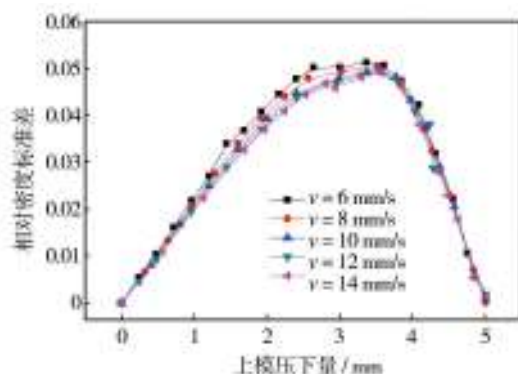
Fig.10 Influence of v on the average value of relative density of the connecting rod

图11 成形速度对连杆相对密度标准差的影响曲线

Fig.11 Influence of v on the standard deviation of relative density of the connecting rod

更均匀。图12为不同成形速度下连杆小端某截面上沿厚度方向的温度分布曲线。更为均匀的温度分布使得坯料从表面到芯部的金属塑性更均匀,从而使得塑性变形更均匀,因此锻件相对密度的分布也更为均匀。

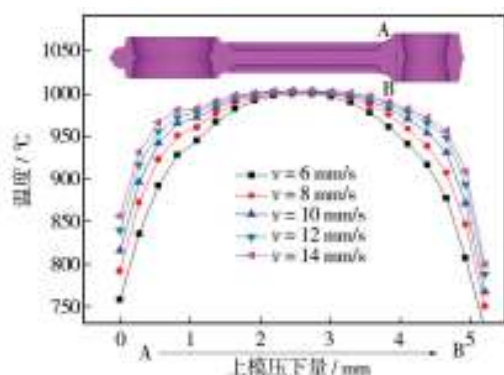


图12 不同成形速度下连杆厚度方向上的温度分布曲线

Fig.12 Temperature distribution along the thickness of the connecting rod at different v

5 结论

提出了内燃机连杆粉末锻造所需烧结预制坯的

设计方法,建立了内燃机连杆粉末锻造有限元模型。在该模型的基础上,揭示了内燃机连杆粉末锻造过程中的相对密度演化规律,进一步分析了工艺参数对连杆相对密度的影响规律,所得结论如下。

1) 随着上模压下量的增大,连杆相对密度平均值逐渐增大,烧结预制坯最终被压实为全致密锻件,证实了所提出的烧结预制坯设计方法的有效性。

2) 随着上模压下量的增大,连杆相对密度标准差先增大后减小,说明了粉末连杆锻造过程中的压实程度的不均匀性。

3) 降低烧结预制坯初始温度和增大成形速度均能够提高连杆粉末锻造过程中的相对密度均匀性,有利于提高连杆质量。

参考文献:

- [1] 洪慎章,曾振鹏. 发动机连杆的粉末锻造工艺[J]. 模具技术,2000(2):52—56.
HONG Shen-zhang, ZENG Zhen-peng. The Powder Forging Technology of the Connecting Rods of the Engine[J]. Die and Mould Technology, 2000(2):52—56.
- [2] 李森蓉,王爱华,李念辛. 粉末锻造发动机连杆的发展[J]. 粉末冶金工业,1995(5):185—188.
LI Seng-rong, WANG Ai-hua, LI Nian-xin. Development of Power Forging Process for Producing Engine Connecting Rods [J]. Powder Metallurgy Industry, 1995(5):185—188.
- [3] DORAIVELU S M, GEGEL H L, GUNASEKERA J S, et al. A New Yield Function for Compressible Materials[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1984, 26 (9—10): 527—535.
- [4] PARK J J. Constitutive Relations to Predict Plastic Deformations of Porous Metals in Compaction[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1995, 37(7):709—719.
- [5] 华林,毛华杰,赵仲治. 粉末冶金锻造变形力和密度计算[J]. 粉末冶金工业,2000,10(1):32—35.
HUA Lin, MAO Hua-jie, ZHAO Zhong-zhi. Calculation of Pressure and Densification for Powder Forging[J]. Powder Metallurgy Industry, 2000, 10(1):32—35.
- [6] HUA Lin, QIN Xun-peng, MAO Hua-jie, et al. Plastic Deformation and Yield Criterion for Compressible Sintered Powder Materials[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 180(1—3):174—178.
- [7] QIN Xun-peng, HUA Lin. Deformation and Strengthening of Sintered Ferrous Material[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187/188:694—697.
- [8] 秦训鹏. 烧结材料三维变形广义上限元理论与应用研究[D].武汉:武汉理工大学,2008.

(下转第29页)

- Using a Silicon Die[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 225: 375—384.
- [4] XU J, ZHU X, SHAN D, et al. Effect of Grain Size and Specimen Dimensions on Micro-forming of High Purity Aluminum[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 646: 207—217.
- [5] JOO B Y, S I OH, et al. Forming of Micro Channels with Ultra Thin Metal Foils[J]. CIRP Annals -Manufacturing Technology, 2004, 53(1): 243—246.
- [6] 方文利, 唐鼎, 李大永, 等. 微通道扁管挤压成形模拟及焊接质量的预测[J]. 塑性工程学报, 2015, 22(1): 12—17.
- FANG Wen-li, TANG Ding, LI Da-yong, et al. Extrusion Forming Simulation of Microchannel Flat Tube and Welding Quality Prediction[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22(1): 12—17.
- [7] CHAN W L, FU M W, LU J. The Size Effect on Micro Deformation Behavior in micro-scale Plastic Deformation[J]. Materials & Design, 2011, 32(1): 198—206.
- [8] 梁信, 陈康华, 陈学海, 等. 等温锻造速率对 7085 铝合金组织与性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2011(4): 290—295.
- LIANG Xin, CHEN Kang-hua, CHEN Xue-hai, et al. Effect of Isothermal Forging Rate on Microstructure and Properties of 7085 Aluminum Alloy[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2011(4): 290—295.
- [9] MOUSAVI SAAA, FEIZI H, MADOLIAT R. Investigations on the Effects of Ultrasonic Vibrations in the Extrusion Process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 187—188: 657—661.
- [10] BUNGET C, NGAILE G. Influence of Ultrasonic Vibration on Micro-extrusion[J]. Ultrasonics, 2011, 51(5): 606—616.
- [11] BAI Y, M YANG. Optimization of Metal Foils Surface Finishing Using Vibration-assisted Micro-forging[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(1): 21—28.
- [12] 吴晓, 李建军, 郑志镇, 等. 振动场作用下金属塑性成形机理的研究和应用进展[J]. 塑性工程学报, 2015, 22(4): 1—6.
- WU Xiao, LI Jian-jun, ZHENG Zhi-zhen, et al. Research and Application Progress of Metal Plastic Forming Mechanism under Vibration Field[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2014, 214(1): 21—28.
- [13] 李旭棠. 微观尺度下的摩擦机理与测试方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- LI Xu-tang. Study on Friction Mechanism and Test in Micro Scale Forming[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [14] LANGENECKER B. Effects of Ultrasound on Deformation Characteristics of Metals[J]. IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, 1966, 13(1): 1—8.
- [15] IZUMI O, OYAMA K, SUZUKI Y. Effects of Superimposed Ultrasonic Vibration on Compressive Deformation of metals[J]. Transaction of the Japan Institute of Metals, 1966, 7(3): 162—167.
- ~~~~~
- (上接第 20 页)
- QIN Xun-peng. Research on Theory and Application of 2D GUBET for Sintered Power Metallurgy Materials[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
- [9] 龚小涛, 胡亚民, 杨帆. 摆动辗压成形在粉末冶金件生产上的应用[J]. 精密成形工程, 2011, 3(5): 50—54.
- GONG Xiao-tao, HU Ya-min, YANG Fan. The Application of Rotary Forging in Powder Metallurgy[J]. Journal of Net-shape Forming Engineering, 2011, 3(5): 50—54.
- [10] 洪慎章. 粉末锻造在国外轿车生产中的应用[J]. 精密成形工程, 2011, 3(4): 47—49.
- HONG Shen-zhang. Application of Powder Forging on External Closed Car Production[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2011, 3(4): 47—49.
- [11] 王德广, 吴玉程, 焦明华, 等. 不同压制工艺对粉末冶金制品性能影响的有限元模拟[J]. 机械工程学报, 2008, 44(1): 205—211.
- WANG De-guang, WU Yu-cheng, JIAO Ming-hua, et al. Finite Element Simulation of Influence of Different Compacting Processes on Powder Metallurgic Products Properties[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(1): 205—211.
- [12] 李永志. 粉末锻造致密规律及过程模拟的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004.
- LI Yong-zhi. Study on Deformation and Densification Law of Powder Forging and Numerical Simulation of Forging Process[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2004.
- [13] 周明智, 李萍, 薛克敏. 粉末烧结体锻造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 Thermo-mechanical FEM Analysis of the Sintered Powder during Upsetting Process[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2005, 12(6): 11—16.
- [14] 仇珩宇. Ti/Al 粉末体塑性变形行为及锻造过程数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- QIU Heng-yu. Study on the Plastic Deformation Behavior and Numerical Simulation of Forging Process of Ti/Al Powder compact[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [15] 陈其玲. 粉末热锻零件性能影响因素研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- CHEN Qi-ling. Research on the Related Factors of the Performance of Powder Hot Forging Parts[D]. Hefei: Hefei University, 2013.