

基于叶型特征重建和缺陷模型提取的 LDMD 叶片再制造*

王涛¹ 丁华鹏¹ 刘一骝² 雷剑波³

(1. 中国民航大学机械电子工程系, 天津 300300; 2. 挪威科技大学生产与质量工程系, 特隆赫姆 7050;
3. 天津工业大学激光技术研究所, 天津 300387)

摘要: 为了实现激光直接沉积(LDMD)对破损叶片的再制造,提出了一种利用设计特征重建叶型曲线(CSC)的方法,并提取缺陷3D模型。首先,规划了叶片再制造系统结构;接着,基于叶型曲线设计特征,对前缘(LE)、后缘(TE)、吸力边(SS)和压力边(PS)在叶型点云中的位置进行识别,然后利用圆弧曲线以背离度和拟合误差作为2个阈值,实现对前缘和后缘的拟合,同时实现叶型点云的分割;再利用6次多项式曲线,在保证与前后缘曲线相切的约束条件下,用最小二乘法实现对吸力边和压力边的拟合,从而得到完整的叶型曲线;接着放样叶型曲线得到完好的目标模型,并采用布尔减运算提取了缺陷3D模型;最后,给出了一个叶片再制造应用实例,证明了方法的可行。

关键词: 叶片 缺陷模型 激光直接沉积 再制造

中图分类号: TH166; V263 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)08-0333-05

LDMD-oriented Blade Remanufacturing Based on CSC Character Reconstruction and Defect Model Extraction

Wang Tao¹ Ding Huapeng¹ Liu Yiliu² Lei Jianbo³

(1. Department of Mechanical Electronic Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China
2. Department of Production and Quality Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim 7050, Norway
3. Research Center of Laser Technology, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

Abstract: The blades of gas turbine are usually long-term operated in harsh environments. Due to high temperature and pressure in operation, as well as many external impacts, blades may have various defects, such as erosion, distortion, wear, cracks and impact dents. In order to implement the remanufacturing of defective blade with laser direct material deposit (LDMD), cross-section curve (CSC) was reconstructed based on design characters and defect 3D model was extracted. First, the remanufacturing system structure of blade was given. Second, on the basis of CSC design characters, the positions of leading edge (LE), trailing edge (TE), suction side (SS) and pressure side (PS) were identified in cross-section point cloud. In order to obtain LE and TE, the circle curves were utilized to fit the data points with the deviation of point from the circle and fitting error as threshold values. Meanwhile, the cross-section point cloud was segmented. And under the constraint condition of tangency to LE and TE, a sixth degree polynomial function was selected to fit the SS and PS by using the least square method. After some whole CSCs were obtained, the perfect blade airfoil model can be achieved by lofting them. Sequentially, defect 3D model for LDMD was extracted in Boolean subtraction. At last, an application of blade remanufacturing was given, which proved that the method was feasible, and the future research direction was also proposed.

Key words: Blade Defect model Laser direct material deposit Remanufacturing

收稿日期: 2014-10-27 修回日期: 2014-11-20

* 国家自然科学基金民航联合研究基金资助项目(U1333121)和天津市应用基础与前沿技术研究计划资助项目(青年项目)(14JCQNJC05000)

作者简介: 王涛,副教授,博士,主要从事数控技术、航空部件数字化制造与修复技术研究, E-mail: wangtaotdme@163.com

引言

燃气轮机广泛应用于航空、船舶、发电等行业,其热端部件如叶片,长期工作在高温、高压等恶劣的工况条件下,且有时也会受到外物的撞击,因此,燃气轮机叶片工作一段时间后,时常出现一些不同程度和不同部位的损坏,更换新叶片,价钱昂贵,再制造损坏的叶片成为高性价比的选择。Oguzhan Yilmaz 等^[1-2]和 Gao 等^[3-4]对叶片的自动修复技术进行了系统的研究,提出了一种叶片自动化修复的集成化解决方案;Zheng 等^[5]设计了一个对破损叶片进行激光焊接自动再制造的技术解决方案,提出了一种叶片破损边界点云的自动识别方法,从几何学的角度对叶片进行修补重构,用于激光焊接机的自动驱动,但其对破损边界的识别依赖于叶片原始的设计模型,致使该方法有一定的局限性。董玲等和杨洗陈等^[6-8]针对自由曲面破损零件激光再制造路径的生成进行了研究,基于逆向工程得到的点云三角网格模型,研究了激光加工的路径自动生成算法。Brant 等^[9]将激光再制造技术用于低压压气机叶片的再制造,延长了叶片的服务周期,取得了较好的效果。Huang 等^[10-12]给出一种基于样板优化的轮廓拟合方法,但该方法忽略了待修叶片的蠕变造成原始设计模型不可用这一问题。Wang 等^[13-14]针对叶片的再制造进行了逆向建模的研究,为叶片的自动焊接和数控加工提供目标模型,Cecil 等^[15-16]主要对用于堆焊的破损模型的提取方法进行了研究。任乃飞等^[17]对选择性激光烧结金属粉末材料进行了研究,指出航空航天上所用的结构件可用激光快速成型获得。

激光直接沉积(Laser direct material deposit, LDMD)技术,也称激光熔敷技术,对叶片的热注入量少、能量精细可控、热影响区极小、再制造组织细密、材料选择面比较广,易于实现自动化和规范化,相比其他再制造方法有明显的优势^[18-19]。实现 LDMD 自动化的先决条件是首先获取待修叶片的缺陷模型,作为沉积的目标模型。但叶片使用一段时间后,其叶型已不同于原始的设计模型,使用一段时间后对其进行扫描得到逆向模型的叶型曲线,其与原始设计叶型曲线存在一定的差异。本文基于特征重建思想,重建叶片未损坏部分的叶型曲线(Cross-section curve, CSC),然后放样这些叶型曲线重建完好的目标模型,再提取出缺陷部位 3D 模型,用于 LDMD 对叶片的再制造。

1 叶片再制造系统结构

如图 1 所示为叶片再制造的系统结构。损坏的叶片由 3D 视觉测量系统进行测量获得叶片的点云数据模型,接着对数据点进行去噪和光滑处理,经过处理的叶片点云进入逆向系统进行模型缺陷提取。逆向系统一方面利用现有有点云重构出有缺陷的叶片 3D 模型;另一方面重建出叶片的再制造目标模型。叶片再制造目标模型重建过程中,首先重建叶片未破损部位的叶型曲线 CSC,然后通过对这些曲线进行放样得到无缺陷的再制造叶片目标模型,最后通过对比缺陷模型和无缺陷的目标模型,进行布尔减运算得到缺陷部位的 3D 模型,用于 LDMD 对叶片的再制造。

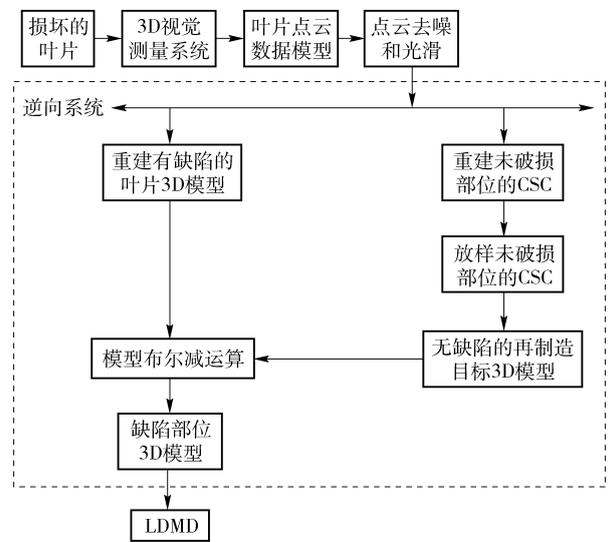


图 1 叶片再制造系统结构

Fig. 1 Structure of blade remanufacturing system

2 叶片缺陷模型提取

2.1 基于设计特征的叶片叶型曲线重建

由第 1 节叶片再制造系统的构建描述可知,叶型曲线 CSC 是重建叶片目标模型的一个关键点。如图 2a 所示,在叶片破损区域两侧, CSC1 和 CSC2 为可能获得的完好叶型曲线,叶片首先通过光学扫描仪测量后得到的是点云,然后可以截取如图 2b 所示的叶型点云,通过拟合叶型点云就可以获得叶型曲线。关于叶型点云的拟合,B 样条曲线是很多逆向工程研究人员常用的方法,不可否认 B 样条曲线拟合精度高,但缺点是它仅从几何拟合精度角度考虑,而忽略了叶型本身的设计特点以及后续叶片数控自动焊接和数控自动加工。

从设计上,叶型曲线由前缘 LE(Leading edge)、后缘 TE(Trailing edge)、吸力面 SS(Suction side)和压力面 PS(Pressure side)4 条边构成,因此可将

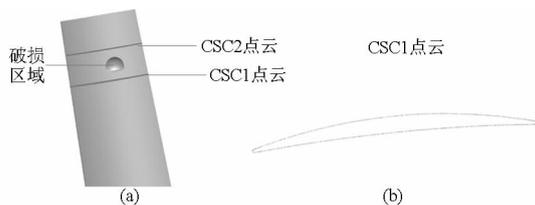


图 2 叶片及叶型点云

Fig. 2 Blade and its CSC point cloud

图 2b 的叶型点云分成 4 个数据点集,分属于这 4 条边,采用叶型设计曲线分别对 4 个数据点集进行拟合,确定叶型曲线常数项,从而构建出叶型曲线的数学模型。

2.1.1 前缘 LE 和后缘 TE 的重建

由叶型设计知,前缘 LE 和后缘 TE 是两段圆弧曲线,吸力面 SS 和压力面 PS 是高次多项式曲线,采用下述方法对这 4 条边的大致位置进行识别。如图 3 所示,找到点云中距离最大的 2 个点,标记为 A 点和 B 点,按照叶片弦长的定义知线段 AB 为叶片的弦, C 为点云中距离线段 AB 最远的点;接下来确定 LE 和 TE 的位置,A 点和 B 点距离 C 点最近的为 LE 所在位置,即为图中 A 点的位置,较远的为 TE 所在位置,即为 B 点位置;最后确定 SS 和 PS 的位置,计算距离线段 AB 中点 D 最近的点,标记为 E 点,则 PS 在 E 点处,SS 在 C 点处^[20],并且以 A 点为起点对叶型数据点进行编号。

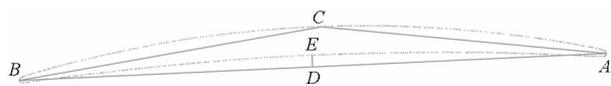


图 3 LE、TE、SS 和 PS 边的位置识别

Fig. 3 Position identification of LE, TE, SS and PS

前缘 LE 的重建过程:以 A 点为起点,并作为一个基本点集,把基本点集向前后 2 个方向进行循环扩展,设立新点相对拟合圆的背离度和曲线拟合误差 2 个阈值。同时计算前后两个点 a 和 b,在同时满足背离度的条件下,曲线拟合误差小的点被加入到点集;如点 a 满足背离度,点 b 不满足,则点 a 加入到点集;如果 2 个点都不满足背离度,则拟合过程结束,得到的圆弧为 LE 曲线。该过程如图 4 所示,首先拟合得到起始圆,然后向两侧扩展数据点,最后获得 LE 圆。同理,依此方法可获得 TE 的曲线。

2.1.2 吸力面 SS 曲线和压力面 PS 曲线重建

获得 LE 圆和 TE 圆后,自然就得到了属于 SS 边和 PS 边的数据点集。高次多项式是构造 SS 和 PS 边的最常用曲线,本文采用 6 次多项式对 SS 和 PS 边的数据点进行拟合,即

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 + a_5x^5 + a_6x^6$$

一阶导数为

$$y' = a_1 + 2a_2x + 3a_3x^2 + 4a_4x^3 + 5a_5x^4 + 6a_6x^5$$

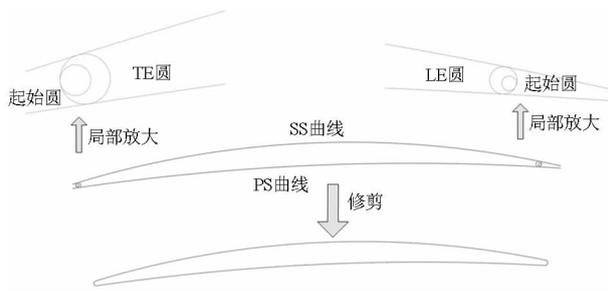


图 4 叶型曲线的重建

Fig. 4 CSC reconstruction

多项式参数的确定需要选取 7 个已知坐标量,且由于 SS(或 PS)边分别与 TE 和 LE 相切,受 2 个相切条件的约束。故从 SS(或 PS)的点云中选取 5 个数据点,再加上 2 个相切条件,就能确定方程中的 7 个常量参数,采用最小二乘法,遍历整个 SS(或 PS)的数据点集,选取曲线拟合误差最小的那一组参数拟合出的曲线为最终结果。图 4 所示为图 3 叶型数据点的拟合结果,最后进行修剪就得到完好的叶型曲线。

2.2 缺陷模型提取

如图 5 所示,通过放样叶型曲线 CSC1 和 CSC2,得到重建的目标模型,接着将目标模型与有缺陷的模型进行布尔减运算,得到缺陷部位的 3D 模型,该模型可用于 LDMD 对叶片的再制造。表 1 所示为叶片典型缺陷及其缺陷模型提取。

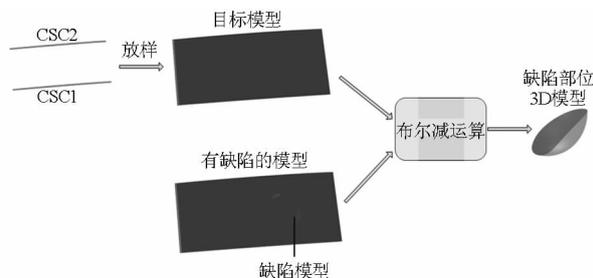


图 5 缺陷模型提取过程示意

Fig. 5 Defect model extraction process

3 应用实例

本文研究的方法在实际叶片再制造中进行了应用。如图 6a 所示为某一钢厂所使用的汽轮机,其上的部分叶片出现了损坏。图 6b 为要再制造的该汽轮机叶片,叶片的吸力面存在凹坑和气蚀。再制造技术要求为:将缺陷部位通过 LDMD 进行再制造,恢复原来形状尺寸。因无原始图纸,再制造部位的形状和尺寸精度可依原件相关部位圆滑过渡。采用的再制造设备主要有:Handyscan 3D 型扫描仪,基于工业机器人的激光再制造系统(图 7),数控加工中心 1 台(套)。经过 LDMD 再制造的效果如图 6c 所示,经钳工加工修正后的叶片如图 6d 所示。经检

表1 叶片典型缺陷及其缺陷模型提取
Tab.1 Typical defect of blade and defect model extraction

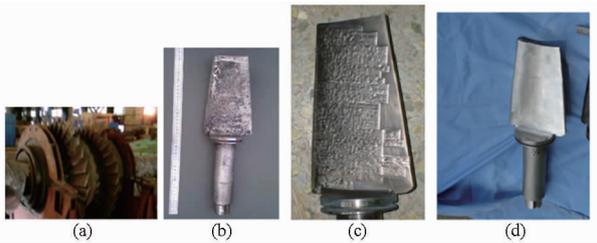
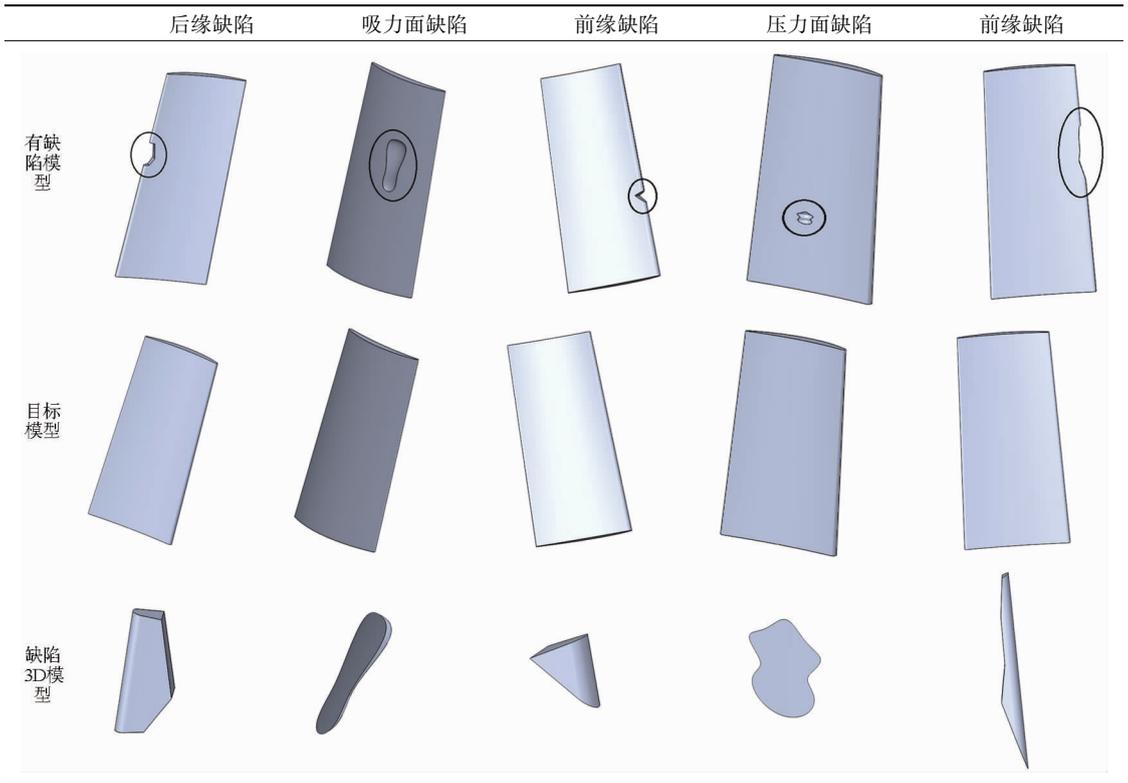


图6 叶片再制造前后对比

Fig.6 Comparison of defect blade and remanufactured blade



图7 基于工业机器人的激光再制造系统

Fig.7 Laser remanufacturing system

based on industrial robot

1. 光纤
2. 激光器
3. 激光工作头
4. 视觉监视
5. 工作站
6. 机器人控制系统
7. 机器人
8. 送粉系统

验叶片符合实际工作要求后,重新投入了使用。

4 结束语

设计了一个叶片 LDMD 再制造的系统结构,并基于叶片叶型曲线的设计特征,研究了基于设计特征重建叶片的叶型曲线和叶片再制造的目标模型,

在此基础上提取缺陷部位的 3D 模型,用于 LDMD 再制造。在叶片的实际再制造应用中可以看出,该方法可行的。

参 考 文 献

- 1 Oguzhan Yilmaz, Dominic Noble, Nabil N Z Gindy. A study of turbomachinery components machining and repairing methodologies [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2005, 77(6): 455-466.
- 2 Oguzhan Yilmaz, Nabil Gindy, Jian Gao. A repair and overhaul methodology for aeroengine components [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26(2): 190-201.
- 3 Gao J, Chen X, Zheng D T, et al. Adaptive restoration of complex geometry parts through reverse engineering application [J]. Advances in Engineering Software, 2006, 37(9): 592-600.
- 4 Gao Jian, Chen Xin, Oguzhan Yilmaz, et al. An integrated adaptive repair solution for complex aerospace components through geometry reconstruction [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 36(11-12): 1170-1179.
- 5 Zheng J, Li Z, Chen X. Worn aera modeling for automating the repair of turbine blades [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 29(9-10): 1062-1067.

- 6 董玲,杨洗陈,张海明,等.自由曲面破损零件激光再制造修复路径生成[J].中国激光,2012,39(7):1-6.
Dong Ling, Yang Xichen, Zhang Haiming, et al. Path generation for repairing damaged parts of free-form [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(7): 1-6. (in Chinese)
- 7 董玲,杨洗陈,雷剑波,等.基于机器视觉的激光再制造机器人离线自动编程研究[J].中国激光,2012,40(10):1-8.
Dong Ling, Yang Xichen, Lei Jianbo, et al. Off-line automatic programming research of laser remanufacturing robot based on machine vision [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 40(10): 1-8. (in Chinese)
- 8 杨洗陈,张海明,刘立峰,等.激光再制造机器人光视觉技术进展[J].中国激光,2011,38(6):1-11.
Yang Xichen, Zhang Haiming, Liu Lifeng, et al. Machine vision in laser remanufacturing robot [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6): 1-11. (in Chinese)
- 9 Brant M, Sun S, Bishop A. Laser repair of steam turbine blades [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(12): 3240-3244.
- 10 Huang H, Gong Z M, Chen X Q, et al. Smart robotic system for 3D profile turbine vane airfoil repair [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 21(4): 275-283.
- 11 Huang H, Gong Z M, Chen X Q, et al. Robotic grinding and polishing for turbine-vane overhaul [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 127(2): 140-145.
- 12 Gong Z M, Chen X Q, Huang H. Optimal profile generation in distorted surface finishing [C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2000: 1557-1562.
- 13 Wang T, Liu Y, Wang L, et al. Digitally reverse modeling for the repair of blades in aero-engines [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 141(1): 258-263.
- 14 Wang T, Liu Y, Tang J, et al. Study on the curve reconstructing in the process of blade repairing [J]. Advanced Materials Research, 2013, 819: 86-90.
- 15 Cecil Piya, Michael Wilson J, Sundar Murugappan, et al. Virtual repair: geometric reconstruction for remanufacturing gas turbine blades [C] // ASME 2011 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, 2011: 895-904
- 16 Wilson J M, Piya C, Shin Y C, et al. Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 80(1): 170-178.
- 17 任乃飞,曹松.选择性激光烧结金属粉末材料的研究进展[J].农业机械学报,2005,36(8):147-153.
Ren Naifei, Cao Song. Research advances of metallic powder materials by selective laser sintering [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(8): 147-153. (in Chinese)
- 18 符永宏,杨巍,张华伟,等.激光微造型凸轮廓的摩擦磨损[J].农业机械学报,2010,41(1):216-219.
Fu Yonghong, Yang Wei, Zhang Huawei, et al. Friction and wear of cam with laser micro-texture under lubrication [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 216-219. (in Chinese)
- 19 郭浩,马钦,张胜利,等.基于三维重建的动物体尺度获取原型系统[J].农业机械学报,2014,45(5):227-232.
Guo Hao, Ma Qin, Zhang Shengli, et al. Prototype system of shape measurements of animal based on 3D reconstruction [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 227-232. (in Chinese)
- 20 Mohaghegh K M H, Siadeghi A, Abdullah A. Reverse engineering of turbine blades based on design intent [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32(9-10): 1009-1020.

(上接第360页)

- 14 Paul Beiss. 粉末冶金零件的粉末成形压机、模架及成形能力发展趋向[J].粉末冶金工业,2011,21(5):12-20.
Paul Beiss. Trends in powder presses, tooling and shaping capabilities for PM parts [J]. Powder Metallurgy Industry, 2011, 21(5): 12-20. (in Chinese)
- 15 董林峰.粉末金属成形中的缺陷预测与成形过程的计算机仿真[D].上海:上海交通大学,2001.
Dong Linfeng. Defects prediction during metal powder compaction and computer simulation of compaction process [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2001. (in Chinese)
- 16 汪俊,李丛心,阮雪榆.基于实验参数修正的粉末金属压制过程数学模型[J].上海交通大学学报,2000,34(3):322-325.
Wang Jun, Li Congxin, Ruan Xueyu. Mathematical model of powdered metal compacting process based on modified experimental parameters [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2000, 34(3): 322-325. (in Chinese)
- 17 Skonecki S, Kulig R, Łysiak G. Models of pressure compaction and their application for wheat meal [J]. International Agrophysics, 2014, 28(1): 125-130.
- 18 俞建卫,刘岳,焦明华,等.粉末冶金压制成形受力情况的研究[J].粉末冶金工业,2012,22(2):49-54.
Yu Jianwei, Liu Yue, Jiao Minghua, et al. Study on force in powder metallurgy molding [J]. Powder Metallurgy Industry, 2012, 22(2): 49-54. (in Chinese)
- 19 Alleyne A. Nonlinear force control of an electro-hydraulic actuator [C] // Japan/USA Symposium on Flexible Automation, 1996, 1: 193-200.
- 20 Sopchak N D, Misiolek W Z. Density gradients in multilayer compacted iron powder parts [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2000, 15(1): 65-79.
- 21 吴成义,张丽英.粉末成形力学原理[M].北京:冶金工业出版社,2003.