

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.05.004

粉体喂料3D打印机输送螺杆的有限元模拟及实验验证

汪传生^{1,2}, 王孔烁^{1,2*}, 王虎子^{1,2}, 江瑞^{1,2}, 张伟^{1,2}

(1. 青岛科技大学 山东省高分子材料先进制造技术重点实验室, 山东 青岛 266061;
2. 青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要:为了探究粉体喂料3D打印机输送螺杆的构型对打印制品表面质量的影响,课题组使用三维软件SolidWorks绘制出3种螺槽深度分别为1.8, 1.8~3.7和3.7 mm的输送螺杆;采用有限元分析软件ANSYS对3种螺杆分别进行模态分析和谐响应分析,得到3种螺杆的各阶固有频率和坐标轴上的响应频率。对比研究表明螺槽深度为1.8~3.7 mm的螺杆的力学性能更好。最后经过实验打印金属制品,比较使用各螺杆打印制品的表面质量,验证了有限元分析的准确性。该研究为螺杆构型的优化设计提供了一种新方法。

关键词:粉体喂料3D打印机;输送螺杆;有限元分析;谐响应分析

中图分类号:TB115.1;TG375 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2018)05-0018-06

Finite Element Simulation and Experimental Verification of Conveying Screw for Powder Feed 3D Printer

WANG Chuansheng^{1,2}, WANG Kongshuo^{1,2*}, WANG Huzi^{1,2}, JIANG Rui^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}

(1. Shandong Province Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology for Polymeric Materials,
Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266061, China;

2. College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266061, China)

Abstract: In order to analyze the influence of the configuration of the power feed 3D conveyor screw on the surface quality of printed products, 3D software SolidWorks was used to draw 3 kinds of conveying screws with depth of 1.8, 1.8~3.7 and 3.7 mm respectively. Modal analysis and harmonic response analysis of 3 kinds of screws were carried out by the finite element analysis software ANSYS. The natural frequencies of 3 kinds of screws and the response frequencies on the coordinate axis were obtained. Comparative studies show that the mechanical properties of the screw with the depth of 1.8~3.7 mm were better. Finally, the surface quality of the experimentally printed products is compared with each other to verify the accuracy of the finite element analysis, which provides a new method for the optimization design of the screw configuration.

Keywords: powder feed 3D printer; conveying screw; FEA (finite element analysis); harmonic response analysis

随着工业的快速发展,传统加工工业已经无法满足现代工业的加工需求,实践中也应用到了不同的加工工艺和方法,3D打印技术应运而生^[1]。3D打印技术是一种新兴的快速成型先进制造技术,属于增材制造技术,它不仅降低了零件的制造难度,而且也减少了

材料的消耗^[2-4]。青岛科技大学弹性体3D打印创新中心研发了一种适用范围较广的低成本金属3D打印方法,即金属-高分子材料载体共混物3D低温打印技术,该技术使用的材料是金属粉末和粘结剂的共混颗粒,通过自主研发的粉体喂料3D打印机机头,实现

收稿日期:2018-03-12;修回日期:2018-06-26

第一作者简介:汪传生(1960),男,安徽安庆人,教授,博士生导师,主要研究方向为高分子材料加工机械。E-mail:kongshuo726@163.com

均匀可控的熔体输送,在低温(200 ℃左右)下通过熔体逐层堆积成三维结构,间接实现金属坯体的3D打印。因此该机头中输送螺杆在传送物料过程中的稳定性是至关重要的,决定了打印制品的好坏。

课题组通过三维软件 SolidWorks 绘出了3种不同螺槽深度的螺杆,将其导入到 ANSYS 软件中进行模拟分析,依螺杆受力情况,模拟出螺杆各个位置的固有频率,再进行螺杆谐响应分析,得出3种螺杆的振动情况。由于振动会影响螺杆输送物料的连续性^[5-6],从而影响成型产品的表面质量。因此,依据实验中打印成型的金属坯体表面质量来评价打印制品的好坏,从而对比出稳定性较好的螺杆。

1 粉体喂料3D打印机工作原理

一台完整的3D打印机主要包括高精度的机械系统、数控系统、挤出系统和成型系统。图1和图2分别是粉体喂料3D打印机机头实体图和示意图。

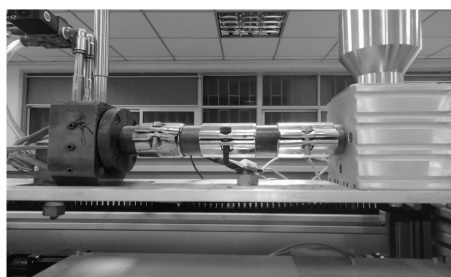
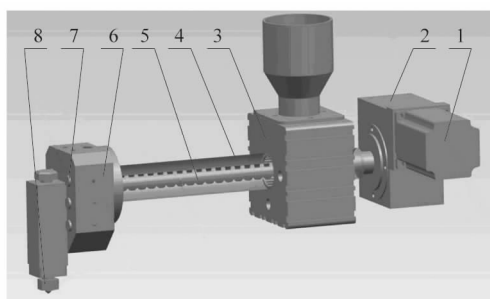


图1 实体3D打印机机头
Figure 1 Solid 3D printer head



1—电机;2—减速器;3—喂料装置;4—套筒;5—输送螺杆;6—喷头装置;7—加热装置;8—喷嘴装置。

图2 3D打印机机头的示意图

Figure 2 Schematic diagram of head of 3D printer

由图2可知,物料由喂料口进入,在加热系统和螺杆的作用下熔融,由螺杆转动建立的聚合物溶体输送压力使溶体不断地被输送到喷嘴装置,进而挤出成型。在整个过程中,螺杆作为输送熔体的装置,其力学性能的稳定性对3D打印产品的成型质量起到了至关重要

的作用。

2 模型建立

2.1 物理模型及有限元模型的建立

2.1.1 物理模型的建立

有限元分析软件 ANSYS 和 CAD 软件能较好地建立无缝连接,通过 SolidWorks 可绘出3种螺槽深度不同的螺杆。螺杆物理模型的建立如图3~5所示。图3是螺槽深度为3.7 mm 螺杆,图4是螺槽深度渐变范围为1.8~3.7 mm 螺杆,图5是螺槽深度为1.8 mm 螺杆。

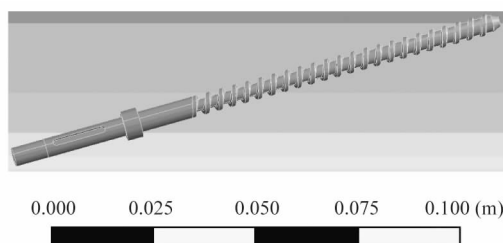


图3 螺槽深度3.7 mm 螺杆
Figure 3 Screw with 3.7 mm spiral groove depth

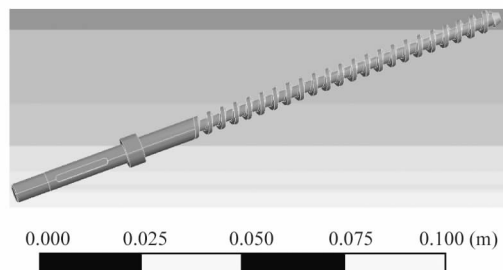


图4 螺槽深度1.8~3.7 mm 渐变螺杆
Figure 4 Gradient screw with 1.8~3.7 mm spiral groove depth

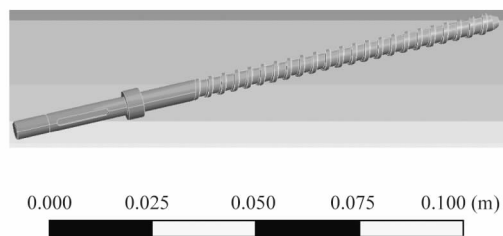


图5 螺槽深度1.8 mm 螺杆
Figure 5 Screw with 1.8 mm spiral groove depth

2.1.2 有限元模型的建立

有限元的网格划分是进行有限元数值模拟分析的重要步骤,网格划分形式影响数值计算的精度。文中模型的网格划分是根据实际位置不同而进行的,图6所示是螺槽深度为3.7 mm 的螺杆网格划分的情况,

生成的节点数量是533 772,单元数量是374 474。图7是螺槽深度渐变范围1.8~3.7 mm 螺杆的网格划分情况,图8是螺槽深度为1.8 mm 螺杆的网格划分情况。

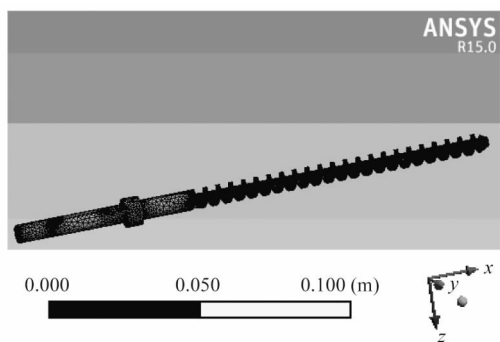


图6 螺槽深度3.7 mm 螺杆的网格划分
Figure 6 Mesh division of spiral groove depth 3.7 mm screw

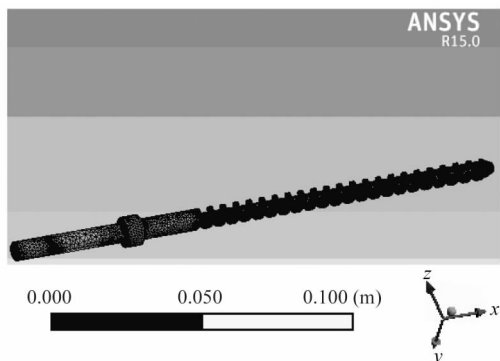


图7 螺槽深度1.8~3.7 mm 渐变螺杆的网格划分
Figure 7 Mesh division of spiral groove depth 1.8~3.7 mm tapered screw

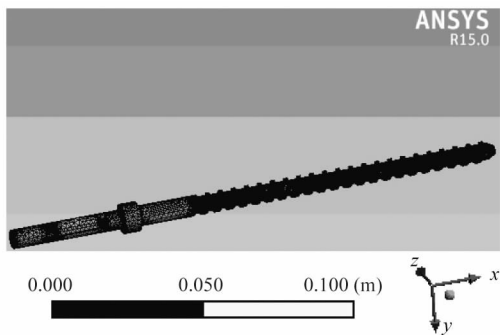


图8 螺槽深度1.8 mm 螺杆的网格划分
Figure 8 Mesh division of spiral groove depth 1.8 mm screw

2.2 数学模型的建立

基于有限元线性振动理论,ANSYS 软件可以对有预应力的结构进行模态分析^[7]。由于3D 打印机输送

物料的螺杆属于悬臂梁结构,其阻尼是很小的,可以忽略不计。

无阻阻力线性结构自由振动的控制方程为:

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = \{0\}。 \quad (1)$$

式中: M 为有限元模型中各单元均布质量集中在单元的节点上形成的总质量矩阵; K 为由单元刚度矩阵和单元划分方式组合而成的总体刚度矩阵; δ 为节点的加速度, m/s^2 ; δ 为节点的位移, m 。

假设结构的运动为简谐运动:

$$\{\delta\} = \{\Phi_i\} \sin(\omega_i t + \theta_i); \quad (2)$$

$$\{\ddot{\delta}\} = -\omega_i^2 \{\Phi_i\} \sin(\omega_i t + \theta_i)。 \quad (3)$$

式中: Φ 为振幅, m ; ω_i 为结构的固有频率, Hz ; t 为时间, s ; θ_i 为相位角。

将结构运动的位移和速度,代入到式(1)中,可得:

$$([K] - \omega_i^2 [M])\{\Phi_i\} = \{0\}。 \quad (4)$$

以下2种情况可以满足上述方程:

$$1) \{\Phi_i\} = 0;$$

表明结构没有振动,此种情况无需考虑。

$$2) \det([K] - \omega^2 [M]) = 0;$$

可以求出 n 个方程的根,即存在 n 个特征值,每一个特征值对应一个特征向量。

ANSYS 采用下式输出计算的固有频率:

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi}。 \quad (5)$$

式中 f_i 为固有频率, Hz 。

3 螺杆的有限元分析

3.1 螺杆的模态分析

模态分析是研究结构动力特性的一种常用方法,是系统辨别方法在工程振动领域的应用^[8]。3D 打印机主要零件螺杆的一端与步进电机减速器连接,根据螺杆受力状况,添加相应的作用力,得到螺杆各阶固有频率,图9~11为3种螺槽深度的螺杆一阶频率的振形。

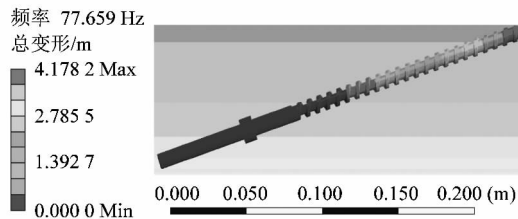


图9 螺槽深度为3.7 mm 螺杆振形
Figure 9 Vibration shape of screw with 3.7 mm spiral groove depth

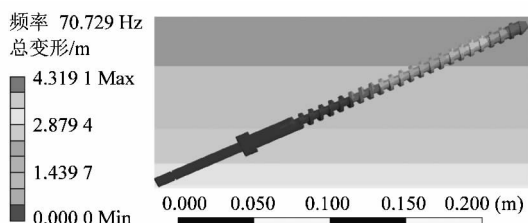


图 10 螺槽深度为 1.8~3.7 mm 螺杆振形
Figure 10 Vibration shape of gradient screw with
1.8~3.7 mm spiral groove depth

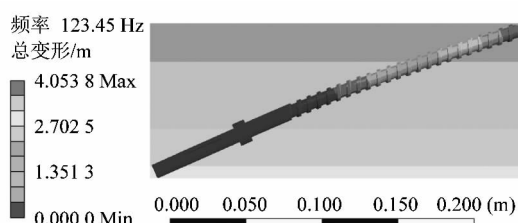


图 11 螺槽深度为 1.8 mm 螺杆振形
Figure 11 Vibration shape of screw with
1.8 mm spiral groove depth

物理理论上有无穷阶模态,振动是无穷阶模态的叠加,但是实际上各阶模态对系统振动的影响程度不同,一般只取前几阶的模态,本文取前六阶模态。分析不同螺杆前六阶变形,可知螺槽深度为 1.8~3.7 mm 和 3.7 mm 的螺杆的前两阶固有频率差的不是太多,

表 1 不同螺杆的各阶固有频率

Table 1 Natural frequencies of different orders of different screws

螺槽深度/mm	固有频率/Hz					
	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶	六阶
1.8	123.450	124.030	706.300	707.250	1 266.300	1 362.700
1.8~3.7	70.729	71.164	573.930	577.920	1 267.600	1 362.900
3.7	77.659	78.329	468.000	471.690	1 257.600	1 263.700

3.2 谐响应分析

谐响应分析是分析持续周期载荷在结构系统中产生的持续周期响应,确定线性结构承受简谐载荷的稳态响应^[9]。从而验证设计是否能够克服疲劳、共振及其它受迫振动引起的有害效果。图 12~20 为螺杆在各个轴向的频率响应。

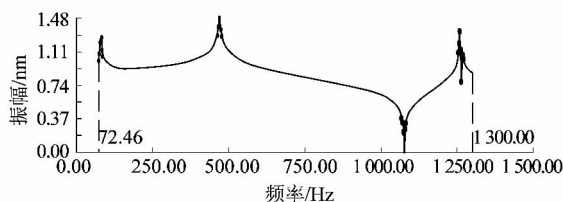


图 12 螺槽深度 3.7 mm 螺杆 X 轴频率响应
Figure 12 X-axis frequency response of
screw with 3.7 mm spiral groove depth

由图 12~20 可知,频率响应出现峰值的位置容易引起共振^[10]。而螺杆最前端频率比较大,实际上这一段长度又很短,所以把分析的重点放在频率为 1 250 Hz 以前部分。通过分析可知,螺槽深度 3.7 mm 螺杆在 3 个轴上发生共振的位置最多。螺槽深度变化范围为 1.8~3.7 mm 螺杆和螺槽深度为 1.8 mm 螺杆相

后几阶相差较大,螺槽深度为 1.8 mm 螺杆的固有频率比另外 2 种要大一些。结合螺杆在实际中的应用,物料加热后挤出,受力情况比较复杂,为了分析的准确性和可靠性,还需要对螺杆进行谐响应分析,表 1 所示为不同螺槽深度螺杆的各阶所对应的固有频率。

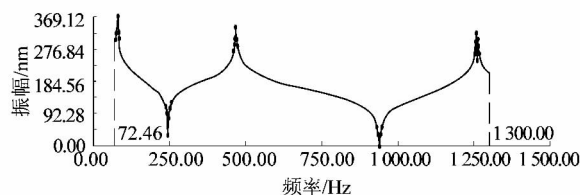


图 13 螺槽深度 3.7 mm 螺杆 Y 轴频率响应
Figure 13 Y-axis frequency response of
screw with 3.7 mm spiral groove depth

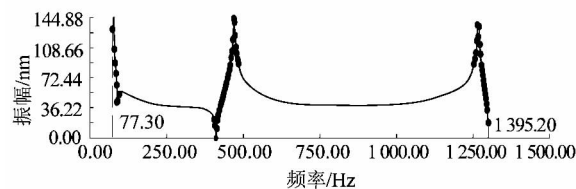


图 14 螺槽深度 3.7 mm 螺杆 Z 轴频率响应
Figure 14 Z-axis frequency response of
screw with 3.7 mm spiral groove depth

比,在低阶的频率响应更小些,并且由模态分析知,螺槽深度为 1.8 mm 螺杆各阶频率更大一些,螺槽深度 1.8 mm 螺杆的输料能力不如螺槽深度 1.8~3.7 mm 螺杆。综合分析,优先选择螺槽深度为 1.8~3.7 mm

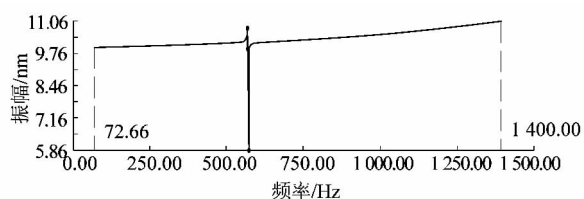


图 15 螺槽深度 1.8~3.7 mm 螺杆 X 轴频率响应
Figure 15 X-axis frequency response of screw with 1.8~3.7 mm spiral groove depth

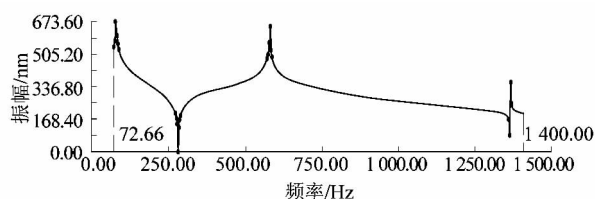


图 16 螺槽深度 1.8~3.7 mm 螺杆 Y 轴频率响应
Figure 16 Y-axis frequency response of screw with 1.8~3.7 mm spiral groove depth

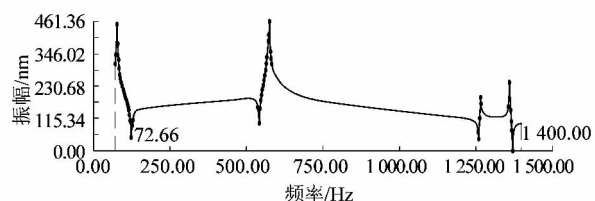


图 17 螺槽深度 1.8~3.7 mm 螺杆 Z 轴频率响应
Figure 17 Z-axis frequency response of screw with 1.8~3.7 mm spiral groove depth

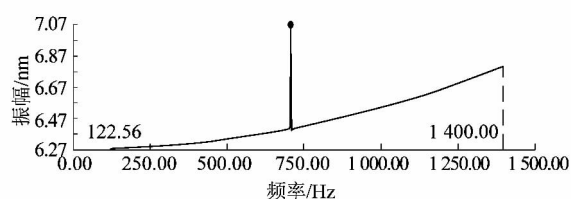


图 18 螺槽深度 1.8 mm 螺杆 X 轴频率响应
Figure 18 X-axis frequency response of screw with 1.8 mm spiral groove depth

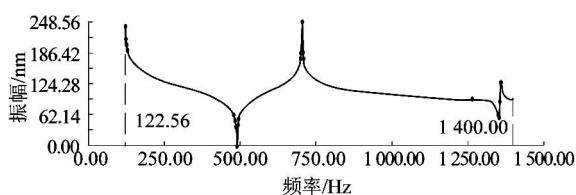


图 19 螺槽深度 1.8 mm 螺杆 Y 轴频率响应
Figure 19 Y-axis frequency response of screw with 1.8 mm spiral groove depth

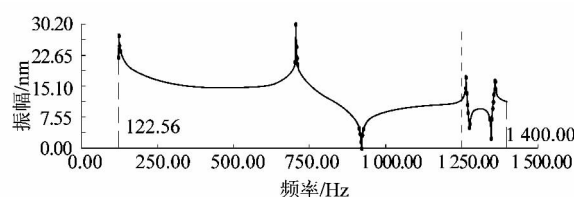


图 20 螺槽深度 1.8 mm 螺杆 Z 轴频率响应
Figure 20 Z-axis frequency response of screw with 1.8 mm spiral groove depth

的螺杆。

3.3 输送螺杆的实验验证

金属低温 3D 打印成型方法是青岛科技大学弹性体 3D 打印创新中心的重点研究方向之一,通过自主研发的粉体喂料 3D 打印机打印成型金属毛坯,其材料是由不锈钢金属粉末和粘结剂组成。本次实验采用了 3 种不同结构的螺杆对相同制品进行打印成型,成型后通过观察产品表面质量,来验证有限元分析软件 ANSYS 的模态分析和谐响应分析结果的一致性,同时为后期粉体喂料 3D 打印机中输送螺杆的设计提供了参考依据。图 21~23 分别为螺槽深度为 1.8 mm, 3.7 mm 和 1.8~3.7 mm 渐变的螺杆打印成型的产品图。



(a) 螺槽深度放大

(b) 螺杆

图 21 螺槽深度为 1.8 mm 螺杆打印的产品
Figure 21 Products printed by screw with 1.8 mm spiral groove depth

输送螺杆在传输物料过程中的振动会影响物料连续性流动^[11],从而导致成型产品表面质量较差。由图 21~23 可知,观察所打印产品的表面质量能够清晰看出螺槽深度为 1.8~3.7 mm 螺杆输送物料效果较好,与有限元分析结果一致。

4 结论

1) 通过有限元软件 ANSYS 对粉体喂料 3D 打印机中 3 种螺槽深度不同的输送螺杆进行模态分析和有限元分析,得到了螺槽深度 1.8~3.7 mm 渐变的螺杆



(a) 螺槽深度放大

(b) 螺杆

图 22 螺槽深度为 3.7 mm 螺杆打印的产品

Figure 22 Products printed by screw with
3.7 mm spiral groove depth

(a) 螺槽深度放大

(b) 螺杆

图 23 螺槽深度为 1.8 ~ 3.7 mm 螺杆打印的产品

Figure 23 Products printed by screw with
1.8 ~ 3.7 mm spiral groove depth

的性能更好,同时在后期的实验中也得到了验证。

2) 采用有限元分析的方法对螺杆构型的优化设计的方法是可行的,同时也为实际生产中降低 3D 打印机输送装置的震动、噪声以及获得精度较高的成型制品提供了解决方案。

参考文献:

- [1] 李小丽,马剑雄,李萍,等.3D 打印技术及应用趋势[J].自动化仪表,2014,35(1):14-16.
- [2] 杨恩泉.3D 打印技术对航空制造业发展的影响[J].航空科学技术,2013,7(1):13-17.
- [3] CHENG S, CHANDRA S. A pneumatic droplet-on-demand generator [J]. Experiments in fluids, 2003, 34(6): 755-762.
- [4] 周世浩,谭跃刚,张帆,等.基于半导体制冷的巧克力 3D 打印成型条件研究[J].机电工程,2017,34(4):351-356.
- [5] 潘龙,张玉霞,金志明,等.单螺杆挤出机挤出理论研究进展[J].中国塑料,2009,23(5):12-19.
- [6] 程岩,姜南,邢应生,等.单螺杆挤出过程熔体输送段数值模拟方法[J].中国塑料,2004,18(11):16-21.
- [7] 郑磊,尹健,纪斌,等.SYS 的脱粒滚筒模态分析[J].农机化研究,2013,6(4):30-32.
- [8] 江顺亮,朱复华.单螺杆挤出全过程三段七区模型的计算机模拟及软件研制[J].中国塑料,2003(1):102-107.
- [9] 石北啸,孔麟,刘文湘,等.真纳水电站机组运行引起结构的谐响应分析[J].水利水电工程,2010,32(7):45-47.
- [10] 刘昌领,陈建义,李清平,等.基于 ANSYS 的六缸压缩机曲轴模态分析及谐响应分析[J].流体机械,2012,40(8):17-21.
- [11] 郭树国,张召,王丽艳,等.单螺杆挤出机新型螺杆的设计及数值模拟分析[J].饲料工业,2016,37(3):10-13.

(上接第 17 页)

- [5] 曹婷婷.橡胶疲劳寿命的有限元分析研究[D].广州:华南理工大学,2014:15.
- [6] 左亮.机车车辆中常用橡胶件的有限元分析[D].成都:西南交通大学,2008:13.
- [7] 黄建龙,谢广娟,刘正伟.基于 Mooney-Rivlin 和 Yeoh 模型的超弹性橡胶材料有限元分析[J].橡塑技术和装备,2008,34(12):23.

- [8] 许小强,赵洪伦.过盈配合应力的接触非线性有限元分析[J].机械强度,2000(1):33.
- [9] 谢伟东,李仁庆,刘振华.基于 MSP430F149 的胎压采集系统研究[J].机电工程,2016,33(6):744-748.
- [10] 马富银,吴伟蔚.车用圆形支承橡胶部分承载力学性能研究[J].机械强度,2012,34(3):471.