

DOI: 10.7652/xjtuxb201305022

曲面仿生复眼透镜微复型过程变形分析

杨俊, 蒋维涛, 王兰兰, 刘红忠

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对大视场曲面仿生复眼透镜的制造难点,采用了一种基于气压辅助聚合物弹性体微复型的制造工艺,以实现大视场曲面微透镜阵列的快速、低成本制造。利用有限元软件(ABAQUS),对气压辅助微复型工艺过程中聚合物弹性体的大变形、曲面成型过程中微透镜的形变问题进行了仿真实验,得到了曲面成型过程中曲面轮廓对成型气压的依赖关系,以及不同纬度微透镜阵列的尺寸变化关系,并进行了相关工艺实验验证。结果表明,在气压辅助曲面成型过程中,成型曲面的轮廓为球面,其球面直径依赖于成型气压;曲面成型过程中,微透镜形变量沿曲面纬度方向基本一致,不同纬度上微透镜直径的增大率为 9.45%~10.56%。由于在不同纬度处所制造的曲面复眼透镜的焦平面不同,因此曲面复眼透镜具有比平面微透镜阵列更大的视场。

关键词: 气压辅助成型;曲面复眼透镜;变形分析

中图分类号: TN305.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)05-0121-05

Deformation Analysis for Curved Compound Eye in Micro-Replica Process

YANG Jun, JIANG Weitao, WANG Lanlan, LIU Hongzhong

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Focusing on the difficulty of manufacturing curved bionic compound lens with big field of view, a manufacturing process based on the pneumatic auxiliary micro-replication of polymer elastomer is proposed to realize fast and low cost production of bionic compound eye. Then ABAQUS software is adopted to analyze the large deformation of polymer elastomer and microlens deformation problems in gas-assisted micro-replica process, and the dependence of surface profile upon the molding pressure and size variation of microlens in different sphere latitude are revealed and compared with the experiments. During curved surface forming, the surface profile gets spherical whose diameter depends upon the molding pressure; the deformation rates of microlens along the sphere latitude remain equal, and the microlens diameter on different latitude increases by 9.45% to 10.56%. The curved bionic compound lens possesses different focal planes along the sphere latitude and larger field of view than planar microlens array.

Keywords: pneumatic auxiliary forming; curved compound eye; deformation analysis

作为一种具有智能特征的仿生光学系统,复眼透镜因其体积小、质量轻、大视场、高灵敏度、可测速等优点,引起了国内外学者的广泛关注,并在红外探

测、精确制导、照相机等国防及民用工业中具有广阔的应用前景^[1-5]。仿生复眼透镜的制造难点主要体现在如何在曲面上实现微透镜阵列制造,以实现复

收稿日期: 2012-09-03。 作者简介: 杨俊(1987—),男,硕士生;刘红忠(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家科技重大专项基金资助项目(2011ZX04014-071);国家自然科学基金资助项目(51275400);中国博士后基金资助项目(2012M520081)。

网络出版时间: 2013-03-15

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130315.1137.007.html>

眼透镜大视场、高分辨率的三维复杂成像。目前,在曲面上实现微透镜阵列化人工复眼的常规制备工艺复杂,而且单个透镜的尺寸难以达到毫米量级以下。这种曲面阵列通常先制作单个透镜小眼,然后再将各个透镜小眼组装形成曲面复眼,但制造过程流程长,存在拼接误差,因此难以小型化与集成化。Jacques 提出一种采用多轴激光束加工曲面微透镜的方法,利用激光束对多轴联动工作台上的曲面透镜进行光刻,从而实现曲面微透镜的制造^[6-7]。该方法采用在三维空间内实时激光扫描加工的方式,能够在三维曲面上实现微米级透镜制造,但需要专用制造设备,并且工艺复杂,效率低,成本高。2006 年,Jeong 提出了一种基于气压辅助微复型工艺制造曲面微透镜的方法,利用平面微透镜作为微复型模板,快速简单地实现了曲面复眼透镜的制造^[8]。由于在气压辅助微复型过程中,聚合物弹性体(PDMS)的大变形以及曲面上微透镜的变形对曲面透镜的成像效果具有重要影响,因此有必要对气压辅助成型工艺中的微透镜结构形变问题进行研究。本文采用气压辅助微复型制造工艺,分析了该工艺对曲面微透镜成型结构的制造误差,实现了真正意义上的曲面微透镜制造。

1 有限元模型及分析

1.1 硅橡胶材料模型

在气压辅助微复型制造曲面微透镜的工艺流程中,采用聚二甲基硅氧烷(PDMS)作为柔性模板,其韧性好、弹性高、弹性模量低、硬度低、可重复变形而不发生永久性破坏,是一种用途广泛的有机硅聚合物。基于 PDMS 柔性模板的复眼透镜成型过程,涉及材料非线性(超弹性)、几何非线性(大变形)问题。Pamplona 等人分析了 PDMS 薄膜在压差作用下形成圆柱薄膜的受力过程,采用 Mooney-Rivlin(MR)材料模型对 PDMS 的变形过程进行了计算,其计算结果与实验结果相符^[9-10]。因此,本文将采用 MR 材料模型,对 PDMS 柔性模板的非线性形变进行理论分析。

在理论仿真过程中,PDMS 柔性模板采用一种不可压缩、均质、各向同性的 MR 材料模型,其应变能密度为

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) \quad (1)$$

式中: I_1 、 I_2 分别为第 1、第 2 Green 不变量; C_1 、 C_2 为 Rivlin 系数,且二者满足

$$C_1 + C_2 = \frac{G}{2} = \frac{E}{4(1+\nu)} \quad (2)$$

式中: G 为材料的剪切模量; E 为材料的弹性模量; ν 为材料的泊松比。根据 PDMS 材料机械性能参数,固化后的 PDMS 柔性模板的硬度值为邵氏 42HA, E 为 1.5 MPa, ν 为 0.49。因此,可以求得 Rivlin 参数 C_1 为 0.148 964 MPa, C_2 为 0.013 929 MPa。

1.2 有限元建模

气压辅助微复型制造曲面微透镜阵列的关键步骤是 PDMS 柔性模板的变形,具有微透镜阵列的 PDMS 薄膜在真空圆形腔内、外气压差的作用下形成曲面,采用有限元软件(ABAQUS)建立的有限元分析模型如图 1a 所示。将 PDMS 薄膜固定在半径为 r 的圆形真空腔上,所承受的载荷为真空圆形腔内、外气压差 ΔP ,在材料属性中选择 Hyperelastic 中的 MR 材料模型,并采用 Explicit 求解器以保证求解的收敛性。

1.3 有限元计算结果

气压辅助微复型制造曲面微透镜阵列的过程不仅包含了大曲面轮廓的成型,即涉及图 1b 中曲面各处的 R 值是否一致(球面或非球面),而且还包含了大曲面上每个微透镜在曲面成型过程的变形,下面将逐一分析 2 种变形的有限元计算结果。

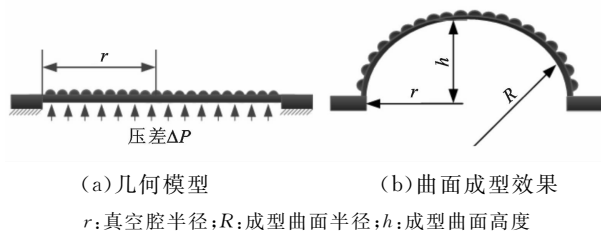


图 1 PDMS 薄膜变形的有限元分析模型

1.3.1 曲面轮廓分析 气压辅助曲面成型中所选用的真空圆形腔的直径一般在毫米级以上,而微透镜直径一般只有几十微米,相差 2 个数量级,但微透镜阵列对曲面成型的影响却很小。为了论证微透镜阵列对成型曲面轮廓的影响,在 ABAQUS 中建立了如图 2a、图 2b 所示的二维平面模型,分析了光滑曲面和微透镜阵列曲面在相同载荷条件下的曲面成型轮廓,发现 2 种几何模型下的成型轮廓基本重合,如图 2c 所示。因此,在分析大曲面的成型轮廓时,为了减少计算量,可以忽略微透镜阵列的影响,直接使用光滑的 PDMS 薄膜进行建模。

图 3a 为曲面成型的位移云图。在 ABAQUS 中对曲面成型的仿真结果沿直径方向提取曲面的表

面节点坐标,然后在 Matlab 中绘制节点坐标曲线。图 3b 为在不同压差作用下 PDMS 薄膜的成型曲面轮廓。在不同压差作用下,2 条拟合曲线基本重合,即成型曲面轮廓为球面,并且曲率随着压差的增大而增大,但变化很小。

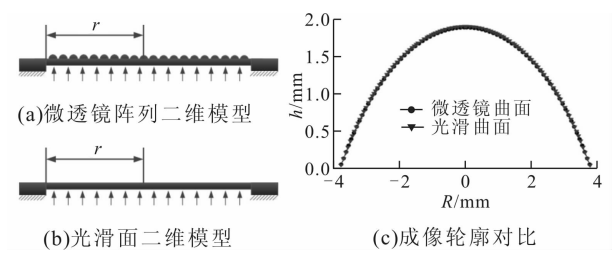


图 2 微透镜对曲面成型的影响

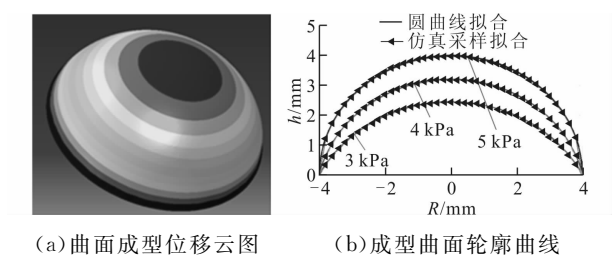


图 3 曲面成型轮廓的仿真结果

1.3.2 曲面上微透镜的变形分析 在曲面成型过程中,PDMS 薄膜上面的微透镜阵列不可避免地也存在变形,而且这种变形会直接反映在 UV 光固化胶曲面微透镜上。由图 3 可知,在气压辅助成型过程中,不同纬度 PDMS 的应力、应变不是完全一致的,这将导致不同纬度的微透镜直径、高度的变形不一致性。对于曲面上微结构的变形,同样进行有限元仿真,为了简化计算,这里只对沿直径方向横截面的二维变形问题进行分析,如图 4a 所示。图 4b、图 4d 为纬度 80° 附近的微透镜轮廓的坐标数据图,对比曲面成型前、后,微透镜直径增大了 $5.28\text{ }\mu\text{m}$,增大率约为 10.55% ,微透镜高度减小了 $1.25\text{ }\mu\text{m}$,减小率约 5% ,如图 4c 所示。利用同样的方法,可以对不同曲面纬度 β 的微透镜轮廓数据进行提取,得到不同曲面纬度的微透镜变形量的仿真结果,如图 5 所示。不同纬度的微透镜变形量并不一致,但是这种不一致性的波动较小,微透镜的直径增大率为 $9.45\%\sim 10.56\%$,而高度方向的减小率为 $4.37\%\sim 5.3\%$ 。因此,可以近似认为不同纬度的微透镜变形量相一致,在成像时可以利用测试系统进行误差补偿。

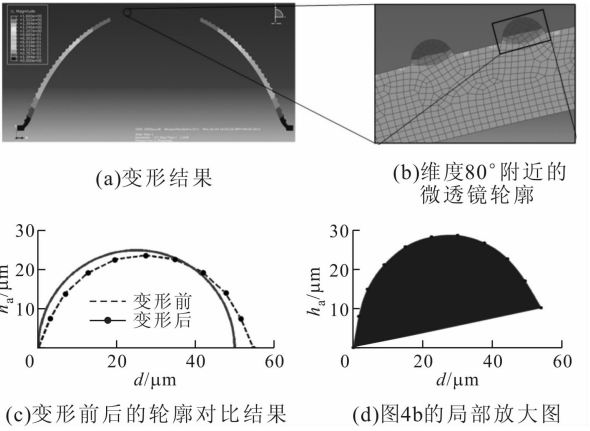


图 4 曲面微透镜在复型过程中的变形

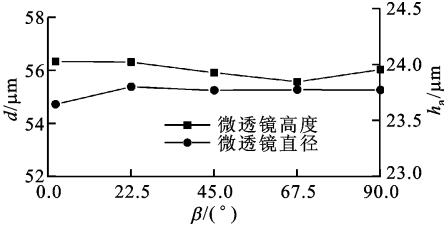


图 5 不同纬度微透镜变形量的仿真结果

2 曲面微透镜阵列复型工艺实验

2.1 实验过程

气压辅助微复型工艺制造曲面复眼微透镜阵列,是以平面微透镜阵列的微复型模板,通过弹性体在气压作用下的变形形成曲面,并通过微复型工艺实现曲面微透镜阵列的制造。

2.1.1 试剂与仪器 实验中使用的试剂包括:PDMS(法国,AXSON ESSIL 296),UV 光固化胶(卡夫特,广东恒大新材料)。实验中使用的仪器设备主要有 PGI 3D 轮廓仪,扫描电子显微镜 SEM(日本 Hitachi S-3000N),接触角测量仪(德国,Dataphysics OCA20),旋转匀胶热板机(美国,Cee200CB),自制气压辅助曲面微复型装置。

2.1.2 曲面上微透镜阵列复型 由平面微透镜阵列模板的气压辅助微复型法,实现了曲面上微透镜阵列的快速制造,主要制造步骤如下:①采用传统的光刻热熔法在平面基底上制备出平面微透镜阵列,如图 6 所示;②利用已经制备好的平面微透镜阵列作为模板,翻制一层 PDMS 薄膜,PDMS 树脂/固化剂按 $10:1$ 的质量比充分搅拌混合均匀后真空脱泡,再将 PDMS 预聚体浇注在平面微透镜上,并利用匀胶机旋涂一层厚 $500\text{ }\mu\text{m}$ 左右的 PDMS,然后水平置于电热恒温烤箱(80°C)中固化 1.5 h ,固化后脱模,得到一层

具有微透镜阵列图形化的 PDMS 薄膜,如图 6c 所示;
③将图形化的 PDMS 薄膜(图形区朝上)固定在一个可以抽真空的圆形空腔上面,通过抽真空产生负压,使 PDMS 薄膜变形成为一个曲面,如图 6d、图 6e 所示;
④将 UV 光固化胶浇注在 PDMS 曲面上,并在曲面上压上玻璃基底,然后置于紫外光下固化 5 min,脱模即可得到曲面微透镜阵列,如图 6f、图 6g 所示。该方法避免了直接在曲面上加工微透镜阵列的困难,快速简单,易于实现。

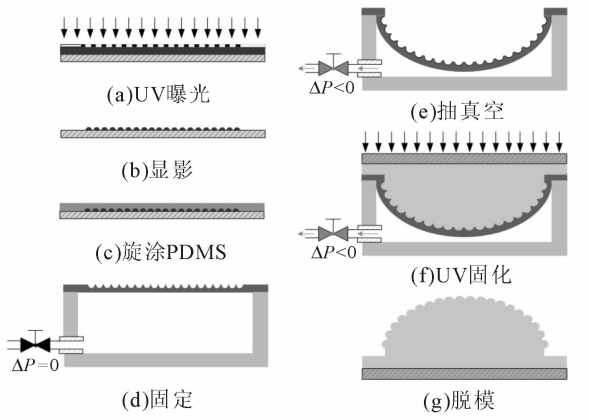


图 6 气压辅助曲面微透镜复型工艺流程

2.2 曲面上微透镜阵列复型结果及分析

利用图 6 所示方法复型所得到的各种不同尺寸(微透镜直径为 100、50 和 4 μm)曲面微透镜阵列的 SEM 观测结果如图 7 所示。实验过程中经过 2 次微复型,最终在曲面上形成的微透镜与平面微透镜模板一样都是凸透镜。

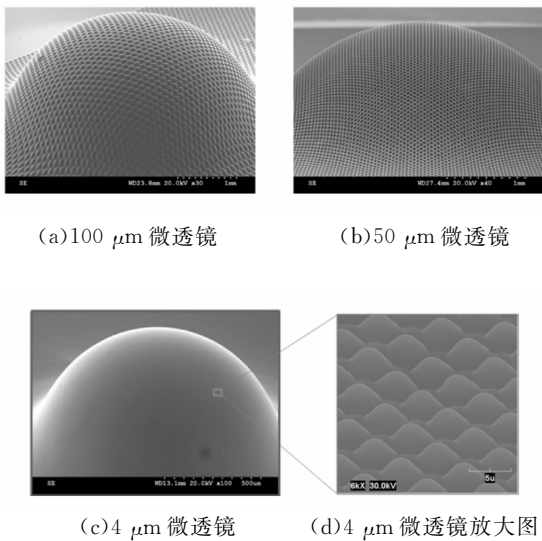


图 7 不同直径微透镜的 SEM 照片

对于图 6 所示方法,还可以利用三步微复型法实现曲面上凹透镜阵列的复型:在翻制 PDMS 膜时,以

第 1 次翻制的 PDMS 膜为 2 级模具,并再次翻制 PDMS 薄膜作为曲面复型用模具,即可得到曲面上凹透镜阵列,如图 8a 所示。利用气压辅助曲面微复型法,本文实现了阵列化的曲面微透镜,如图 8b 所示。采用 Taylor Hobson PGI 3D 轮廓仪,对曲面成型轮廓进行测量,在进行球面曲线拟合时发现,曲率半径偏差小于 3 μm ,可以认为成型曲面近似为球面($R \approx 3 \text{ mm}$),符合图 3b 所示的仿真结果。

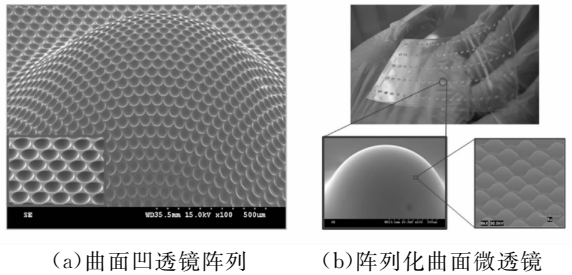


图 8 曲面微透镜的阵列化 SEM 照片

由于对曲面上微透镜结构尺寸变形的准确测量比较困难,因此实验中采用切片的方式,对纬度 80°附近的微透镜进行 SEM 观测,发现成型前、后微透镜直径的增大率约为 9.58%,如图 9 所示,与图 4 的仿真结果接近。

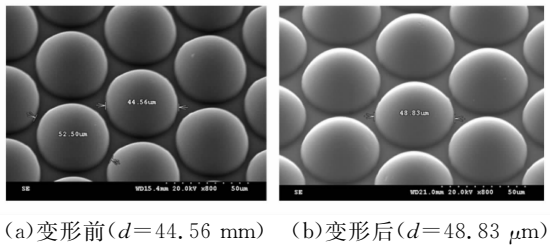


图 9 变形前、后曲面上微透镜的 SEM 照片

2.3 微透镜阵列成像测试

微透镜阵列的成像测试装置如图 10a 所示,光源经 XJ 字样的孔洞照射在微透镜阵列上,再经过一个显微物镜成像到 CCD 上。图 10b 为实际采用的成像测量系统,在接触角测量仪的出光口张贴 XJ 字样,把微透镜阵列垂直置于载物台上,通过调节工作台的位置来进行成像测试。图 10c 为平面微透镜阵列模板的成像测试结果,在整个成像平面微透镜阵列同时聚焦形成清晰、大小一致的 XJ 像。图 10d、图 10e 和图 10f 为气压辅助微复型制造的曲面仿生微透镜阵列的成像结果,其中图 10d 的聚焦测量区域为曲面复眼透镜的顶部,可以发现顶部中间区域成像清晰,而边缘区域不能清晰成像,通过改变成像距离可以对边缘区域进行清晰成像。图 10e 和图 10f 分别为聚焦在曲面复眼透镜的偏左侧区域和偏右侧区域的成像结果。

成像测试表明,曲面上各纬度处的微透镜焦平面不同,可通过调节成像接收面的相对位置,来实现不同方位物体的清晰成像。因此,曲面仿生复眼比平面微透镜具有更大的视场。

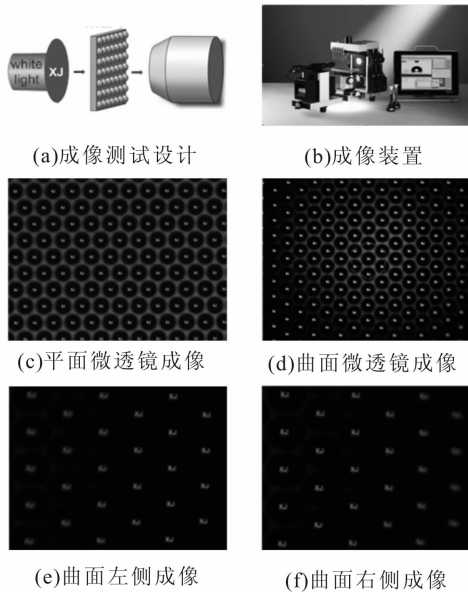


图10 微透镜阵列成像测试

3 结 论

本文提出了一种低成本、快速、大批量制造曲面微透镜阵列的方法,利用平面微透镜阵列作为模版,采用气压辅助微复型的方法实现了大视场曲面微透镜阵列的制造。本文对气压辅助微复型过程中的曲面轮廓进行了实验测量和有限元计算,结果表明:在气压辅助曲面成型过程中,成型曲面的轮廓为球面,其球面直径依赖于成型气压;微透镜形变量沿曲面纬度方向基本一致,不同纬度上微透镜直径的增大率在 $9.45\% \sim 10.56\%$ 以内。成像测试表明,曲面上不同纬度处的微透镜焦平面不同,可通过调节成像接收面的相对位置,来实现不同方位物体的清晰成像。因此,本文所制造的曲面仿生复眼比平面微透镜阵列具有更大的视场,并且在三维成像及动态测速方面,具有广阔的工程应用前景。

参考文献:

- [1] LAND M F. Compound eyes: old and new optical mechanisms [J]. *Nature*, 1980, 287(5874): 681-686.
- [2] BERTHA F A, STUMM A W. Surface structure of the compound eye of various drosophila species and eye mutants of drosophila melanogaster [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 1974, 44(6): 262-265.

- [3] EGELHAAF M, BORST A. Motion computation and visual orientation in flies [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 1993, 104(4): 659-673.
- [4] 张红鑫, 卢振武, 李凤有. 人工仿生复眼的研究进展 [J]. *长春理工大学学报*, 2006, 29(2): 4-7.
ZHANG Hongxin, LU Zhenwu, LI Fengyou. The research progress of artificial compound eye [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2006, 29(2): 4-7.
- [5] DUPARRE J, DANNBERG P, Schreiber P, et al. Thin compound-eye camera [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(15): 2949-2956.
- [6] RADTKE D, DUPARRE J. Laser lithographic fabrication and characterization of a spherical artificial compound eye [J]. *Optics Express*, 2007, 15(6): 3067-3077.
- [7] BRUCKNER A, DUPARRE J, LEITEL R, et al. Thin wafer-level camera lenses inspired by insect compound eyes [J]. *Optics Express*, 2010, 18(24): 24379-24394.
- [8] JEONG K H. Biologically inspired artificial compound eyes [J]. *Science*, 2006, 312(5773): 557-561.
- [9] YU Yingsong, ZHAO Yapu. Deformation of PDMS membrane and microcantilever by a water droplet: comparison between Mooney-Rivlin and linear elastic constitutive models [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2009, 332(2): 467-476.
- [10] PAMPLONA D C, GONCALVES P B, LOPES S R X. Finite deformations of cylindrical membrane under internal pressure [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2006, 48(6): 683-696.

[本刊相关文献链接]

- 王伊卿, 张庆, 甘代伟, 等. 微透镜阵列热压印应力与脱模温度研究. 2013, 47(4): 6-10.
- 陈思翰, 刘福兴. 用选择性激光烧结技术制作陶瓷原件研究. 2011, 45(11): 116-120.
- 于雪梅. 气体静压轴承用多孔 SiC 陶瓷的制备及静态性能. 2011, 45(3): 117-120.
- 张笑, 鲍崇高, 乔冠军, 等. 氧化铝陶瓷注射成型用黏结剂及混料工艺研究. 2011, 45(1): 127-131.
- 冯诗愚, 高秀峰, 刘卫华, 等. 内啮合摆线转子压缩机型线连续性条件研究. 2009, 43(1): 34-37.
- 王伊卿, 赵万华, 施乐平, 等. 光固化快速成型高分辨激光液位检测系统的开发. 2008, 42(11): 1394-1397.
- 汪传美, 李国君, 郑金, 等. 非轴对称端壁成型技术的实验研究. 2008, 42(9): 1086-1090.

(编辑 管咏梅)