

## 大口径导光板抛光及其功率谱密度分析

王 伟<sup>1,2</sup>, 徐 敏<sup>1,2</sup>, 李洪玉<sup>3</sup>, 于国域<sup>4</sup>

(1. 复旦大学 光科学与工程系, 上海 200433; 2. 复旦大学 超精密光学制造工程研究中心, 上海 200433; 3. 哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨, 150001; 4. Optic Glyndwr, Ffordd William Morgan, St Asaph, LL17 0JD UK)

**摘 要:** 光学技术对于现代科学尤其是航天科学的发展起着越来越重要的作用。而具有高精度大口径光学元器件的跨尺度加工一直是现代光学技术的难点。超精密气囊抛光技术是基于计算机控制光学表面成形技术。其采用充气的柔性抛光气囊作为抛光工具, 解决了传统数控抛光方法中抛光头不能很好地和工件吻合的缺点。以 Preston 方程为基础, 研究了超精密气囊抛光的理论材料去除特性, 建立了气囊抛光中“进动”运动方式下的材料去除模型, 并针对气囊抛光工具的物理特性, 按照 Hertz 接触理论对去除模型进行了修正。在理论分析的基础上完成了一块口径为 570 mm 的平面楔形工件的抛光, 使得工件的面形精度 P-V 值达到了  $1/8 \lambda$ , RMS 值达到  $1/75 \lambda$ 。并分析了该元件的功率谱密度 (PSD) 曲线, 窄带噪声及其产生原因。

**关键词:** 抛光; 大口径; Preston 方程; Hertz 接触理论

**中图分类号:** TH161.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)04-0982-06

## Polishing of large-aperture mirror and analysis of power spectral density

Wang Wei<sup>1,2</sup>, Xu Min<sup>1,2</sup>, Li Hongyu<sup>3</sup>, Yu Guoyu<sup>4</sup>

(1. Department of Optical Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China; 2. Shanghai Ultra-precision Optical Manufacturing Engineering Center, Fudan University, Shanghai 200433, China; 3. Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 4. Optic Glyndwr, Ffordd William Morgan, St Asaph, LL17 0JD UK, China)

**Abstract:** As the development of modern optical technology, especially space optical science, more high precision mirrors with large apertures are needed. But it is difficult to manufacture high precision large aperture optical components of multi-scale processing. The method of optical polishing using an ultra-precise bonnet was based upon the technology of computer controlled optical surfacing. A bonnet filled with air was applied as a precise polishing tool which was flexible and able to adapt itself well to the shape of the part, which was superior than other polishing methods. A material removing model of bonnet processed polishing was established according to kinematic principle based on the Preston equation. The model was modified in terms of Hertz contact theory using the physical characteristics of polishing bonnet

收稿日期: 2012-08-10; 修订日期: 2012-09-15

基金项目: 国家科技重大专项课题(2011ZX02402)

作者简介: 王伟(1982-), 男, 博士, 主要从事超精密光学制造方面的研究。Email: wangweiw88@gmail.com

导师简介: 徐敏(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事超精密光学制造与检测方面的研究。Email: minx@fudan.edu.cn

tools. A satisfactory result was obtained for one of the surfaces of a wedge mirror with a diameter of 570 mm. The result of P-V and RMS parameters are  $1/8 \lambda$  and  $1/75 \lambda$  respectively. The PSD curves of the part and the noise of the narrow band are analyzed, as well as the reasons.

Key words: polishing; large aperture mirror; Preston equation; Hertz contact theory

## 0 引言

现代光学技术飞速发展,不断出现的新型光学系统不停地挑战人类对于光学元件的制造水平。这些新型光学系统中有些系统体积庞大,系统中光学元件数量惊人,如美国的国家点火装置(NIF),欧洲南天文台在建的口径为 42 m 的 E-ELT 太空望远镜等<sup>[1-4]</sup>。这些系统是现代新型光学系统中大型光学系统的代表,这些光学系统的共同点之一是:光学元件的口径大、数量多。因此,现代光学加工技术在满足光学元件口径越来越大的要求的同时,也要与日益提高的精度要求相适应。

计算机控制光学表面成形技术(CCOS)是 20 世纪 70 年代发展起来的一项新型光学加工技术,该技术能快速、高效地对光学元件进行加工,成功地解决了大口径、高精度非球面,特别是离轴非球面的高效率加工难题。因此,在现代光学加工中被广泛采用。

20 世纪 90 年代,伦敦光学实验室基于 CCOS 的思想提出一种新的抛光方法<sup>[5]</sup>,其工作原理是采用一个柔性气囊对工件表面进行抛光,通过计算机控制抛光气囊相对工件的压力、旋转、进给速度及驻留时间实现对光学元件的精密加工,最终得到满足精度要求的非球面面形。

该方法最大的优点是:由于采用了柔性的球形充气气囊作为抛光工具,解决了传统数控抛光方法中抛光头不能很好地和工件吻合的缺点,是一种高效、高精度的光学元件确定性加工方法,尤其适用于大口径非球面光学元件的加工<sup>[6-8]</sup>。其与英国 Zeeko 公司联合开发的 IRP 系列抛光机床已经进入商用市场。

气囊抛光采用了特殊的抛光头结构,抛光头为球形气囊,外表面粘贴聚氨酯抛光垫,装于旋转的工作部件上,形成封闭的腔体,内部充入低压气体。气囊抛光模在抛光时,其旋转轴与工件表面局部法线成一角度,由气囊抛光模凸起的一个侧面与工件表面接触,避免了传统同轴旋转抛光中心速度为零的

缺点,气囊抛光原理如图 1 所示。 $N$  为垂直于工件局部表面的法线, $H$  是气囊旋转轴,对工件上某点进行加工时,气囊旋转轴绕工件表面某点局部法线以一定的角度连续旋转,当气囊旋转轴  $H$  移动时,其绕法线  $N$  保持角  $\rho$  恒定“进动”,在空间扫过一个圆锥面的轨迹。理论上讲,工件在各个方向上都可被均匀抛光,从而获得无明显抛光擦痕的高精度的表面;零件自身也能旋转,而抛光头高速旋转获得较高的去除率。抛光气囊的路径、速度和压力可以通过计算机进行控制。这种抛光压力和接触面积的连续变化的能力,决定了机床具有抛光球面和非球面的能力,且可实现的加工表面范围十分广泛,甚至是任意自由曲面。

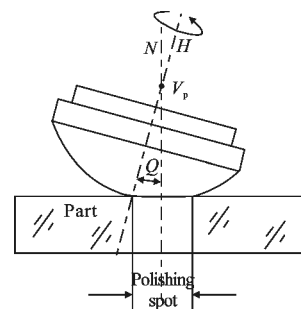


图 1 气囊抛光原理示意图

Fig.1 Scheme of bonnet polishing

## 1 “进动”方式抛光下的材料去除模型

光学表面抛光受多种因素影响,在一定的假设条件下,可以用 Preston 方程描述气囊抛光材料去除量与各种工艺参数的关系<sup>[9]</sup>。Preston 方程中,将速度和压力以外的一切因素的作用全部归为一个比例常数,这样就建立了材料去除量、压力和瞬时速度的线性关系。

$$dz/dt = k \cdot v \cdot p \quad (1)$$

式中: $k$  为比例常数,它与被抛光材料、抛光膜层材料、抛光粉种类、抛光液浓度、PH 值以及抛光温度有关; $v$  为工件表面某一点的瞬时抛光速度; $p$  为抛光压力, $v$  和  $p$  都是关于位置坐标  $(x, y)$  和时间  $t$  的函数。

定义去除函数  $R(x, y)$  为不作移动时抛光气囊在单位时间  $T$  内的平均材料去除量, 即

$$R(x, y) = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta Z_r(x, y, t) \cdot dt \quad (2)$$

式中:  $\Delta Z_r(x, y, t)$  为单位时间内的材料去除量。当压力及其他工艺条件不变的情况下, 抛光气囊的去除函数与相对运动速度  $v_p$  成正比, 所以求得抛光盘覆盖区域内各点的相对运动速度  $v_p$  随转角  $\theta$  的变化规律之后, 在公转一周内对其积分后即可得到抛光气囊覆盖区域内材料去除量的分布函数, 也就是抛光气囊的去除函数。公转周期为  $T=2\pi/\omega_0$ , 加工过程中压强  $p$  均匀恒定, 因此去除函数为:

$$R(r) = \frac{1}{T} \int_0^T k \cdot p(x, y) \cdot v(x, y) = \frac{kp}{2\pi} \int_{-\theta_0}^{\theta_0} v(x, y) \cdot d\theta \quad (3)$$

1.1 去除特性的数学建模

图 2 是抛光头“进动”示意图, 图 3 为抛光接触区内任意一点的速度合成, 抛光气囊绕自身轴线的旋转速度为  $\omega_0$ , 绕工件法线的旋转速度为  $\omega$ ,  $O$  点为

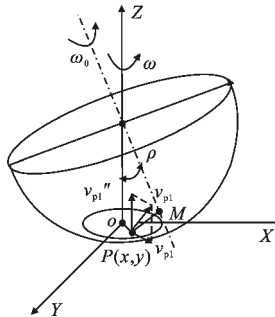


图 2 抛光头“进动”的空间运动示意图

Fig.2 Sketch of space movement of polishing bonnet precession

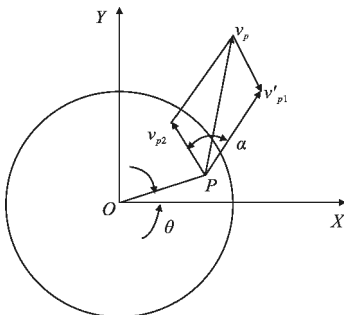


图 3 抛光接触区内任意点的速度关系

Fig.3 Velocity relation of any point in polishing contact zone

圆形抛光接触区的圆心,  $P(x, y)$  点为抛光接触区内任意接触点, 进动角为  $\rho$ , 设气囊压缩量为  $d$ , 抛光气囊的半径为  $R$ , 由进动运动的几何关系, 可得抛光接

触面内的速度分量:

$$v'_{p1} = 2 \cdot \cos\rho \cdot (R-d)^{-1} \sqrt{s \cdot (s-\alpha) \cdot (s-\beta) \cdot (s-\gamma)} \cdot \omega_0 \quad (4)$$

式中:  $\alpha = [(R-r)^2 + x^2 + y^2]$ ;  $\beta = (R-r) \cdot (\cos\rho)^{-1}$ ;  $\gamma = [y^2 + [(R-r) \cdot \text{tg}\rho - x]^2]^{1/2}$ ;  $s = \frac{1}{2} \alpha \cdot \beta \cdot \gamma^{\circ}$ 。

$$V_{p2} = r \cdot \omega \quad (5)$$

$$V_p = \sqrt{(V'_{p1})^2 + (V_{p2})^2 + 2\cos\alpha \cdot V'_{p1} \cdot V_{p2}} \quad (6)$$

将公式(6)代入公式(3), 即可利用计算机仿真得到气囊抛光的去除函数, 对于去除函数, 最重要的是它的形状,  $k$  值主要影响去除函数的幅值, 反应去除效率的高低, 进行计算机仿真时通过归一化处理可以不必考虑  $k$  值的大小。

1.2 Hertz 接触理论对去除模型的修正

以上去除模型的推导是假设气囊为理想的气囊, 即与工件接触时, 对工件表面的压力可看作是气囊的充气压力, 接触区的压强均匀分布, 但实际上, 所使用的气囊从物理机械特性上分析, 不能看作是理想的气囊。因此, 气囊对抛光接触区的压力由气囊材料本身弹性变形和充气压力两者共同作用产生。可以将充气的气囊模拟为弹簧系统, 气囊在不充气时的弹性系数与气囊的物理机械特性有关; 充气的气囊弹性系数不但与气囊的物理机械特性有关, 还与充气压力的大小有关。因此, 在不同的充气压力下, 气囊的弹性系数是不同的。对于相等的气囊压缩量, 气囊在不同的充气压力下, 对抛光接触区所施加的载荷也不同, 当气囊压缩量不大的情况下, 可以按照 Hertz 接触理论求解抛光接触区的压力分布<sup>[10]</sup>, 该理论是由 Hertz 于 1882 年首先提出的, 压力分布如下式:

$$p(x, y) = p_0 \left( 1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} \right)^m \quad (7)$$

式中: 平均压力  $p_0 = (n+1)ke/\pi ab$ ; 抛光面积被认为是椭圆形接触区的边界所围成的区域, 由接触区的椭圆方程  $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$  确定;  $m$  为压力分布系数; 于是气囊抛光过程中, Preston 方程可以修正为:

$$H(r, \theta) = \int K_p \frac{(m+1)ke}{\pi ab} \times \left( 1 - \frac{r^2 \cos^2(\theta)}{a^2} - \frac{r^2 \sin^2(\theta)}{b^2} \right)^m \times V(r, \theta) \cdot dt \quad (8)$$

式中:  $m$  可通过实验估算, 一般情况下  $m$  取 1, 当  $r=0, \theta=0$  时可通过实验得到接触区的面积和中心去除深度, 从而得到  $K_p$ 。

根据上述理论分析,通过实验论证可以得出以下结论<sup>[11]</sup>:

(1) 气囊定点抛光加工区域为一椭圆,“进动”运动抛光的去除函数是近似的高斯分布。

(2) 进动角越大,去除越均匀,但进动角超过一定范围时,气囊的变形严重,考虑到抛光头的实际几何形状与在机器各自由度的运动范围,进动角取 10°-20°较为合适,特别当进动角为 15°时,气囊抛光的去除函数与理想的高斯分布比较接近,如图 4 所示。

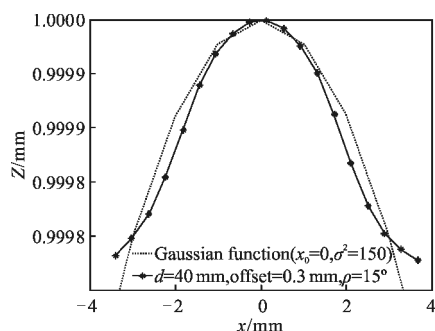


图 4 去除函数实验结果与高斯函数的比较

Fig.4 Comparison of experimental results of removing function and Gauss function at 15°

(3) 气囊压缩量越大去除量越大,但去除特性越不均匀,且气囊变形的影响越大,中心与抛光边缘去除量相差也越大,越容易产生高频信息。压缩量的选择不应超过 0.5 mm。

(4) 压力和旋转速度基本不影响去除特性的形状,但影响去除效率,且去除效率随压力变化是先增大后减小,这是因为压力增大,有效抛光的抛光粉颗粒会随之减少。

## 2 “进动”方式抛光光学元件及抛光结果 PSD 分析

### 2.1 对于大口径光学元件的抛光

根据上述理论分析及实验论证结果对一片圆形导光板进行抛光加工。所用设备为 Zeeko 公司的 IRP-600 抛光机。

被抛光的光学元件为口径为 570 mm 的圆形导光板,通光口径为 470 mm,一面为平面(a 面),另一面为 30'的楔角平面(b 面),工件薄边处厚度为 70mm,材料为 K9。其中 a 面已用环抛的方法加工精度至 P-V 值 0.16 λ(λ=632.8 nm,下同),要求加工 b 面,使

透射波前(t 面)的精度优于 P-V 值 1/6 λ。

整个抛光过程保持温度、湿度及环境的稳定,检测时也使元件达到热平衡后方进行检测。

如图 5 所示的是 t 面经精密气囊抛光之前的面形检测结果。

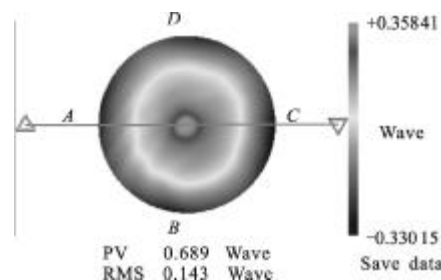


图 5 t 面经精密气囊抛光之前的面形检测结果

Fig.5 Measurement result of face t before polishing

从图 5 中可以看出,元件经过环抛之后,t 面面形 P-V 值为 0.689 λ,RMS 值为 0.143 λ。

整个抛光加工遵循如图 6 所示流程,抛光过程中采用的抛光参数如下:进动角为 15°,气囊压缩量

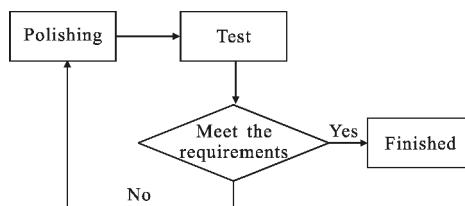


图 6 抛光加工流程示意图

Fig.6 Scheme of polishing processing

为 0.3 mm,磨头转速为 1 500 r/min,进给速度为 1 000 mm/min,经过 3 次精密气囊抛光循环之后,t 面的面形检测结果如图 7 所示。

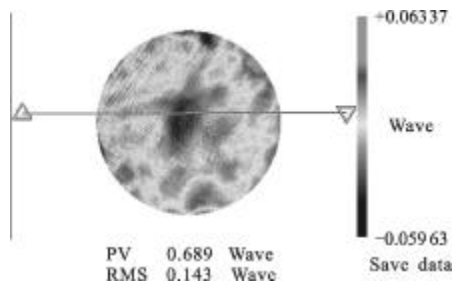


图 7 t 面经精密气囊抛光后的面形检测结果

Fig.7 Measurement result of face t after polishing

从图 7 中可以看出:元件经过精密气囊抛光之后,t 面面形精度达到了 P-V 值优于 1/8 λ,RMS 值为 1/75 λ。其加工结果令人满意。图 8 所示为该元件

加工完成之后的照片。



图 8 导光板抛光完成后的照片

Fig.8 Picture of the work piece after polishing

## 2.2 对于抛光结果 PSD 的分析

功率谱密度(PSD)指标是衡量该大口径光学元件的一项重要指标,因此,有必要分析该元件的 PSD 曲线。SPIE 5431 中提出了 NIF 对于光学元件 PSD 的部分要求。

如图 9 所示,图中虚线即按 NIF 指标的拟合曲线,实线为实际加工元件的 PSD 检测数据。图 9(a)为 X 方向,图 9(b)为 Y 方向。

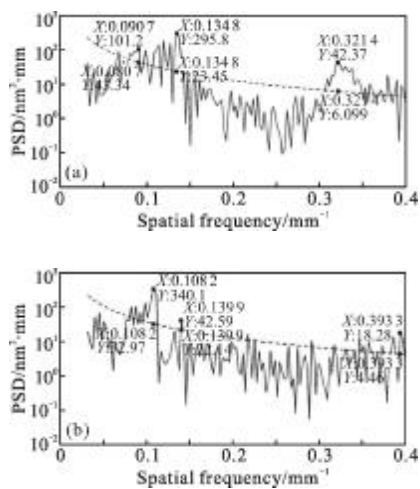


图 9 NIF PSD 指标拟合曲线与气囊抛光元件的 PSD 检测数据对比

Fig.9 Comparison of NIF PSD index fitting curve and bonnet polishing PSD result

从图 8 中可以看到,就该元件精密气囊加工质量而言,整体质量仅在 PSD 谱中的空间频率 $0.1/\text{mm}$ 、 $0.33/\text{mm}$  两窄带存有噪声,其振幅在中频部分超 NIF 指标峰值达 8~9 倍,但整体权重并不大。而高频部分( $0.33/\text{mm}$ )一般激光装置的空间滤波可实现抑

制,从而将控制激光在传输中小信号非线性增长。

造成该元件在 PSD 谱中的空间频率  $0.1/\text{mm}$ 、 $0.33/\text{mm}$  两窄带存有固定噪声的原因有多种,譬如加工时的环境震动、机器的共振、抛光路径的叠加以及所采取的加工参数等。针对不同的可能形成原因,需要采取相应的手段来减小其在 PSD 谱中的空间频率  $0.1/\text{mm}$ 、 $0.33/\text{mm}$  两窄带存有的固定噪声。如对机器的放置地点采取隔震地基以减小环境震动和机器共振产生的影响;抛光加工时进一步优化抛光路径,避免抛光路径的叠加产生的影响;进一步通过理论和实验的指导优化抛光参数等。

结果表明:不同的光学抛光工艺及方法导致元件表面的最终结果不同,如通过传统的环抛工艺可较容易获得 GRMS、PSD 等指标的达标,但对大口径元件的 PV、RMS 指标达标则较困难、特别是由于大尺寸材料诸如应力、折射率均匀性等导致的局部表面面形的控制;而利用高精密气囊数控加工则可获得高精度的光学面形。

## 3 结论

文中通过分析精密气囊的抛光机理,建立了其在“进动”抛光模式下的材料去除模型,并用 Hertz 接触理论对去除模型进行了修正。完成了对一块口径为  $570\text{ mm}$  的平面楔形光学元件的抛光,使得工件的面形精度 P-V 值由抛光前的  $0.689\lambda$  达到了  $1/8\lambda$ , RMS 值由抛光前的  $0.143\lambda$  达到  $1/75\lambda$ ,加工精度令人满意。但是分析抛光结果的 PSD 数据时发现,其在空间频率为  $0.1/\text{mm}$ 、 $0.33/\text{mm}$  的两窄带存有噪声,因此,在接下来的工作中需要研究如何打破该抛光方法在此两个窄带下的固有噪声。

## 参考文献:

- [1] Shore P, Cunningham C, Debra D, et al. Precision engineering for astronomy and gravity science [C]//CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(2): 694-710.
- [2] Keck Observatory W M. ANNUAL report [EB/OL]. [http://keckobservatory.org/about/annual\\_reports.2008](http://keckobservatory.org/about/annual_reports.2008).
- [3] NASA. AXAF high resolution mirror [EB/OL]. <http://hea-www.harvard.edu/HRC/AXAF/hrma.html.2010>.
- [4] Bajt S, Chapman H N, Spiller E, et al. Multilayers for next generation X-ray sources[C]//SPIE, 6586: 18-24.

- [5] Bingham R G, Walker D D, Kim D -H, et al. A novel automated process for aspheric surfaces[C]//SPIE, 2000, 4093: 445-450.
- [6] Walker D D, Beaucamp A, Brooks D, et al. Novel CNC polishing process for control of form and texture on aspheric surfaces[C]//SPIE, 2002, 4767: 99-106
- [7] Walker D D, Beaucamp A, Brooks D, et al. New results from the precessions polishing process scaled to larger sizes [C]//SPIE, 2004, 5494: 71-81.
- [8] Walker D D, Beaucamp A, Doubrovski V, et al. Automated optical fabrication—first results from the new precessions 1.2 m CNC polishing machine[C]//SPIE, 2006, 6273: 91-98.
- [9] Fan Quantang, Zhu Jianqiang, Zhang Bao'an. Effect of the geometry of workpiece on polishing velocity in free annular polishing[J]. Chin Opt Lett, 2007, 5(5): 298-300.
- [10] Johnson K L. Contact Mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1992: 72-77.
- [11] Li Hongyu, Zhang Wei, Yu Guoyu. Removing characteristics of ultraprecise bonnet polishing on spatial optics elements[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(3): 811-817.

## 下期预览

# Q235 钢拉伸过程热塑性效应试验研究及有限元分析

王为清, 杨立, 范春利, 吕事桂, 石宏臣

(海军工程大学 动力工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 材料发生塑性变形时, 部分塑性功将转化为热, 从而使材料温度发生改变。因此, 用红外热像仪对物体表面的红外热辐射进行测量, 即可对材料塑性变形过程中产生的热效应进行定量描述。在分析材料热弹塑性效应基础上, 通过红外热像仪对 Q235 钢试件在准静态拉伸过程中的表面温度进行测量, 获得了不同应变率条件下试件表面温度分布及随时间的变化规律; 通过对比由 ANSYS 数值模拟以及由试验得到的载荷-位移曲线, 确定了 Q235 钢全程拉伸真应力-真应变曲线, 并以此作为材料力学本构关系对上述拉伸实验中的热塑性效应进行数值模拟, 讨论了应变率、塑性功向热能转化系数(系数)、对流换热系数等对试件表面温度变化的影响。结果表明, 应变率越大, 变形过程中的热损失越小, 从而由塑性变形产生的温升也越高; 由拉伸过程中颈缩区域的温升最高、颈缩区域向试件两端温升逐渐降低的分布特点, 则可说明在同一时间内塑性变形越大、越集中的区域, 其温升也越大。文中的数值计算结果与实验结果吻合较好, 说明用现有的有限元商业软件对材料热塑性耦合效应进行数值分析不失为一种可靠高效的研究方法。