

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.042

# 平面磨削淬硬薄工件磨削力研究\*

张莹<sup>1,2</sup> 葛培琪<sup>1</sup> 张磊<sup>1</sup> 毕文波<sup>1</sup> 江京亮<sup>1</sup>

(1. 山东大学机械工程学院, 济南 250061; 2. 山东商业职业技术学院, 济南 250103)

**【摘要】** 平面磨削淬硬薄工件实验测定的磨削力曲线呈现凸形,磨削后的工件表面呈现凹形,分析了曲线变化原因,并对磨削力变化进行了预测。通过磨削热力耦合有限元分析了工件变形,并对变形量影响磨削力的变化进行了分析。结果表明:工件变形导致磨削用量增大,是引起磨削力变化的主要原因,而且工件装夹方式对变形有很大影响。磨削力的变化又改变了流入工件的磨削热流密度,从而影响磨削温度场,导致磨削淬硬层分布不均。根据磨削力、磨削温度和工件变形之间的相互影响关系,通过逐步迭代法预测出磨削力变化曲线,并与实验曲线进行了对比。

**关键词:** 磨削力 磨削淬硬 磨削温度 热变形 有限元

**中图分类号:** TH16; TG580.1<sup>+</sup>3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)08-0231-04

## Grinding Force of Surface Grinding Hardening Thin Workpiece

Zhang Ying<sup>1,2</sup> Ge Peiqi<sup>1</sup> Zhang Lei<sup>1</sup> Bi Wenbo<sup>1</sup> Jiang Jingliang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China

2. Shandong Institute of Commerce and Technology, Jinan 250103, China)

### Abstract

The grinding force curve always varied as convex in the surface grinding hardening thin workpiece. The workpiece became concavity on the ground profile. Through coupled thermal-mechanical FEM analysis, the variation of grinding magnitude caused by the grinding deformation was the main reason for grinding force variation. The mode of workpiece clamping exerted tremendous influence on the deformation. The grinding force variation affected the heat flux into the workpiece and the grinding temperature. As a result, the grinding depth is non-uniform. Through the relationship among the grinding force, grinding temperature and the grinding thermal deformation, the grinding force can be divided into intervals and be iterated. The predictable grinding force curve has good agreement with the experiment result and is useful to analyze the grinding hardening depth distribution.

**Key words** Grinding force, Grinding hardening, Grinding temperature, Thermal deformation, Finite element method

### 引言

磨削淬硬技术需要磨削过程产生足够的热量,以达到工件奥氏体相变温度<sup>[1]</sup>。平面磨削淬硬薄工件时,磨削热力作用引发了工件的变形<sup>[2]</sup>,从而影响实际材料去除量,已有研究表明由于磨削过程

中的热变形导致加工后的工件呈凹形。磨削量的变化引发了磨削力的动态变化,从而流入工件的热流量也发生变化,导致了磨削淬硬层的不均匀,因此有必要研究磨削力变化规律与热变形量之间的相互关系,从而能更好地控制磨削淬硬。

通过磨削热力耦合有限元分析,可以数值求解

收稿日期: 2011-10-20 修回日期: 2011-12-02

\* 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2011CB706605、2009CB724403)

作者简介: 张莹, 博士生, 山东商业职业技术学院讲师, 主要从事磨削淬硬研究, E-mail: girlcheryl@163.com

通讯作者: 葛培琪, 教授, 博士生导师, 主要从事磨粒加工及传热控制研究, E-mail: pqge@sdu.edu.cn

磨削变形量,磨削变形量又影响磨削力的变化,从而可以通过磨削力、磨削温度、磨削变形量之间的相互关系,结合磨削力预测模型对磨削力曲线进行预测,同时也可分析磨削淬硬层的分布。

## 1 磨削淬硬实验

磨削力测量实验采用单程平面顺磨,选用MKL7120X6型磨床,由于磨床刚度较好,实验中忽略机床-砂轮系统弹性变形及砂轮磨损。实验中采用YDXM-III97型三向压电石英晶体测力平台测定磨削力。磨削加工工件材料为40Cr,工件尺寸为80 mm × 11 mm × 11 mm。磨削淬硬加工参数:砂轮型号为WA60L6V,砂轮线速度为25 m/s,磨削方式为顺磨。实验中对不同进给速度和磨削深度下的磨削力进行了采集,图1是在进给速度10 mm/s,磨削深度0.1 mm的磨削工况下的切向磨削力。

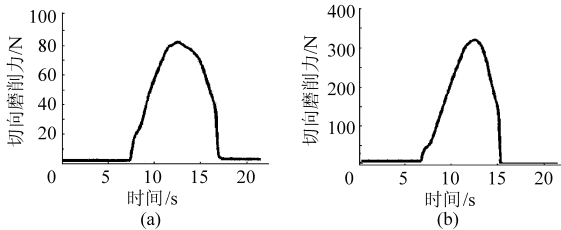


图1 切向磨削力曲线

Fig. 1 Curves of grinding tangential force

(a) 固定工件两侧面底部 (b) 固定工件两侧面顶部

## 2 磨削力预测模型

磨削力起源于砂轮与工件接触后引起的弹性变形、塑性变形、切屑形成以及磨粒和结合剂与工件表面之间的摩擦作用,磨削力是一个表征磨削情况的主要参数<sup>[3-4]</sup>。采用的磨削力理论计算模型为基于概率统计的平均磨削力预测方法,在磨削弧区内,按照磨粒是否发生切削行为,将磨粒分为切削磨粒、耕犁磨粒和滑擦磨粒,从单颗粒金刚石切削实验得知,当金刚石的切入深度小于某一临界深度时,是不会发生切削作用的。通过磨粒切入深度求出磨屑的体积,而宏观切除率与微观切除率是相等的,由此可以计算出磨粒的切入深度。假设砂轮表面磨粒为正态分布,对磨削弧区的磨粒进行统计,得到磨削弧区单位面积内参与切削磨粒数目和参与滑擦磨粒数目<sup>[5-6]</sup>。对单颗磨粒在切削和滑擦分别进行受力分析,得到相应的磨削力计算模型

$$F_t = \mu \sum_{i=1}^n S_i H_v N_{nhi} + N_{cutt} \frac{3}{2 \cos \theta} k A_m^{-\lambda} \bar{a}_g^{-2} \sin \theta \quad (1)$$

$$F_n = \sum_{i=1}^n S_i H_v N_{nhi} + N_{cutt} \frac{6}{\pi \cos \theta} k A_m^{-\lambda} \bar{a}_g^{-2} \sin \theta \tan \theta \quad (2)$$

式中  $F_t$ ——切向磨削力  $F_n$ ——法向磨削力

$\mu$ ——摩擦因数  $\theta$ ——磨粒锥角

$S_i$ ——滑擦磨粒接触面积

$H_v$ ——材料维氏硬度

$N_{nhi}$ ——单位时间内磨削弧区内滑擦磨粒数目

$N_{cutt}$ ——单位时间内磨削弧区内切削磨粒数目

$k$ ——与材料有关的系数

$A_m$ ——平均切削面积

$\bar{a}_g$ ——磨粒平均切削深度

$\lambda$ ——系数,一般取0.2~0.5

磨削力预测曲线如图2所示,切向磨削力随工件进给速度的增加而增加,随磨削深度的增加而增加。

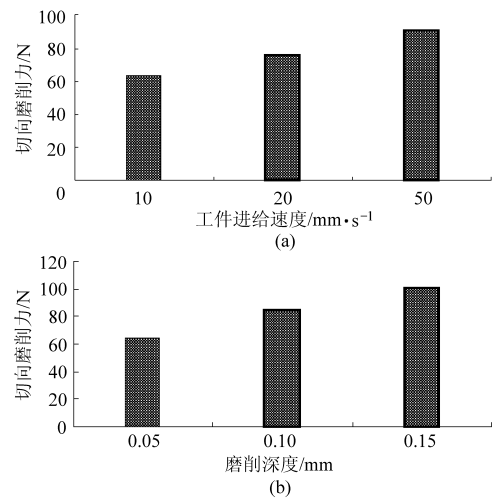


图2 切向磨削力

Fig. 2 Grinding tangential force

(a) 砂轮线速度  $v_s = 35$  m/s,磨削深度  $a_p = 0.05$  mm  
(b) 砂轮线速度  $v_s = 35$  m/s,工件进给速度  $v_w = 10$  mm/s

## 3 磨削热力耦合有限元分析

### 3.1 磨削热变形数值分析

用对应图1a平均切向磨削力  $F_t$  换算热流密度  $q$  为

$$q = \frac{F_t (v_s + v_w)}{bl_c} \quad (6)$$

式中  $b$ ——砂轮宽度  $l_c$ ——磨削弧长

通过热流密度  $q$  和热量分配比  $\varepsilon$ <sup>[7]</sup> 可以计算出磨削区域进入工件的热流密度为

$$q_w = \varepsilon q \quad (7)$$

其中  $\varepsilon = \frac{1}{1 + \left(\frac{v_s}{v_w}\right)^{1/2} \left[\frac{(k\rho c)_c}{(k\rho c)_w}\right]^{1/2}}$  (8)

磨削热量传入工件以后,在工件内传导而形成

温度梯度,分析温度场的模型是将磨削热视为热流密度为  $q_w$  带状热源在半无限大表面上的移动。用数值分析方法求解温度场<sup>[8-9]</sup>,先建立整个工件的实体模型,然后对其进行网格划分,施加边界条件(图 3)。通过有限元数值计算求解出的磨削温度场如图 4 所示。

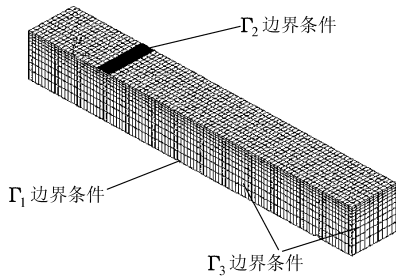


图 3 工件模型处理示意  
Fig. 3 Modeling and meshing

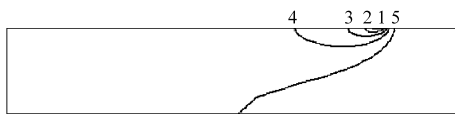


图 4 磨削温度场等温线  
Fig. 4 Diagram of grinding isothermal phase  
1. 420°C 2. 260°C 3. 940°C 4. 460°C 5. 300°C

磨削热及磨削力引发了工件变形,通过有限元数值分析求解变形量,加载载荷为磨削温度和磨削力<sup>[10]</sup>。首先给模型施加位移约束条件,与实验采用两种夹具对应,方案 1 约束位置为工件两侧面底部,方案 2 约束位置为工件两侧面端部,显然方案 1 约束有效面积大。然后加载温度场和磨削力,求解出工件不同位置高度方向变形量如图 5 所示。从图 5 中可以看出,由于磨削开始温度较低引起工件高度方向变形量小,磨削中部区域的变形量变化不大。方案 1 约束下高度变形量最大达 0.158 mm,方案 2 约束工件高度变形量为 0.058 mm,可见工件夹持条件对磨削变形有很大影响,而磨削力的加载对变形量影响很小,分析时被忽略。由于磨削设定切深为 0.1 mm,从而实际加工切深为设定切深叠加工件变形高度,因此实际加工切深远大于磨削淬硬设定切深。由磨削力预测模型可知,磨削切深对磨削力有很大影响,因而磨削淬硬过程中磨削热变形是磨削力增大的主要原因。这也被磨削力测量结果所验证,图 1a 与图 1b 采用相同磨削用量,由于夹具夹持面积不同,两组磨削力值相差很大。

### 3.2 变磨削力作用下磨削热变形数值分析

由于方案 1 中磨削力动态变化较大,用时变的磨削力换算出时变热流密度与实际更加吻合,再通过时变热流密度求解磨削温度场及热变形量。由于热变形导致磨削深度增大,从而增大了磨削弧长,因

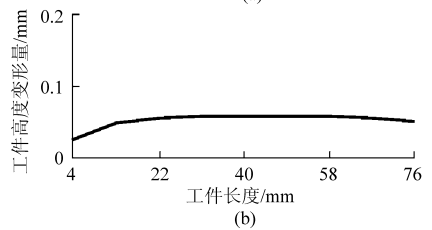
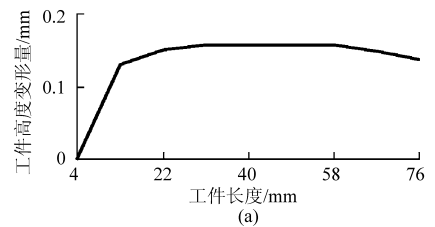


图 5 工件高度变形量  
Fig. 5 Height deformation  
(a) 方案 1 (b) 方案 2

而式(6)应代入变化后的磨削弧长  $l_c$ 。为修正磨削弧长  $l_c$ ,先通过磨削力与原磨削弧长求解温度场,然后求解磨削热变形,获得修正切深,再用修正切深换算磨削弧长  $l_c$ ,再重复温度场与热变形求解,直到最后求解出的热变形量与上次求解出的热变形量基本一致,说明磨削力、磨削温度与磨削热变形相互对应。用变热流密度方式分析图 1b,对应的磨削最高温度变化曲线如图 6 所示,工件高度方向热变形量曲线如图 7 所示。由于图 1b 工况下磨削参数大,测量的磨削力动荡明显,由此引起的磨削温度与磨削热变形变化明显,都呈现先上升,后下降的趋势。而且工件加工完成后由于冷却过程工件高度进一步减小,冷却后的轮廓如图 8 所示。由图 8 可以看出,用时变热流密度加载进行热力耦合模拟出来的工件最终轮廓与实验测定结果有很好的对应性。最终有效淬硬层深度是淬硬层去除凹形后剩余深度,凹度的存在使有效淬硬层深度降低。

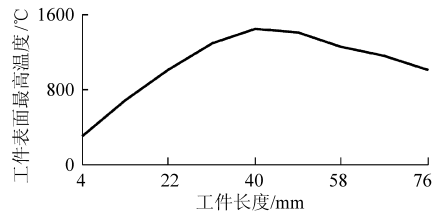


图 6 工件表面最高温度曲线  
Fig. 6 Top temperature of surface

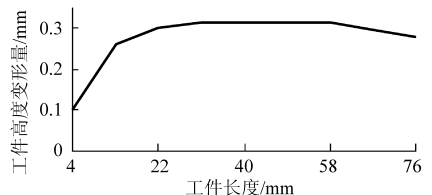


图 7 变磨削力下工件高度变形量曲线  
Fig. 7 Height deformation under variant grinding force

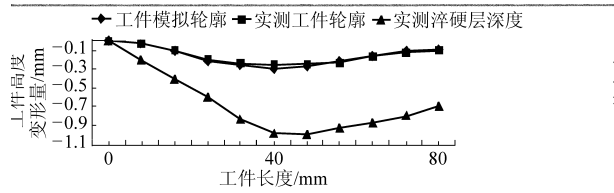


图8 工件表面轮廓

Fig. 8 Workpiece surface profile

#### 4 动态磨削力曲线预测

根据实验测量的磨削力进行了热变形数值分析,得出磨削力、磨削温度和磨削热变形量三者之间的关系,通过迭代方式可以预测磨削力变化曲线。将磨削力分成  $N$  个区间,考虑到温度模拟连续性,以区间长度为一个磨削弧长换算出  $N$  值,先根据磨削力预测模型计算出加工参数下的初始磨削力,然后数值分析计算出热变形量。从磨削热变形量获得下个区间的磨削修正加工参数,再通过磨削力预测模型计算出修正加工参数后的磨削力,依次循环,最后记录下每个区间的磨削力,即可绘制出预测磨削力变化曲线,流程如图9所示。

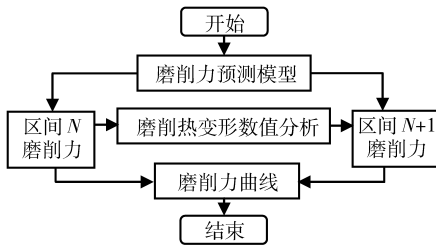


图9 磨削力预测流程

Fig. 9 Forecasting flowchart of grinding force

不同加工参数下的切向磨削力预测曲线与实验测量曲线对比如图10所示。

对图10中实验测量磨削力曲线和预测曲线对比分析如下:

(1) 预测曲线与实测曲线都是凸弧,具有较好的对应性,说明动态磨削力预测模型的可行性。而存在误差可能产生于磨削力预测模型、数值分析模

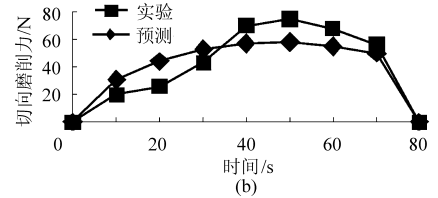
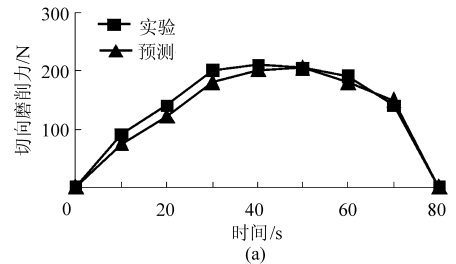


图10 磨削力曲线

Fig. 10 Grinding curve

(a)  $v_s = 35 \text{ m/s}$ ,  $v_w = 30 \text{ mm/s}$ ,  $a_p = 0.15 \text{ mm}$

(b)  $v_s = 35 \text{ m/s}$ ,  $v_w = 10 \text{ mm/s}$ ,  $a_p = 0.05 \text{ mm}$

型和加工误差等。

(2) 图10a相比图10b磨削力振荡小,且图10a实测曲线与模拟曲线误差小。原因是图10a加工参数下虽然磨削温度高,但由于进给速度快,工件深度方向高温范围少,因而对应的磨削热变形量变化小,磨削力动态变化幅度相应小。图10b由于进给速度慢,热量积累多,在工件深度方向高温范围大,因而热变形量变化大,引起了磨削力的动态变化大。

#### 5 结论

(1) 平面磨削淬硬薄工件时,磨削高温引发的工件热变形增大了磨削用量,是磨削力变化的主要原因。

(2) 平面磨削淬硬薄工件时,由于磨削力的动态变化引起磨削温度场的变化,导致磨削淬硬层不均匀。

(3) 根据磨削力、磨削温度和磨削热变形之间相互关系,可以将磨削力分解成  $N$  个区间,用迭代的方式得到的磨削力预测曲线有助于分析磨削淬硬层的分布。

#### 参考文献

- 葛培琪,孙建国. 磨削淬硬-磨削加工与表面淬火集成制造技术[J]. 工具技术, 2001, 35(1): 7~10.  
Ge Peiqi, Sun Jianguo. Grinding hardening - integration manufacturing technology of grinding and surface heat treatment process[J]. Tool Engineering, 2001, 35(1): 7~10. (in Chinese)
- Nishihara T, Okuyama S, Kawamura S, et al. Study on the geometrical accuracy in surface grinding-thermal deformation of workpiece in traverse grinding[J]. Journal of the Japan Society of Precision Engineering, 1993, 59(7): 1145~1150.
- Malkin S. Grinding technology theory and application[M]. Shenyang: Northeast University Press, 2002: 1~7.
- 李伯民. 现代磨削技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- 张磊. 单程平面磨削淬硬技术的理论分析和试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.  
Zhang Lei. Theory analysis and experimental investigation for single-pass plane grinding-hardening technology [D]. Ji'nan: Shandong University, 2006. (in Chinese)

## 参 考 文 献

- 1 Berckmans D. Perspectives of precision livestock farming[C]//Biennial Conference of the Australian Society for Engineering in Agriculture(SEAg), Brisbane: SEAg, 2009.
- 2 王玲, 王超峰, 郑奎. 基于 ARM 的蛋鸡养殖场网络视频监控系统设计[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 186 ~ 191.  
Wang Ling, Wang Chaofeng, Zheng Kui. Design and implementation of network video surveillance system for laying hens farm based on ARM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 186 ~ 191. (in Chinese)
- 3 Cangar O, Leroy T, Guarino M. Automatic real-time monitoring of locomotion and posture behavior of pregnant cows prior to calving using online image analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 64(1): 53 ~ 60.
- 4 Xue Xinwei, Henderson Thomas C. Feature fusion for basic behavior unit segmentation from video sequences[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2009, 57(3): 239 ~ 248.
- 5 Aydin A, Cangar O, Ozcan S E, et al. Application of a fully automatic analysis tool to assess the activity of broiler chickens with different gait scores[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 73(2): 194 ~ 199.
- 6 Ahmad P, Anette W, Claudia B, et al. Automatic monitoring of turkeys: a vision-based approach to detect and analyse the behaviour of turkeys in transport cages based on ellipse fitting[C]//ASABE-7th World Congress on Computers in Agriculture Conference Proceedings, 2009.
- 7 陈长喜, 张宏福, 飞颢经纬. 肉鸡产业技术体系生产监测与产品质量可追溯平台设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 100 ~ 106.  
Chen Changxi, Zhang Hongfu, Feixie Jingwei. Traceability platform design of production monitoring and products quality for broilers industry technology system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 100 ~ 106. (in Chinese)
- 8 陆颖瑜, 林海, 张永林. 基于 Java 与 JMF 的视频监控系统[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(11): 2 740 ~ 2 742, 2 761.  
Lu Yingyu, Lin Hai, Zhang Yonglin. Video surveillance system based on Java and JMF[J]. Computer Engineering and Design, 2007, 28(11): 2 740 ~ 2 742, 2 761. (in Chinese)
- 9 王从局. 基于 JMF 的流媒体传输实践[J]. 中国民航飞行学院学报, 2011, 22(4): 53 ~ 56.  
Wang Congju. Transmission practice based on JMF streaming media[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2011, 22(4): 53 ~ 56. (in Chinese)
- 10 熊迎军, 沈明霞, 孙玉文, 等. 农田图像采集与无线传输系统设计[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 184 ~ 187.  
Xiong Yingjun, Shen Mingxia, Sun Yuwen, et al. Design on system of acquisition and wireless transmission for farm land image[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 184 ~ 187. (in Chinese)
- 11 刘龙申, 沈明霞, 孙玉文, 等. 基于 FPGA 的农田图像采集与 3G 无线传输系统设计[J]. 农业机械学报, 2011, 42(12): 186 ~ 190.  
Liu Longshen, Shen Mingxia, Sun Yuwen, et al. Acquisition system and wireless transmission by 3G for farmland image based on FPGA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 186 ~ 190. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 234 页)

- 6 张建华. 单程平面磨削淬硬层预测及其摩擦磨损性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2008: 19 ~ 102.  
Zhang Jianhua. Hardening layer forecast and frictional wear investigation for single-pass plane grinding-hardening technology [D]. Ji'nan: Shandong University, 2008: 19 ~ 102. (in Chinese)
- 7 Lavine A S, Malkin S, Jen T. Thermal aspects of grinding with CBN wheels[J]. CIRP Annals-manufacturing Technology, 1989, 38(1): 557 ~ 560.
- 8 王霖, 葛培琪, 秦勇. 基于有限元法的湿式磨削温度场分析[J]. 机械工程学报, 2002, 38(9): 155 ~ 158.  
Wang Lin, Ge Peiqi, Qin Yong. Wet grinding temperature analysis based on FE [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(9): 155 ~ 158. (in Chinese)
- 9 张建华, 葛培琪, 张磊. 磨削淬火技术的温度场仿真研究[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 32(1): 78 ~ 80.  
Zhang Jianhua, Ge Peiqi, Zhang Lei. Temperature simulation for grinding-hardening technology [J]. Journal of Wuhan Polytechnics University, 2008, 32(1): 78 ~ 80. (in Chinese)
- 10 张朝晖. ANSYS 热分析教程与实例解析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.