

DOI: 10.7652/xjtub201804012

已加工表面热源模型研究及磨削温度场数值模拟

王德祥¹, 孙树峰¹, 颜丙亮², 刘新福¹, 江京亮¹

(1. 青岛理工大学机械工程学院, 266520, 山东青岛; 2. 山推道路机械有限公司研究院, 272103, 山东济宁)

摘要: 为了利用浅磨模型对磨削温度场进行数值模拟, 基于圆弧热源模型、砂轮和工件接触表面直角三角形热源, 采用温度匹配法进行了反传热分析, 建立了已加工表面热源分布形状的计算方法。该方法不需预先假设已加工表面热源的分布形状, 即可根据具体的磨削条件, 获得相应的热源分布形状, 解决了以往已加工表面热源的分布形状常被假设为直角三角形、三角形、抛物线和椭圆等形状, 但上述假设都是基于特定的磨削条件, 不能普遍适用于所有磨削工况的问题。采用有限元法建立了磨削温度场的数值仿真模型(浅磨模型), 计算了工件的磨削温度场, 采用热成像仪测量了磨削温度场, 结果表明: 已加工表面热源的分布形状随着磨削条件而改变, 磨削温度场的模拟结果与测量结果具有很好的一致性, 磨削区已加工表面最高温度的模拟值与测量值之间相对误差在 0.8%~9.5% 之间, 建立的浅磨模型可以准确地模拟工件的磨削温度场。

关键词: 磨削; 热源形状; 磨削温度场; 数值模拟

中图分类号: TG580.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)04-0084-06

Modeling of Heat Source on Machined Surface and Numerical Simulation for Grinding Temperature Field

WANG Dexiang¹, SUN Shufeng¹, YAN Bingliang², LIU Xinfu¹, JIANG Jingliang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266520, China;

2. Research Institute, Shantui Road Machinery Company, Ltd., Jinan, Shandong 272103, China)

Abstract: The distributing shape of the heat source on machined surface is constructed to numerically simulate grinding temperature field with the shallow grinding model. Adopting the circular arc heat source model and the right triangular heat source on wheel/workpiece contact surface, the inverse heat transfer analysis is completed by the temperature matching method. The shape of the heat source on a machined surface is usually supposed as right triangle, triangle, parabola or ellipse. However, the above suppositions are based on specified grinding conditions, and are not generally applicable to all grinding conditions. Neglecting the above suppositions, the shape of the heat source on machined surface can be obtained with the proposed scheme according to specific grinding conditions. A shallow grinding model is established by finite element method to analyze the grinding temperature field of the workpiece, and a thermography camera is used to measure the real grinding temperature field. It is found that the shape of the heat source on machined surface varies with the change of grinding conditions. A comparison between the measured and simulated results indicates that the relative error of the maximum temperature on

the machined surface in grinding zone ranges from 0.8% to 9.5%, and the shallow grinding model can accurately simulate the grinding temperature field.

Keywords: grinding; heat source shape; grinding temperature field; numerical simulation

磨削加工需要极高的能量比,绝大部分能量都在磨削区转化为热量^[1]。磨削加工时传入工件的热量会在工件表层产生高温以及极大的温度梯度,导致工件产生热损伤。磨削温度场是研究磨削热损伤的重要依据。

随着计算机技术的快速发展,数值模拟技术成为研究磨削温度场的重要方法。利用计算机进行磨削温度场的数值模拟,需要建立磨削温度场的数值仿真模型。磨削温度场的数值仿真模型可以分为浅磨模型和深磨模型^[2],如图1所示。浅磨模型不需要建立砂轮和工件接触表面与工件已加工表面之间楔形区域的几何模型,直接将热源施加到已加工表面上;深磨模型需要建立楔形区域的几何模型,并且需要划分为精细的网格,而楔形区域内的网格一般具有较大的长宽比,容易导致计算结果不准确^[2]。因此,浅磨模型更加方便,常用于磨削温度场的数值模拟。已加工表面热源的分布形状是进入工件已加工表面的热流密度分布,是利用浅磨模型研究磨削温度场的重要基础。目前,在利用浅磨模型进行磨削温度场的数值模拟时,一般把已加工表面热源分布形状假设为直角三角形^[3]、三角形^[4]、抛物线^[5]和椭圆^[6]等形状。但是,已加工表面热源的分布形状会随着磨削工艺条件改变,上述假设都是基于特定的磨削工艺条件,不能普遍适用于所有的磨削工况。

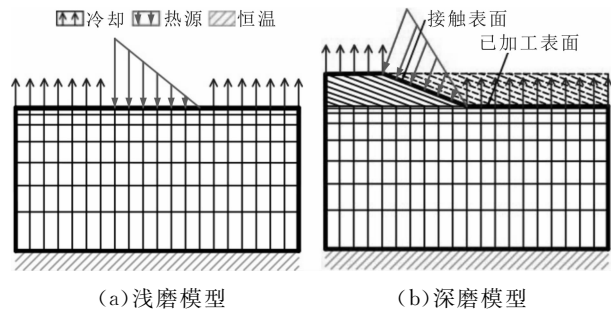


图1 磨削温度场数值仿真模型

本文基于圆弧热源模型、砂轮和工件接触表面直角三角形热源,计算了被磨工件的无量纲磨削温度场,利用温度匹配法进行了反传热分析,建立了已加工表面热源分布形状的计算方法,采用有限元方法建立了磨削温度场的数值仿真模型(浅磨模型),仿真计算了工件的磨削温度场,并同实验结果进行

了对比。

1 已加工表面热源分布形状计算方法

1.1 无量纲磨削温度场计算

由于磨削区未变形切屑厚度沿砂轮和工件接触表面趋于线性分布,并且磨削热流密度与未变形切屑厚度几乎成正比^[7]。因此,砂轮和工件接触表面热源的分布不会随着磨削工艺条件改变,接近于直角三角形分布,如图2所示。

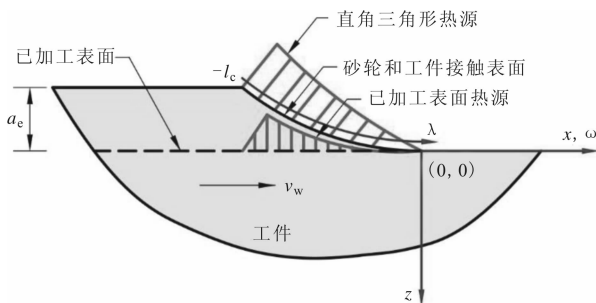


图2 工件磨削区的热源分布

在计算已加工表面热源的分布形状时,首先建立如图2所示的直角坐标系,然后基于圆弧热源模型^[8]、砂轮和工件接触表面直角三角形热源,计算被磨工件的无量纲磨削温度场。无量纲磨削温度场的表达式为

$$\bar{T}(x, z) = \frac{\pi k v_w}{2 a \alpha} T(x, z) = \frac{v_w}{2 \alpha} \int_{-l_c}^0 f(\lambda) \exp \left[\frac{v_w (x - \lambda \cos \varphi_i)}{2 \alpha} \right] \cdot K_0 \left\{ \frac{v_w [(x - \lambda \cos \varphi_i)^2 + (z - \lambda \sin \varphi_i)^2]^{1/2}}{2 \alpha} \right\} d\lambda \quad (1)$$

式中: v_w 是工件速度; α 是工件材料的热扩散率,且 $\alpha = k / (\rho c)$, k 、 ρ 和 c 分别是工件材料的热导率、密度和比热容; q_w 是传入工件的平均热流密度; $T(x, z)$ 是工件的磨削温度场; l_c 是磨削接触弧长,且 $l_c = (a_c d_s)^{1/2}$, a_c 是磨削深度, d_s 是砂轮直径; λ 是积分变量,表示接触表面上任意一点; φ_i 是接触表面上任意一点处的接触角,且 $\lambda = d_s \varphi_i$; K_0 是零阶二类修正贝塞尔函数; $f(\lambda)$ 是描述接触表面热源分布形状的形函数,对于直角三角形热源,其形函数为

$$f(\lambda) = -2\lambda / l_c \quad (2)$$

1.2 已加工表面热源的形函数计算

当如式(1)所示的无量纲磨削温度场 $\bar{T}(x, z)$

由已加工表面热源产生时,根据移动热源理论^[9],可得如下表达式

$$\begin{aligned} \bar{T}(x, z) &= \frac{\pi k v_w}{2 \alpha q_w} T(x, z) = \\ &= \frac{v_w}{2 \alpha} \int_{x_a}^{x_b} s(\omega) \exp \left[\frac{v_w (x - \omega)}{2 \alpha} \right] \cdot \\ &K_0 \left\{ \frac{v_w [(x - \omega)^2 + z^2]^{1/2}}{2 \alpha} \right\} d\omega \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $[x_a, x_b]$ 是已加工表面热源的分布区域; $s(\omega)$ 是描述已加工表面热源分布形状的形函数; ω 是积分变量, 表示已加工表面热源分布区域内的任意一点。

在计算已加工表面热源的形函数时, 首先将已加工表面热源的分布区域等分为 m 个区间, 然后利用温度匹配法^[10]进行反传热分析, 可得以下方程组

$$\sum_{i=1}^m c_{ji} s_i = \bar{T}(x_j, z_e), \quad i, j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

式中: s_i 是第 i 个区间内的未知形函数值; $\bar{T}(x_j, z_e)$ 是 m 个等距点处的无量纲磨削温度值, (x_j, z_e) 表示各点的坐标; c_{ji} 是系数, 定义为

$$\begin{aligned} c_{ji} &= \frac{v_w}{2 \alpha} \int_{\omega_i}^{\omega_{i+1}} \exp \left[\frac{v_w (x_j - \omega)}{2 \alpha} \right] \cdot \\ &K_0 \left\{ \frac{v_w [(x_j - \omega)^2 + z_e^2]^{1/2}}{2 \alpha} \right\} d\omega \end{aligned} \quad (5)$$

式中: ω_i 和 ω_{i+1} 是第 i 个区间的积分下限和积分上限, 表述为

$$\left. \begin{aligned} \omega_i &= x_b + \frac{x_a - x_b}{m} (i - 1) \\ \omega_{i+1} &= x_b + \frac{x_a - x_b}{m} i \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

最后, 对式(4)进行数值求解, 即可得到描述已加工表面热源分布形状的形函数 $s(\omega)$ 。

在不同的磨削工艺参数下, 将求得的已加工表面热源分布形状绘于图 3, 图中 v_s 是砂轮转速。由

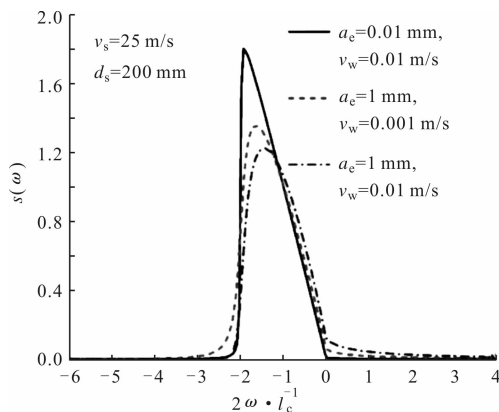


图3 已加工表面热源的分布形状

图 3 可得, 已加工表面热源的分布形状随着磨削工艺条件而改变, 将已加工表面热源的分布形状假设为某一特定形状, 并不适用于所有的磨削工况。因此, 在利用浅磨模型对磨削温度场进行数值模拟时, 必须根据具体的磨削工艺条件, 计算相应的已加工表面热源分布形状。

2 磨削温度场数值仿真模型

本文采用有限元模拟软件 ANSYS 14.0 建立磨削温度场的数值仿真模型(浅磨模型), 如图 4 所示, 具体的建模过程如下所述。

2.1 几何模型及网格划分

在建立数值仿真模型时, 建立了工件的二维几何模型。工件的长度是 60 mm, 高度是 12 mm。为了方便加载热源, 工件已加工表面的网格尺寸划分为磨削接触弧长的 1/30。沿工件的高度方向, 划分了 30 个网格, 并且已加工表面附近的网格划分得更加细密。以上网格划分已通过网格独立性验证, 足以获得准确的计算结果。单元类型选择二维八节点平面热效应单元 PLANE77。

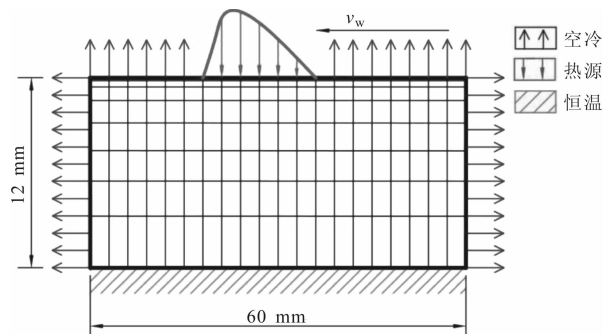


图4 磨削温度场数值仿真建模示意图

2.2 材料特性

工件材料是淬硬轴承钢 GCr15, 砂轮磨粒材料是白刚玉, 两种材料的热物性参数如表 1 所示。

表1 两种材料的热物性参数^[11]

材料	热导率 k / $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	密度 ρ / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	比热容 c / $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$
淬硬 GCr15	34.3	7 815	506
白刚玉	35.0	3 980	765

注: 文献[11]中的工件材料是 AISI 52100, 其材料特性接近于 GCr15; 白刚玉的热物性参数用于计算砂轮与工件之间的热量分配比。

2.3 边界条件

在建立数值仿真模型时, 将周围环境温度设置为 20 °C, 将工件底面设置为恒温绝热。干磨时, 由

于工件与周围环境之间的对流换热系数在 $20\sim100\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 之间,并且磨削温度场的数值仿真模型对对流换热系数的微小变化不敏感,因此将对流换热系数设置为 $60\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})^{[12]}$ 。

在模拟工件的磨削温度场时,将已加工表面热源加载到工件的已加工表面上,如图 4 所示。在计算已加工表面热源的热流密度分布 $q_{\text{wf}}(\omega)$ 时,首先通过磨削实验测量切向磨削力 F_t ,再利用式(7)计算砂轮和工件接触表面上的平均热流密度

$$q=F_tv_s/(bl_c)$$

(7)

式中: b 是磨削宽度。

然后分析磨削区热量分配关系,计算砂轮与工件之间的热量分配比 $\epsilon^{[11]}$ 和传入工件的平均热流密度 q_w ,并且 $q_w=\epsilon q$, ϵ 的表达式如下

$$\epsilon=[1+0.97k_g/(r_0v_s(k\rho c))^{1/2}]^{-1}$$

(8)

式中: k_g 是磨粒的热导率; r_0 是磨粒接触半径。

最后计算描述已加工表面热源分布形状的形函数 $s(\omega)$,并最终得到已加工表面热源的热流密度分布 $q_{\text{wf}}(\omega)=q_ws(\omega)$ 。

在计算已加工表面热源的热流密度分布 $q_{\text{wf}}(\omega)$ 时,算得的形函数 $s(\omega)$ 实际上是 m 个离散值,并且只有 $\omega\in[-l_c,0]$ 内的 $s(\omega)$ 离散值参与计算 $q_{\text{wf}}(\omega)$ 。因此,算得的 $q_{\text{wf}}(\omega)$ 也是一系列的离散值。在进行数值模拟时,将 $q_{\text{wf}}(\omega)$ 的离散值施加到已加工表面热源分布区域内的节点上。由于沿工件的长度方向网格尺寸划分为磨削接触弧长的 $1/30$,那么在已加工表面热源分布区域内有 31 个节点,因此算得的 $q_{\text{wf}}(\omega)$ 应有 31 个离散值。为了获得 31 个 $q_{\text{wf}}(\omega)$ 离散值,在计算形函数 $s(\omega)$ 时,假设已加工表面热源的分布区域为 $[-3l_c,2l_c]$,并将已加工表面热源的分布区域等分为 150 个区间,即 $m=150$ 。

在数值模拟过程中,已加工表面热源沿磨削方向步进,并随时更新已加工表面的对流换热条件。

3 磨削力与磨削温度测量实验

采用 MKL7120×6 CNC 强力磨床开展平面磨削实验,磨削工艺条件如表 2 所示。在每次磨削之前,都进行砂轮修整。采用 YDXM-III97 型测力仪测量磨削力,采用 Ti32 型热成像仪测量磨削温度,磨削力与磨削温度测量实验的示意图^[12] 如图 5 所示。在测量磨削温度时,设置热成像仪的成像像素为 320×240 ,空间分辨率为 $1.25\times10^{-3}\text{ rad}$,最小焦距为 15 cm。

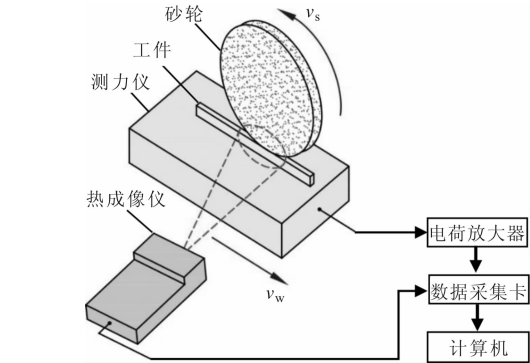


图 5 磨削力与磨削温度测量实验示意图^[12]

4 结果及讨论

根据如表 2 所示的磨削工艺条件,开展磨削力与磨削温度测量实验,计算传入工件的平均热流密度 q_w 与已加工表面热源的形函数 $s(\omega)$,并对工件的磨削温度场进行数值模拟。切向磨削力 F_t 的实验测量结果与平均热流密度 q_w 的计算结果如表 3 所示。

表 2 磨削工艺条件

磨削参数	说明和数值
磨床	MKL7120×6 CNC 强力磨床
砂轮	WA60L6V
砂轮直径 d_s/mm	280
工件材料	淬硬 GCr15(HRC 62)
工件的长、宽、高/mm	60, 10, 12
砂轮转速 $v_s/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	25
工件速度 $v_w/\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	250
磨削深度 $a_e/\mu\text{m}$	50, 100, 150, 200, 250
冷却方式	干磨
修整器	单点金刚石砂轮修整器
修整深度/mm	0.1
修整速度/ $\text{mm}\cdot\text{r}^{-1}$	0.08

根据表 3 中的第 1、3、5 组磨削工艺参数,将求得的形函数 $s(\omega)$ 绘于图 6。利用求得的 q_w 与 $s(\omega)$

表 3 F_t 测量值与 q_w 计算值结果

组号	$a_e/\mu\text{m}$	F_t/N	$q/\text{W}\cdot\text{mm}^{-2}$	$q_w/\text{W}\cdot\text{mm}^{-2}$
1	50	6.5	4.34	3.67
2	100	10.2	4.82	4.07
3	150	12.7	4.90	4.14
4	200	14.8	4.94	4.18
5	250	16.6	4.96	4.19

计算已加工表面热源的热流密度分布 $q_{wf}(\omega)$, 利用数值仿真模型模拟工件的磨削温度场。在表 3 中第 1 组磨削工艺参数下, 温度场分布的实验测量结果与数值模拟结果见图 7, 发现两温度场分布虽然略有差异, 但是总体上较为相近。

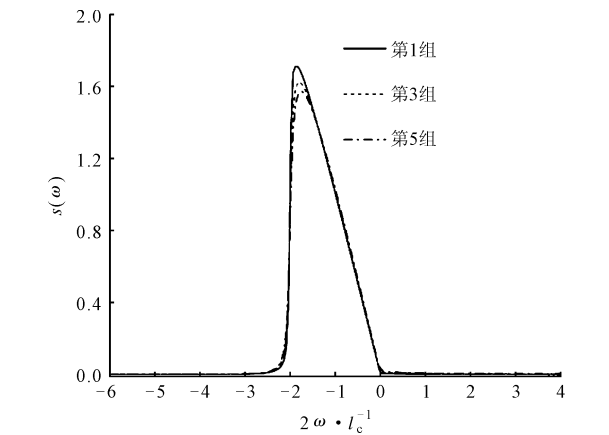


图 6 不同磨削条件下的已加工表面热源形函数 $s(\omega)$

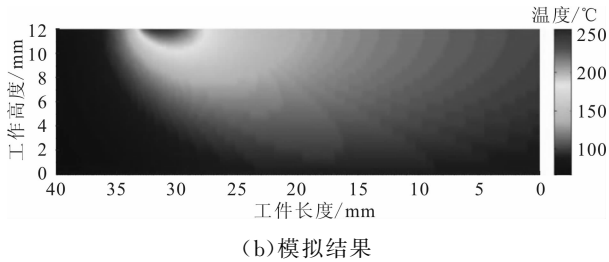
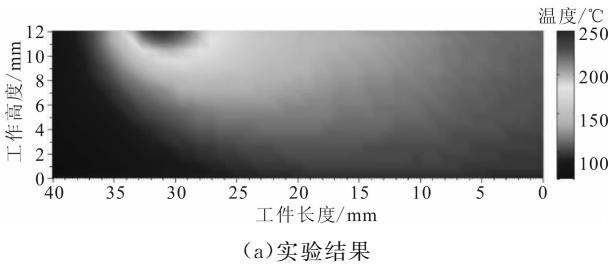


图 7 温度场分布的测量结果与模拟结果

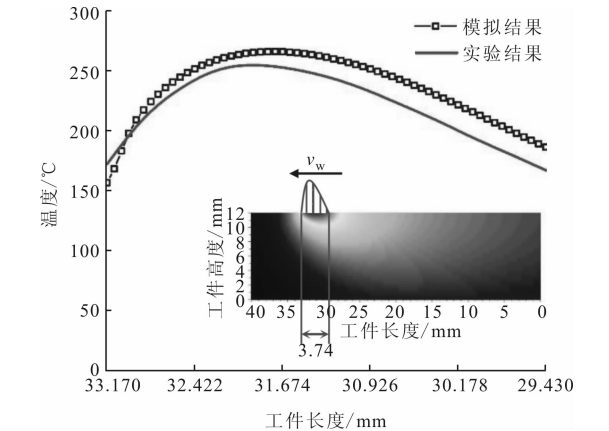


图 8 磨削区已加工表面温度分布

在表 3 中第 1 组磨削工艺参数下, 磨削区已加工表面温度分布的测量与模拟结果见图 8, 发现两者具有较好的一致性。

在如表 3 所示的磨削工艺参数下, 磨削区已加工表面最高温度的测量与模拟结果见图 9。利用测量结果的算术平均值计算相对误差, 结果见图 9, 发现最高温度的模拟值与测量值之间最大相对误差是 9.5%, 最小相对误差是 0.8%。

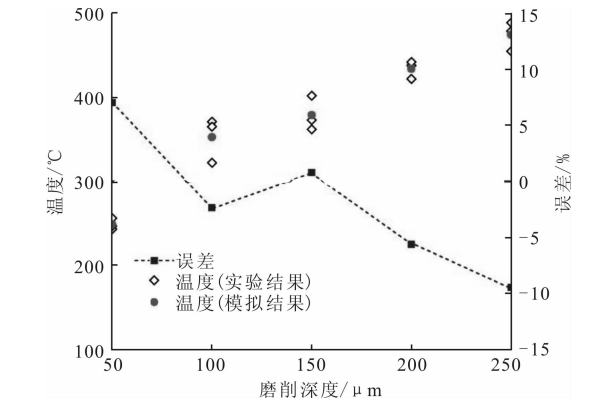


图 9 磨削区已加工表面最高温度及相对误差

5 结 论

本文建立了已加工表面热源分布形状的计算方法, 利用浅磨模型计算了磨削温度场, 结论如下。

(1) 已加工表面热源的分布形状随着磨削工艺条件而改变, 将已加工表面热源的分布形状假设为某一特定形状, 并不适用于所有的磨削工况。

(2) 建立的磨削温度场数值仿真模型(浅磨模型)可以准确地模拟工件的磨削温度场, 磨削区已加工表面最高温度的模拟值与测量值之间相对误差在 0.8%~9.5% 之间。

(3) 利用浅磨模型对磨削温度场进行数值模拟时, 采用本文方法不需预先假设已加工表面热源的分布形状, 即可根据具体的磨削条件, 获得相应的热源分布形状。

参考文献:

[1] MALKIN S, GUO C. Thermal analysis of grinding [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2007, 56(2): 760-782.

[2] ANDERSON D, WARKENTIN A, BAUER R. Comparison of numerically and analytically predicted contact temperatures in shallow and deep dry grinding with infrared measurements [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 48(3):

- 320-328.
- [3] ANDERSON D, WARKENTIN A, BAUER R. Experimental validation of numerical thermal models for dry grinding [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 204(1): 269-278.
- [4] MAHDI M, ZHANG L. The finite element thermal analysis of grinding processes by ADINA [J]. *Computers & Structures*, 1995, 56(2/3): 313-320.
- [5] WANG X, YU T, SUN X, et al. Study of 3D grinding temperature field based on finite difference method: considering machining parameters and energy partition [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 84(5/6/7/8): 915-927.
- [6] SHAH S M, NELIAS D, CORET M. Numerical simulation of grinding induced phase transformation and residual stresses in AISI-52100 steel [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2012, 61: 1-11.
- [7] ZÄH M F, BRINKSMEIER E, HEINZEL C, et al. Experimental and numerical identification of process parameters of grind-hardening and resulting part distortions [J]. *Production Engineering*, 2009, 3(3): 271-279.
- [8] ROWE W B, JIN T. Temperatures in high efficiency deep grinding (HEDG) [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2001, 50(1): 205-208.
- [9] JAEGER J C. Moving sources of heat and the temperature of sliding contacts [J]. *Proceeding of the Royal Society of New South Wales*, 1942, 76: 203-224.
- [10] GUO C, MALKIN S. Inverse heat transfer analysis of grinding: part 1 Methods [J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1996, 118: 137-142.
- [11] ROWE W B. Thermal analysis of high efficiency deep grinding [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, 41(1): 1-19.
- [12] 王德祥, 葛培琪, 毕文波, 等. 磨削弧区热源分布形状研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(8): 116-121.
- WANG Dexiang, GE Peiqi, BI Wenbo, et al. Heat source profile in grinding zone [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(8): 116-121.
- (编辑 杜秀杰)

(上接第 76 页)

- [8] 黄文涛, 付强, 窦宏印. 基于自适应优化品质因子的共振稀疏分解方法及其在行星齿轮箱复合故障诊断中的应用 [J]. *机械工程学报*, 2016, 52(15): 44-51.
- HUANG Wentao, FU Qiang, DOU Hongyin. Resonance sparsity decomposition method based on adaptive optimization quality factor and its application in complex fault diagnosis of planetary gear box [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(15): 44-51.
- [9] 张文义, 于德介, 陈向民. 基于信号共振稀疏分解与能量算子解调的轴承故障诊断方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(20): 111-118.
- ZHANG Wenyi, YU Dejie, CHEN Xiangmin. Fault diagnosis method of bearing based on signal resonance sparse decomposition and Energy Operator Demodulation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(20): 111-118.
- [10] ILKER B SELESNICK I W. Frequency-domain design of overcomplete rational-dilation wavelet transforms [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, 57(8): 2957-2972.
- [11] 李星, 于德介, 张顶成. 基于最优品质因子信号共振稀疏分解的滚动轴承故障诊断 [J]. *振动工程学报*, 2015, 28(6): 998-1005.
- LI Xing, YU Dejie, ZHANG Dingcheng. Fault diagnosis of rolling bearing based on optimal quality factor signal resonance sparsity decomposition [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2015, 28(6): 998-1005.
- [12] 张顶成, 于德介, 李星. 滚动轴承故障诊断的品质因子可调小波重构方法 [J]. *航空动力学报*, 2015, 30(12): 3051-3057.
- ZHANG Dingcheng, YU Dejie, LI Xing. Quality factor adjustable wavelet reconstruction method for rolling bearing fault diagnosis [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2015, 30(12): 3051-3057.
- (编辑 武红江)