

新型点磨削砂轮磨削温度仿真实验

尹国强¹, 巩亚东¹, 李宥玮¹, 王飞²
(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 首都航天机械公司, 北京 100076)

摘 要: 点磨削倾斜角 α 和新型砂轮粗磨区倾角 θ 的存在使得砂轮与工件接触区域发生变化, 由线接触变为理论上的点接触, 磨削区温度也随之发生变化. 本文采用有限元法仿真点磨削温度, 采用热电偶法测量磨削区温度, 设计了五因素四水平 $L_{16}(4^5)$ 正交试验; 通过极差分析, 得出影响点磨削温度的主次因素为: 粗磨区倾角 $\theta >$ 磨削深度 $a_p >$ 倾斜角 $\alpha >$ 进给速度 $v_f >$ 砂轮速度 v_s , 降低磨削区温度的最优参数组合为: $\theta(20^\circ)$, $a_p(0.01\text{ mm})$, $\alpha(1^\circ)$, $v_f(0.6\text{ mm/min})$, $v_s(35\text{ m/s})$. 最后采用单因素实验, 验证仿真的正确性并且深入分析了各参数对点磨削温度的影响规律及原因.

关 键 词: 点磨削; 新型砂轮; 磨削温度; 有限元仿真; 正交试验

中图分类号: TG 58 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)03-0392-06

Simulation Experiment of Grinding Temperature for Novel Point Grinding Wheel

YIN Guo-qiang¹, GONG Ya-dong¹, LI You-wei¹, WANG Fei²
(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2. Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076, China. Corresponding author: YIN Guo-qiang, E-mail: yinguoqiang@me.neu.edu.cn)

Abstract: The wheel-workpiece contact zone is changed due to point grinding inclining angle α and novel grinding wheel with coarse grinding area angle θ . It changes from line contact into point contact in theory and the grinding zone temperature is also changed. In this paper, the grinding zone temperature is simulated by the finite element method. The orthogonal experiments $L_{16}(4^5)$ was designed and thermocouple measurement was used for grinding experiments. Through range analysis, primary and secondary factors affecting grinding temperature is that coarse grinding area angle $\theta >$ cutting depth $a_p >$ inclining angle $\alpha >$ axial feeding speed $v_f >$ grinding wheel speed v_s . The optimum parameters combination of reducing the grinding zone temperature is that $\theta(20^\circ)$, $a_p(0.01\text{ mm})$, $\alpha(1^\circ)$, $v_f(0.6\text{ mm/min})$, $v_s(35\text{ m/s})$. Finally, by means of single factor experiments, the correctness of the simulation was verified and the influence of each parameter on grinding zone temperature was deeply analyzed.

Key words: point grinding; novel grinding wheel; grinding temperature; finite element simulation; orthogonal experiment

与传统外圆磨削不同,点磨削加工时砂轮轴线与工件轴线不是平行关系,而是沿垂直于两条轴线确定的平面方向旋转 α 角。 α 称作倾斜角,使砂轮与工件的接触区域,由线接触变成点接触,减小了砂轮与工件的接触面积^[1],减小了磨削力^[2],提高了加工精度和表面质量^[3].

磨削热对磨削加工后的表面质量有重要影响,磨削过程中去除材料所转化的能量几乎都集中在磨削区,磨削热也会对砂轮的寿命和加工精度产生影响^[4-6]。近年来,研究者们对磨削温度的理论、仿真和实验等方面进行了一些研究。Rowe等^[7-8]建立了适用于深磨和浅磨的热分配系数模型以及最大磨削温度的量级预测方法,得出结论:采用高工作速度,能够容许工件温度接近工件材

料的熔化温度,降低能耗,减小磨削力和已加工表面的损伤. González-Santander 等^[9]假定磨削时进入工件的热量呈线性热流分布,模拟了稳态时线性热流分布的温度场,得出结论:最高温度出现在磨削工件表面,并且将研究三维无界的温度场转换成了研究一维特定区间内的函数,简化了计算过程. Vinay 等^[10]通过磨削工具钢,建立了评估磨削温度的数学模型,并且进行了仿真,模型、仿真和实验结果相吻合,同时得出降低磨削温度的最优参数组合,以及磨削温度随着砂轮修整量的增大而降低.

以上研究主要针对传统磨削区的温度,但是就目前检索的文献来看,关于新型砂轮点磨削区温度的研究还鲜有报道. 新型砂轮粗磨区倾角 θ 和点磨削倾斜角 α 改变了磨削区温度. 本文用有限元法仿真点磨削接触区域温度,采用热电偶法测量磨削区温度,借助于正交试验和单因素实验,验证仿真的正确性并且分析各参数对点磨削温度的影响规律.

1 磨削热理论及点磨削温度场仿真

1.1 磨削热产生和分配理论

Rowe 等^[8]提出磨削加工时产生的热量主要分配在砂轮、工件、切屑和冷却液 4 种介质中.

$$q_t = q_w + q_s + q_c + q_f. \quad (1)$$

式中: q_t 为总热量; q_w, q_s, q_c, q_f 分别为 4 种介质工件、砂轮、切屑和冷却液中分配的分热量.

磨削热在工件、砂轮、切屑和冷却液之间的分配系数分别为 R_w, R_s, R_c, R_f , 且各介质之间的系数总和为 1; 当干磨时, R_f 为磨削热传递到空气中的分配系数, 相当于辐射热.

$$R_w + R_s + R_c + R_f = 1. \quad (2)$$

对温度场进行仿真时,需要定义移动热源的热通量,本文采用三角形热源分布模型,如图 1 所示. 热源幅值沿其传递方向线性递增,热源长度为砂轮与工件接触弧长 l_c ,热源以固定步长 l_i 呈离散形式向前移动. 根据加工中消耗的功率,计算出磨削区产生的总热量如下:

$$q_t = \frac{P}{l_c b_w} = \frac{F_t v_s}{l_c b_w}. \quad (3)$$

式中: P 为消耗功率; l_c 为砂轮与工件接触弧长; b_w 为接触宽度. 传向不同介质的热通量为

$$q_x = R_x q_t. \quad (4)$$

根据单颗磨粒去除材料时的分配模型,由工件和砂轮传递的热量 $q_{ws} = q_w + q_s$, 可得砂轮-工

件热量分配比 R_{ws} ,

$$R_{ws} = \frac{q_w}{q_w + q_s} \left(1 + \frac{0.974 k_g}{\beta_w \sqrt{r_0 v_s}} \right)^{-1}. \quad (5)$$

式中: k_g 为磨粒的导热系数; r_0 为磨粒的有效接触半径; β_w 为工件材料的接触系数.

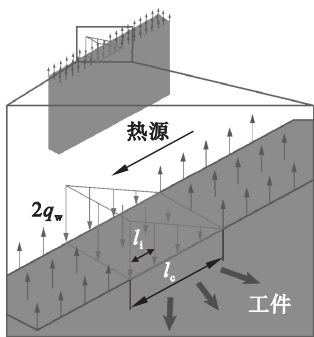


图 1 三角形热源分布模型
Fig. 1 Triangle heat source distribution model

1.2 点磨削温度仿真

由于点磨削工艺具有倾斜角 α ,磨削过程中产生的热量及磨削热分配比率发生变化,因此,需要建立新的热源模型来仿真磨削区的温度. 磨削过程中,机械能在磨削区转化为热能,计算出总热量为

$$q_t = \frac{P_w}{b_w l_c}. \quad (6)$$

式中: P_w 为磨削能;根据作者前期的研究成果^[2],点磨削加工的砂轮与工件接触弧长 l_c 为

$$l_c = \sqrt{a_p d_e} = \sqrt{\frac{a_p d_s d_w}{d_w + d_s \cos^2 \alpha}}. \quad (7)$$

点磨削过程中,传递到工件的热通量为

$$q_w = R_w q_t = \frac{R_w P_w}{l_c b_r}. \quad (8)$$

采用上节中的三角形热源模型,热源宽度为砂轮-工件接触宽度,热通量沿工件周向分布的长度等于接触弧长. 由图 2 可知,设磨削区内任意点 A 的坐标为 (x_i, y_i) , O 点为砂轮圆心, O' 点为工件圆心, φ 为 OO' 和 $O'A$ 的夹角,由于切削深度远小于工件半径,所以模型中可以忽略切深的影响,点 A 的坐标及夹角 φ 可表示为

$$\left. \begin{aligned} x_i &= \frac{d_w}{2} \sin \varphi, \\ y_i &= \frac{d_w}{2} \cos \varphi; \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\varphi = \frac{2v_w t}{d_w}. \quad (10)$$

为了得到磨削区的最高温度值,可通过式 (11) 来计算热量流整个移动过程需要的时间.

3.2 实验验证

3.2.1 a_p 对磨削温度的影响

从图 7 中可知,磨削温度仿真值和实验测量值变化趋势一致,仿真数值大于实验测量值,大约为实验结果的 1.3 ~ 1.5 倍. 这是因为仿真忽略了系统振动、砂轮磨损等因素,同时在实验过程中热电偶测温也存在误差,所以仿真与实验结果数值差别稍大,但是数值比例稳定且变化趋势一致,所以仿真可以为实际加工提供一种辅助和预测方法. 另外,从图中还可以看出,点磨削温度随着磨削深度 a_p 的增加而升高. 因为 a_p 增加,每个磨粒的切削厚度增加,接触弧长也随之增大,有效磨粒数增加,磨削力增大,在线速度不变的情况下磨削功率增加,从而产生的磨削热增加,磨削温度升高.

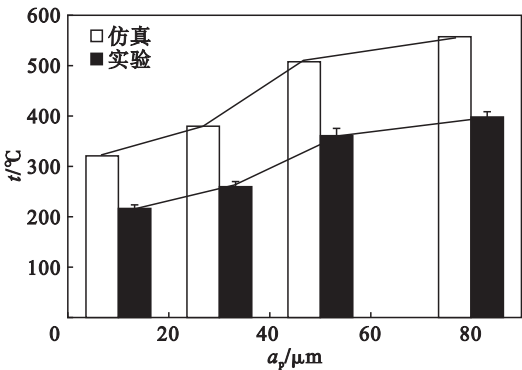


图 7 a_p 对磨削温度影响
Fig. 7 Influence of a_p on grinding temperature

3.2.2 v_f 对磨削温度的影响

从图 8 中可知,仿真和实验结果基本一致,仿真数值大约为实验结果的 1.3 ~ 1.5 倍. 另外,点磨削温度随着轴向进给速度 v_f 增大而升高. 因为轴向进给速度 v_f 增大,磨削功率增加,摩擦加剧,热源强度增大,从而磨削温度升高.

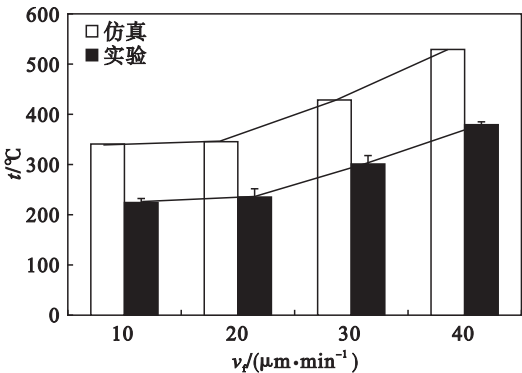


图 8 v_f 对磨削温度影响
Fig. 8 Influence of v_f on grinding temperature

3.2.3 v_s 对磨削温度的影响

由图 9 可知,仿真和实验结果基本一致. 另

外,点磨削温度随着砂轮速度 v_s 的增加而升高. 因为 v_s 增加,单位时间内参与磨削的磨粒数增加,磨粒在磨削时的耕犁及滑擦运动加剧,产生更多的热量,磨削温度升高.

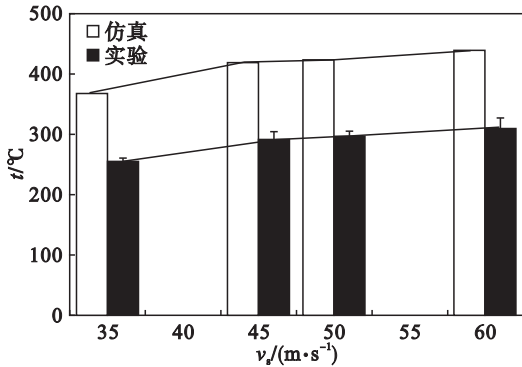


图 9 v_s 对磨削温度影响
Fig. 9 Influence of v_s on grinding temperature

3.2.4 α 对磨削温度的影响

仿真和实验的对比结果如图 10 所示. 从图中可知,仿真和实验结果也是基本一致的. 另外,倾斜角 α 对磨削区温度的影响变化曲线近似对称于 $\alpha = 0$. 这说明 α 的正负对磨削温度影响不大,主要取决于绝对值的大小. 倾斜角 α 有效地降低了磨削温度,且随着 α 绝对值的增大,点磨削温度逐渐减小. 这是因为点磨削过程中,砂轮相对工件转过倾斜角 α ,砂轮和工件由线接触变为点接触,接触面积减小,单位时间内的有效磨粒数减小,从而磨削过程中产生的磨削热减少. 另一方面,倾斜角 α 的存在使得磨削热更容易排出,改善了散热条件,而且 α 越大,散热条件越好,以上共同原因使得点磨削温度低于传统外圆磨削温度.

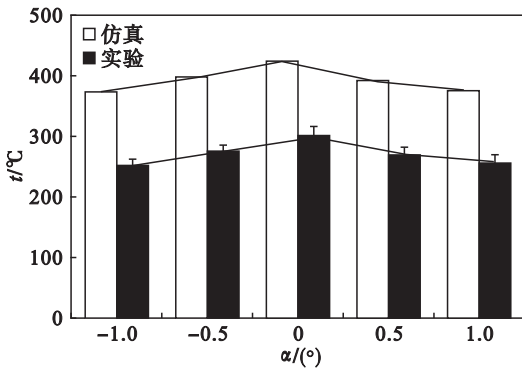


图 10 α 对磨削温度的影响
Fig. 10 Influence of α on grinding temperature

当粗磨区倾角 θ 从 0° 变化到 20° 时,磨削温度分别为 275.3, 261.6, 256.2, 255.8, 249.5, 246.7, 241.6 $^\circ\text{C}$, 可知,随着粗磨区倾角 θ 的增

加,磨削温度逐渐降低.磨削温度随着新型砂轮粗磨区倾角 θ 的增加而降低,说明在相同条件下,新型砂轮降低了磨削区温度.这是由于 θ 角的存在,使得磨屑更容易排出磨削区,改善了散热条件.另外,由于砂轮和工件的接触区域变小,产生的磨削热减少,从而磨削温度降低.总之,通过以上实验验证了仿真的正确性,而且新型砂轮和点磨削加工工艺能够降低磨削区温度.

4 结 论

- 1) 利用有限元法仿真了点磨削加工的磨削区温度,结果表明:磨削温度随着磨削深度 a_p 和砂轮速度 v_s 的增大而升高, a_p 是影响工件表面温升主要因素,当 v_s 增大而 a_p 减小时,磨削温度降低.
- 2) 设计了 $L_{16}(4^5)$ 正交试验,采用热电偶法测量磨削区温度,通过极差分析,得出影响磨削温度的主次因素为:粗磨区倾角 $\theta >$ 磨削深度 $a_p >$ 倾斜角 $\alpha >$ 进给速度 $v_f >$ 砂轮速度 v_s ,以及降低磨削温度的最优参数组合为: $\theta(20^\circ)$, $a_p(0.01\text{ mm})$, $\alpha(1^\circ)$, $v_f(0.6\text{ mm/min})$, $v_s(35\text{ m/s})$.
- 3) 通过单因素实验验证了仿真的正确性,仿真数值大约为实验结果的1.3~1.5倍,但是数值比例稳定且变化趋势一致,所以仿真可以为实际加工提供一种辅助和预测方法.同时得出点磨削温度随着粗磨区倾角 θ 、倾斜角 α 绝对值的增加而降低,随着磨削深度 a_p 、轴向进给速度 v_f 、砂轮速度 v_s 的增加而升高.

(上接第 374 页)

[5] Korra N N, Vasudevan M, Balasubramanian K R. Multi-objective optimization of activated tungsten inert gas welding of duplex stainless steel using response surface methodology [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 77(1/2/3/4): 67 – 81.

[6] Sathiya P, Panneerselvam K, Jaleel M Y A. Optimization of laser welding process parameters for super austenitic stainless steel using artificial neural networks and genetic algorithm [J]. *Materials & Design*, 2012, 36: 490 – 498.

[7] Lin H. The use of the Taguchi method with grey relational analysis and a neural network to optimize a novel GMA welding process [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*,

参考文献:

[1] Gong Y D, Yin G Q, Wang C, et al. Study on the effect of coarse grinding area slope angle on surface quality in point grinding [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 797: 118 – 122.

[2] 尹国强, 巩亚东, 温雪龙, 等. 新型点磨削砂轮磨削力模型及试验研究 [J]. *机械工程学报*, 2016, 52(9): 193 – 200. (Yin Guo-qiang, Gong Ya-dong, Wen Xue-long, et al. Modeling and experimental investigations on point grinding force for novel point grinding wheel [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(9): 193 – 200.)

[3] Gong Y D, Yin G Q, Wen X L, et al. Research on simulation and experiment for surface topography machined by a novel point grinding wheel [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2015, 29(10): 4367 – 4378.

[4] 温雪龙, 巩亚东, 程军, 等. 铝合金 Al6061 微尺度磨削力热特性试验分析 [J]. *机械工程学报*, 2014, 50(23): 165 – 174. (Wen Xue-long, Gong Ya-dong, Cheng Jun, et al. Experimental research on force and temperature characteristics in micro-grinding Al6061 [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(23): 165 – 174.)

[5] Malkin S, Guo C. Thermal analysis of grinding [J]. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2007, 56(2): 760 – 782.

[6] Hwang J, Kompella S, Chandrasekar S, et al. Measurement of temperature field in surface grinding using infra-red (IR) imaging system [J]. *Journal of Tribology*, 2003, 125(2): 377 – 383.

[7] Rowe W B. Thermal analysis of high efficiency deep grinding [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, 41(1): 1 – 19.

[8] Rowe W B, Jin T. Temperatures in high efficiency deep grinding [J]. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2001, 50(1): 205 – 208.

[9] González-Santander J L, Martín G. A theorem for finding maximum temperature in wet grinding [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 2015(10): 1 – 13.

[10] Vinay P V, Rao C S. Temperature assessment in surface grinding of tool steels [J]. *Journal of Mechanical Science & Technology*, 2015, 29(11): 4923 – 4932.

2012, 23(5): 1671 – 1680.

[8] Gao Z, Shao X, Jiang P, et al. Parameters optimization of hybrid fiber laser-arc butt welding on 316L stainless steel using Kriging model and GA [J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 83: 153 – 162.

[9] Wang J, Sun Z. The stepwise accuracy-improvement strategy based on the Kriging model for structural reliability analysis [J]. *Structural & Multidisciplinary Optimization*, 2018(4): 1 – 18.

[10] Yang G. A modified particle swarm optimizer algorithm [C] // International Conference on Electronic Measurement. Xi'an, 2007: 675 – 679.