

# 缓磨烧伤过程的计算机仿真研究

徐鸿钧 李 迎 徐西鹏 张幼桢

(南京航空航天大学505教研室, 南京, 210016)

## STUDY ON BURN PROCESS DURING CREEP FEED GRINDING BY COMPUTER SIMULATION TECHNIQUE

Xu Hongjun, Li Ying, Xu Xipeng, Zhang Youzhen

(Faculty 505, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016)

**摘 要** 在关于缓磨时的磨削热, 接触弧区换热过程以及工件表层非稳态温度场的深入研究的基础上, 构造了一可用于计算缓磨烧伤前后工件表层温度场畸变历程的数学模型, 并据此完成了关于缓磨烧伤过程的计算机仿真研究, 仿真结果与实际吻合良好, 它率先阐明了缓磨烧伤的热机理并且证明了缓磨烧伤是一具有明显前兆特征的典型渐变过程。

**关键词** 磨削 传热 烧伤 数学模型 计算机仿真

中图分类号 V261.25, TG580.11

**Abstract** On the basis of deepgoing researches on the grinding heat, heat transfer process of the contact zone and unstable-state temperature field in the workpiece surface layer during creep feed grinding, a simulation mathematical model which can be used to calculate the time-course of temperature field distorting in the workpiece surface layer has been structured, and on these grounds the computer simulation studies of workpiece burn process during creep feed grinding have been completed. The simulation result accords well with the practice of burn process during creep feed grinding, and it takes the lead in explaining the heat mechanism of burn during creep feed grinding, showing that the creep feed grinding is a typical slowly changing course which has obvious premonition characteristics.

**Key words** grinding heat transfer burn mathematical models computerized simulation

大量文献虽都确认正常缓磨温度远比普通磨削为低, 但都无法解释温度很低却又易发生烧伤的矛盾。对此曾有文献提出磨削液成膜沸腾导致工件突发烧伤的假设<sup>[1]</sup>, 即认为当磨削热流密度  $Q$  小于磨削液成膜沸腾的临界热流密度  $Q_{im}$  时工件表面温度可稳定维持在临界成膜温度约130 以下, 但只要一旦  $Q > Q_{im}$  磨削液发生成膜沸腾, 便可因工件表面汽膜层的阻断作用, 使本来可由磨削液带走的大量磨削热改道进入工件, 从而导致瞬时突发烧伤。不过这一假设带有明显的主观臆断, 且亦与其后提供的实验事实有悖<sup>[2,3]</sup>。本文旨在从理论上进一步完善关于缓磨烧伤发生机理的研究, 为今后更有效控制缓磨烧伤和大幅度开发缓磨潜力提供指导。

### 1 综合考虑缓磨时砂轮钝化与磨削液成膜沸腾双重影响的非定常移动热源模型

大量文献证实, 在砂轮正常磨损阶段将弧区平均磨削热流密度  $Q$  考虑成随时间线性增长的关系是接近符合实际情况。图1是按三角形分布假设构造的线性增长的移动热源模型,

1994-08-29收到, 1995-04-24收到修改稿

国家自然科学基金与航空科学基金资助课题

不失一般性, 假设在磨削开始后的某一时刻  $t_0$ , 与平均磨削热流密度  $Q_0$  相对应的进入工件的平均热流密度为  $q_0 = R_w Q_0$ ,  $R_w$  为磨削热流进入工件的比例; 再设磨削热流密度的线性增长率为  $C$ , 弧区长度为  $2l$ , 则任意时刻  $t$  在弧区任意点  $x$  上流入工件的热流密度表示为

$$q(x, t) = \left[ 1 + \frac{x}{l} \right] [1 + C(t - t_0)] q_0 \quad (1)$$

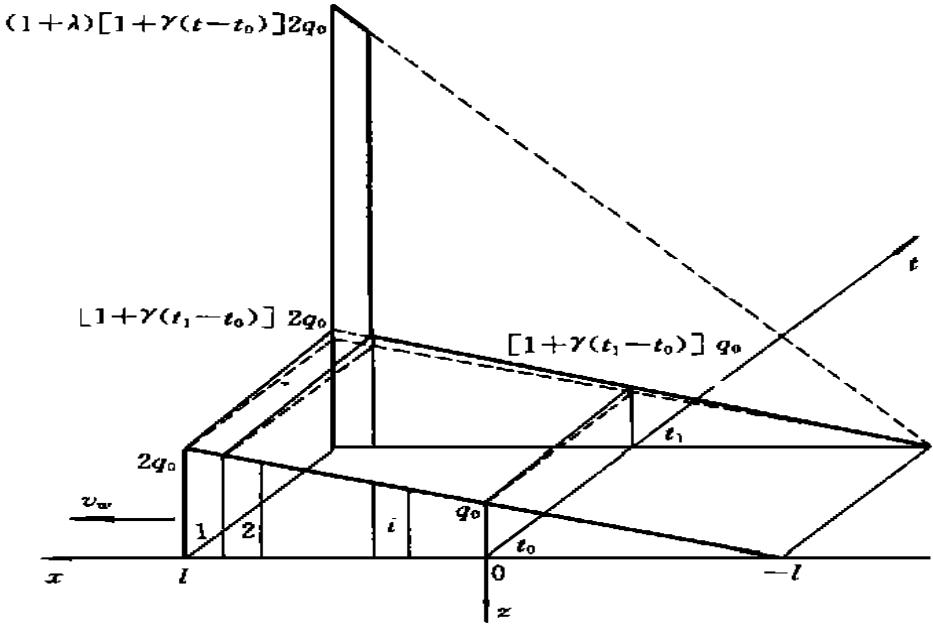


图1 热源模型

再按沸腾与汽液两相流换热理论, 弧区磨削液处于泡核沸腾状态时其换热系数具有最佳值, 且在  $Q < Q_{lim}$  的很大范围内其值维持不变, 意味着在成膜沸腾之前弧区的热流分配比例  $R_w$  也是不变的, 这样, 成膜沸腾的临界条件就可以通过流入工件的热流密度  $q$  等价表述如下

$$q = R_w Q_{lim} = q_{lim} \quad (2)$$

文献[2, 3]揭示成膜沸腾是自弧区高端向低端逐步扩展的, 因此为了考虑成膜沸腾的影响, 不妨设想将弧区等分为  $2n$  个子区间, 见图1, 并约定各子区间上磨削液进入成膜沸腾的临界时刻以各子区间右边界点上热流密度  $q$  增长达到  $q_{lim}$  的时刻为准。然后不失一般性, 假设在磨削开始后的某一特定时刻  $t_0$ , 弧区顶端  $x = l$  处的热流密度  $q(l, t_0)$ , 恰好增长到满足条件

$$q(l, t_0) = 2q_0 = q_{lim} \quad (3)$$

则由式(1)和式(3)顺序确定出自高端起算各子区间次第进入成膜沸腾状态的临界时刻序列为

$$t_i = t_0 + \frac{i}{(2n - i)C} \quad i = 1, 2, \dots, (2n - 1) \quad (4)$$

如前所述, 弧区某个区段上发生成膜沸腾其影响可以归结为在该区段上进入工件的热流密度的大幅度剧增, 图1中已示出在临界成膜时刻  $t_i$  因  $i$  子区间成膜而使进入该子区间热

流密度跃增至  $(1 + K)q$  的情况,  $K$  为跃增倍数。

推广到时刻  $t_i < t < t_{i+1}$  的最一般情况, 因这时已有  $i$  个子区间次第进入成膜状态, 故由成膜沸腾引起的热源的温度畸变情况便可由下式综合描述

$$\left. \begin{aligned} q(x, t) &= q^0(x, t) + \sum_{j=1}^i q_j(x, t) \\ q_0(x, t) &= \left[ 1 + \frac{x}{l} \right] [1 + C(t - t_0)] q_0, \quad -l \leq x \leq l, \quad t > 0 \\ q_i(x, t) &= K \left[ 1 + \frac{x}{l} \right] [1 + C(t - t_0)] q_0, \quad \left( 1 - \frac{j}{n} \right) l \leq x \leq \left( 1 - \frac{j-1}{n} \right) l, \quad t > t_j \end{aligned} \right\} (5)$$

亦即它可以被看作是原三角形分布的基本热源和共  $i$  个已成膜子区间上的附加热源的叠加组合, 其中每个附加热源作用的起始时刻就是它所在子区间的临界成膜时刻。

式(5)确定了缓磨开始后任意时刻弧区热源的分布形态和数值, 即为综合反映砂轮钝化与磨削液成膜沸腾双重影响的非定常移动热源模型。

## 2 缓磨烧伤过程计算机仿真的数学模型

按照热源法处理问题的基本思想, 缓磨时弧区工件表层的温度场  $H(x, z, t)$  显然是由式(5)所描述的作用在整个弧区上的三角形分布的基本热源  $q_0(x, t)$  引起的温度场  $H(x, z, t)$  和若干个仅作用在各自的子区间上的梯形分布的附加热源  $q_j(x, t)$  引起的温度场  $H(x, z, t)$  的叠加组合。由于文献[4]中引进卷积概念建立起了关于任意非定常移动热源的非稳态温度场的完整解析方法, 故上述基本和附加热源温度场计算所需的理论准备已具备。

本文关于烧伤仿真的思路可以归纳为:

- (1) 参照缓磨实验功率曲线数据合理设定因砂轮钝化引起的磨削热流密度的增长率  $C$ ;
- (2) 不失一般性假定在磨削开始后的某一时刻  $t_0$  恰有  $q(l, t_0) = q_{im}$  条件成立;
- (3) 根据以上两项设定确定弧区各子区间次第进入成膜沸腾的临界时刻序列  $t_i$ ;
- (4) 顺序计算各临界时刻点上工件表层温度分布, 最终获得温度场畸变的时间历程。仿真计算的数学模型表述如下

$$q(x, t) = \left[ 1 + \frac{x}{l} \right] [1 + C(t - t_0)] q_0 \quad (6a)$$

$$q(l, t_0) = q_{im} \quad (6b)$$

$$t_i = t_0 + \frac{i}{(2n - i)C} \quad (6c)$$

$$(q(x, z, S_i) = (q_0(x, z, S_i) + \sum_{j=1}^i (q_j(x, z, S_i)), \quad i = 1, 2, \dots \quad (6d)$$

$$\begin{aligned} q_0(x, z, S_i) &= \int_0^{S_i} [1 + \frac{x}{l} (S_i^2 - S^2)] e^{-z^2/4S^2} \left\{ \frac{1}{P} \frac{x + L + 2S^2}{L} \times \right. \\ &\quad \left[ \operatorname{erf} \frac{x + L + 2S^2}{2S} - \operatorname{erf} \frac{x - L + 2S^2}{2S} \right] + \\ &\quad \left. \frac{2S}{L} \left[ \exp \left( - \frac{x + L + 2S^2}{2S} \right) - \exp \left( - \frac{x - L + 2S^2}{2S} \right) \right] \right\} dS \quad (6e) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (j(X, Z, S_i) = & K \left[ 1 + \#(S_{i0}^2 - S^2) \right] e^{-Z^2/4S^2} \left\{ \frac{P}{L} \frac{X + L + 2S^2}{L} \right. \\
 & \left[ \operatorname{erf} \frac{X - \frac{(n-j)L}{n} + 2S^2}{2S} - \operatorname{erf} \frac{X - \frac{(n-j+1)L}{n} + 2S^2}{2S} \right] + \\
 & \frac{2S}{L} \left[ \exp \left[ - \frac{X - \frac{(n-j)L}{n} - 2S^2}{2S} \right]^2 - \right. \\
 & \left. \exp \left[ \frac{X + \frac{(n-j+1)L}{n} - 2S^2}{2S} \right] \right] \left. \right\} dS \quad (6f)
 \end{aligned}$$

式中:  $\left( = \frac{PkT_w}{2Kq_0} H \right) \# = \frac{4K}{v_w^2} C$  为温度、热流密度增长率的无量纲量;  $S = \frac{v_w^2}{4K} S$ ,  $S_i = \frac{v_w^2}{4K} t_i$ ,  $S_{i0} = \frac{v_w^2}{4K} (t_i - t_0)$ ,  $S_{ij} = \frac{v_w^2}{4K} (t_i - t_j)$  为无量纲时间量;  $X = \frac{v_w}{2K} x$ ,  $Z = \frac{v_w}{2K} z$ ,  $L = \frac{v_w}{2K} l$  为无量纲的空间坐标量;  $q_0 = R_w Q_0 = R_w \frac{F_{t_0} v_s}{2J1B}$ ,  $F_{t_0}$  为时刻  $t_0$  流入工件的平均热流密度, 切向磨削力;  $K, k, Q, c, J$  为工件材料导热系数、导热系数、比重、比热和热功当量;  $H, S, t, t_0, t_i, t_j, x, z$  为温度、时间、空间的坐标量;  $v_s, v_x, B, \operatorname{erf}(u)$  为砂轮速度、工件速度、关于变量  $u$  的误差函数。

注意, 当  $i = j$  时, 因  $S_{ij} = 0$ , 故  $(j(X, Z, S_i) = 0$ 。例如,  $(1(X, Z, S_1) = (2(X, Z, S_2) = \dots = (i(X, Z, S_i) = 0$ 。由式(6)知, 在时刻  $t_1, 1^\#$  区间才开始成膜, 此时温度场仅由基本热源决定, 推广到一般情况, 时刻  $t_i$  的温度场应综合基本热源和总计  $(i-1)$  个但不包括第  $i$  个子区间附加热源的贡献。

### 3 缓磨烧伤仿真计算的结果

因仿真计算的是工件表层无量纲温度分布变化的规律和趋势, 故需输入的参数不多, 在本例仿真中取  $n = 10$ , 即将整个弧区等分为 20 个子区间, 取  $k = 7$ , 取  $C = 0.0025/s$  (根据实验并参照文献确定的)。它是普通刚玉砂轮缓磨一般钢材时的最具代表性的数据。

按式(6)数学模型编制软件输入数据运行软件便可完成仿真计算及打印输出仿真结果。图2便是计算机输出缓磨烧伤过程的数字仿真实例, 它完整展示了缓磨时随砂轮钝化磨削液成膜沸腾在自高端开始发生并向低端逐步扩展的过程中, 工件表面温度分布出现畸变最终达到烧伤温度的全过程。参照文献[2, 3]可以发现, 仿真结果理想地揭示了缓磨烧伤前后工件表面温度分布畸变增长的形态特征和趋势规律。关于缓磨烧伤过程的系统仿真研究的结果还从理论上进一步表明:

(1) 缓磨时工件温升至烧伤的过程是一与成膜沸腾在弧区自高端向低端的扩展大体上同步的典型渐变过程, 此过程时间约 300s 左右, 考虑难磨材料将  $C$  提高 4 倍所需时间仍在 100s 上下; 仅有小范围的成膜沸腾, 只要它不再扩展是不可能引发烧伤的。因此认为一旦发生成膜沸腾就会瞬时突发烧伤是没有科学根据的。

(2) 控制缓磨烧伤的一个关键是控制热流密度的增长率  $C$ , 因此采用不易钝化的超硬磨料砂轮再通过温度监测适时地对砂轮施加适度的修整。

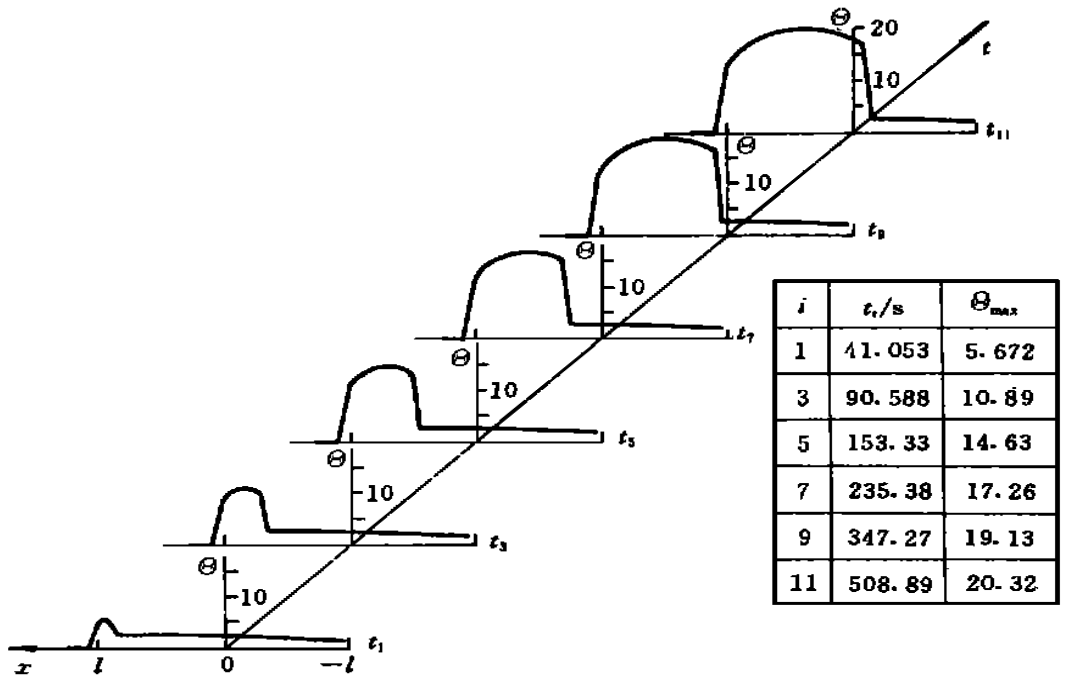


图2 缓磨烧伤前后工件表面温度分布畸变增长历程的数字仿真结果

砂轮直径  $D = 300\text{mm}$ , 切深  $a_p = 1.5\text{mm}$ ,  $v_w = 1\text{mm/s}$

$k = 15\text{mm}^2/\text{s}$ ,  $z = 0$ ,  $t_0 = 20\text{s}$ ,  $K = 7$ ,  $C = 0.0025/\text{s}$

(3)在不烧伤前提下大幅度开发缓磨潜力的一个关键是设法提高磨削液成膜沸腾的临界热流密度  $Q_{lim}$ 。

### 参 考 文 献

- 1 Shafto G R, Howes T D, Andrew C. Thermal aspects of creep feed grinding. Proceedings of The 16th MTDR conference, Manchester, 1975, 31- 37
- 2 徐鸿钧, 浦学锋, 胡协方, 张幼桢. The work piece temperature distribution in contact zone and burn mechanism during creep feed grinding. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1990, 3(1): 58- 66
- 3 徐鸿钧, 浦学锋, 胡协方, 张幼桢. 缓磨时弧区的温度分布与工件烧伤机理. 机械工程学报, 1990, 26(6): 74- 79
- 4 徐鸿钧, 徐西鹏, 林涛, 张幼桢. 断续磨削时的脉动温度场解析. 航空学报, 1993, 14(6): B287- B293