

文章编号: 1000-6893(2001) 03-0222-05

开槽砂轮缓磨时射流冲击强化换热的研究

傅玉灿¹, 徐鸿钧²

(1. 中国科学技术大学 力学和机械工程系, 安徽 合肥 230027)

(2. 南京航空航天大学 505 教研室, 江苏 南京 210016)

STUDY ON ENHANCING HEAT TRANSFER WITH JET IMPINGEMENT IN CREEP FEED DEEP GRINDING WITH SLOTTED GRINDING WHEEL

FU Yu-can¹, XU Hong-jun²

(1. Mechanics and Mechanical Engineering Department,

University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

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

摘要: 提出了运用磨削弧区强化换热技术开发高效磨削潜力的创新构想, 并在开槽砂轮的基础上研制开发了能够实现磨削弧区沿砂轮径向定向高压水射流冲击强化换热的新型磨削液供液装置; 完成了关于开槽砂轮缓磨时弧区定向高压水射流冲击强化换热效果的理论计算和实验研究, 计算结果与实验结果基本吻合。

关键词: 缓磨; 射流冲击; 强化换热; 开槽砂轮

中图分类号: V261.91; TG580.6 **文献标识码:** A

Abstract: A creative conception is set up to exploit the potentialities of high efficiency grinding to great extent through enhancing heat transfer of the grinding zone, and a new grinding-fluid-providing device is put forward to enhance heat transfer of the grinding zone by the high-pressure jet impingement. Furthermore, theoretical and experimental studies on the effect of the jet impingement are completed. The calculated results well correspond with the tested ones.

Key words: creep feed deep grinding; jet impingement; augmentation of heat transfer; slotted grinding wheel

在确保加工表面精度和完整性要求的前提下, 尽最大可能提高材料的去除率, 这是自有磨削以来人们一直在致力追求的目标, 而长期制约该目标得以实现的最大障碍则是磨削时产生并积聚在弧区的磨削热及由其引起的工件表面热损伤。本文将热工领域的强化换热思想引入高效磨削研究中, 构思设计了采用径向高压水射流冲击强化冷却弧区工件表面的独创方案, 并在开槽砂轮的基础上研制开发了能够实现磨削弧区沿砂轮径向定向高压水射流冲击强化换热的新型磨削液供液装置, 最后通过对开槽砂轮缓进深磨时工件表层温度场的理论解析结合磨削实验, 研究了缓磨时高压水射流冲击强化弧区换热的冷却效果。

1 磨削弧区定向高压水射流冲击强化换热装置的研制

整套装置由高压柱塞泵、旋转密封接头和砂

轮组件三大部分组成。

磨削液的供液系统如图 1(a) 所示。高压柱塞泵型号为 3P00, 流量 90L/min, 最大供液压力 7MPa。磨削液通过水泵, 经调压阀, 由旋转密封接头以一定压力进入砂轮组件中。砂轮组件结构参见图 1(b)。如图所示, 砂轮组件由砂轮(带径向通液孔的片状开槽砂轮)、左右压板、固定外环以及法兰盘、法兰座组成。磨削液到达砂轮组件后经由法兰盘上的 6 个均布的进水槽进入压板腔内, 在两压板内侧圆周表面各均布 36 个小轮弹性密封块, 每个密封块可密封相间的 2 个通液孔, 当砂轮旋出, 离开弧区位置后, 小轮弹性支撑密封块在转进入弧区位置时, 小轮密封块被位于固定外环底部的凸块依次向上顶起, 从而打开通液孔, 压板腔中的磨削液便经通液孔沿砂轮径向射水压力、离心力及弹簧恢复力的作用下回位, 重新封闭通液孔, 从而实现了磨削弧区沿砂轮径向高压水的定向射流。砂轮设计成单片组合式结构, 易于安装拆卸, 砂轮磨损后可方便更换。小轮密封块上的滚动轮选用微型滚动轴承, 转动灵活且耐磨。该装置

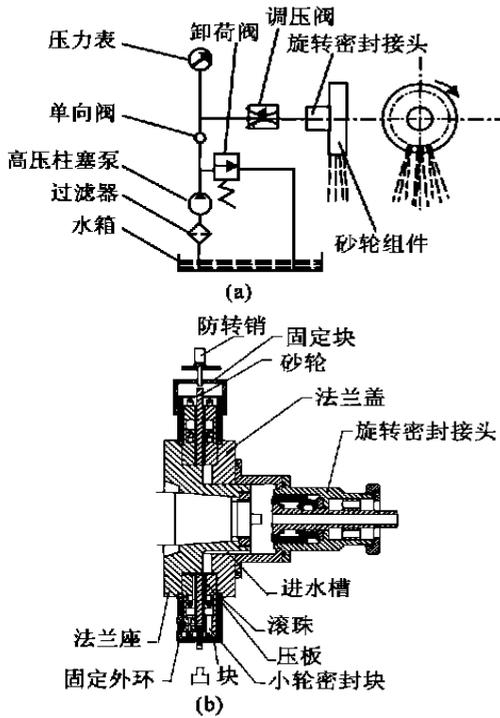


图 1 射流冲击强化换热新型磨削液供液系统
Fig. 1 New grinding-fluid-providing device to enhance heat transfer of the grinding zone

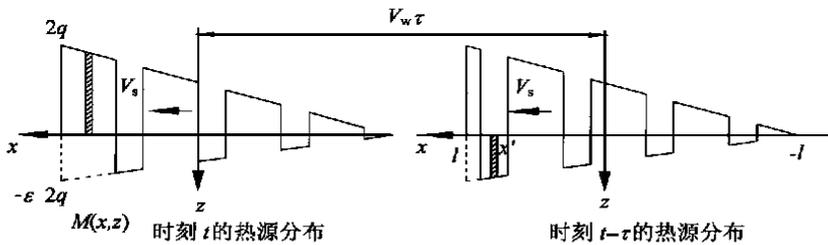


图 2 开槽砂轮深磨时的当量热源模型

Fig. 2 Heat source model of the deep grinding with slotted grinding wheel

如图 2 所示, 假设弧长 $2l$ 上正好包容 n 对齿槽, 且在观察时刻 t 正好由一个整齿占据弧区顶端位置。弧区内的齿部对应正热源, 槽部对应负热源, 正负热源均按三角形分布考虑。若自弧区高端起将弧区包容的几对齿槽顺序编号为 $1, 2, \dots, n$, 则任意第 m 个齿或槽在弧区中的位置可分别表示如下

$$\left. \begin{aligned}
 &\text{齿部 } l - (m - 1 + \eta) \frac{2l}{n} < x < \\
 &\quad \quad \quad l - (m - 1) \frac{2l}{n} \\
 &\text{槽部 } l - m \frac{2l}{n} < x < l - (m - 1 + \eta) \frac{2l}{n} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: η 为断续比。

再设 ϵ 为一取决于弧区磨削液换热效果的比例系数 ($0 < \epsilon < 1$), 则对应观察时刻 t 弧区热源的

的设计结构巧妙, 不仅理想地解决了在高速回轮的砂轮组件引入高压水时的动密封和泄漏问题, 而且还成功地解决了限制高压水只向磨削弧区工件表面作径向喷射的难题, 实验装置的研制成功为最终完成磨削实验提供了保证。

2 开槽砂轮缓进深切磨削时弧区射流冲击冷却工件表层温度场解析

为了验证开槽砂轮辅以弧区定向高压水射流冲击强化换热的冷却效果, 进一步开展了开槽砂轮缓磨时射流冲击强化换热的理论与实验研究, 首先进行开槽砂轮缓进深切磨削时弧区射流冲击冷却工件表层温度场的解析。

考虑到通常深磨的切深为普通磨切深的几十倍甚至几百倍, 与普通断续磨削时接触弧区中只有一个轮齿参与切削不同, 深切断续磨削时接触弧区中有多个轮齿同时参与切削。为能较好地反映缓进深磨时工件的实际受热情况, 本文提供了图 2 所示的当量热源模型。

瞬态分布便可由下式综合描述

$$\left. \begin{aligned}
 q(x) &= \sum_{m=1}^n [q_{m,t}(x) + q_{m,s}(x)] \\
 \text{齿部热源分布} \\
 q_{m,t}(x) &= \left(1 + \frac{x}{l}\right) q \\
 l - (m - 1 + \eta) \frac{2l}{n} &< x < l - (m - 1) \frac{2l}{n} \\
 \text{槽部热源分布} \\
 q_{m,s}(x) &= -\epsilon \left(1 + \frac{x}{l}\right) q \\
 l - m \frac{2l}{n} &< x < l - (m - 1 + \eta) \frac{2l}{n} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

实际磨削过程中, 齿(槽)部的正(负)带状热源在以 V_w 沿工件表面移动的同时, 还会以砂轮的线速度 V_s 在弧区中作周期性的高速扫描式移动, 这样弧区内工件表层各点的热源强度也将周

期性地改变。因此解析开槽砂轮缓进深磨时工件表面的温度场就必须较全面地考虑磨削过程中正(负)热源的这种移动变化情况。

考虑到弧区包容 n 对齿槽在弧区中作周期性扫描移动,扫描移动周期为 $nT = 2l/V_s$ (T 为开槽砂轮的断续周期),当时间 τ 为扫描移动周期 nT 的整数倍时,时刻 t 与时刻 $t - \tau$ 在弧区上同一位置处的热源强度相同,而当 τ 为 nT 的非整数倍时,则弧区上同一位置处在 2 个时刻的热源强度是不同的。假设在观察时刻 t 弧区上 x 位置的热源为齿部正热源,则 $t - \tau$ 时刻弧区上同一位置处的热源可能是齿部正热源也可能是槽部负热源。

假设时间 τ 与 T 的比值 J 可表示为

$$J = \tau T = J_i + J_r \tag{3}$$

其中: J_i 为比值的整数部分; J_r 为比值的尾(小)数部分。

又取 $t_r = J_r T$ (4)

则可以确定出 $t - \tau$ 时刻,弧区上 x 处的热源强度为

$$q_{m,t}(x, t - \tau) = \begin{cases} \left(1 + \frac{x}{l}\right) q & V_{st} < x - \left[l - (m - 1 + \eta) \frac{2l}{n}\right] \\ - \epsilon \left(1 + \frac{x}{l}\right) q & x - \left[l - (m - 1 + \eta) \frac{2l}{n}\right] \\ V_{st} < x - \left[l - m \frac{2l}{n}\right] \\ \left(1 + \frac{x}{l}\right) q & V_{st} > x - \left[l - m \frac{2l}{n}\right] \end{cases} \tag{5}$$

若观察时刻 t 弧区上 x 处的热源为槽部负热源,同样可确定 $t - \tau$ 时刻弧区同一位置上的热源强度为

$$q_{m,s}(x, t - \tau) = \begin{cases} - \epsilon \left(1 + \frac{x}{l}\right) q & V_{st} < x - \left[l - m \frac{2l}{n}\right] \\ \left(1 + \frac{x}{l}\right) q & x - \left[l - m \frac{2l}{n}\right] \\ V_{st} < x - \left[l - (m + \eta) \frac{2l}{n}\right] \\ - \epsilon \left(1 + \frac{x}{l}\right) q & x - \left[l - (m + \eta) \frac{2l}{n}\right] \end{cases} \tag{6}$$

采用热源法^[1,2]经积分化简并无量纲化,得

$$[\theta] = \frac{\pi \lambda V_w}{2 \alpha q} \theta(X, Z, S_i) = \sum_{m=1}^n \frac{S_i}{0} - e^{-\frac{Z^2}{4S^2}} \cdot \left\{ \frac{1}{\pi} \left[\frac{x + L + 2S^2}{L} \right] \left\{ (2 + 2\epsilon) \operatorname{erf}(W_1) + \operatorname{erf}(W_2) + \epsilon \operatorname{erf}(W_3) - (1 + \epsilon) [\operatorname{erf}(W_4) + \operatorname{erf}(W_5) + \operatorname{erf}(W_6)] \right\} + \frac{2S}{L} \left\{ (2 + 2\epsilon) \cdot \exp[-(W_1)^2] + \exp[-(W_2)^2] + \epsilon \exp[-(W_3)^2] - (1 + \epsilon) \left\{ \exp[-(W_4)^2] + \exp[-(W_5)^2] + \exp[-(W_6)^2] \right\} \right\} \right\} dS \tag{7}$$

式中: $X = V_w x / (2\alpha)$; $Z = V_w z / (2\alpha)$; $L = V_w l / (2\alpha)$; $S = V_w^2 \tau / (4\alpha)$; $S_i = V_w t / (4\alpha)$ 均为无量纲量; $W_i = [X - C_i(m)L + 2S^2] / (2S)$ ($i = 1, 2, \dots, 6$); $C_1(m) = 1 - 2(m - J_i) / n$; $C_2(m) = 1 - 2(m - 1) / n$; $C_3(m) = 1 - 2m / n$; $C_4(m) = 1 - 2(m - 1 + \eta) / n$; $C_5(m) = 1 - 2(m - 1 + \eta - J_r) / n$; $C_6(m) = 1 - 2(m + \eta - J_r) / n$ 。

式(7)即为开槽砂轮缓进深切磨削时工件表层温度场解析式。

用开槽砂轮缓磨时,在磨削弧区温度场的理论解析过程中,曾假设弧区内的齿部对应正热源,槽部对应负热源,并设定了一个取决于弧区磨削液换热效果的比例系数 ϵ 。分析式(7)可见,要完成开槽砂轮缓进深磨时工件表层温度场的理论解析工作,其关键问题就是要估算出槽部负热源的强度,即确定比例系数 ϵ 。

当槽部有冷却,特别是针对弧区工件表面成膜沸腾而采用在槽部定向高压水射流冲击冷却时,工件表面上的边界条件极其复杂,其界面上的传热包括对流换热、沸腾换热、汽化、热辐射等多种形式,因此工件表面的换热系数很难用理论推导的方法确定下来。为此,采用理论解析结合实验研究的方法来确定工件表面的换热系数,亦即通过实验的方法估算出槽部负热源的强度。

实验采用直径 $d_s = 300\text{mm}$,开槽数 $n = 144$ 的单层电镀 CBN 砂轮,磨削钛合金 TC4;磨削用量条件: $V_s = 18\text{m/s}$, $V_w = 0.05\text{m/min}$, $a_p = 1.2\text{mm}$ 。在普通冷却及弧区定向射流冷却条件下夹丝热电偶捕捉到的热电势信号分别如图 3(a), (b) 所示。

通过温度标定曲线,可由热电势值换算成温度值,则图 3(a) 所示的普通冷却条件下弧区的最高温度值为 $\theta_{t1} = 800^\circ\text{C}$,观察工件表面发现已发生

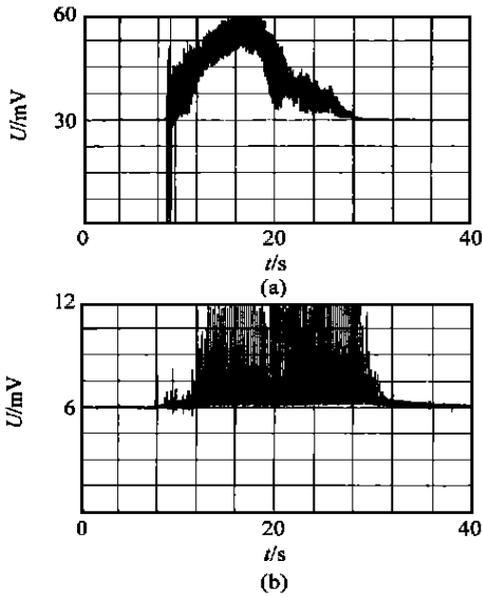


图 3 实测温度信号

Fig. 3 Measured temperature signal

烧伤, 同时认为烧伤时磨削热量全部进入工件且槽部负热源强度近似为零, 于是便可由式 (7) 计算出 θ_i 与对应的无量纲温度 $[\theta]_d$, 然后按照公式 $[\theta]_d = \frac{\pi \Delta V_w}{2\alpha q} \theta_i$ 便可计算出此时即烧伤时的传入工件的热流密度 q 。

保持相同的磨削用量, 在弧区中施加定向高压水射流冲击冷却, 测得弧区的最高温度为 $\theta = 70$ (如图 3(b) 所示), 同时可假设此时传入工件的热流密度为

$$q = (1 - \epsilon) q \quad (8)$$

式中: ϵ 即为在弧区中施加定向高压水射流冲击冷却时表征负热源强度的比例系数。

由式 (7) 可知当其他条件已知时, 对应于设定的 ϵ , 可计算得到无量纲温度分布 $[\theta]_e$, 同时由

$$[\theta]_e = \frac{\pi \Delta V_w}{2\alpha q} \theta_e = \frac{\pi \Delta V_w}{2\alpha(1 - \epsilon)q} \theta$$

可得一个 $[\theta]_e$, 根据试凑法, 经反复试算, 当所取的 ϵ 值使得 2 个 $[\theta]_e$ 值相等时, 便可确定出反映此时负热源强度的比例系数 ϵ , 经计算可得 $\epsilon = 0.93$, 由此便可给出此时工件表层温度分布的计算曲线 (如图 4 所示)。

由图可见, 历时 250s 左右, 工件表层温度达到稳态分布, 此时的无量纲温度为 49.8, 换算为实际温度值 $\theta = 110.3$, 由此从理论上可以看出开槽砂轮辅以弧区定向高压水射流冲击强化换热的确具有良好的冷却效果, 它可以在普通冷却时工件发生烧伤的条件下将弧区温度稳定控制在成膜沸腾的临界温度 120 ~ 130 以下。验证了开槽砂轮辅以弧区定向高压水射流冲击强化换热冷

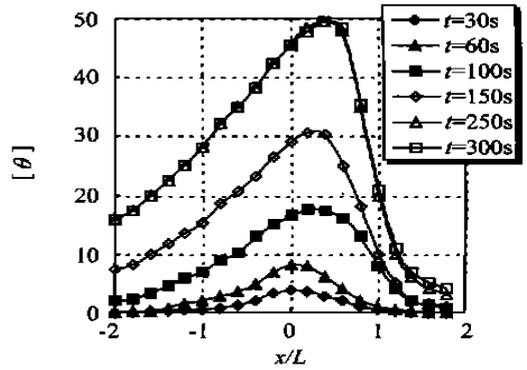


图 4 开槽砂轮缓磨时弧区射流冲击冷却工件表层温度场

Fig. 4 Temperature field on the surface of workpiece in creep deep grinding with slotted grinding wheel and jet impingement

却在改善弧区换热条件、疏导弧区磨削热、抑制磨削液成膜沸腾过程以及降低磨削温度上的显著效果, 进一步肯定了高效磨削时采用定向水射流冲击弧区换热可以作为大幅度开发高效磨削潜力的一项极其有效的手段。

3 磨削弧区定向高压水射流冲击强化换热冷却效果验证实验

为了验证磨削弧区定向高压水射流冲击强化换热的实际换热效果, 在相同的砂轮圆周速度 $V_s = 18\text{m/s}$ 以及相同的工作台进给速度 $V_w = 0.06\text{m/min}$ 下, 改变切深大小, 采用普通供液法及新型供液法磨削 TC4。

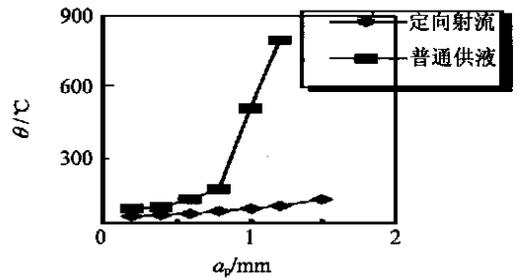


图 5 不同冷却方式磨削温度的对比

Fig. 5 Comparison of the temperature under different cooling modes

磨削温度的变化如图 5 所示, 由图可见当采用磨削弧区沿砂轮径向高压水射流定向冲击冷却时, 磨削温度明显降低, 特别是在材料去除率较高时, 其降温效果更加显著。同样通过测得的磨削力或磨削功率, 可计算出磨削比能, 再由比能折算出热流密度, 便可以得到不同冷却方式下换热效果的对比 (如图 6 所示)。由图可见当采用弧区定向

高压水射流冲击冷却时, 换热曲线斜率明显增大, 换热系数显著提高。

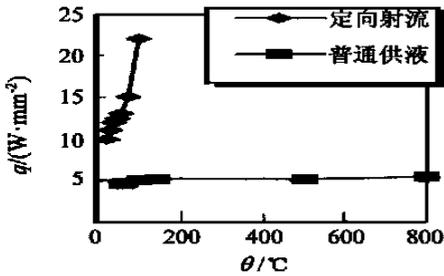


图6 不同冷却方式换热效果的对比

Fig. 6 Comparison of effect of heat transfer under different cooling modes

参考文献

- [1] 候镇冰, 何绍杰, 李恕先. 固体热传导[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984. 21~25.
- [2] 徐鸿钧, 徐西鹏, 林涛. 断续磨削时工件表层温度场解析[J]. 机械工程学报, 1994, 30(1): 30~36.

作者简介:



傅玉灿 男, 1972年6月生, 博士后, 研究方向: 材料设计与材料力学行为。Email: yu-canfu@ustc.edu.cn

《航空学报》中、英文版均已被 Ei Compendex 数据库收录

根据最新网上查询, 《中国航空学报(英文版)》从1999年第2期开始, 被 Ei Compendex 数据库全部收录; 《航空学报》(中文版)自2000年第2期开始, 被 Ei Compendex 数据库选择性收录。(英文期刊的收录直接由国外 Ei 总部制作, 上网较快; 中文期刊的收录由 Ei 设在北京的 Ei 中国信息部制作再寄发到 Ei 总部, 进入数据库稍慢)。

需要说明的是, Ei 作为一家信息服务公司, 根据客户对工程技术信息的需求制订其文章收录标准和办法, 并对收录期刊定期进行重新评价, Ei 的文章收录和评价标准, 并不等同于学术质量评价标准; Ei 对某个期刊的文章的收录不一定是连续和长期的, 也不一定全部文章收录, 各期刊和 Ei 之间也不存在固定的文章收录协议关系, 因此, 各篇文章是否被 Ei 收录, 应以最终是否能在 Ei Compendex 数据库中查到为准。

《航空学报》已从2000年开始将中英文版的印刷版均改为铜版纸印刷, 并积极参加和开拓网上出版, 积极和国际重要文摘数据库联系, 以进一步促进科研成果的传播、利用和转化。

另外: 本刊还被国内外如下文献检索机构及数据库收录:

美国宇航文摘(IAA)

美国应用力学评论(AMR)

俄罗斯文摘

中国科学引文数据库(CSCD)

中国科技论文统计分析和引文统计源期刊

中国学术期刊网(CJN)

万方数据库等等

《航空学报》杂志社

2001年4月25日