

文章编号:0253-9993(2010)05-0844-06

水射流辅助硬质合金钻头切割岩石过程的 刀具温度分析

李晓红,杨晓峰,卢义玉,陆朝晖,杨博凯

(重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室,重庆 400030)

摘要:通过对硬质合金钻头切削岩石过程中热量转换、传递过程分析,建立了前刀面的温度方程。根据对水射流与刀片间传热过程的热力学分析分别建立了水射流与刀片表面对流换热微分方程组和热源与刀片间的稳态导热微分方程,推导出水射流对刀片的换热功率表达式和刀片内温度场表达式。研究表明,在无水射流情况下,钻头切削岩石前刀面温度变化与切削速度 v_q 的平方根成正比;水射流的存在可以大幅降低刀具的温度,水射流对刀片的换热功率 Φ 与射流压力 p 的四次方根成正比,刀片平均温度的变化与 $p^{-1/4}$ 成正比。一定条件下的试验结果表明,采用水射流辅助硬质合金钻头切削岩石,当射流大于适当压力,钻头破损程度大幅下降,从而有效地提高钻头寿命。

关键词:水射流;硬质合金钻头;岩石;热量;温度分析

中图分类号:TD231.62 **文献标志码:**A

Temperature analysis of cemented carbide drill cutting rock associated with water jet

LI Xiao-hong, YANG Xiao-feng, LU Yi-yu, LU Zhao-hui, YANG Bo-kai

(Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources and the Environmental Disaster Control Engineering of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The temperature equation of drill rake face was established upon the analysis of heat conversion and transfer during the rock cutting process which uses cemented carbide drill bit. Based on the thermodynamic analysis of heat transfer process between water jet and the blade surface, the differential equations of heat convection and differential equation of steady heat conduction between water jet and the blade surface were established. Expression of heat exchange power and expression of temperature field of the blade were derived. Study results show that without water jet, the temperature of the drill rake face in rock cutting is proportional to the square root of cutting speed v_q , and the existence of water jet can significantly reduce the temperature of cutting tool, the power expression of heat exchange Φ between water jet and the blade surface is proportional to the four square root of the jet pressure p , the average changing temperature of blade is proportional to $p^{-1/4}$. The experimental results under certain conditions show that the drill breakage declined sharply and the life of drill is improved effectively by cemented carbide drill cutting associated with water jet.

Key words: water jet; cemented carbide drill; rock; heat; temperature analysis

在煤巷掘进及穿层瓦斯抽放孔的钻进过程中,经常遇到煤层顶、底板坚硬岩石,刀具破损严重,寿命急剧下降,严重影响生产效率及成本。水射流配合刀具破岩可以对刀具实施有效冷却,并可在岩石上开槽和

产生裂隙,促使裂纹扩展,从而降低刀具阻力,近年来成为研究热点。刀具的失效与其工作温度密切相关,特别是硬质合金材料导热性存在一定局限,在高温条件下工作将直接导致刀具加速破损寿命降低^[1-4]。

收稿日期:2009-11-23 责任编辑:许书阁

基金项目:国家自然科学基金委创新研究群体专项基金资助项目(50621403);重庆市杰出青年基金资助项目(CSTC 2009BA6047)

作者简介:李晓红(1959—),男,重庆合川人,教授,博士生导师,博士。联系人:杨晓峰(1980—),男,吉林辽源人,博士研究生。E-mail: act777@126.com

因此刀具工作温度对研究刀具破损机理、提高刀具寿命有重要意义。Jaeger 给出了平面移动热源的热量计算方法^[5];Milton C. Shaw 给出了金属切削中刀具、切屑、工件热量分配比例模型^[6];A. A. Yevtushenko 和 R. Komanduri 分别讨论了运动摩擦表面热源的温度分布变化趋势^[7-8];R. M' Saoubi 利用红外成像仪研究发现,刀具温度最高点不是在摩擦表面而是在刀片内部某点^[9]。然而,大部分对刀具温度的研究集中在金属切削领域,目前针对岩石切削特别是水射流的辅助钻头切削热和降温效能分析的国内外相关报道很少。

本文在给出硬质合金钻头干切削岩石条件下前刀面温度方程的基础上,通过对水射流条件下刀片传热过程的热力学分析,推导出水射流作用下刀片内温度场表达式,并分析了影响温度变化的主要因素,为推进水射流辅助钻头切割岩石的钻头失效机理的进一步研究和工业应用提供了参考依据。

1 干切削条件下的刀具温度分析

切削温度是指前刀面与切屑接触区的平均温度。切削区的主要热源有 2 个:一个在剪切区,另一个在刀屑接触区,所以前刀面的平均温度可以近似认为是剪切面的平均温度与刀屑接触面摩擦温度之和^[3]。

1.1 在剪切面的热量传递及温度分析

在钻头切削岩石过程中,根据 Shaw 等的分析和实验结果,可以近似认为剪切变形功完全转化为热能^[6,10-11],切削示意如图 1 所示。

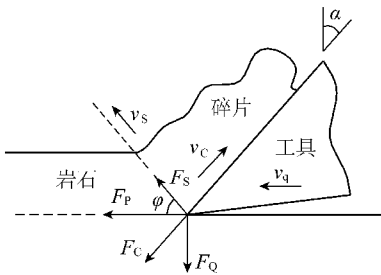


图1 刀具切削岩石示意

Fig. 1 Schematic of cutting rock

单位时间在单位面积上消耗的功 U_s 为

$$U_s = \frac{F_s v_s}{b e \csc \varphi} = \frac{F_s v_s}{b e} \sin \varphi$$

式中, F_s 为剪切力; v_s 为切削速度; b 为切削宽度; e 为切削厚度; φ 为剪切角。

$$F_s = (F_p \cos \varphi - F_Q \sin \varphi)$$

式中, F_p 为主切削力; F_Q 为背向力。

$$v_s = \frac{\cos \alpha}{\cos(\varphi - \alpha)} v_c$$

式中, v_c 为切削速度; α 为刀具前角。

单位时间单位面积上的热量 q_1 为

$$q_1 = U_s = \frac{F_s v_s}{b e \csc \varphi} = \frac{F_s v_s}{b e} \sin \varphi$$

设 R_1 为剪切面产生热量传入刀具的比率,则流入刀具的热量为 $q_1 R_1$, R_1 为

$$R_1 = \left(1.328 \frac{K_1 \gamma}{v_q e} \right)^{\frac{1}{2}} \left/ \left(1 + 1.328 \frac{K_1 \gamma}{v_q e} \right)^{\frac{1}{2}} \right.$$

式中, K_1 为岩石的导温系数; γ 为剪切区的相对滑移系数, $\gamma = \cos \alpha / [\sin \varphi \cos(\varphi - \alpha)]$ 。

在切削过程中刀片与岩石紧密接触,根据 J. C. Jaeger 的分析,两者接触区域可近似看成移动热源与平面作用模型^[5],热源部分的平均温度可表示为

$$T_s = \frac{0.754}{k_1 \sqrt{L_1}} R_1 q_1 \left(\frac{e \csc \varphi}{2} \right) + T_0$$

式中, T_0 为室温; k_1 为岩石导热系数; L_1 为计算参数,

$$L_1 = \frac{v_s (e \csc \varphi / 2)}{2 K_1} = \frac{v_q \gamma e}{4 K_1}。$$

则剪切面上的平均温度 T_s 为

$$T_s = \frac{0.754}{k_1 \sqrt{L_1}} \frac{1.328 [K_1 \gamma / (v_q e)]^{1/2}}{1 + 1.328 [K_1 \gamma / (v_q e)]^{1/2}} q_1 \left(\frac{e \csc \varphi}{2} \right) + T_0 \quad (1)$$

1.2 摩擦面的热量传递及温度分析

设前刀面由于摩擦在单位时间单位面积产生的热量为 q_2 ,摩擦造成的温升用 ΔT_f 表示,有

$$q_2 = \frac{F_c v_c}{a b}$$

$$v_c = \frac{v_q \sin \varphi}{\cos(\varphi - \alpha)}, F_c = (F_p \sin \alpha - F_Q \cos \alpha)$$

式中, F_c 为前刀面摩擦力; v_c 为岩石切屑与刀具的摩擦速度; a 为切屑与刀具的接触长度。

$$q_2 = (F_p \sin \alpha - F_Q \cos \alpha) \frac{\sin \varphi}{\cos(\varphi - \alpha)} \frac{v_q}{a b}$$

设 R_2 为摩擦热量传入切屑的比率,则流入切屑中的热量为 $R_2 q_2$, R_2 为

$$R_2 = \frac{q_2 (a \Lambda / k_3) - T_s + T_0}{q_2 (a \Lambda / k_3) + q_2 (0.377 a / k_2 \sqrt{L_2})}$$

式中, Λ 为移动平面热源的形状系数; k_2 为岩石切屑的导热系数; k_3 为刀具材料的导热系数; L_2 为计算参数。

$$\Lambda = \frac{2}{\pi} \left\{ \operatorname{arsinh} \left(\frac{b}{a} \right) + \frac{b}{a} \operatorname{arsinh} \left(\frac{a}{b} \right) - \frac{1}{3} \left(\frac{b}{a} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{a}{b} \right) - \frac{1}{3} \left(\frac{a}{b} + \frac{b}{a} \right) \left[1 + \left(\frac{b}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

$$L_2 = \frac{v_c a / 2}{2K_2}$$

式中, K_2 为岩石切屑的导温系数。

根据前面的分析,切屑与刀具摩擦也可以看成移动摩擦表面与平面作用模型,则由摩擦造成的表面平均温度为

$$T_T = T_S + \Delta T_F = 0.754 \frac{1.328 \left(\frac{k_1 \gamma}{v_q e} \right)^{\frac{1}{2}}}{1 + 1.328 \left(\frac{k_1 \gamma}{v_q e} \right)^{\frac{1}{2}}} \left[\frac{(F_P \cos \varphi - F_Q \sin \varphi) \cos \alpha}{\cos(\varphi - \alpha)} v_q \sin \varphi / (be) \right] \frac{e \csc \varphi}{2} / \left(k_1 \sqrt{\frac{v_q \gamma e}{4K_1}} \right) + 0.377 \frac{q_2(a\Lambda/k_3) - T_S + T_0}{q_2(a\Lambda/k_3) + q_2(0.377a/k_2 \sqrt{L_2})} (F_P \sin \alpha - F_Q \cos \alpha) \frac{\sin \varphi}{\cos(\varphi - \alpha)} \frac{v_q}{b} / \left(k_2 \sqrt{\frac{\sin \varphi}{\cos(\varphi - \alpha)} \frac{v_q a}{2}} / 2K_2 \right) + T_0 \quad (3)$$

由式(3)可看出,钻头切削岩石时前刀面的温度与刀片材料、岩石材料、刀片尺寸、切削力、切削速度等因素有关。在只有切削速度变化的条件下,式(3)可表示为 $T_T = \omega \sqrt{v_q} + T_0$ 的形式(ω 为常系数),即切削温度升高与 $\sqrt{v_q}$ 成比例。

2 水射流作用下换热量及刀片温度场分析

2.1 水射流与刀片的换热量分析

水射流从刀片表面底端流到顶端将发生热量传递,达到一定降温效果,可以近似看成外掠平板的对流换热过程。在该流场中取出边长为 dX 、 dY 的微元体,建立下列微分方程^[12-13]。

根据傅里叶导热定律,流体任意一点 (X, Y) 表面传热系数 h_x 为

$$h_x = - \frac{\lambda}{\Delta t_x} \left(\frac{\partial t}{\partial Y} \right)_{w,x} \quad (4)$$

式中, $\left(\frac{\partial t}{\partial Y} \right)_{w,x}$ 为 X 点贴壁处温度梯度; Δt_x 为 Y 点温差。

根据质量守恒定律,建立二维不可压缩流体流动连续性方程

$$\frac{\partial u}{\partial X} + \frac{\partial v}{\partial Y} = 0 \quad (5)$$

式中, u 、 v 为长度 dX 、 dY 微元体在 X 和 Y 方向上的速度分量。

根据动量守恒定律,微元体的动量微分方程为

$$u \frac{\partial u}{\partial X} + v \frac{\partial u}{\partial Y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial Y^2} \quad (6)$$

根据能量守恒定律,对微元体建立能量微分方程为

$$u \frac{\partial t}{\partial X} + v \frac{\partial t}{\partial Y} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial^2 t}{\partial Y^2} \quad (7)$$

$$\Delta T_F = \left[0.377 \frac{q_2(a\Lambda/k_3) - T_S + T_0}{q_2(a\Lambda/k_3) + q_2(0.377a/k_2 \sqrt{L_2})} q_2 a \right] \times (k_2 \sqrt{L_2})^{-1} \quad (2)$$

1.3 前刀面接触区的平均温度

据上述分析,综合式(1)、(2),前刀面接触区的平均温度 T_T 为

式中, t 为微元体温度; c_p 为水比热容; ρ 为水密度。

联立方程(4)~(7)并对刀具平板表面传热系数 h_x 进行求解得

$$h_x = 0.664 \frac{\lambda}{X} \left(\frac{v_L X}{\nu} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\mu c_p}{\lambda} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

式中, v_L 为水流速; ν 为水运动黏度; μ 为水动力黏度。

对于长度为 l 的平板,积分式(8)求出平均表面传热系数 h 为

$$h = \frac{1}{l} \int_0^l h_x dX = 2h_l = 0.664 \frac{\lambda}{l} \left(\frac{v_L l}{\nu} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\mu c_p}{\lambda} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

根据牛顿冷却公式,全板换热功率 Φ 为

$$\Phi = h(T_H - T_L)A \quad (10)$$

式中, T_H 为板温; T_L 为水温; A 为过流面积。

将式(9)代入式(10)得

$$\Phi = 0.664 \frac{\lambda}{l} \left(\frac{v_L l}{\nu} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\mu c_p}{\lambda} \right)^{\frac{1}{3}} (T_H - T_L) l m \quad (11)$$

式中, l 为刀片长; m 为刀片宽。

容易得出,在其他条件一定时,水射流的换热功率 $\Phi \propto \sqrt{v_L}$ 。

2.2 水射流作用下刀片的温度场分析

水流的平均流速为 v_L ,单位长度水流在刀片上平均停留时间为

$$s = l/v_L$$

吸收热量 Q 为

$$Q = \Phi s = c_p M_s \Delta T_s$$

式中, M_s 为水层平均质量, $M_s = \rho l m d_s$; d_s 为刀片表面水层平均厚度; ΔT_s 为水层平均温升。

$$\Delta T_s = \frac{\Phi s}{c_p \rho l m d} =$$

$$\frac{0.664 \frac{\lambda}{l} \left(\frac{v_L l}{\nu} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\mu c_p}{\lambda} \right)^{\frac{1}{3}} (T_H - T_L) \frac{l}{v_L}}{c_p \rho d_s} \quad (12)$$

可以看出,在其他条件一定时,刀片表面流动水层的温度升高 $\Delta T_s \propto v_L^{1/2}$ 。

水层加热后平均温度为

$$T_s = T_{s0} + \Delta T_s = T_{s0} + \frac{0.664 \frac{\lambda}{l} \left(\frac{v_L l}{\nu} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\mu c_p}{\lambda} \right)^{\frac{1}{3}} (T_H - T_L) \frac{l}{v_L}}{c_p \rho d_s} \quad (13)$$

式中, T_{s0} 为水流初始温度。

切削热对刀片起加温作用,水流起降温作用,在稳定工作状态下,两热源保持稳定,所以该过程可以近似看做平壁稳态导热过程,对于点 (x, y, z) , 其微分方程为

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0 \quad (14)$$

刀片温度沿刀片长度和宽度方向变化率很小,主要沿厚度方向发生变化,故可近似按一维导热问题处理,则式(14)可简化为

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = 0 \quad (15)$$

边界条件:

$$t \Big|_{x=0} = T_H, t \Big|_{x=d} = T_L \quad (16)$$

积分式(15),并代入式(16),整理得刀片的温度分布为

$$T_x = T_T - (T_T - T_s)x/d \quad (17)$$

式中, d 为壁厚; x 为刀片内一点到刀片的表面距离。

将式(3)和式(13)代入式(17),整理得刀片内温度场表达式为

$$T_x = \frac{0.754}{k_1 \sqrt{L_1}} R_1 q_1 \left(\frac{ecsc \varphi}{2} \right) + T_0 + \frac{0.754(R_2 q_2) a}{k_2 \sqrt{L_2}} - \left\{ \frac{0.754}{k_1 \sqrt{L_1}} R_1 q_1 \left(\frac{ecsc \varphi}{2} \right) + T_0 + \frac{0.377(R_2 q_2) a}{k_2 \sqrt{L_2}} - \left[T_{s0} + \frac{0.664 \frac{\lambda}{l} \left(\frac{v_L l}{\nu} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\mu c_p}{\lambda} \right)^{\frac{1}{3}} (T_T - T_L) \frac{l}{v_L}}{c_p \rho d_s} \right] \right\} x/d \quad (18)$$

2.3 不同泵压下刀片的温度场

不同泵压水射流的流速^[14] v_L 为

$$v_L = \sqrt{\frac{2gp}{G}} \quad (19)$$

式中, p 为泵压; G 为水的容重, $G = \rho g$ 。

将式(19)代入式(18),得不同泵压下刀片温度

分布表达式为

$$T_x = \frac{0.754}{k_1 \sqrt{L_1}} R_1 q_1 \left(\frac{ecsc \varphi}{2} \right) + T_0 + \frac{0.754(R_2 q_2) a}{k_2 \sqrt{L_2}} - \left\{ \frac{0.754}{k_1 \sqrt{L_1}} R_1 q_1 \left(\frac{ecsc \varphi}{2} \right) + T_0 + \frac{0.377(R_2 q_2) a}{k_2 \sqrt{L_2}} - \left[T_{s0} + 0.664 \frac{\lambda}{l} \left(\frac{1}{\nu} \sqrt{\frac{2gp}{G}} x \right)^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{\mu c_p}{\lambda} \right)^{\frac{1}{3}} (T_T - T_L) \frac{l}{\sqrt{2gp/G}} / (c_p \rho d_s) \right] \right\} x/d \quad (20)$$

3 水射流辅助钻头切割岩石的试验及分析

由于钻头在岩石钻进时的工作条件十分恶劣,直接精确测量出刀片温度非常困难,尽管国内外许多学者做过一些尝试,但效果都不甚理想。本文利用对比试验方法,从比较钻头破损程度的角度定性验证干切削及不同泵压水射流条件下工作温度对刀具的影响。

3.1 试验装置及参数

试验装置由矿用钻机改装,高压水由1台压力可达135 MPa进口高压泵提供,系统装置如图2所示。钻头由普通三翼钻头改装,刀片材料为硬质合金 YG-6。射流喷嘴紧贴刀片底部布置,射流方向与刀片平行^[15]。



图2 试验装置

Fig. 2 Testing system

相关试验参数:室温 20 °C,水温 20 °C,灰岩导热系数 $k_1 = 2.864 \text{ J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K})$,灰岩导温系数 $K_1 = 1.242 \times 10^{-6}$,灰岩切屑导热系数 $k_2 = 0.81 \text{ J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K})$,切屑导温系数 $K_2 = 6.03 \times 10^{-7}$,灰岩剪切角 $\varphi = 36.69^\circ$,刀具前角 $\alpha = 30^\circ$,刀片长 $l = 15 \text{ mm}$,宽 $m = 6 \text{ mm}$,厚 $d = 4 \text{ mm}$,刀片导热系数 $k_3 = 79.6 \text{ J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ 。切割速度 $v_q = 189 \text{ mm/s}$,主切削力 $F_p = 708.5 \text{ N}$,背向力 $F_Q = 237.5 \text{ N}$,切削宽度 $b = 5 \text{ mm}$,切削厚度 $e = 13 \text{ mm}$,切屑与刀片摩擦长度 $a = 2.5 \text{ mm}$,水层厚度 $d_s = 0.5 \text{ mm}$ 。

3.2 试验结果

在无水射流、水射流泵压 0.5 MPa 和 25.0 MPa 下进行了 3 组试验,结果见表 1。

几乎相同的钻进速度和时间,试验 1 刀具破损严重,而试验 2 和 3 的刀具只有轻微磨损,如图 3 所示。

表 1 岩石钻进试验记录
Table 1 Rock drilling record

序号	泵压/MPa	钻进距离/cm	钻进时间/s	钻进速度/(cm·s ⁻¹)
1	0	40.5	291	0.139
2	0.5	40.5	295	0.137
3	25.0	40.5	290	0.140



(a) 试验1



(b) 试验2



(c) 试验3

图 3 钻头破损情况

Fig. 3 The damage pictures of drills

3.3 计算分析

实际上,硬质合金的抗弯强度与温度密切相关,在室温至 300 °C 强度基本不变,在 300 ~ 400 °C 以上时开始下降,超过 500 °C 比室温时的强度大约降低 30%^[4,16-17]。

(1) 无水射流条件下

试验 1 由式(3)计算前刀面的平均温度 $T_T = 572.6$ °C。由于刀片尺寸很小,钻进稳定后刀片平均温度可用前刀面温度代替。无水射流冷却,平均温度

接近 600 °C,抗弯强度下降接近 30%,所以钻头破损情况较严重(图 3(a))。

(2) 水射流条件下

根据上述分析,为比较方便,可将水射流作用下刀片中心处温度近似看成刀片平均温度。根据式(11)、(12),带入相关参数得到换热功率、水层温升与射流压力间的关系式为

$$\Phi = 368.839v_L^{1/2} = 78.0p^{1/4}$$

$$\Delta T_s = 29.269v_L^{-1/2} = 138.4p^{-1/4}$$

根据式(20)推出试验条件下水射流辅助下刀片中心 $x=2$ 处温度与射流压力之间关系为

$$T_2 = 69.2p^{-1/4} + 296.3 \quad (21)$$

图 4 是根据式(21)的计算结果绘制的温度与压力的关系曲线,可以看出,随着泵压提高,温度下降较快,降温效果比较明显 ($\Delta T \propto p^{-1/4}$),当泵压提高到 7 MPa 左右,提高压力对温度的降低效果开始放缓,并缓慢趋近极限值。

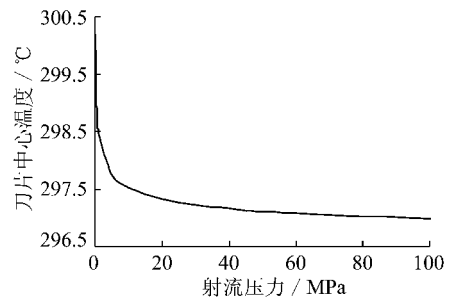


图 4 泵压对刀片温度的影响

Fig. 4 Effects of pressure on blade temperature

由式(21)可知,在该试验条件下只要射流压力大于 0.12 MPa 即可以使刀具平均温度降到 300 °C 以下。理论上,温度下降的极值为 296.3 °C。

根据式(12)、(19),试验 2、3 的具体计算结果如下。

试验 2 泵压 0.5 MPa,射流流速 31.62 m/s,水温升高 5.20 °C,刀片温度分布函数为

$$T_x = 572.58 - \frac{572.58 - 25.2}{4}x \quad (0 \leq x \leq 4)$$

刀片中心 $x=2$ 处, $T=298.9$ °C。

试验 3 泵压 25.0 MPa,射流流速 152.85 m/s,水温升高 1.95 °C,刀片温度分布函数为

$$T_x = 572.58 - \frac{572.58 - 21.95}{4}x \quad (0 \leq x \leq 4)$$

刀片中心 $x=2$ 处, $T=297.3$ °C。

试验 2、3 的射流压力均大于 0.12 MPa,刀片理论计算平均温度都低于 300 °C,所以刀具破损比没水射流辅助要轻微得多。

4 结 论

(1) 在无水射流情况下, 钻头切削岩石时前刀面的温度与刀片材料、岩石材料、刀片尺寸与形状、切削力、切削速度等诸多因素有关, 当其他条件一定时, 前刀面平均温度升高与切削速度 v_q 的平方根成正比。

(2) 水射流对硬质合金刀片起降温作用, 水射流对刀片的换热功率 Φ 与水射流速度 v_L 的平方根成正比 ($\Phi \propto \sqrt{v_L}$), 也与泵压 p 的四次方根成正比 ($\Phi \propto \sqrt[4]{p}$)。刀片表面流动水层和刀片平均的温度升高与 $v_L^{-1/2}$ 成正比, 也与 $p^{-1/4}$ 成正比。这表明增大泵压即提高水射流速度, 是提高刀片换热效率与降低刀具温度的有效手段。但是随着压力的提高, 刀片温度降低存在一个极限值, 该值与材料参数、环境温度、切削力和切削速度等因素有关。

(3) 根据试验相关参数, 采用合适压力的水射流可使硬质合金刀片工作在临界破坏温度之下, 从而大幅提高刀具寿命。

参考文献:

- [1] Beste U, Hartzell T, Engqvist H, et al. Surface damage on cemented carbide rock-drill buttons[J]. *Wear*, 2001, 249: 324-329.
- [2] Kunio Uoharo. Fundamental approach to the thermal crack of cemented cutting tools[J]. *Annals of the CIRP*, 1981, 30(1): 256-259.
- [3] Kindermann P, Schlund P, Sockel H G, et al. High-temperature fatigue of cemented carbides under cyclic loads[J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 1999, 17: 55-68.
- [4] 黄道远, 易丹青, 刘会群, 等. 硬质合金强度随温度的变化及失效机理的研究[J]. *材料热处理学报*, 2007, 28(5): 105-108.
Huang Daoyuan, Yi Danqing, Liu Huiqun, et al. Effect of temperature on bending strength and failure mechanism of cemented carbide[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2007, 28(5): 105-108.
- [5] Jaeger J C. Moving sources of heat and the temperature at sliding contacts[J]. *Proc. Royal. Soc. of New South Wales*, 1942, 76: 203-224.
- [6] Milton C Shaw. *Metal cutting principles*[M]. Oxford: Oxford University Press, 1984.
- [7] Yevtushenko A A, Ivanykt E G, Ukhanska O M. Transient temperature of local moving areas of sliding contact[J]. *Tribology International*, 1997, 30(3): 209-214.
- [8] Komanduri R, Hou Z B. Analysis of heat partition and temperature distribution in sliding systems[J]. *Wear*, 2001, 251: 925-938.
- [9] Saoubi R M, Chandrasekaran H. Investigation of the effects of tool micro-geometry and coating on tool temperature during orthogonal turning of quenched and tempered steel[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004, 44: 213-224.
- [10] Vincent Dessoly, Shreyes N Melkote, Christophe Lescalier. Modeling and verification of cutting tool temperatures in rotary tool turning of hardened steel[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004, 44: 1 463-1 470.
- [11] Armarego E J A, Karri V, Smith A J R. Fundamental studies of driven and self-propelled rotary tool cutting processes-I theoretical investigation[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1994, 34(6): 785-801.
- [12] 章熙民, 任则需, 梅飞鸣. *传热学*[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Zhang Ximin, Ren Zepei, Mei Feiming. *Heat transfer*[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2008.
- [13] PIncropera F, Dewitt D P. *Fundamentals of heat and mass transfer*[M]. John Wiley & Sons Inc., 1985.
- [14] 李晓红, 卢义玉, 向文英. *水射流理论及其在矿业工程中的应用*[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2007.
Li Xiaohong, Lu Yiyu, Xiang Wenying. *Water jet theory and its application in mining engineering*[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2007.
- [15] 卢义玉, 陆朝晖, 李晓红, 等. 水射流辅助 PDC 刀具切削岩石的力学分析[J]. *岩土力学*, 2008, 29(11): 3 037-3 040.
Lu Yiyu, Lu Zhaohui, Li Xiaohong, et al. Mechanical analysis of water jets assisting PDC bit to cut rocks[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(11): 3 037-3 040.
- [16] Valdimir D Krestic. Fracture of brittle solids in the presence of thermoelastic stresses[J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1984, 67(9): 589-593.
- [17] Bhaumik S K, Balasubramaniam R, Upadhyaya G S, et al. Oxidation behaviour of hard and binder phase modified WC-10Co cemented carbides[J]. *Journal of Material Science Letters*, 1992, 11: 1 457-1 459.