

文章编号:0253-9993(2011)01-0152-05

水射流辅助岩石切削过程的刀具热应力分析

杨晓峰,李晓红,卢义玉

(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:建立了刀片在水射流辅助切削岩石过程中的热传导模型,并在对岩石切削过程进行热功转换分析的基础上,给出了热流密度、界面温度等边界条件的确定方法,从而建立了水射流条件下刀片的温度场模型。对刀片由于温度变化产生的热应力进行了系统分析,并给出了热应力的计算模型,并且结合计算分析了射流压力等参数对各种热应力的影响。研究表明:热应力是导致岩石切削刀具失效的主要影响因素。热应力受刀具与岩石材料热物性质、刀片尺寸、切削力、切削速度、射流压力等因素影响。水射流的存在可以大幅降低刀具的热应力,热应力的大小与射流压力 p 的四次方根的倒数成正比。选择合适参数可将热应力控制在临界范围内,避免刀具早期失效,延长其使用寿命。

关键词:水射流;岩石切削;刀具;热应力;温度

中图分类号:TD231.62 **文献标志码:**A

Thermal stress analysis of tool in cutting rock with water jet

YANG Xiao-feng, LI Xiao-hong, LU Yi-yu

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

Abstract: Heat conduction model of the blade of tool was established during the process of rock cutting with water jet. Based on the analysis of the conversion between thermal and power in rock cutting, computational methods of the boundary conditions such as heat flux, interface temperature were given. Thereby the temperature field model of the blade was established in rock cutting with water jet. The thermal stresses of drill bit were analyzed and computational models of the thermal stress were also presented. The influence of parameters to the thermal stresses such as jet pressure was analyzed and computational methods were also given. The results show that thermal stresses are the main factors which induce the tool failure. The thermal stresses are influenced by material properties of the tool and rock, blade sizes, cutting force and speed, jet pressure. The thermal stresses of drill bit can be decreased efficiently by water jet and it is proportional to the reciprocal of four square root of the jet pressure. The life cycle of the tool will be prolonged without earlier failure if the parameters are controlled in critical range.

Key words: water jet; rock cutting; tool; thermal stress; temperature

在穿越硬岩的施工中,刀具费用接近施工成本的1/3,由于刀具原因造成的停机时间占施工时间的比率接近20%。深入研究刀具破损机理,提高刀具寿命,有很强的学术和实用价值。刀具热应力的分析对研究刀具破损机理有着重要意义。刀具在切削过程

中绝大部分切削功都转化成切削热,致使刀片温度迅速升高,造成刀片内产生很高热应力,对刀具失效产生影响^[1]。Gunnars等^[2]计算了金属切削过程中发生温度变化时的刀具涂层热应力并就其对耐磨性的影响做了初步分析;Sayman等^[3]对切削金属时刀片

收稿日期:2010-06-01 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);重庆大学研究生科技创新基金资助项目(201005B1A0010341)

作者简介:杨晓峰(1980—),男,吉林辽源人,博士研究生。Tel:023-65106640, E-mail:act777@126.com

冷却过程中热应力大小进行了模拟和计算。当前大部分对刀具热应力的研究集中在金属切削领域,由于刀具切削岩石过程的复杂性,特别是在水射流的参与下,使刀具温度和热应力的建模与计算十分困难,目前国内外尚无人给出水射流辅助刀具切削石过程的刀具热应力计算方法。

本文在建立刀具温度场模型的基础上,系统地给出了水射流辅助刀具切削岩石过程中的刀具热应力的计算方法,并计算分析了射流压力等技术参数对刀具热应力的影响,为水射流辅助刀具破岩理论的深入研究和延长刀具使用寿命的优化设计与指导工程施工提供了参考依据。

1 温度场与热应力的计算模型

刀具切削岩石过程中的主要发热源有两个:一是刀具与岩石摩擦产生的摩擦热;另一个是岩石剪切变形产生的剪切热,两者的共同作用造成了刀具温度的升高。而水射流从刀片表面流过将发生热量传递,吸收带走一部分切削产生的热量,达到一定降温效果,是主要的吸热源。

1.1 热传导模型

取安装在刀具基座上的刀片为研究对象,建立如图1所示的刀片模型,则刀片的热传导微分方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q \quad (1)$$

式中, ρ 为刀具的密度; c 为刀具的比热; t 为时间变量; k 为刀具的导热系数; (x, y, z) 为刀具内任一点的坐标; T 为 (x, y, z) 处的温度; Q 为 (x, y, z) 处的内部发热量。

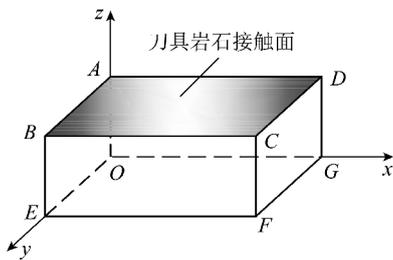


图1 刀片模型

Fig. 1 Model of the blade

在连续稳定的切削条件下,根据 Jaeger^[4] 和 Shaw^[5] 的分析和实验验证,可以近似认为切割破岩产生的热量在工作面上均匀分布,刀具-岩屑接触区可以看作稳定的面热源,而且刀具内部并无内热源存在($Q=0$)。

如果水射流的速度也基本保持恒定(稳定的热吸收),则式(1)简化为

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2)$$

1.2 边界条件的确定

在切削工作中,面 ABCD 为工作面,也是刀具-岩石-水射流接触界面,切削热在该界面上流入刀具。而刀片的剩余 5 个面 BCDE、CDGF、EFGO、ABEO、AOGD 不与岩石接触,可定性为热传导边界,边界温度为环境温度 T_0 。对于热流边界面 ABCD,根据傅里叶定律有

$$-k \text{grad } T_1 = q \quad (3)$$

式中, T_1 为刀-岩-水接触区界面温度; q 为流入刀具的平均热流密度。

可见界面温度和热流密度是影响热传导边界条件的主要因素。

1.2.1 热流密度 q 的确定

设切削过程中单位时间单位面积上产生的剪切热为 q_1 ,流入刀具的比率为 R_1 ;单位时间单位面积上产生的摩擦热为 q_2 ,流入刀具中的比率为 R_2 。

(1)干切削时单位时间、单位面积上流入刀具的热流密度 q_D 为

$$q_D = q_1 R_1 + q_2 R_2 \quad (4)$$

由式(4)可知,下面对热量分配比率 R_1 、 R_2 的求解对定量了解热流密度 q_D 至关重要,下面给出比率参数 R_1 、 R_2 的求解过程。

根据 Bever 等一系列研究和准确的实验结果,固体切削时所有与切屑形成有关系的能量几乎完全被转化为热能,而形成新表面的表面能相对于热能来说可以忽略^[6]。则单位时间单位面积剪切面上热量 q_1 为

$$q_1 = \frac{F_s v_s}{b e c \text{sc} \varphi} \quad (5)$$

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

流入岩石切屑的热量为 $(1-R_1)q_1$ 。根据比热公式,剪切面附近切屑的平均温度 T_s 为

$$T_s = \frac{q_1 (b e c \text{sc} \varphi) (1 - R_1)}{C_1 \rho_1 b e v_s \frac{\cos(\varphi - \theta)}{\cos \theta}} + T_0 \quad (6)$$

式中, C_1 为岩石的比热; ρ_1 为岩石的密度; θ 为刀具前角。

式(6)中 R_1 为未知数,为解出 R_1 还要从岩石角度求出剪切面的平均温度。刀片在切削岩石过程中紧密接触,剧烈摩擦产生热量,在两者接触区域可以近似看成移动摩擦表面与平面作用模型^[4-5],移动热源部分的平均温度可以表示为

$$T_s = 0.754R_1q_1 \frac{\operatorname{ecsc} \varphi}{2} \frac{1}{k_1} \left(\frac{v_s G \operatorname{ecsc} \varphi}{4K_1} \right)^{-1/2} + T_0 \quad (7)$$

式中, k_1 为岩石的导热系数; K_1 为岩石的导温系数; G 为剪切区的相对滑移系数。

式(6)、(7)分别是由岩石切屑与刀具求出的剪切面平均温度, 根据 Blok 温度准则, 接触界面上两者的温度应该相等, 联立后可求出热量传递比率 R_1 为

$$R_1 = \frac{1.328 \left[\frac{K_1 G \cos \theta}{v_s \operatorname{ecsc}(\varphi - \theta)} \right]^{1/2}}{1 + 1.328 \left[\frac{K_1 G \cos \theta}{v_s \operatorname{ecsc}(\varphi - \theta)} \right]^{1/2}} \quad (8)$$

摩擦在单位时间单位面积产生的热量 q_2 为

$$q_2 = \frac{F_c v_c}{ab} \quad (9)$$

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。

R_2 为摩擦产生热量传入切屑的比率, 则 $R_2 q_2$ 为流入切屑中的热量。与前面的分析类似, 切屑与刀具摩擦可看成移动摩擦表面与平面作用模型, 则由摩擦造成的切屑表面平均温升 ΔT_F 为

$$\Delta T_F = \frac{0.754(R_2 q_2) a}{2} \frac{1}{k_2} \left(\frac{v_c a / 2}{2K_2} \right)^{-1/2} \quad (10)$$

式中, k_2 为切屑的导热系数; K_2 为岩石切屑的导温系数。

前刀面的平均温度 T_T 可近似认为是剪切面的平均温度 T_s 与刀屑接触面摩擦温升 ΔT_F 之和^[5], 即 T_T 为

$$T_T = T_s + \Delta T_F \quad (11)$$

式(10)中 R_2 为未知数, 为解出 R_2 还要站在前刀面的角度求出 T_T 。刚切下的切屑与刀具在钻进过程中紧密接触, 可以看成固定的连续摩擦热源, 根据 Miltion 的分析^[5], 刀具前刀面接触区的平均温度为

$$T_T = \frac{(1 - R_2) q_2 a / 2}{k_3} \Lambda + T_0 \quad (12)$$

式中, k_3 为刀具材料的导热系数; Λ 为移动平面热源的形状系数^[6]。

两种方法求出的前刀面温度应该相等, 联立式(11)、(12), 解出热量传递比率 R_2 为

$$R_2 = \frac{q_2(a\Lambda/k_3) - T_s + T_0}{q_2 \frac{a\Lambda}{k_3} + q_2 \frac{0.377a}{k_2} \sqrt{\frac{v_c a / 2}{2K_2}}} \quad (13)$$

(2) 水射流作用条件下单位时间单位面积上流入刀具的热流密度 q_w 。水射流从刀片表面流过发生的热量传递可近似看成外掠平板的对流换热过程, 根

据对热流换热方程和牛顿冷却公式, 单位时间、单位面积水射流带走的热量 q_3 ^[7-8] 为

$$q_3 = 0.664 \frac{\lambda}{l} \left(\frac{v_L l}{\xi} \right)^{1/2} \times \left(\frac{\mu c_p}{\lambda} \right)^{1/3} (T_T - T_{s0}) l m \quad (14)$$

式中, λ 为水的导热系数; ξ 为水运动黏度; v_L 为水流速度; μ 为水动力黏度; c_p 为水比热容; m 为刀片宽; T_{s0} 为水温。

则水射流条件下流入刀具的热流密度 q_w 为

$$q_w = q_1 R_1 + q_2 R_2 - q_3 \quad (15)$$

1.2.2 界面温度 T 的确定

(1) 干切削条件下的界面温度。稳定切削条件下, 刀具接触界面的温度 T 基本保持恒定, 综合前面的分析, 干切削条件下界面平均温度 T_T 为

$$T_T = T_s + \Delta T_F \quad (16)$$

(2) 水射流条件下的界面温度。水射流辅助条件下界面温度 T_w , 由式(17)^[9] 给出, 即

$$T_w = \frac{1}{2} \left[\frac{0.754 R_1 q_1}{k_1} \frac{\operatorname{ecsc} \varphi}{2} \left(\frac{v_s G \operatorname{ecsc} \varphi}{4K_1} \right)^{-1/2} + \frac{0.377 R_2 q_2 a}{k_2} \left(\frac{v_c a / 2}{2K_2} \right)^{-1/2} + \frac{0.664 (v_L l / \xi)^{1/2} (\mu c_p / \lambda)^{1/3} (T_T - T_{s0})}{c_p \rho d_s} \times \left. \frac{\lambda}{l} \frac{l}{v_L} + T_{s0} - T_0 \right] + T_0 \quad (17)$$

水射流的速度与泵压的关系由式(18)^[10] 给出, 即

$$v_L = \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \quad (18)$$

式中, p 为泵压; ρ 为水的密度。

1.3 热应力计算模型

根据广义虎克定律, 刀片内一点所受热应力的计算表达式^[11-12] 为

$$\sigma_x = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} e_x + \frac{E}{1+\nu} e_x - \frac{E\alpha}{1-2\nu} \Delta T$$

$$\sigma_y = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} e_y + \frac{E}{1+\nu} e_y - \frac{E\alpha}{1-2\nu} \Delta T$$

$$\sigma_z = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} e_z + \frac{E}{1+\nu} e_z - \frac{E\alpha}{1-2\nu} \Delta T$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{xy}$$

$$\tau_{xz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{xz}$$

$$\tau_{yz} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{yz}$$

式中, σ_x 、 σ_y 、 σ_z 为刀片内一点在 x 、 y 、 z 方向上的热应力; τ_{xy} 、 τ_{xz} 、 τ_{yz} 为该点在 xy 、 xz 、 yz 方向上的热剪应力; E 为刀片材料的弹性模量; ν 为刀片材料的泊松比; α 为刀片材料的热膨胀系数; ΔT 为该点温差; e_Σ 为体积应变; e_x 、 e_y 、 e_z 为该点体积应变在 x 、 y 、 z 方向上的应变分量; γ_{xy} 、 γ_{xz} 、 γ_{yz} 为该点在 xy 、 xz 、 yz 方向上的剪应变。

体积应变表达式^[13]为

$$e_\Sigma = e_x + e_y + e_z = \frac{1 - 2\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) + 3\alpha\Delta T$$

热应力局部或整体超过材料强度时,材料可能出现断裂等失效现象,而且按照不同的强度理论^[13-15],刀具材料所受的最大拉应力、最大剪应力都会对刀具材料的破坏(断裂、磨损)产生影响。

2 结果分析与讨论

2.1 计算参数

刀片材料为硬质合金 YG-6, 抗拉强度 1 422 MPa, 弹性模量 $E=630$ GPa, 泊松比 $\nu=0.22$, 热膨胀系数 $4.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。其它条件: 室温 T_0 为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 水温 T_{s0} 为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$, 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 $\varphi=36.69^\circ$, 灰岩抗剪强度 $\tau_j=16 \text{ MPa}$; 刀具前角 $\theta=30^\circ$, 刀片长 $l=15 \text{ mm}$ 、宽 $m=6 \text{ mm}$ 、厚 $d=4 \text{ mm}$, 刀片导热系数 $k_3=79.6 \text{ J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K})$; 剪切力 $F_s=426.2 \text{ N}$, 剪切速度 $v_s=0.165 \text{ m/s}$, 前刀面摩擦力 $F_c=148.6 \text{ N}$, 摩擦速度 $v_c=0.114 \text{ m/s}$; 切屑与刀片摩擦长度 $a=2.5 \text{ mm}$, 切削厚度 $e=13 \text{ mm}$, 切削宽度 $b=5 \text{ mm}$ 。

2.2 计算结果

拉应力会对材料断裂和疲劳破坏产生很大影响,根据计算参数求得干切削条件下刀片最大热应力为 $\sigma_{\max 1}=2\ 005.9 \text{ MPa}$ 。此时的热应力已经超过刀具材料的强度,刀具的失效在所难免。

水射流条件下,其它切削条件一定时,刀具最大热拉应力与泵压之间关系为

$$\sigma_{\max 1} = 251.5 \times 10^6 p^{-1/4} + 1\ 004.2 \times 10^6$$

由图2可以看出,一旦水射流加入后刀具最大热拉应力就骤然降低,随着泵压的提高,热拉应力下降较快,当泵压超过 0.13 MPa 时,热拉应力就将低于刀片材料的强度。当泵压提高到 15 MPa 左右后,提高压力对热拉应力的降低效果开始放缓。宏观热应力下降的理论极值点为 $1\ 004.2 \text{ MPa}$ (但压力要求达到无穷大)。

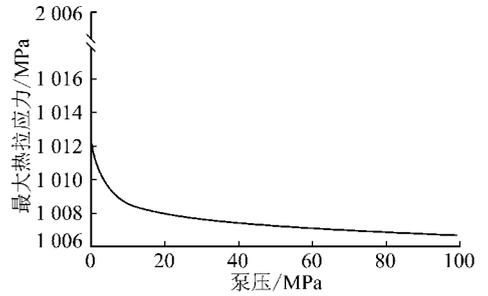


图2 泵压对最大热拉应力的影响

Fig. 2 Effects of pressure on max thermal principal stress

剪应力会对材料磨损产生很大影响,降低材料所受剪应力可以减少材料的磨损,在上述计算条件下得出干切削时刀具最大热剪应力为 642.1 MPa ,而水射流条件下最大热剪应力与水射流压力之间关系为

$$\tau_{\max 2} = 80.27 \times 10^6 p^{-1/4} + 320.5 \times 10^6$$

可以看出,一旦水射流加入后刀具最大热剪应力急剧下降,泵压对最大热剪应力影响趋势如图3所示。热剪应力下降的理论极值点为 320.5 MPa (压力要求达到无穷大)。

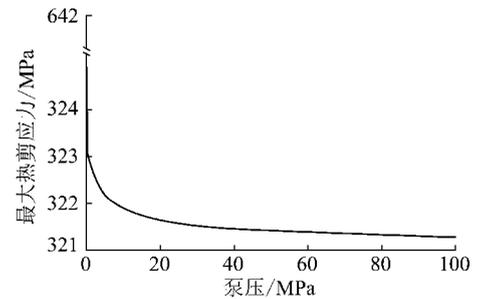


图3 泵压对最大热剪应力的影响

Fig. 3 Effects of pressure on max thermal shear stress

在上述切削参数条件下,根据式(19)^[16]计算得出的刀片切削岩石时单位面积上所受平均机械应力 $R=33.40 \text{ MPa}$ 。

$$R = \frac{\tau_j}{\sin \varphi \cos(\varphi - \alpha + 22.5 + 0.25\alpha)} \quad (19)$$

式中, τ_j 为岩石的抗剪强度。

根据上述的一系列计算结果,可以看出,刀具在岩石切削过程中所受热应力远远超过其受到的机械应力,热应力是影响刀具破坏的主要因素,而大量实验和工程实践所反映出的结果也一定程度上证实了这一论断。可见,选择合适的水射流技术参数,可使刀具所受热应力与机械应力叠加后仍然小于刀具材料强度,避免材料脆性断裂,并使热拉应力、热切应力降低,从而减少刀具的疲劳和磨损,将避免刀具的过早失效并延长其使用寿命。下一步的工作重点应是寻找和采用合适的测试手段对机械应力和热应力进行测量,以对这一问题进行更为深入的研究。

3 结 论

(1) 岩石切削时刀具的热应力与其温度场的变化直接相关,受刀片材料与岩石材料热物性质、刀片尺寸、切削力、切削速度、射流压力等因素影响。

(2) 无论是干切削还是水射流辅助条件下,硬质合金刀具在切削岩石过程中都会产生大量热量致使刀片温度升高,产生热应力,而且大大超过了刀片所受机械应力,是导致刀具破损的主要因素。

(3) 通过模型计算得出的结果表明,在无水射流辅助作用时,刀片热应力将大大超出其材料强度。水射流可以大幅降低刀片的热拉应力和热剪应力,而且这两类热应力均与射流压力 p 四次方根的倒数成正比 ($\sigma_1 \propto p^{-1/4}, \tau_2 \propto p^{-1/4}$),这表明增大泵压即提高水射流速度,是降低刀具热应力的有效手段。

(4) 在工程施工中,合理调控射流压力、切削速度等技术参数可使硬质合金刀片的热应力控制在一定范围内,避免刀具早期失效。

参考文献:

- [1] Ulrik Beste, Staffan Jacobson. A new view of the deterioration and wear of WC/Co cemented carbide rock drill buttons [J]. *Wear*, 2008, 264: 1 129-1 141.
- [2] Gunnars J, Alahelisten A. Thermal stresses in diamond coatings and their influence on coating wear and failure [J]. *Surface and Coatings Technology*, 1996, 80: 303-312.
- [3] Sayman O, Sen F, Celik E, et al. Thermal stress analysis of WC-Co/Cr-Ni multilayer coatings on 316L steel substrate during cooling process [J]. *Materials and Design*, 2009, 30: 770-774.
- [4] Jaeger J C. Moving sources of heat and the temperature at sliding contacts [J]. *Proceedings of the Royal Society of New South Wales*, 1942, 76: 203-224.
- [5] Milton C Shaw. *Metal cutting principles* [M]. Oxford: Thetford Press Limited, 1984.
- [6] Bever M B, Holt D L, Titchener A L. The stored energy of cold work [J]. *Progress in Materials Science*, 1973, 17: 5-177.
- [7] 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.
- [8] Incropera F P, Dewitt D P. *Fundamentals of heat transfer (6th edition)* [M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2006.
- [9] 李晓红, 杨晓峰, 卢义玉, 等. 水射流辅助硬质合金钻头切割岩石过程的刀具温度分析 [J]. *煤炭学报*, 2010, 35(5): 844-849.
Li Xiaohong, Yang Xiaofeng, Lu Yiyu, et al. Temperature analysis of cemented carbide drill cutting rock associated with water jet [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(5): 844-849.
- [10] 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.
- [11] 王润富, 陈国荣. *温度场和温度应力* [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [12] 严宗达, 王洪礼. *热应力* [M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [13] Anderson T L. *Fracture mechanics: fundamentals and applications (3rd Edition)* [M]. Florida: CRC Press, 2004.
- [14] Shukla A. *Dynamics fracture mechanics* [M]. Singapore: World Scientific Press, 2006.
- [15] 王永国, 艾 兴, 李兆前, 等. 梯度功能陶瓷刀具的热应力分析 [J]. *机械工程学报*, 2003, 39(4): 53-55.
Wang Yongguo, Ai Xing, Li Zhaoqian, et al. Thermal stresses analysis of functionally graded ceramic tool [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(4): 53-55.
- [16] Nishimatsu Y. The mechanics of rock cutting [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 1972, 9(2): 261-270.