

锯切力的随机性与锯片磨损

周灿丰¹, 陈庆寿², 李祖光²

(1. 北京石油化工学院 机械工程系, 北京 102600; 2. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083)

摘 要 通过对材料的微观硬度分布不均匀性的数学描述, 建立随机性锯切力模型, 提出了随机性锯切力计算公式, 用花岗岩锯切实验验证了公式的合理性。在此基础上总结了锯切参数选择对锯切力及锯片磨损的影响规律。

关键词 锯切力 蠕动磨削 随机性 岩石锯切

中图分类号 :TD231.1 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-3746(2000)02-0052-04

Randomness of Sawing Forces and Wear of Blade/ZHOU Can-feng (Beijing College of Oil and Chemical Industry, Beijing 102600, China); **CHEN Qing-shou, LI Zu-guang** (China University of Geo-sciences, Beijing 100083, China)

Abstract :Based on mathematical description of nonhomogeneous microstructural distribution of material, stochastic model of sawing force is established, and calculating formula of random sawing force is presented, rationality of the formula is verified by sawing testing in moorstone, and effect of sawing parameter on sawing forces and wear of blade is summarized.

Key words :sawing force; creep-feed grinding; randomness; stone sawing

从材料去除机理的角度而言, 探矿和采矿工程中的钻头钻取岩心、市政和土建工程中的锯切机开凿混凝土以及石材工业中的圆锯片切割荒料等等, 都属于非金属脆性材料的蠕动磨削。此类工程应用的最根本目标, 不是提高加工表面质量, 而是提高切削效率, 所以能显著减小锯切力和锯切功率、提高锯切效率的分段金刚石锯片和金刚石钻头得到了日益广泛的应用。

在岩石锯切领域, 为了提高锯片寿命和锯切效率, 国内外学者对锯片磨损和锯切参数选择等进行了大量的实验研究。但是, 这些研究基本上是定性研究, 即使为数很少的定量研究, 采用的锯切力计算公式也是传统的确定性锯切力计算公式, 这些公式不能很好地反映岩石材料微观硬度不均匀的特点。有必要根据材料特点, 提出新的锯切力计算公式。

1 材料的微观硬度分布不均匀与随机性锯切力模型

1.1 材料微观硬度分布不均匀的数学描述

工件材质不均匀时, 刀具的切削力是不恒定的。如图 1 所示, 金刚石圆锯片属多刃刀具, 在锯切过程中会产生 2 个层次的随机性锯切力: 其一是, 某一磨粒切削到接触弧长上不同硬度质点的单刃锯切力的不确定性; 其二是, 刀具接触弧段在水平进给方向的

总锯切力的不确定性。单刃锯切力可以方便地应用于单刃微观切削和单颗磨粒磨损规律研究, 但测量困难; 总锯切力可以方便地应用于锯片整体磨损和锯切参数选择研究, 而且测量方便。

加工过程的总锯切体积可以看成是一系列几

图 1 岩石锯切样品几何形状与尺寸

何尺寸相等的样品体积之和。这里的样品是由锯片宽度、切深和数值上与平均未变形切屑厚度近似相等的进给量共同决定的弧形几何体。对给定的锯片而言, 宽度 b 是常数, 水平进给 Δf 或切深 a 增加时, 样品体积相应增加。在砂轮的一个转动周期 T_s 内, 切除的工件长度 $l = V_w T_s$ (V_w 为工件给进速度), 被切除的样品数目 $n = V_w T_s / \Delta f$, 切除工件一个样品所需的时间 $\Delta t = T_s / n = \Delta f / V_w$, 从而求得锯切力随机变化的最高频率 $f_{\max} = 1 / \Delta t = V_w / \Delta f$ 。

样品 j 的平均硬度为 μ_{sj} , 其第 i 个微观质点的硬度用 h_i 表示, 微观硬度 h_i 的随机性决定了去除该微观质点磨粒的单刃锯切力的随机性。类似地,

收稿日期: 1999-10-27

作者简介 周灿丰(1970-), 男(汉族), 湖南人, 北京石油化工学院讲师, 探矿工程专业, 博士, 从事机械加工自动化和机电一体化研究, (010) 6924452-274 陈庆寿(1937-), 男(汉族), 福建人, 中国地质大学(北京) 教授, 博士生导师, 探矿工程专业, 从事地质工程和爆破工程研究工作, (010) 82322624 李祖光(1947-), 男(汉族), 湖北人, 中国地质大学(北京) 工程技术学院高级工程师, 从事探矿机械研究工作, (010) 82322624。万方数据

第 j 个样品平均硬度 μ_{sj} 对整个工件整体平均硬度 μ_a 的波动性决定了总锯切力的随机性。利用材料测点微观硬度数据和统计公式,可以算出表征材料分布的统计量 均值 μ_a 和方差 σ^2 。材料的非均匀性使得每个样品因包含的微观测点硬度不同而具有不同的样品硬度值 $\mu_j = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} H_s$ (N_s 表示第 j 个样品内微观硬度测点数)。正是这种样品硬度均值的变化导致了加工过程中锯切力的随机变化。根据中心极限定理,样品硬度均值的分布即 μ_a 的分布是近似正态分布,从而可以估计出表征总锯切力随机性的 2 个参数 样品均值 μ_a 和样品方差 σ^2 。

1.2 随机性锯切力模型

G. Werner 等推导出了通用的磨削力计算公式,并写出了蠕动磨削时的特定表达公式,人们往往将该公式作为岩石锯切力定量计算公式。但该公式的推导是以材料微观硬度分布均匀作前提,对岩石材料而言,只能用于计算平均锯切力,而不能用于计算瞬态锯切力,因为瞬态锯切力是随机变化的。

切削力不随切深线性地增加而是渐减地增加是所有切屑形成过程的共同特性。这条经验规律可以用公式(1)表示:

$$F = K_{s1} b t^n \quad (0 < n < 1) \tag{1}$$

用随机变量 (μ_{sj}/μ_a) 表示样品 j 平均硬度相对于总体平均硬度的随机性;用随机变量 (μ_{si}/μ_a) 表示第 i 个微观质点对样品 j 平均硬度的随机性。利用式(1)和 G. Werner 推导出的有关公式^[1],假定材料去除率保持不变,即 $z = aV_w = \text{Const}$,可以推导出单位锯切宽度法向总锯切力公式(2)和单刃锯切力公式(3)^[2]:

$$F_{nj} = k(\mu_{sj}/\mu_a) C_1^\gamma (z/V_s)^{2\epsilon-1} a^{1-\epsilon} d_s^{1-\epsilon} \tag{2}$$

$$F_{ei} = k_e (h_i/\mu_{sj}) (z/V_s)^{(1-a)n} (ad_s)^{-\frac{1}{2}(1-a)n} \tag{3}$$

式中: z ——表示材料去除率; F_{nj} ——单位锯片宽度法向力; F_{ei} ——单刃锯切力; k, k_e ——比例系数; C_1 ——锯片磨粒密度; V_w ——工件速度; V_s ——锯片速度; a ——切深; d_s ——锯片直径; γ, ϵ ——由锯片、工件等决定的指数, $\epsilon = [(1+n) + \alpha(1-n)]/2, \gamma = \beta(1-n)$; α, β ——锯片刃形公布指数。

公式(2)表明,总锯切力与接触弧长内各微观质点硬度无关,而与样品平均硬度 μ_{sj} 的变化有关,也就是说当切深不变时其随机性只有在工件进给方向才表现出来。

2 岩石锯切实验

公式(2)中 (μ_{sj}/μ_a) 项可以改写为 $(\mu_{sj}/\mu_a) -$

$1 + 1 = 1 + \Gamma(t), \Gamma(t)$ 是一个衡量材料均匀程度的涨落系数,它反映样品硬度均值相对于工件整体硬度均值的随机变化。

根据图 2 中水平分力、垂直分力和法向力、切向力之间的关系,利用法向锯切力公式(2),求得水平锯切力计算公式:

$$F_{jx} = \{\sqrt{1 + s^2}/(\sin\varphi + s\cos\varphi)\} \cos\theta \cdot k(\mu_{sj}/\mu_a) C_1^\gamma (z/V_s)^{2\epsilon-1} d_s^{1-\epsilon} a^{1-\epsilon} \tag{4}$$

其中 $\theta = \text{arctg}(F_{jy}/F_{jx}) = \text{arctg}s, s$ 表示水平锯切力 F_{jx} 与垂直锯切力 F_{jy} 的比值。

对于一个岩石锯切系统,若保持速比 $q = V_s/V_w$ 和材料去除率 $z = aV_w$ 为常数,则可以令

$$k_p = \{\sqrt{1 + s^2}/(\sin\varphi + s\cos\varphi)\} \cos\theta \cdot k C_1^\gamma (z/V_s)^{2\epsilon-1} d_s^{1-\epsilon}$$

从而把方程(4)改写为:

$$F_{jx} = k_p [1 + \Gamma(t)] a^{1-\epsilon} \tag{5}$$

k_p 是由锯片、工件材料、锯片速度和材料去除率、冷却液等共同决定的系数。

如果不考虑式(5)中反映样品微观硬度不均匀的随机系数,则得到确定性锯切力或者平均锯切力计算公式(6):

$$F_x = k_p a^{1-\epsilon} \tag{6}$$

图 3 是岩石锯切及锯切力采集原理示意图。锯切机床主轴功率 11 kW,主轴转速在 300~2000 r/min 的范围内可调,加工台由液压系统控制,进给速度在 0.3~15 m/min 的范围内可调,切深由齿轮传动控制,采用水冷却。金刚石锯片直径 300 mm,宽度 $b = 3$ mm,粒度 30/40 美国目,浓度 32%,采用钴-青铜作为结合剂。

应变式测力仪测量到水平方向(x)和垂直方向(y)锯切力产生的应变,应变信号通过动态电阻应变仪转换、放大后,接入模/数转换电路(A/D 卡),再由计算机进行定时采样。

图 2 岩石锯切受力分析

图 3 岩石锯切实验装置

用 1BAS-2000 型彩色图像分析仪分析出实验用花岗岩的矿物组成是:钾长石 40%~35%,斜长石 30%~35%,石英 25%,黑云母 3%~5%。用 Leitz ORTHOLU×II POL-BK 型维氏硬度机测量该花岗岩的一系列测点的微观硬度,对测试结果进行统计,得到:

$$\mu_{ag} = 576, \sigma_{ag}^2 = 3738.$$

图 4 表示 $V_s = 2000 \text{ r/min}$ 、 $z = 250 \text{ cm}^2/\text{min}$ 时, x 方向平均锯切力 F_x 与切深的实验关系,通过数据分析,对于实验用的花岗岩, $\epsilon = 0.58$, 锯切力与切深满足公式:

$$F_x = 104 a^{0.42} \quad (7)$$

图 4 平均锯切力 F_x 与切深 a 的关系

图 5 表示 $V_s = 2000 \text{ r/min}$ 、 $z = 250 \text{ cm}^2/\text{min}$ 、 $a = 10 \text{ mm}$ 时, x 方向随机性锯切力 F_{jx} 曲线。

比较图 4 和图 5,可以认为对应于某一切深的瞬态锯切力是以该切深时的平均锯切力为中心随机变化,这个结论与推导的理论计算公式是一致的。

3 锯切力随机性对锯片磨损的影响与锯切参数选择

切削力的随机性和非线性普遍存在于各种切削方式之中,岩石材料往往是非均匀性比较严重、硬脆程度较高的难加工材料,所以锯切力的随机性和非线性尤为明显。锯切力的随机性与非线性对锯片磨损有直接影响,通过分析锯切力的变化可以更好地选择锯切参数。

3.1 锯切力的随机性与磨粒磨损统计规律

锯片磨损包含多种类型,而且随工件材料和加工条件的不同而不同。许多学者用扫描电镜 SEM 观察、分析了锯片表面磨损形貌,得出了一些定性结论^[3~5]。事实上,他们的研究没有揭示的一点是,锯片磨粒磨损统计规律与锯切力的随机性之间有密切的关系。

根据表面磨损形貌的不同,磨粒磨损通常分为晶粒完好、表面磨耗、晶粒碎裂和晶粒脱落 4 类,其中表面磨耗和磨粒碎裂占相当大的比例。根据遍历性原理,每一磨粒必然经历完好、磨钝、碎裂和脱落 4 个阶段,而且发展到磨耗和碎裂状态的概率最大。因为单刃锯切力对磨粒磨损类型有重要的、几乎是决定性的影响,所以如果对锯片圆周上磨粒磨损类型进行统计分析,就能对单个磨粒的磨损过程做出估计,反之亦然。换句话说,磨粒磨损类型与单刃锯切力应该有相同或相似的分布规律。

根据中心极限定理,被第 i 个磨粒切削的材料微观质点硬度 h_i 服从正态分布,利用随机变量函数的概率密度计算公式求出单刃锯切力的分布密度表达式表明单刃锯切力呈正态分布^[2]。

A. G. Mamalis 详细测量了金刚石锯片锯切硬质花岗岩的锯切力和研磨效率,统计了各种磨损类型的磨粒数目^[5],结果表明磨粒磨损数目与单刃锯切力的确有相同的分布规律,即二者都呈正态分布。

当碎裂和脱落的磨粒数目之和超过磨粒总数的 $1/3$ 时,通常认为锯片失效。因为磨粒磨损类型与单刃锯切力有相似的分布规律,所以对于某个锯切系统,根据给定的锯切力变化规律,可以估计某一时刻发生某种类型磨损的磨粒数目,从而估计锯片寿命。

3.2 岩石锯切参数选择

对总锯切力公式(2)和单刃锯切力公式(3)求全微分^[2],从而可以看出:速度对总锯切力和单刃锯切力的影响相同,二者均随速度增大而减小进给、切深对总锯切力和单刃锯切力的影响规律恰好相反,总锯切力是切深的增函数,进给的减函数;单刃磨削力是切深的减函数,进给的增函数。进给与切深中的某一因素,不仅因其本身的变化导致磨削力变化,而且该因素变化引起的另一因素的相反变化亦强化了该因素导致的磨削力的变化。例如,增大切深导致总锯切力增大,而且切深增大引起的进给的减小亦导致总锯切力的增大。

进给减小,单刃锯切力减小,此时,磨粒擦光、变钝而导致总锯切力迅速增加,锯片运转不好以致失效。进给增大,虽能降低总锯切力,但是材料硬度不

均匀性引发的随机振动加剧了对加工系统稳定性的影响,这种随机振动在许多脆性材料尤其是岩石、混凝土锯切中普遍存在,岩石锯切中采用很慢的进给速度能把随机振动限制在较低的水平。

切深减小,单刃锯切力增大,磨粒趋向于碎裂而非磨钝;切深增大,单刃锯切力减小,磨粒表面磨平占主导地位,锯切力随磨粒与材料接触面积增大而增大,当锯切力超过基体对磨粒的夹持力时,磨粒脱落。当脱落的磨粒数目与自锐的磨粒数目大致相等或者说在二者之间建立了动态平衡关系时,岩石锯切系统进入稳定工作阶段。大切深能较好地建立脱落数目和自锐数目之间大致的平衡,这正是受控锯切的基本要求,而且大切深能显著提高工效,所以岩石锯切通常采用很大切深。但是,大切深锯切亦有其不可避免的缺点,如较大的总锯切力要求机器有足够的功率和刚度,跑合时间较长且容易产生加工不稳定性。

高速锯切尤其是锯切硬质材料时,为了防止过于剧烈的冲击带来的一系列不良影响,应该适当地降低转速,但是转速也不能过低,否则过大的单刃锯切力造成大量的磨粒碎裂。材料的不均匀性加剧了

冲击载荷的波动性,因此锯片转速不能过高。

综上所述,锯切方式、锯片速度、进给速度和切深等因素中某一因素的加强或削弱并非总是利或弊,而是往往既有积极作用,又有消极影响,这就要求根据具体情况进行权衡。

4 结语

随机性锯切力模型能够正确反映岩石材料微观硬度分布不均匀的特征,该模型可以用于锯片磨粒磨损研究和岩石锯切参数选择。

参考文献:

- [1] G. Werner. Influence of Work Material on Grinding Forces[J]. Annals of the CIRP, 1978, 27(1): 243-248.
- [2] 周灿丰. 岩石锯切系统随机非线性动力学研究[D]. 北京: 中国地质大学, 1998. 8-12.
- [3] W. Ertingshausen. Wear Processes in Sawing Hard Stone[J]. Industrial Diamond Review, 1985, (5): 254-258.
- [4] A. Buttner. Diamond Tools and Stone[J]. Industrial Diamond Review, 1974, (3): 89-93.
- [5] A. G. Mamalis, R. Schulze, K. K. Tonshoff. The Slotting of Blocks of Hard Rock with a Diamond Segmented Circular Sawblade[J]. Industrial Diamond Review, 1979, (10): 356-365.