



Research
Tunnel Engineering—Article

采矿过程中磨料水射流性能通用预测方法

Eugene Averin

000 Skuratovsky Experimental Plant, Tula 300911, Russia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 22 March 2017

Revised 8 September 2017

Accepted 5 December 2017

Available online 8 December 2017

关键词

磨料水射流

能量守恒法

切割深度

断裂力学

阈值速度

采矿

摘要

极端采矿条件下的硬岩破碎可采用磨料水射流(AWJ)技术,这种技术能够在不产生粉尘的条件下有效切割难以机械加工的材料。这种技术还可用于爆破、本安和消防安全。就断裂力学而言,每一种可被破坏的材料均可被视为韧性或脆性材料。因此,需要找到一种无论使用AWJ对何种材料进行切割都能精确预测其效率的方法。该问题可通过能量守恒法加以解决,它显示了材料去除量与AWJ动能之间的比例。本文介绍了基于能量守恒法的预测方法,并提出如何达到最有效破坏水平的建议,以及关于涉及磨料流量与水流量、靶距和磨料颗粒粒径关系值的合理范围的建议。本文还提供了基于断裂力学的临时结构法确定材料破坏起始阈值条件的参数。

© 2017 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of the Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

采矿机械的效率急待提高,其应用领域急需拓展。同时还需要特别关注能提高技术、经济性能并提供安全作业条件的采矿设备的研制。水射流技术是满足这些需求的最有前途的解决方案之一。水射流技术利用高速水流的能量在被破坏材料内产生大于其强度的应力,从而导致裂纹扩展和侵蚀[1,2]。水射流技术目前被广泛应用于高科技行业[3-5],其优点包括机械加工用途广泛、切割形状多样、无热变形和切割力小。这种技术还为切割陶瓷、大理石、层叠复合材料等难以机械加工的材料提供了可能。在采矿领域,水射流技术可使掘进速度提高几倍,从而提高生产率,并且能在不产生粉尘的条件下

破碎硬岩,具有爆破安全、本安、消防安全等特点[6,7]。由于这些原因,水射流技术在极端采矿条件作业以及破碎硬岩方面极其有用。

在纯水射流中加入一定数量的磨料颗粒可大大提高水射流技术的有效性[6,8-11]。在破碎岩石方面,磨料水射流(AWJ)最常见的用途是加工天然石料,特别是大理石和花岗岩[12,13]。在地下采矿中运用AWJ技术的方式也得到了重视[6,14-16]。为了提高采矿工作的效率和安全性,以下作业采用AWJ工艺是合理的:

- 拆卸工程(即切割金属结构、铠装电缆、钢丝绳输送带等);
- 安装紧固件时,沿工作面准备巷道轮廓线进行作业;

* Corresponding author.

E-mail address: evgeniy.averin.90@mail.ru

- 修复开挖区及恢复横断面；
- 通过排料槽削弱硬岩，用机械工具进一步对其进行破碎；
- 切割岩石和固体材料，包括（地质断层区、破碎岩体区等）极端条件下的高强度金属；
- 钻排气孔，以防止煤矿发生瓦斯突出。

从上述采矿条件清单可以看出，需要有效切割的不仅有岩石，还包括金属、混凝土等具有不同物理和力学性能的固体材料。

2. 磨料水射流基本原理

有两种方式可将磨料与水混合形成AWJ——直接泵送系统与卷吸系统。在直接泵送系统中，磨料与水预先混合形成浆液，然后通过喷嘴泵送并喷射出去；在卷吸系统中，首先利用孔口形成高压水射流，然后磨料被卷入水射流中与水混合形成AWJ。在采矿条件下，卷吸系统更为方便，因为其成本较低，结构更加紧凑，且对被切割的具体金属数量要求低[17]。

更确切地说，卷吸系统中的AWJ形成机理如下：高压泵将水压缩至高压（140~420 MPa）或特高压（420 MPa以上），随后供水系统将水输送至刀头，在刀头处形成水射流。水射流进入混合仓，同时用专用输送系统将磨料从容器送入混合仓内。在混合仓内，水射流与磨料颗粒混合形成的浆液进入混合仓的收敛段，最后进入瞄准器形成AWJ。

在与该技术相关的大部分计算中，可能会忽略水的影响，因为水的主要功能是使AWJ中颗粒加速运动，然后将其带离被破碎材料表面。AWJ对材料的破碎主要通过射流中磨料颗粒的冲击来实现[6]。因此，这一过程可描述为磨料颗粒与材料表面的相互作用。这种相互作用取决于被破碎材料的类型，即被破碎材料是韧性材料还是脆性材料。此划分得益于基于断裂力学中材料韧性的现代概念的诞生。根据这一概念，破碎被视为侵蚀的一种形式，由同时发生的变形组成，包括弹性变形、受约束变形和开裂等。

目前可采用断裂力学的临时结构法在原子层面确定特定荷载和环境条件下材料的类型[18]。脆性断裂与化学键的突然断裂有关，而韧性断裂是由于出现了原子面沿滑移面的移位。因此，具有各向同性特征的大部分材料具有原子随机排列的特点，表现出脆性断裂的特性。

相反，晶体结构的固体多表现出韧性断裂的特性，这种结构难以形成节理，因为弹性变形消除了局部应力。因此，正常条件下的硬岩始终为脆性材料，而大部分金属为韧性材料。

3. 磨料水射流性能预测方法

虽然硬岩石的破碎被认为是AWJ在采矿中的主要应用，但如上所述，该技术也可用于切割非岩石材料。因此，需要找到一种无论用AWJ切割何种材料都能精确预测其效率的方法。可采用能量守恒模型解决这个问题。这种方法基于以下假设：材料去除量与AWJ动能之间存在比例关系。由此已发展出数种测定各种材料切割深度的半经验方法。

第一种此类方法由Blickwedel等[19]提出，考虑了横移速度的指数特征及其对切割深度 d 的影响：

$$d = C_s \frac{P - P_c}{u^f} \quad (1)$$

式中， C_s 为经验参数，取决于材料特性； f 为经验参数，对切缝内射流的能量损失进行描述； u 为AWJ的横移速度； P_c 为引发破碎所需的最小水压力； P 为当前水压力。

参数 f 由下式确定：

$$f = 0.86 + \frac{2.09}{u} \quad (2)$$

后来Chen等[20]对这一方法进行进一步延伸，用来计算脆性材料——铝陶瓷的切割深度。该方法的主要特点是引入了磨料流量 m_a ：

$$d = 0.0101 \frac{m_a P}{u^{0.78}} \quad (3)$$

随后这一方法得到进一步发展，增加了参数数量，用于计算各种材料的切割深度。如Wang[21]在该方法中加入射流直径 d_j 和水密度 ρ_w ，用于预测聚合物基体复合材料（韧性材料）的切割效率。

$$d = 0.6267 \frac{m_a^{0.407} P}{d_j u^{0.637} \rho_w} \quad (4)$$

虽然式(3)和式(4)中的横移速度指数不同于式(2)，但对于特定类型的被破碎材料，前者更加可靠，可视为常量[6]。因此对于脆性材料，指数约为0.78，而对于韧性材料，指数约为0.64。

两个公式中分数之前的常量为特定材料的切削性系数。可利用参考文献[4]给出的以下公式对该系数进行

初步评价:

$$C_s = 3.626 \times 10^{-8} \exp(-2.448 \times 10^{-8} \sigma_c) \quad (5)$$

式中, σ_c 为单轴抗压强度。

虽然式(5)很有价值,但利用回归法测定特定材料的切削性系数更为可靠,这就需要开展实验研究。

目前已知的是,有效切割角度取决于材料类型[22-24]。切割角度 φ 为 90° 时,对脆性材料的破碎最有效,而对于韧性材料,最佳切割角度约为 20° 。为了考虑水射流冲击角度对切割效率的影响,确立了一个新系数 k_φ ,其值为 $0 \sim 1$ 。该系数由根据一般实验数据[22]得到的逼近函数确定[6,22-24]。

对于脆性材料:

$$k_\varphi = 0.99 \exp\left(-0.5 \left| \frac{\varphi - 90}{28.4} \right|^{1.77}\right) \quad (6)$$

对于韧性材料:

$$k_\varphi = 8437 \sin\left(\frac{\varphi}{68049}\right) \exp\left(\frac{-\varphi}{20.5}\right) \quad (7)$$

式(6)适用于 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的角度;式(7)适用于 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的角度。

需要探讨的下一个重点是磨料流量。对该参数的研究[25-28]表明:磨料流量增加使切割效率提高,当达到过剩水平时切割效率开始降低。经证实,最优流量与材料无关。事实上,最优流量取决于水射流能量与磨料颗粒之间的动量交换效率;换言之,最优流量可表示为磨料流量 m_a 与水流量 m_w 的关系式[29]。这种优化意味着在给定条件下,切割工艺可用最少的能量实现最深的切割[6]。如参考文献[25]所示,最优流量取值范围为 $m_a/m_w = 0.1 \sim 0.35$ 。切割效率函数取决于磨料流量与水流量的关系,表现为平缓曲线(即它不会从函数两侧急剧增加至转折点),且在上述给定范围内分散不广泛。因此,将 m_a/m_w 保持在所述范围内的水平可实现至少90%的最高切割效率。考虑到水射流的动能被有效传递至磨料颗粒上,AWJ流刚好离开工具时的速度为刚好进入工具时的速度的二分之一[25]。因此,水射流动能传递至磨料颗粒的理论最高效率为25%。如果 m_a/m_w 未维持在给定范围内,则磨料的实际动能小于AWJ系统中水射流总动能的10%[30]。

水射流速度 u_w 可按式计算:

$$u_w = \mu \sqrt{\frac{2P}{\rho_w}} \quad (8)$$

式中, μ 为水流与孔壁间摩擦产生的速度损失系数。

根据上述分析可得到该方法的以下模式,这一模式基于能量守恒法,可在实践中加以运用:

$$d = \frac{\mu^2 m_a P}{4 \rho_w d_j u^2} C_s k_\varphi \quad (9)$$

4. 结果与探讨

式(9)未考虑磨料类型、磨料颗粒尺寸和靶距等重要参数[31]。然而,可通过建议来将这些参数引入该方法。采矿条件下,磨料不可能重复利用,因此磨料费用宜尽可能低。最合理的磨料为石英砂,该建议得到参考文献[32]所述研究的证实,该研究对参数各异的52种磨料(费用、有效性、颗粒韧性等)进行了分析。与石榴子石、贵橄榄石或金属球不同的是,石英砂作为磨料使用时,无法把被加工材料切割成精确的轮廓,但对于材料破碎仍十分有效。磨料颗粒的合理尺寸为 $0.1 \sim 0.25 \text{ mm}$ [6,33]。

为了实现最有效的破碎,建议采用 $4 \sim 6 \text{ mm}$ 的靶距[6]。靶距过小,含磨料和被破碎材料颗粒的水可能溅射到喷嘴口,甚至堵塞喷嘴口,阻碍有效切割;靶距过大,AWJ发生耗散,同时其速度由于磨料颗粒与环境的相互作用(即与矿井空气摩擦造成的能量损耗)而降低。

值得注意的是,式(1)包含引发破碎所需的最小水压参数。虽然该方法的其他模式[包括式(9)]未包含阈值参数,但显然,引发破碎需要满足特定条件。目前已知[34]的是,无法根据经典断裂力学预测动态断裂(用AWJ破碎岩石明显是动态过程)。大量实验结果[35,36]揭示出与传统方法之间的矛盾之处(即临界应力或临界应力强度系数概念),这种矛盾只能解释为静态方法不适用于动态问题[37]。各种尺度和水平的断裂均为微裂纹增长、扩散和接合等复杂的动力学过程的综合结果[35,36],因此,不能将其视为瞬态事件。解决非线性动态断裂问题时可考虑这些微观尺度过程,因此可以通过使用基于孕育时间 τ 的断裂标准来解决动态断裂的非线性问题,同时保持在线性公式的框架中。该标准的提出最初是为了预测动态条件下的裂纹萌生,如参考文献[38]所示。可利用该标准成功预测脆性固体材料中的起始断裂[39,40]。孕育时间指从介质制备至断裂或相变的持续时间,为材料常数[41]。相对简单的孕育时间测量方法是将其视为释放远离断裂界面处的拉应力所需的时间[37]。

表1 各种材料切割深度的实验值与理论值的对比

Material (type)	σ_c (MPa)	P (MPa)	d_j (mm)	U (mm·s ⁻¹)	m_a (kg·s ⁻¹)	d_{exp} (mm)	d_{th} (mm)	R^2
Marble (brittle)	27.2	50–150	3.5–7.5	0.7–7.0	5–30	6–410	6–405	0.93
Limestone (brittle)	90.1	50–150	3.5–7.5	0.7–7.0	5–30	2–85 ^a	2–86	0.98
Granite (brittle)	115.5	50–150	3.5–7.5	0.7–7.0	5–30	1.2–52 ^a	1.4–50	0.94
Aluminum (ductile)	150.0	175	0.6	0.3–1.7	48–96	40–200	48–210	0.78

d_{exp} : 切割深度实验值; d_{th} : 切割深度理论值。

^a 如果高横移速度和低水压同时发生, 则不发生破碎。

利用该标准可得到引发被破碎材料中裂纹生长所需的颗粒阈值速度。对于韧性材料[41], 阈值速度 V_c 可按下式估算:

$$V_c = 335.5 \left(\frac{R}{\tau} \right)^5 \frac{\pi \rho (1 - \nu^2)}{E} \quad (10)$$

式中, R 为磨料颗粒中半径; ρ 为颗粒密度; ν 为被破碎材料泊松比; E 为被破碎材料的杨氏模量。

对于脆性材料[42], 阈值速度可按下式估算:

$$V_c = 0.63 \sqrt[9]{\frac{J_c^5 E^2}{\sigma_c^5 \tau^5 (1 - \nu^2)^2 \rho^2}} \quad (11)$$

式中, J_c 为 J 积分的临界值[43,44]。

为计算水射流速度(如果满足磨料流量与水流量最优关系条件), 根据材料种类, 从式(10)或式(11)得到的阈值速度估算值乘以2后, 可用式(8)得到引发破碎所需的临界水压值。

5. 结论

本文介绍了基于能量守恒法对用AWJ技术切割韧性或脆性材料的切割深度的预测方法。用代表性方法得到的理论值与实验值的对比见表1。为便于计算, 水密度 ρ_w 取1000 kg·m⁻³; 水流与孔壁间摩擦造成的速度损失系数 μ 为0.75; 脆性材料切割角度为90°; 塑性材料切割角度为20°。

虽然本方法存在对磨料流量与水流量关系、靶距、磨料颗粒尺寸和磨料种类的限制, 但利用这些限制可实现最有效的破碎。因此, 宜将这些限制视为不影响本方法使用且可提供辅助信息以提高AWJ效能的建议。本文同时还探讨了确立材料破碎起始阈值条件的参数。

致谢

我谨向我的导师Alexander Zhabin教授表示衷心感

谢, 感谢Alexander Zhabin教授给予我开展研究的机会、悉心教导、谆谆教诲以及大力支持, 更重要的是, 感谢我的导师在百忙中抽出时间不厌其烦地对我的论文进行指导与修改。

References

- [1] Huang L, Folkes J, Kinnell P, Shipway PH. Mechanisms of damage initiation in a titanium alloy subjected to water droplet impact during ultra-high pressure plain waterjet erosion. *J Mater Process Technol* 2012;212(9):1906–15.
- [2] Kong MC, Axinte D, Voice W. Aspects of material removal mechanism in plain waterjet milling on gamma titanium aluminide. *J Mater Process Technol* 2010;210(3):573–84.
- [3] Folkes J. Waterjet—An innovative tool for manufacturing. *J Mater Process Technol* 2009;209(20):6181–9.
- [4] Wang J. Abrasive waterjet machining of engineering materials. Zurich: Trans Tech Publications, Ltd.; 2003.
- [5] Albert M. The promise of waterjet technology for micromachining. *Mod Mach Shop* 2013;85(10):76–81.
- [6] Brenner VA, Zhabin AB, Pushkarev AE, Shhegolevskii MM. [Abrasive waterjet cutting of rocks]. Moscow: Mining Book; 2003. Russian.
- [7] Merzlyakov VG, Baftalovsky VE, Baydinov VN. On using hydraulic technology for mechanization of mining operations. *Min Equip Electromech* 2010;(6):2–6. Russian.
- [8] Merzlyakov VG, Baftalovsky VE. [Development and creation of abrasive waterjet tools for cutting hard materials and estimation of rational parameters of the process]. *Min Equip Electromech* 2008;(4):27–31. Russian.
- [9] Engin IC. A correlation for predicting the abrasive water jet cutting depth for natural stones. *S Afr J Sci* 2012;108(9–10):Art.#692.
- [10] Hashish M, Steele DE, Bothell DH. Machining with super-pressure (690 MPa) waterjets. *Int J Mach Tool Manuf* 1997;37(4):465–79.
- [11] Susuzlu T, Hoogstrate AM, Karpuschewski B. Initial research on the ultra-high pressure waterjet up to 700 MPa. *J Mater Process Technol* 2004;149(1–3):30–6.
- [12] Aydin G, Karakurt I, Aydin K. Prediction of the cut depth of granitic rocks machined by abrasive waterjet (AWJ). *Rock Mech Rock Eng* 2013;46(5):1223–35.
- [13] Karakurt I, Aydin G, Aydin K. An experimental study on the depth of cut of granite in abrasive waterjet cutting. *Mater Manuf Process* 2012;27(5):538–44.
- [14] Sitarama Chakravarthy P, Ramesh Babu N. A new approach for selection of optimal process parameters in abrasive water jet cutting. *Mater Manuf Process* 1999;14(4):581–600.
- [15] Kim JG, Song JJ, Han SS, Lee CI. Slotting of concrete and rock using an abrasive suspension waterjet system. *KSCE J Civ Eng* 2012;16(4):571–8.
- [16] Lu Y, Tang J, Ge Z, Xia B, Liu Y. Hard rock drilling technique with abrasive water jet assistance. *Int J Rock Mech Min Sci* 2013;60:47–56.
- [17] Hashish M. The waterjet as a tool. In: Proceedings of the 14th International Conference on Jetting Technology; 1998 Sep 21–23; Brugge, Belgium. London: Professional Engineering Publishing; 1998. p. 1–14.
- [18] Evstifeev AD, Gruzdkov AA, Petrov YV. Dependence of the type of fracture on temperature and strain rate. *Tech Phys* 2013;58(7):989–93.
- [19] Blickwedel H, Guo NS, Haferkamp H, Louis H. Prediction of abrasive jet cutting performance and quality. In: Saunders D, editor *Jet cutting technology: Proceedings of the 10th international symposium*; 1990 Oct 31–Nov 2; Amsterdam, the Netherlands. London: Elsevier Applied Science; 1990. p. 163–79.
- [20] Chen L, Siores E, Wong WCK. Kerf characteristics in abrasive waterjet cutting of ceramic materials. *Int J Mach Tool Manuf* 1996;36(11):1201–6.
- [21] Wang J. Abrasive waterjet machining of polymer matrix composites—Cutting performance, erosive process and predictive models. *Int J Adv Manuf Technol* 1999;15(10):757–68.

- [22] Ives LK, Ruff AW. Transmission and scanning electron microscopy studies of deformation at erosion impact sites. *Wear* 1978;46(1):149–62.
- [23] Hockey BJ, Wiederhorn SM, Johnson H. Erosion of brittle materials by solid particle impact. In: Bradt RC, Hasselman DPH, Lange FF, editors *Fracture mechanics of ceramics, volume 3: Flaws and testing*. New York: Plenum Press; 1978. p. 379–402.
- [24] Sheldon GL, Finnie I. On the ductile behavior of nominally brittle materials during erosive cutting. *J Eng Ind* 1966;88(4):387–92.
- [25] Zhabin AB, Averin EA. Improvement of the method for the cut depth calculation when cutting by hydroabrasive instrument. *Min Equip Electromech* 2014;(11):24–9. Russian.
- [26] Yazici S. Abrasive jet cutting and drilling of rock [dissertation]. Rolla: University of Missouri; 1989.
- [27] Faber K, Oweinah H. Influence of process parameters on blasting performance with the abrasive jet. In: Saunders D, editor *Jet cutting technology: Proceedings of the 10th international symposium; 1990 Oct 31–Nov 2; Amsterdam, the Netherlands*. London: Elsevier Applied Science; 1990. p. 365–82.
- [28] Chalmers EJ. Effect of parameter selection on abrasive waterjet performance. In: Labus TJ, editor *Proceedings of the 6th American Water Jet Conference; 1991 Aug 24–27; Houston, TX, USA*. St. Louis: Water Jet Technology Association; 1991. p. 345–54.
- [29] Laurinat A, Louis H, Meier-Wiechert GA. Model for milling with abrasive water jets. In: Hashish M, editor *Proceedings of the 7th American Water Jet Conference; 1993 Aug 28–31; Seattle, WA, USA*. St. Louis: Water Jet Technology Association; 1993. p. 119–39.
- [30] Hashish M. Pressure effects in abrasive-waterjet (AWJ) machining. *J Eng Mater Technol* 1989;111(3):221–8.
- [31] Zhabin AB, Averin EA. Systematization of parameter of rocks erosion destruction with abrasive waterjet. *Min Equip Electromech* 2015;(4):41–4. Russian.
- [32] Hessling M. Recent examination relating to the effects of the abrasive material, operating parameters and rock properties on the depth of cut obtainable with abrasive high presser water jets when cutting rock. In: Wood PA, editor *Symposium proceedings: 9th International Symposium on Jet Cutting Technology; 1988 Oct 4–6; Sendai, Japan*. Cranfield: BHR Group; 1988. p. 357–76.
- [33] Hashish M. Aspects of abrasive-waterjet performance optimization. In: *Proceedings of the 8th International Symposium on Jet Cutting Technology; 1986 Sep 9–11; Durham, UK*. 1986. p. 297–308.
- [34] Homma H, Shockey DA, Murayama Y. Response of cracks in structural materials to short pulse loads. *J Mech Phys Solids* 1983;31(3):261–79.
- [35] Ravi-Chandar K, Knauss WG. An experimental investigation into dynamic fracture: I. Crack initiation and arrest. *Int J Fract* 1984;25(4):247–62.
- [36] Ravi-Chandar K, Knauss WG. An experimental investigation into dynamic fracture: III. On steady-state crack propagation and crack branching. *Int J Fract* 1984;26(2):141–54.
- [37] Kazarinov NA, Bratov VA, Petrov YV, Fedorovsky GD. Evaluation of fracture incubation time from quasistatic tensile strength experiment. *Mater Phys Mech* 2014;19:16–24.
- [38] Petrov YV, Morozov NF. On the modeling of fracture of brittle solids. *J Appl Mech* 1994;61(3):710–2.
- [39] Petrov YV. On the incubation stage of fracture and structural transformations in continuous media under pulse energy injection. *Mech Solids* 2007;42(5):692–9.
- [40] Bratov V. Incubation time fracture criterion for FEM simulations. *Acta Mech Sin* 2011;27(4):541–9.
- [41] Gorbushin NA, Volkov GA, Petrov YV. On the effect of the geometrical shape of a particle on threshold energy in erosion damage. *Tech Phys* 2013;58(3):388–92.
- [42] Zhabin AB, Averin EA. Elementary method for calculation of hard rocks erosion caused by abrasive waterjets. *Min Equip Electromech* 2015;(5):44–8. Russian.
- [43] Cherepanov GP. Crack propagation in continuous media. *J Appl Math Mech* 1967;31(3):503–12.
- [44] Rice JR. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. *J Appl Mech* 1968;35(2):379–86.