

水力冲孔防突措施的破煤理论分析

刘明举¹, 任培良^{1,2}, 刘彦伟¹, 孟磊^{1,2}

(1. 河南理工大学 瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室, 河南 焦作 454003; 2. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454003)

摘要: 为了确定不同硬度的煤在高压水射流破煤时所需的破煤压力, 以淮南矿业集团潘三矿和谢桥矿为试验点, 通过理论计算把实际用的多喷嘴转化为计算用的当量喷嘴, 通过当量直径和流量系数计算出水射流的压力, 再扣除管路系统的压力损失就能得出高压水射流的出口压力. 再结合矿井的实际条件可知实验煤层的坚固性系数, 通过拟合的煤层抗压强度与煤的坚固性系数关系 $\sigma_c = 10f$ 就得出煤的临界抗压强度. 从而得出水力冲孔高压水射流所需的破煤压力, 理论分析并结合实际考察得出合理的破煤压力取 8~15 MPa 比较合理.

关键词: 水力冲孔; 破煤压力; 高压水射流

中图分类号: TD 713 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-9787(2009)02-0142-04

Breaking coal theoretical analysis of outburst prevention by hydraulic flushing

LIU Ming-ju¹, REN Pei-liang^{1,2}, LIU Yan-wei¹, MENG Lei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: In order to determine breaking-coal pressure of different hardness coal by high pressure water jet, nozzles in the real application are transformed into equivalent nozzle through theoretical calculation. Pressure of water jet are calculated by equivalent diameter and flow coefficient, and outlet pressure of high pressure water jet is obtained by deducting pressure loss of pipeline system. The critical compressive strength by $\sigma_c = 10f$ are gotten with the fitting of coal seam compressive strength and the strength coefficient of coal by combining with actual condition of experimental mine. By theoretical analysis and practical investigation, the reasonable high pressure water jet of actual broken coal is 8~18MPa.

Key words: hydraulic flushing; breaking-coal pressure; high pressure water jet

0 引言

水力冲孔防突措施是在进行石门揭煤或采掘工作之前, 使用高压水射流, 在突出危险煤层中, 冲出若干直径较大的孔洞, 冲孔过程中排出了大量瓦斯和一定数量的煤炭, 因此在煤体中形成一定的卸压、排放瓦斯区域, 在这个区域内可预防突出的发生^[1-5]. 水力冲孔的过程是高压射流破碎煤体、释放大瓦斯、改变改善煤体应力状态的过程. 煤体的破坏首先是高能量的高压射流以高速水滴的形式撞击煤体, 在不大的面积上集中施以大量的能量, 在水射流脉动的动压力和总冲击力的作用下引起煤

收稿日期: 2009-01-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2005CB221501); 国家十一五科技支撑计划项目(2006BAK03B01); 教育部“瓦斯预测与治理”创新团队发展计划项目(IRT0618).

作者简介: 刘明举(1964-), 男, 河南桐柏人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事煤岩动力灾害和瓦斯灾害防治方面的教学与研究工作.

E-mail: mingju@hpu.edu.cn

体受冲击点脉动挤压变形,产生脉动的、向周围煤体传播的压缩应力波,剪应力波和张应力波及这些应力遇到煤体时产生的反射应力波,形成复杂的动态应力场^[6-7]。对于近于脆性的煤体来说,剪应力对煤体破碎作用更加明显。在应力超过煤体强度时,产生裂缝,煤体开始破碎,高速水射流在冲击煤体表面的同时,水流冲进裂缝并沿裂缝渗入,在裂缝内传递由水射流压力转变而来的静压力,在裂缝面上形成作用力很大的水楔,进一步扩张和延伸裂缝,最终导致煤体裂成碎块。水力冲孔破煤理论的计算不仅能为现场设备选型提供指导,而且可以计算出不同硬度的煤破煤所需的临界压力。

1 喷嘴当量直径的计算

当流量一定时,喷嘴直径很小的变化反映到泵压力上则有明显的变化,这从式(3)中可以看出,压力与喷嘴直径的4次方成反比关系,即喷嘴直径增大1倍,则压力要下降15倍。

式(2)~(3)计算时仅适用于单喷嘴设计,而实际在水力冲孔时却经常使用多喷嘴。因而在计算时要将多喷嘴化成当量喷嘴直径进行计算,当量喷嘴直径表示为^[8-9]

$$d_e = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + \dots + d_n^2}, \quad (1)$$

式中, d_e 为喷嘴的当量直径,mm; d_n 为第 n 个喷嘴的直径,mm。

在水力冲孔期间常用的喷嘴型号有 $2\phi 3\text{mm}$, $3\phi 2\text{mm}$, $1\phi 1.8\text{mm} + 2\phi 3.0\text{mm}$ 和 $1\phi 1.8\text{mm} + 2\phi 2.8\text{mm}$,这些喷嘴以及其它型号喷嘴的当量直径和相应的面积计算见表1。

表1 喷嘴当量直径与相应的面积

Tab. 1 Equivalent diameter of nozzle with the corresponding area

喷嘴型号	d_1/mm	d_2/mm	d_3/mm	d_e/mm	面积/ mm^2
$2\phi 2$	2	2	0	2.83	6.28
$2\phi 2.5$	2.5	2.5	0	3.54	9.81
$2\phi 3$	3	3	0	4.24	14.13
$2\phi 4$	4	4	0	5.66	25.12
$3\phi 2$	2	2	2	3.46	9.42
$3\phi 4$	4	4	4	6.93	37.68
$1\phi 1.8 + 2\phi 3.0$	1.8	3	3	4.61	16.67
$1\phi 1.8 + 2\phi 2.8$	1.8	2.8	2.8	4.35	14.85

2 管路压力损失的计算

水力冲孔系统胶管长度通常为几十米至一百多米,如此长距离的输送下其压力损失很大。通常,软管允许流速不超过 6 m/s ,也就是说通径 10 mm 的软管流量不应超过 28 L/min 。实际使用中,由于大直径管承压较低,特别是高压下,流速远超过此值,因而软管压力损失是不容忽视的。例如,流量为 70 L/min 时,选用 $\phi 8\text{ mm}$ 管压力损失为 0.51 MPa/m ,如选直径为 5 mm 的软管则压力损失高达 4.71 MPa/m 。

压力损失可用下述公式计算:^[10]

$$\Delta p = \frac{59.7q^2}{D^5 \text{Re}^{0.25}}, \quad (2)$$

式中, q 为体积流量, L/min ; D 为软管内径,mm; Re 为雷诺数,对水取 $11\ 165q/D$ 。

水力冲孔期间使用的高压胶管内径有 32 mm , 25 mm 和 16 mm ,其压力损失计算见表2。

表2 管路压力损失与内径的关系

Tab. 2 Relations between pipe pressure loss and the diameter

内径 D/mm	体积流量 $q/(\text{L/min})$	系数	雷诺数 Re	压力损失 $\Delta p/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$
32	150	59.7	52 336	0.003
25	150	59.7	66 990	0.009
16	150	59.7	104 672	0.071
8	70	59.7	97 694	0.505
5	70	59.7	156 310	4.708

从表2可以看出,当体积流量一定时,压力的损失随着软管内径的减小而增大,并且这种变化幅度是相当大的,当流量为 70 L/min ,内径为 8 mm 时,压力损失为 0.51 MPa/m ,而当内径减小到 5 mm 时,压力损失已达 4.71 MPa/m ,因此,在水力冲孔时,由于流量较大,采用内径为 25 mm 的软管还是比较合理的,其压力损失为 0.01 MPa/m ,如果按实际水力冲孔的距离取 100 m ,那么 100 m 长内径为 25 mm 的管路损失就是 1 MPa 。实际水力冲孔时,由于接头处漏水较难控制和管路变径和联接接头处拐弯较大,实际损失压力要大于计算的损失压力。

3 水射流压力的计算

水力冲孔过程中,泵不可能把压力调到额定压力,因此其流量也不可能是额定流量,另外当泵的压力一定时,由于管路和接头处漏水的损失,在喷头处的压力并不是泵压,若泵压力和流量一定,则随着喷嘴直径的减小,在喷嘴处建立的压力就相应增大。

根据式 $q_i = 2.1d^2\sqrt{p}$ 及式 $q = \mu q_i$ 可得

$$P = 0.227 \frac{\varepsilon^2}{M^2 d^4}, \quad (3)$$

式中, P 为对流压力, MPa; d 为喷嘴孔出口截面直径(简称喷嘴直径), mm; q 为射流体积流量, L/min; μ 为喷嘴流量系数; p 为射流压力, MPa。

由于泵的流量不是额定流量,水力冲孔期间现场测试用 SGS 双功能高压水表测定其流量,流量在 150 L/min 左右,喷嘴流量系数 μ

取 0.95^[8], 通过式(3)计算出在不同的喷嘴型号下所建立的冲孔水压,再减去如表 2 压力损失就得到如表 3 的射流压力。

由表 3 可知,随着喷嘴直径的增大,由其所建立起来的射流压力随之减小,喷嘴当量直径的微小变化,就使射流压力出现较大的改变,如喷嘴直径为 2.83 mm 时,其建立的压力高达 87.3 MPa,而当其当量直径变成 3.54 mm 时,其建立起来的压力迅速减小至 35.17 MPa,喷嘴的当量直径只减小了 0.71 mm,还不到 1 mm,压力却减小了 52.13 MPa,因此,若想提高射流压力,在泵压和流量不变的情况下,只需减小喷嘴直径就可满足要求,并且这种变化是显著的。

4 水力冲孔破煤所需的射流压力

水力冲孔时作用于煤面上的射流动压,使射流冲击区中的煤内部形成内应力。当这种内应力的最大剪应力超过煤的极限抗剪强度时,煤就受剪破坏。因此,水力冲孔时,若要使水射流破煤,只需射流压力大于煤体极限抗压强度则可。而煤的抗压强度与煤的坚固性系数 f 有一定的关系^[11]:

$$\sigma_c = 10f, \quad (4)$$

式中, σ_c 为煤的抗压强度, MPa; f 为煤的坚固性系数。

根据淮南谢桥矿、潘一矿、潘二矿和潘三矿煤体坚固性系数的测定,这几个矿的 f 值基本上都在 0.5 左右,由式(4)可知,这几个矿煤的抗压强度在 5 MPa 左右,由表(3)可知,只有 3φ4mm 的喷头建立的压力为 2.45 MPa,其它喷头的建立起的压力均大于煤层的抗压强度 5 MPa,这并不是说射流压力只要大于 5 MPa 就能破煤,而是说从理论上可以破煤,由于现场操作的实际情况,不可能像理论上那么完善,因此,实际上的冲孔破煤水压取 8~15 MPa 比较合理。由表(3)可知,水力冲孔时,用喷嘴型号为 2φ3mm, 1φ1.8mm+2φ3.0mm 和 1φ1.8mm+2φ2.8mm 是比较好的,从现场的应用情况也可以得到验证。

潘三矿冲孔时用的喷嘴型号为 2φ4mm 的,由于其建立的压力只有 5.52 MPa,虽然也超过了理论

表 3 喷嘴型号与射流压力的关系

Tab. 3 Relations between model of nozzle and pressure of jet

喷嘴型号	当量直径 d/mm	系数	体积流量 $q/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	流量系 数 μ	射流压力 p/MPa
2φ2	2.83	0.69	150	0.95	87.30
2φ2.5	3.54	0.69	150	0.95	35.17
2φ3	4.24	0.69	150	0.95	16.44
2φ4	5.66	0.69	150	0.95	4.52
3φ2	3.46	0.69	150	0.95	38.24
3φ4	6.93	0.69	150	0.95	1.45
1φ1.8+2φ3.0	4.61	0.69	150	0.95	11.53
1φ1.8+2φ2.8	4.35	0.69	150	0.95	14.79

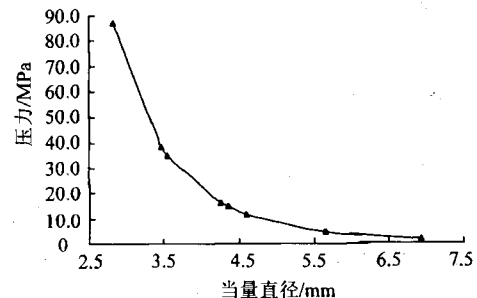


图 1 喷嘴当量直径与压力的关系

Fig. 1 Relations between equivalent diameter of nozzle and pressure

破煤的5 MPa,但由于其冲孔是下向孔,其破煤之后还要克服煤的自重而把煤带出孔外,因此冲孔效果就不是太好。

谢桥矿所用的喷嘴型号为 $1\phi 1.8\text{ mm} + 2\phi 3.0\text{ mm}$ 和 $2\phi 4\text{ mm}$,如2008年8月8号冲孔采用的喷嘴型号就是 $1\phi 1.8\text{ mm} + 2\phi 3.0\text{ mm}$,所建立的水压10 MPa左右,这与理论计算的12.53 MPa近似相等,冲孔过程中出煤均匀,没有出现憋孔和喷孔现象,共计冲出煤量9.5矿车,体积 14.25 m^3 。2008年8月14号冲2号孔时,用的喷嘴为 $2\phi 4\text{ mm}$ 的,冲孔用时3个小时,冲出5矿车煤,体积约 7.5 m^3 ,由此可见,同样用的 $2\phi 4\text{ mm}$ 的,谢桥的效果要明显好于潘三,主要原因是因为潘三矿在冲孔时冲的是下向孔,需要克服煤的自重,而谢桥矿冲孔时是上向孔,其不需要克服煤的自重,相反其自重再加上水压就更容易被冲出孔外。

5 结 论

(1)并不是水射流的压力大于煤的极限抗压强度就能出现较好的破煤效果,破煤效果的好坏,还跟水力冲孔孔的布置方式有关,如潘三矿用 $2\phi 4\text{ mm}$ 的喷嘴建立起来的压力5.52 MPa,虽然也达到了潘三矿煤的极限抗压强度,但由于其冲孔孔的布置方式是下向孔,煤体破坏后还要克服其自身的重力,因此,其效果并不理想,同样的压力和煤的强度,当孔的布置方式为上向孔时,其效果要好于下向布置。

(2)由喷嘴当量直径和出口处水压的关系,并考虑实际操作时误差,以及接头处漏水和拐弯,因此,实际上的冲孔破煤水压取8~15 MPa比较合理。

参考文献:

- [1] 于不凡,王佑安.煤矿瓦斯灾害防治及利用技术手册[M].北京:煤炭工业出版社,2000.
- [2] 林柏泉,崔恒信.矿井瓦斯防治理论与技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,1998.
- [3] 李学臣,魏国营.突出煤层水力掏槽防突技术措施的应用[J].河南理工大学学报:自然科学版,2006,25(4):270-274.
- [4] 姚宝魁,孙广忠,尹代勋,等.煤与瓦斯突出的区域性预测[M].北京:中国科学技术出版社,1993.
- [5] 中国矿业学院瓦斯组.煤和瓦斯突出的防治[M].北京:煤炭工业出版社,1979.
- [6] 李海洲.水力采煤的落煤问题[J].水力采煤与管道运输,1997(4):3-8.
- [7] 洪允和.水力采煤[M].北京:煤炭工业出版社,1988.
- [8] 薛胜雄,黄汪平,陈正文等.高压水射流技术与应用[M].北京:机械工业出版社,1998.
- [9] 崔谟慎,孙家骏.高压水射流技术[M].北京:煤炭工业出版社,1993.
- [10] LABUS T J. Fluid Jet Technology: Fundamentals and Application [M]. St. Louis: WJTA, 1995.
- [11] 于不凡,白帆,刘明.煤矿瓦斯防治技术[M].北京:中国经济出版社,1987.

(责任编辑 李文清)