

瓦斯测压孔壁围岩坍塌机理及孔壁注浆加固技术

王法凯, 蒋承林, 吴爱军, 杨 洋, 公衍伟, 黄鑫业

(中国矿业大学 煤矿瓦斯治理国家工程研究中心, 江苏 徐州 221008)

摘 要: 为了解决由瓦斯测压孔围岩松软易坍塌而导致的测压钻孔成孔困难、延误瓦斯测压时间等技术难题, 用松软围岩阶梯注浆加固技术实现分阶段加固测压钻孔围岩。利用孔壁围岩坍塌机理, 分析了围岩松软颗粒失稳易坍塌的力学原因; 采用浆液扩散球状渗透机理, 研究了浆液渗透扩散特性与围岩改造的关系。平煤股份八矿斜井石门测压应用试验结果表明: 在 12 MPa 注浆压力的作用下, 松软围岩区域浆液单次渗透扩散达 3.7 m, 3 次带压注浆就解决了孔壁坍塌、抱夹钻事故对测压钻孔施工干扰的问题, 最终顺利测得了煤层瓦斯压力为 1.67 MPa。基于孔壁坍塌机理的阶梯注浆技术实现了逐段充填松软围岩孔壁裂隙、增强围岩抗拉强度、降低切向应力集中, 逐段加强围岩孔壁稳定性能, 从而改善了围岩的松软特性。

关键词: 孔壁围岩坍塌机理; 浆液球状渗透机理; 孔壁围岩松软; 测压钻孔

中图分类号: TD265.4; TD712 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336 (2010) 09-0010-04

Surrounding Rock Collapse Mechanism and Grouting Reinforcement Technology of Gas Pressure Measuring Borehole

WANG Fa-kai, JIANG Cheng-lin, WU Ai-jun, YANG Yang, GONG Yan-wei, HUANG Xin-ye

(National Engineering Research Center of Mine Gas Control, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: In order to solve the pressure measurement borehole drilling difficulty, the gas pressure measurement time delay and other technical problems occurred by the soft surround rock collapse of the gas pressure measuring boreholes, the stage grouting reinforcement technology of the soft surrounding rock could be applied to the stage grouting reinforcement of the surrounding rock for the gas pressure measuring boreholes. With the surrounding rock collapse mechanism of the borehole wall, the mechanism cause of the soft particle stability lost and easy collapse was analyzed for the surrounding rock. The diffusion ball type permeation mechanism of the grout was applied to study the relationship between the grout permeation diffusion mechanism and the surrounding rock reconstruction. The applied test results of the pressure measurements at the cross-cut of the mine inclined shaft in No. 8 Mine of Pingdingshan Coal Mining Group showed that under the role of the 12 MPa grouting pressure, each permeation diffusion of grouting in the soft surrounding rock area would be 3.7 m. Three pressurized grouting operations had solved the borehole wall collapse and the drilling bit jamming accidents affected to the drilling of the pressure measuring borehole. The coal bed methane pressure of 1.67 MPa was finally and successfully measured. Based on the stage grouting technology with the borehole wall collapse mechanism, the cracking in the soft rock surrounding borehole wall could be sectionally filled, the tensile strength of the surrounding rock borehole could be steadily reinforced. Thus the soft features of the surrounding rocks could be improved.

Key words: borehole wall collapse mechanism; ball type permeation mechanism of grout; surrounding rock of borehole; pressure measurement borehole

在煤矿生产过程中, 瓦斯的严重威胁着工人的生命健康和矿井财产安全, 制约煤炭工业的发展。煤层瓦斯压力是瓦斯涌出和突出的动力, 也是煤体瓦斯含量的标志。准确测定煤层瓦斯压力, 对矿井合理制定瓦斯防治措施, 预测煤与瓦斯突出危

险性具有重要意义^[1]。测压钻孔施工的成功率受到多种因素的影响, 成功率较低^[2]。因为测压地点的选择局限性, 有时需穿越松软围岩测定煤层瓦斯压力, 而此测压点松软段围岩壁通常存在微、孔裂隙, 且极易造成孔壁坍塌, 夹钻事故, 使得钻孔成孔困难。这不仅耽误测压行程, 而且延长了生产周期。为了解决这一难题, 在孔壁围岩坍塌机理的

基金项目: 国家重点基础研究专项经费资助项目 (2006CB202204-3)

分析基础上,结合浆液扩散球状渗透机理,提出了松软围岩阶梯注浆加固技术,并通过在平煤股份八矿的斜井石门测压应用,证明了该技术的可行性。

1 松软围岩孔壁坍塌机理

围岩孔壁坍塌是指在围岩中打钻时或成孔后发生的孔壁岩石掉块的现象。对于较大倾角测压钻孔,倘若围岩孔壁松软则较难成孔,即便偶然成孔,但随着大块塌落岩石卡住钻孔且其后小碎块的不断积聚也极可能导致钻孔堵塞;而对于较小倾角的测压钻孔,坍塌掉落的碎块则直接堆积在原处,由于岩石的碎胀作用而膨胀堵塞钻孔,致使测压钻孔封孔测压前就失效、报废。

因此,为了彻底排除孔壁松软、易坍塌对测压成孔的干扰,掌握围岩孔壁颗粒的失稳特性,必须深入细致地了解测压钻孔松软围岩孔壁的坍塌机理。

根据圆形钻孔围岩应力^[3]的分布规律,分析松软、易垮钻孔围岩的侧向压力时(图1),在钻孔孔壁处(研究点至钻孔中心的距离 $r=a$,其中 a 为钻孔半径),恒有径向应力 $\sigma_r=0$,由边界条件可以得出:

$$\sigma_r = \frac{1+\lambda}{2}q_0\left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{1-\lambda}{2}q_0\left(1 - 4\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4}\right)\cos(2\theta) \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{1+\lambda}{2}q_0\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1-\lambda}{2}q_0\left(1 + 3\frac{a^4}{r^4}\right)\cos(2\theta) \quad (2)$$

$$\tau_{\theta\theta} = \frac{1-\lambda}{2}q_0\left(1 + 2\frac{a^2}{r^2} - 3\frac{a^4}{r^4}\right)\sin(2\theta) \quad (3)$$

式中: σ_θ 、 $\tau_{\theta\theta}$ 分别为钻孔围岩内任意点的切向应力、剪应力; λ 为原岩应力场中的侧向应力系数, $\lambda < 1$; q_0 为铅垂自重应力, $q_0 = \gamma H$ (γ 为上覆岩层的平均容重, H 为地层深度); θ 为研究点的方

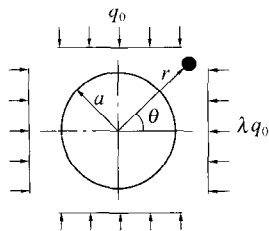


图1 钻孔围岩受力模型

向角。

根据式(2)中切向应力的边界条件可知:钻孔孔壁坍塌是在围岩内部压力和原岩应力共同作用下发生的孔壁围岩撕裂现象,是围岩内某位置处所产生的切向拉应力超过该处抗拉强度极限的力学结果。故应满足的力学条件为

$$|\sigma_\theta| > |R_t| \quad (4)$$

即

$$\left| \frac{1+\lambda}{2}q_0\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1-\lambda}{2}q_0\left(1 + 3\frac{a^4}{r^4}\right)\cos(2\theta) \right| > |R_t| \quad (5)$$

其中, R_t 为钻孔围岩孔壁内某位置处的围岩抗拉强度。当式(5)条件满足时,则钻孔周围松软部分就容易出现钻孔坍塌、垮孔或夹抱钻现象。

岩石中裂隙发育对卸压瓦斯抽放具有双重作用。一方面,为了能从储层中解析出更多的瓦斯并使解析瓦斯流入钻孔,要求储层内的裂隙足够发育;另一方面,当储层中的裂隙过度发育时,这些裂隙可能使钻孔和地面、工作面开采空间或地层水联通,导致钻孔吸入过多的空气而使瓦斯浓度降低,或是钻孔内水量过大而使抽出瓦斯量变小,或是地层水通过钻孔涌入开采空间,致使井下涌水量过大。

2 浆液扩散球状渗透机理

根据浆液球状渗透机理可知,浆液在一定压力梯度下呈球状沿裂隙流动、渗透扩散,当其离开注浆管一定距离,压力梯度降低到临界压力梯度时,流速减小,并由紊流转变为层流状态,此时水硬性材料将发生凝固,黏滞性增大,流速继续降低最后停止流动。而非硬性材料的颗粒逐渐聚结沉析或粘附在裂隙上,这就增大了浆液的流动阻力和静剪应力,最后在注浆管前端一定距离形成近似球状注浆体。球状注浆体半径,也就是球状浆液的扩散半径 r_1 为^[4]

$$r_1 = \sqrt[3]{kpr_0t/(\beta n)} \quad (6)$$

式中 k ——浆液在围岩中的渗透系数, cm/s;

r_0 ——注浆管半径, cm;

p ——注浆压力, 10^5 Pa;

t ——注浆时间, s;

β ——浆液黏度, Pa·s;

n ——岩层的孔隙率,一般取 0.5% ~ 3.0%。

浆液在钻孔周围裂隙面上形成网络骨架,并充填到孔壁围岩细小裂缝中,凝固后形成对岩体具有较高黏结性的有机塑性体,人为改善了孔壁围岩松软特性,起到加固、充填密实裂隙作用,增强孔壁围岩的强度。

3 松软围岩阶梯注浆加固技术

3.1 技术原理

根据浆液球状渗透机理,浆液在一定注浆压力作用下呈球状沿裂隙扩散、渗流,充填松软孔壁围岩裂隙,凝固后可加强节理、层理、裂隙等弱面的接触支撑力,改变式(5)的满足条件,增强围岩抗拉强度 R_t ,浆液凝固生成的塑性体增大了孔壁围岩整体可塑性,降低了切向应力 σ_θ 的集中程度,加强围岩孔壁稳定性能,从而改变围岩松软特性。

浆液作为一种黏性流体,在孔壁裂隙中扩散渗流时,会受到围岩裂隙接触阻力的约束;其次,浆液在裂隙面的沉积初凝,会阻碍后面浆液的渗流,两者共同加大了浆液在孔壁弱面内的流动阻力和静剪应力,而一定的注浆压力恰好可以克服这一阻力。反之,则可说明在一定注浆压力的作用下,浆液的渗流、扩散距离是有限的。即浆液离开注浆管一定距离后形成近似球状注浆体。

随着浅部孔壁围岩松软环境的注浆加固改善,则可以以此为阶梯^[5],顺钻孔扫孔钻进,至再次出现钻孔量突然增大或夹抱钻现象时,退出钻杆,再次带压注浆,这样钻孔可在各阶段注浆体基础上呈阶梯式延伸,直到测压煤层。钻孔周围松软孔壁特性在分段注浆加固过程中呈阶梯式推进,并最终在钻孔周围形成具有一定厚度的注浆体固化外壳^[6-7],从而杜绝松软孔壁对测压钻孔施工过程的影响。改善松软围岩所需浆液量 Q ,可由式(7)和式(8)近似求得:

$$Q = \sum Q_j \quad (7)$$

$$Q_j = \frac{4\pi k}{\beta} t_j p_j r_j \quad (8)$$

式中 Q_j ——第 j 段注浆所耗浆液量, cm^3 ;

t_j ——第 j 段注浆时间, s ;

p_j ——第 j 段注浆压力, 10^5Pa ;

r_j ——第 j 段注浆半径, cm 。

3.2 施工工艺

将穿越松软围岩的测压钻孔设计为一级套管、阶梯注浆。具体步骤如下所述。

1) 首先利用大于 $\phi 108 \text{ mm}$ 的钻头开 3 m 长的钻孔,退出钻杆,利用压风扫净孔内岩粉;放入长 3 m 带法兰的 $\phi 108 \text{ mm}$ 套管,外露 300 mm;利用聚氨酯固定套管,等待发泡 15 min;将按一定水灰比配制成的水泥浆液通过法兰盘上的高压接头注入钻孔内,注浆至孔口管侧壁返浆或注浆机表压力达 6 MPa 即停。

2) 待水泥浆凝固后,用 $\phi 75 \text{ mm}$ 的钻头扫孔 6 m,做耐压试验,要求耐压 12.0 MPa,该套管固定是阶梯注浆固孔的基础,也是该固孔工艺成败的关键,因此一定要严格要求试验人员,使得耐压试验达标。

3) 套管耐压试验合格后,继续钻进至出现孔壁坍塌、钻屑量突然增大、夹抱钻等现象时停止,退出钻杆,进行高压注浆,注浆压力不得低于耐压试验压力。

4) 待浆液凝固后,再次扫孔钻进,若仍有垮孔、钻屑量突增,夹抱钻或钻机明显旋转阻力增大等现象,则继续注浆,扫孔。

5) 至顺利见煤,进行最后一次高压注浆。保证整个测压钻孔围岩的完整性和连续性,彻底封堵围岩微、孔裂隙,从而使扫孔后整个钻孔围岩孔壁的岩性完整一致,排除了松软裂隙干扰、杜绝了瓦斯泄漏。

4 现场应用

平煤股份八矿位于平顶山市东部,矿井井田面积 54 km^2 ,东西走向长 12.5 km,南北宽 3.65 km,含煤面积 43.8 km^2 ,可采储量 2.7 亿 t,2003 年核定综合生产能力 330 万 t/a。主采煤层丁₅₋₆、戊₉₋₁₀、己₁₅、己₁₆₋₁₇,煤层厚度 11.6 m,倾角 $5 \sim 32^\circ$ 。主要煤种为肥煤、1/3 焦煤和焦煤。

2010 年初扩大采区五采区明斜井即将首次穿越东部戊₉₋₁₀煤层(法距 6 m)向下延伸,明斜井位于八矿工业广场东北围墙内,开口标高为 +118.5 m,设计方位角 $109^\circ 14' 25''$,施工坡度 -15° ,落底标高 -580 m 。根据《煤矿安全规程》规定,斜井揭煤必须进行突出危险性鉴定。

1) 选择测压地点。为测得戊₉₋₁₀煤层瓦斯压力, 要求选择的测压点少受或不受松软围岩裂隙的影响, 且所测得的瓦斯压力接近煤层原始瓦斯压力, 因此决定在距掘进工作面约 20 m 的远斜井巷壁左帮做一测压钻场 (标高 -406.903 m, 垂深 525.403 m), 测压钻孔就布置在钻场内。

根据地质资料, 石门附近戊₉₋₁₀煤层倾角呈 13°, 煤层直接顶为均厚 2.0 m 的含油泥岩, 主要以炭质泥岩、黏土质页岩及未胶结的疏松含水砂岩为主, 含有黏土质矿物质, 岩石硬度较低, 普氏系数 $f=0.6 \sim 2.8$, 质地松软, 钻孔成孔过程中极易

发生围岩孔壁坍塌、返渣量突增、抱夹钻等现象。

2) 确定施工参数。根据测压点附近的地质资料, 及现场巷道施工初期的探煤钻孔信息反馈计算可知, 揭戊₉₋₁₀煤测压钻场附近的围岩除了起始段为厚度约 2.0 m 的硬质砂岩, 深部围岩钻探反馈资料显示围岩孔壁破碎, 钻孔施工过程返渣量大, 冲水时间长, 夹抱钻时有发生。为避免孔壁围岩坍塌造成的夹抱钻现象对测压钻孔施工的影响, 现场施工测压钻孔时直接采用松软围岩阶梯注浆加固技术处理戊₉₋₁₀煤层的松软围岩。共施工 2 个戊₉₋₁₀煤层瓦斯压力测定钻孔, 钻孔设计施工参数见表 1。

表 1 钻孔设计施工参数

钻孔 编号	全掘进工作 面距离/m	与巷道夹 角/(°)	方位角	俯角/ (°)	套管长 度/m	岩石孔 长/m	钻孔总长 度/m	注浆压 力/MPa	浆液水灰 体积比
1	20	45	64°14'25"	35	2	19	20	12	2:1
2	23	45	334°14'25"	25	2	17	18	12	2:1

3) 工艺应用。现场改造围岩时应用的设备材料: 2ZBQ12/10 型气动泵、3B-200 型搅拌机、425 号普通硅酸盐水泥、25 号高压注浆管、25 号高压球阀、2.0 m 长的 $\phi 108$ mm 钢管。

高压注浆操作流程: 注浆机、高压胶管、高压球阀依次连接→注清水试机→造浆→注浆→停机冲洗注浆管→关闭高压球阀→拆除高压注浆管。现场应用严格按照松软围岩阶梯注浆加固技术的施工工艺步骤进行。

根据式 (6) 计算可得浆液扩散半径 r 为 374.7 cm。浆液黏度 β 为 16 Pa·s, 浆液结石率为 97%, 浆液冗余系数为 1.2 (为保证孔壁围岩能够注入理论浆液量, 即实现改善围岩松软特性所需的计算浆液量而实际配制出的浆液超量与理论值的比例系数), 渗透系数 k 为 3.6, 围岩孔隙率 n 为 1%, 注浆时间 t 为 30 min。

依据注浆半径计算可知, 套管固定耐压试验合格, 在 12 MPa 的注浆压力作用下, 松软围岩区域浆液一次可渗透扩散 3.7 m, 根据各测压钻孔具体设计参数及现场情况可得具体施工数据, 见表 2。应用松软围岩阶梯注浆加固技术顺利通过松软易垮围岩段, 最终结合 M-II 型瓦斯压力测定仪^[8]顺利测得了戊₉₋₁₀煤层的瓦斯压力, 1 号孔压力 1.67 MPa、2 号孔压力 1.50 MPa, 根据最终煤层瓦斯压

力选取以大者为据的原则, 确定 1.67 MPa 为戊₉₋₁₀煤层压力。

表 2 现场施工数据

钻孔 编号	顺孔硬 岩长/m	含油泥岩 顺孔长/m	注浆 次数	共消耗浆 液量/m ³
1	3.5	3.5	4	1.26
2	4.7	4.7	3	0.93

4) 应用效果。应用过程中, 可以根据公式计算并准备好各项施工所需的材料工具, 这样有利于科学合理规划施工注浆工艺次数, 避免施工过程的盲目性。测压钻孔能够快速测得煤层瓦斯压力并顺利回收, 这本身就是对测压钻孔围岩孔壁改造技术的肯定。从八矿明斜井戊₉₋₁₀煤层瓦斯压力测定环境改造的试验来看, 阶梯注浆技术很好地实现了充填松软孔壁围岩裂隙, 加强节理、层理、裂隙等弱面的接触支撑力, 增强围岩抗拉强度 R_t , 增大孔壁围岩整体可塑性, 降低切向应力 σ_θ 集中, 从而加强围岩孔壁稳定性能, 改变围岩松软特性, 降低孔壁坍塌对测压造成的威胁。

5 结 论

1) 抗拉强度 R_t 小于径向应力 σ_r 时, 钻孔周

(下转第 18 页)

(上接第 13 页)

围松软部分易出现钻孔坍塌、垮孔或夹抱钻现象。

2) 浆液在一定压力梯度下呈球状沿裂隙流动、渗透扩散, 在周围裂隙面上形成网络骨架, 并充填到孔壁围岩细小裂缝中, 凝固后形成对岩体具有较高黏结性的有机塑性体, 增强孔壁围岩的强度, 最终在注浆管前端一定距离形成近似球状注浆体。

3) 利用松软围岩阶梯注浆加固技术, 可使钻孔周围松软孔壁的特性呈阶梯式推进加强改进, 最终在钻孔周围形成具有一定厚度的注浆体固化外壳, 从而杜绝了松软孔壁对测压钻孔施工过程的影响, 人为改善了孔壁围岩松软特性, 使得钻孔施工顺利进行。

参考文献:

- [1] 俞启香. 矿井瓦斯防治 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992: 208.
- [2] 吕闰生, 张子戎. 提高测压钻孔瓦斯压力测定成功率分析

[J]. 煤炭工程, 2004 (11): 46-48.

- [3] 钱鸣高, 刘听成. 矿山压力与岩石控制 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 11-41.
- [4] 高 谦. 现代岩土施工技术 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2006.
- [5] 高爱军, 张春华, 方保明. 深钻孔“阶梯”式注浆封孔新工艺探讨 [J]. 科技信息, 2007 (34): 61, 67.
- [6] 张瑞林, 刘 晓, 贾金峰. 围岩破碎条件下穿层测试瓦斯压力的封孔工艺 [J]. 煤矿安全, 2008, 39 (7): 17-19.
- [7] 刘 頔. 煤层瓦斯压力测定中的注浆封孔工艺分析 [J]. 科技信息, 2007 (11): 29-30.
- [8] 何书建, 张仁贵, 王 凯, 等. 新型封孔技术在煤层瓦斯压力测定中的应用 [J]. 煤炭科学技术, 2003, 31 (10): 33-35.

作者简介: 王法凯 (1983-), 男, 山东费县人, 硕士, 主要从事矿井瓦斯防治方面的研究工作。Tel: 18623277869, E-mail: wangfakai316@126.com

收稿日期: 2010-05-15; 责任编辑: 王晓珍