

文章编号: 1001-1986(2017)06-0022-06

碎软突出煤层空气动力造穴工程主控因素

赵 龙

(中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 为揭示空气动力造穴技术在碎软突出煤层中造穴效果的主要工程影响因素及其机制, 加大该技术在碎软突出煤层瓦斯治理中的应用力度, 通过空气动力造穴机理分析认为, 影响造穴效果的工程主控因素为注气压力和返排气体排量; 同时采用数值模拟、现场实验和公式推算相结合的方法, 对注气压力与返排气体排量的影响机制进行了研究。结果认为: 距离井壁越近, 储层内的气体压力越大、煤储层结构越容易被空气压力“激动”作用破坏, 注气压力在安徽淮南谢一矿实验点的碎软煤层中的有效传导半径为 7 m, 煤层洞穴半径单次扩大量为 0.1 m 左右, 掏出煤体体积在一定范围内与注气压力、返排气体排量呈正相关关系。

关 键 词: 注气压力; 返排气体排量; 洞穴半径; 掏出煤体体积

中图分类号: TD712.62 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2017.06.004

Main controlling factors of air-cavitation engineering in broken soft outburst-prone coal seams

ZHAO Long

(Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to research the master engineering affecting factors and affecting mechanism of air-cavitation technology, increase its application in gas governance of the broken soft outburst-prone coal seams, this paper analyzed the mechanism of air-cavitation and believed that the master affecting factors were gas injection pressure and gas injection displacement. This paper adopted numerical simulation, field experiments and formula derivation so as to research the affecting mechanism of gas injection pressure and gas injection displacement. Results suggested that the closer to the well wall, the larger the gas pressure in the coal seam, the more easily the body structure of the coal was destroyed. The effective conduction radius of gas injection pressure was 7 meters in the broken soft coal seam in this experimental area. The cave radius of one-time expansion in coal seam was about 0.1 meter. The taken out volume of coal body was positively correlated with the gas injection pressure in certain range and well positively correlated with the gas injection displacement.

Keywords: gas injection pressure; gas injection displacement; cave radius; the taken out volume of coal body

空气动力造穴技术自 20 世纪 80 年代起在美国圣胡安盆地被应用推广以来, 在煤层气井储层改造方面取得了较好的效果, 该技术是采用介质“激动”的方法, 通过从井口注入空气或氮气进行憋压, 然后迅速卸压, 不断周期性重复憋压、卸压过程, 使煤储层一定范围内形成剧烈的压力“激动”, 从而破坏储层原始应力状态分布, 提高储层渗透性^[1-2]。该

技术引进国内后, 在沁水盆地和沈北煤田被应用于地面煤层气井增产改造, 但气井增产效果不佳, 分析原因是: 美国圣胡安盆地煤体结构好、煤层渗透率大, 注气增压时高压气体能够沿煤层裂隙传导较远, 从而沟通了煤储层内的裂隙系统, 达到大范围的改善煤储层渗透性的目的; 我国煤储层的渗透率较低、煤体结构较差^[3], 在受到高压气体挤压后,

收稿日期: 2016-11-06

基金项目: 国家科技重大专项课题(2011ZX05040-003); 陕西省工业科技攻关项目(2016GY-182); 中煤科工集团西安研究院有限公司创新基金项目(2015XAYZD18)

Foundation item : National Science and Technology Major Project(2011ZX05040-003); Industrial Science and Technology Research Project in Shaanxi Province, China(2016GY-182); Science and Technology Innovation Fund of Xi'an Research Institute of CCTEG(2015XAYZD18)

作者简介: 赵龙(1987—), 男, 山西大同人, 硕士研究生, 助理研究员, 从事煤层气地质与开发工程工作. E-mail: zhaolong@cctegxian.com

引用格式: 赵龙. 碎软突出煤层空气动力造穴效果工程主控因素[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(6): 22-27.

ZHAO Long. Main controlling factors of air-cavitation engineering in broken soft outburst-prone coal seams[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(6): 22-27.

注气压力在井筒周围煤储层传递范围小，不能达到大范围改善煤储层渗透性的效果。我国的碎软突出煤层，空气动力造穴技术虽然达不到大范围改造储层渗透性的目的，但是由于碎软突出煤层煤体结构较差^[4]，在局部压力过大然后瞬间卸压的情况下，煤体结构受到大幅度破坏，大面积脱落形成粉末状，在煤层中产生大空间的洞穴，有利于局部瓦斯压力迅速释放，便于瓦斯快速抽采。该项技术已在安徽淮南、淮北矿区井下石门快速揭煤工程中得到应用，并取得了一定的效果^[5-6]。为了进一步提高该技术在煤矿瓦斯治理方面的应用效果，笔者对影响造穴效果的工程主控因素进行综合分析和系统研究，提出一套适合我国碎软突出煤层空气动力造穴的工程参数组合。

1 空气动力造穴机理与工程主控因素

1.1 空气动力造穴机理

空气动力造穴，首先利用空压机、增压机以及相应的地面-井筒管路系统，将大量空气压入井内，在井底空间内形成高压环境，高压气体一部分直接作用于揭露的煤层表面，一部分渗入煤层，沿煤层裂隙延展，造成井筒揭露的煤层及其附近出现应力集中现象。然后瞬间卸压，井筒附近煤储层应力瞬间释放，一方面使井筒附近的煤体结构受到一定程度的破坏，产生坍塌、剥落和粉碎；另一方面由于压力激荡进入煤层裂隙的气体，会携带出裂隙中的煤粉，疏通裂隙通道，使原有的裂隙系统得到扩大和延伸。之后再利用空压机压风洗井，将其余脱落的煤粉或煤粒返排至地面，扩大洞穴体积，增大煤层的暴露面积，提高井眼周围煤体的渗透性，增大储层的导流能力。

1.2 工程主控因素分析

依据技术原理，将空气动力造穴主要分为2个阶段：注气造穴和返排掏煤。造穴半径主要取决于空气动力的“激动”作用所能够形成的空洞的大小和返排煤粉时空气携带煤粉能力的大小。产生空气动力“激动”作用的根本原因是压力差，因此压力差的大小决定了空气动力制造煤体洞穴能力的大小，压力差的工程主控因素是注气压力。煤粉上升的能量来自于不断注入的高压气体，决定气体能量大小的主要工程因素是返排排量，因此空气动力造穴的工程主控因素为注气压力和返排排量。

a. 注气压力

在地质条件一定的情况下，注气压力决定了井口裸露煤层及其附近的应力状态，注气压力过小，会导致应力在煤层中的传递半径减小，煤储层的弹

性势能也较小，不利于形成较大洞穴；注气压力过大，会使煤储层结构破坏程度过大，塑性变形增多，弹性变形减少，弹性势能降低，不利于卸压时弹性势能转化为动能，不利于煤体大量脱落，注气阶段的注气压力大小直接影响了碎软煤层空气动力造穴的煤体破坏程度。

b. 返排排量

返排煤粉阶段是在不憋压的状态下，利用空压机向井底注气，将井底煤粉携带至地面的过程。此阶段煤粉和气体相互作用，形成混合为一体的气、固两相流^[7]，气体将一部分动能转化为煤粉的动能，使煤粉具有向上的速度，煤粉在向上运动时又将动能转化为势能，当煤粉的动能大于从井底到地面所需势能转化量时，煤粉就可以被返排至地面。根据能量守恒定律，注入气体的动能越大，煤粉具有的动能也就越大，被携带的煤粉量也就越多。现场实验中空压机提供的返排气体排量决定了空气携带煤粉能力的大小^[8-9]。

2 造穴效果影响研究

对比了淮南矿区谢一煤矿2口空气动力造穴井的数据，施工了1口实验井，并对实验井进行了数值模拟分析和工程实践效果分析。

2.1 数值模拟分析

2.1.1 流固模型方程

煤体是具有骨架结构的连续多孔介质，在被高压气体压缩后会产生应变和位移，孔隙内的气体或液体也会在压差的作用下发生流动，因此需要将煤体的变形与流体的运动综合考虑，建立流-固耦合方程，来分析注气增压过程中煤储层状态的变化。由于煤储层内煤体和流体是处于同一压力系统下，因此需建立考虑孔隙压力的煤体变形方程和流体控制方程，通过孔隙压力项和位移项进行相互耦合^[10]，对多物理场进行分析和求解，气水两相流体与煤体变形的耦合方程为

$$\begin{aligned} & -\nabla \cdot \left(\frac{KK_{rg}}{B_g \mu_g} \nabla p \right) - \nabla \cdot \left(\frac{KK_{rw}}{B_w \mu_w} \nabla p \right) + \\ & \varphi \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_g}{B_g} + \frac{S_w}{B_w} \right) + \left(\frac{S_g}{B_g} + \frac{S_w}{B_w} \right) \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中 ∇ 为哈密顿算子； K 为绝对渗透率， $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ； K_{rg} 、 K_{rw} 为煤层气和地层水的相对渗透率， $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ； B_g 、 B_w 为煤层气和地层水体积系数； S_g 、 S_w 为煤层气和地层水的饱和度，%； μ_g 、 μ_w 为气相和水相黏度， $\text{mPa}\cdot\text{s}$ ； ε 为体积应变； φ 为孔隙度； p 为孔隙压力， MPa 。

2.1.2 数值模拟及结果分析

数值模拟实验采用多物理场耦合软件—

COMSOL Multiphysics(简称 COMSOL)，该软件可用于所有可用偏微分方程描述的物理过程的求解。本次数值模拟以各向同性和连续弹性介质、弹性小变形、广义虎克定律、达西定律、吸附饱和、Langmuir 方程为基本假设条件，通过 COMSOL 软件建立多物理场耦合数值模型^[11]，在煤体表面加载不同的法向应力模拟注气增压作用，分析不同压力下的煤体应力应变的变化情况，从而确定空气动力造穴注气增压的传导范围，分析造穴效果。

数值模拟的物理模型选用 x 、 y 、 z 三轴式直角坐标体系，以煤储层理面为 x - y 平面，以走向方向为 x 轴， y 轴与 x 轴垂直，以煤层倾向方向为 z 轴正方向；模型大小 $x \times y \times z$ 设为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ ，井筒穿过位于 x - y 坐标平面中心，井筒直径 0.3 m，见图 1。

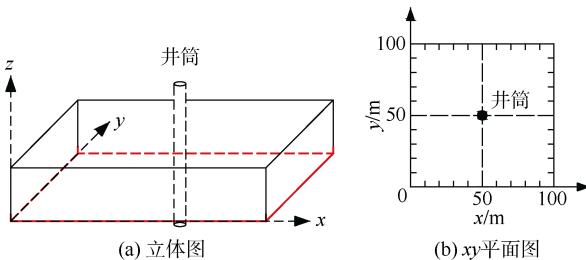


图 1 数值模型示意图

Fig.1 Schematic numerical model

数值模拟的主要参数包括初始注气半径、注气速度、注气煤层厚度、储层压力、最大和最小水平主应力、煤岩密度以及相关的煤岩力学参数。本次实验在空气动力造穴前进行了机械扩孔和水力扩孔，将井眼半径从 0.15 m 扩大至 1.00 m，数据见表 1，模拟结果云图见图 2。

表 1 参数设置
Table 1 Parameter setting

参数名称	赋值
初始注气半径/m	1.00
注气压力/MPa	8.00
注气速度/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	1.35
注气煤层厚度/m	6.55
初始瓦斯压力/MPa	0
储层压力/MPa	3.85
最大(最小)水平主应力/MPa	11.00(8.00)
煤岩密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.51
内聚力/MPa	1.90
内摩擦角/(°)	29.00
体积模量/ 10^3 MPa	6.11
剪切模量/ 10^3 MPa	1.45
抗拉强度/MPa	2.15

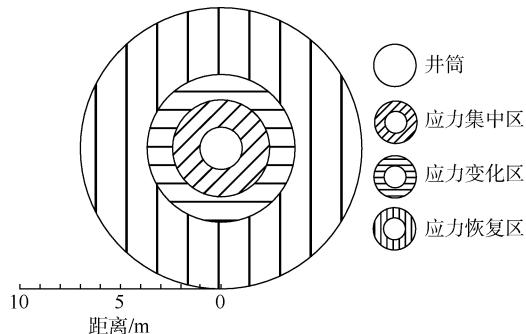


图 2 注气井筒周围储层气体压力图

Fig.2 Gas pressure in coal seam around gas injection well

注入气体压力从井筒向四周逐渐降低(图 2)，应力集中区位于距离井壁 2.5 m 的范围内，压力值为 6~8 MPa，区域内边界为井眼表面，是最易发生破碎坍塌的区域；应力变化区位于距离井壁 2.5~3.7 m 的范围，压力值为 4~6 MPa，储层气体压力变化明显，比原始储层气体压力升高了 2~3 MPa，发生破碎的可能性较大；应力恢复区位于距离井壁 3.7~7 m 的范围，压力值为 4~3.8 MPa，储层的渗透性会有一定改善，但储层结构不会受到大幅破坏；应力稳定区位于距离井壁 7 m 以外，压力恢复至储层原始值。

数值模拟数据表明注气增压只对钻孔周围的储层气体压力产生了影响，据井眼 7 m 以外的区域气体压力并未发生改变，储层渗透性不会有大面积提升，空气动力造穴技术在碎软煤层中很难达到大面积改善储层渗透性的作用。

2.2 工程实践效果分析

2.2.1 注气压力影响效果

现场共进行了 17 次空气动力造穴实验施工，注气压力 4~8 MPa，注气排量 $60.6 \text{ m}^3/\text{min}$ ，现场统计掏出煤体体积 161 m^3 ，掏出煤体体积数据见表 2。由于地面统计掏煤量是按照煤粉的体积进行计算，因此需要将煤粉的体积按照式(2)换算为煤储层的煤体体积即为洞穴体积，经现场测量煤粉密度为 $1.06 \text{ g}/\text{m}^3$ ，换算最终洞穴体积为 112.16 m^3 ，煤储层洞穴半径从 1 m 扩大至 2.51 m。

$$V_{\text{洞穴}} = V_{\text{煤体}} = V_{\text{煤粉}} \times \frac{\rho_{\text{煤粉}}}{\rho_{\text{煤体}}} \quad (2)$$

根据现场实验结果，每次空气动力造穴施工钻孔井眼的半径扩大范围均在 0.1 m 左右，处于数值模拟的应力集中区，表明只有储层气体压力值接近注气压力时，才能因空气压力“激动”作用发生大面积破碎和坍塌。初始注气压力为 4 MPa，返排煤粉量较少，洞穴扩大距离较小，说明注气压力不足以大面积破坏煤体结构并将煤体粉碎；将注气压力逐

表2 实验井空气动力造穴数据表
Table 2 Date of aerodynamic cavitation in test well

次序	注气压力/MPa	掏出煤体体积/m ³	换算掏出煤体体积/m ³	注气前洞穴半径/m	注气后洞穴半径/m	半径扩大距离/m
1	4.00	3.59	2.50	1.00	1.06	0.06
2	4.00	3.88	2.70	1.06	1.12	0.06
3	6.00	8.02	5.59	1.12	1.23	0.11
4	8.00	8.02	5.59	1.23	1.33	0.10
5	7.50	10.03	6.99	1.33	1.44	0.12
6	6.50	10.03	6.99	1.44	1.55	0.11
7	6.50	12.04	8.39	1.55	1.67	0.12
8	6.60	12.04	8.39	1.67	1.79	0.11
9	6.10	11.04	7.69	1.79	1.89	0.10
10	6.20	11.04	7.69	1.89	1.98	0.09
11	6.10	11.04	7.69	1.98	2.07	0.09
12	6.00	11.04	7.69	2.07	2.15	0.09
13	6.00	11.04	7.69	2.15	2.24	0.08
14	6.00	11.04	7.69	2.24	2.32	0.08
15	6.00	11.04	7.69	2.32	2.39	0.08
16	8.00	10.03	6.99	2.39	2.46	0.07
17	8.00	6.03	4.20	2.46	2.50	0.04
总计		161.00	112.16			1.51

渐上升至6~8 MPa，返排煤粉量明显提升，洞穴单次扩大距离也一直维持在0.08~0.12 m；当返排煤粉量急剧下降时，将注气压力提升至8 MPa无明显效果，分析认为由于洞穴体积过大，注入的空气无法将洞穴内的煤粉携带进入返排通道，导致返排煤粉量急剧下降。

将掏出煤体体积、注气压力通过散点图进行趋势分析，两者随造穴次数的变化趋势基本一致；在两曲线尾部由于洞穴体积过大，煤粉在洞穴内形成环流，无法被返排至地面，继续提升注气压力已不能提高单次返排煤粉量，使两曲线出现负相关性（图3）。在注气压力未超过7 MPa时，掏出煤体体积随着注气压力的上升而增大，在注气压力超过7 MPa后，掏出煤体体积随着注气压力的上升而下降，注气压力为6.5 MPa、6.6 MPa掏出煤体体积达到峰值，详见图4所示。

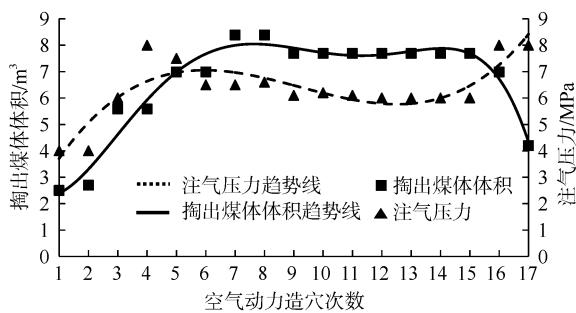


图3 掏出煤体体积和注气压力变化曲线

Fig.3 Variation of taken-out volume of coal body and gas injection pressure

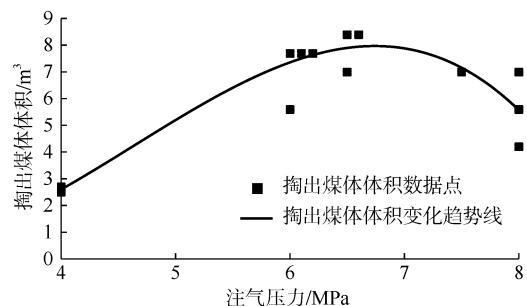


图4 掏出煤体体积与注气压力相关性曲线

Fig.4 Taken-out volume of coal body vs gas injection pressure

2.2.2 返排量影响效果

高压气体在注入阶段将其动能转化为煤粉的动能和势能以及摩擦热能，由于气体的动能与其速度平方及密度成正比，气体在高速运动中几乎是不可被压缩的^[12]，因此可将气、固混合物视为密度相对均匀的混合相，当煤粉从井底洞穴上升至环空口处时，由于环空的过流面积远小于洞穴，出现混合气体压力急剧升高、流速急剧下降的现象，如果此时的井底气体速度大于返排末速度值（式3），煤粉将随高速气体进入环空通道；在环空中由于气体压力不断下降^[13]，气体、煤粉混合相速度会不断上升，煤粉将被运移至地面。

$$V_{\text{末}} = \frac{4gd((\gamma_{\text{煤粉}} - \gamma_{\text{气}}))}{3C\gamma_{\text{气}}} \quad (3)$$

$$E = \frac{1}{2} \rho_{\text{标}} V_{\text{气}}^2 \quad (4)$$

$$\frac{\rho_{\text{标}}}{\rho_{\text{工}}} = \frac{p_{\text{标}}}{p_{\text{工}}} \quad (5)$$

$$Q_{\text{排}} = V_{\text{气}} [\pi (R^2 - r^2)] \quad (6)$$

式中 $V_{\text{气}}$ 为煤粉返排末速度, m/s; $V_{\text{气}}$ 为气体速度, m/s; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 ; d 为注气钻杆内径, m; $\gamma_{\text{煤粉}}$ 为煤粉重度, N/m^3 ; $\gamma_{\text{气}}$ 为空气重度, N/m^3 ; C 为扰流阻力系数; E 为气体动能, J/m^3 ; $\rho_{\text{标}}$ 、 $\rho_{\text{工}}$ 分别为标准状态和工况条件下的空气密度, kg/m^3 ; $p_{\text{标}}$ 、 $p_{\text{工}}$ 分别为标准状态和工况条件下的气体压力, MPa; $Q_{\text{排}}$ 为返排气体排量, m^3/min ; R 为套管内径, m; r 为钻杆外径, m。

根据 R.R. Angel^[13]提出的气固两相流最小动能法认为环空气体能够携带粉尘运移的最小动能与以 15.24 m/s 运行的标准状况下的空气动能相当, 按照式(4)计算的动能为 149.80 J/m^3 ^[14], 而按照式(5)压力与密度的换算公式, 注气压力为 2.4 MPa 的工况下, 携带煤屑所需的最小空气动能为 $3.60 \times 10^3 \text{ J/m}^3$, 井底气体的动能需大于携带煤屑所需的最小空气动能才能将煤粉携带至地面, 因此返排气体动能决定了被破坏的媒体是否能够有足够的能量被携带至地面。据式(6), 注气排量为 $35 \text{ m}^3/\text{min}$ 时, 返排环空通道气体速度为 15.26 m/s , 气体动能为 $3.64 \times 10^3 \text{ J/m}^3$, 稍高于理论最小动能值, 空气钻井现场实测最小气量值一般比 Angel 理论计算值高 25% 左右^[15], 因此该工况下的排气量过小, 不利于煤粉返排; 注气排量为 $40 \text{ m}^3/\text{min}$ 时, 返排环空通道气体速度为 17.44 m/s , 气体动能为 $4.76 \times 10^3 \text{ J/m}^3$, 返排气体动能是理论最小动能的 132% , 注气排量为 $60 \text{ m}^3/\text{min}$

时, 返排环空通道气体速度为 26.16 m/s , 气体动能为 $1.07 \times 10^4 \text{ J/m}^3$, 返排气体动能是理论最小动能的 297% , 均可满足煤粉在返排通道中的运移, 但随着空气动力造穴井底洞穴的增大, 洞穴截面积越来越大, 气体运动速度越来越小, 气体携带煤粉的动能也越来越小, 煤粉从洞穴进入返排通道也越来越困难。各种工况下不同位置空气动能计算值见表 3。

表 3 不同工况下空气动能计算表
Table 3 The computation sheet of air kinetic energy in working condition

不同工况		位置	空气动能计算值/ $10^3(\text{J}\cdot\text{m}^{-3})$
注气压力/MPa	排量/ $(\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1})$		
2.4	35	注气通道	67.30
		返排通道	3.64
2.4	40	注气通道	88.00
		返排通道	4.76
2.4	60	注气通道	198.00
		返排通道	10.7

为了研究不同注气排量下的掏出媒体体积, 采用排量较大的空气压缩机进行施工, 结合前期收集的研究区 2 口空气动力造穴井资料(表 4), 当注气压力范围基本一致时, 实验井比 1 号井返排排量增加 71% , 掏出媒体体积增加 45 m^3 , 增幅 37% ; 实验井比 2 号井返排排量增加 50% , 掏出媒体体积增加 20 m^3 , 增幅 14% , 即随着返排气体排量的增大, 返排煤粉量也随之增大。

表 4 空气动力造穴掏出媒体体积统计对比表
Table 4 Statistical and comparative data of taken-out volume of coal body of aerodynamic cavitation

井号	注气次数								注气压力/ MPa	返排排量/ $(\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1})$	掏出媒体 体积/ m^3
	0	$p < 5 \text{ MPa}$	5 MPa	$p < 6 \text{ MPa}$	6 MPa	$p < 7 \text{ MPa}$	7 MPa	$p < 8 \text{ MPa}$	p	8 MPa	
1	1	2		11			1	3	2.4	35	120
2	1	2		10			2	2	2.4	40	145
实验井	2	0		11			1	3	2.4	60	165

3 结 论

a. 空气动力注气增压只对钻孔周围的储层气体压力产生影响, 空气动力造穴技术在碎软煤层中很难达到大面积改善储层渗透性的作用, 距离钻孔位置越近煤储层越易遭到气体压力“激动”作用破坏, 在淮南谢一矿实验区碎软煤层注气影响半径约 7 m , 影响效果较明显的区域半径为 2 m , 影响效果剧烈的区域半径为 1 m 。根据现场实验结果, 每次注气增压洞穴半径扩大距离为 0.1 m 左右。

b. 碎软突出煤层空气动力造穴的注气压力适合设置为 $6\sim7 \text{ MPa}$, 不宜高于 8 MPa , 在一定范围内, 掏出媒体体积随注气压力的增加而增大。

c. 在注气压力一定的情况下, 碎软突出煤层空气动力造穴的返排气体排量越大掏出煤粉量也越多, 但受破碎煤粉总量限制, 不会无限制上升。

参 考 文 献

- [1] 熊德华, 王珊珊. 煤层气井空气造穴工艺的实践与认识[J]. 中国煤炭地质, 2010, 22(10): 26-27.

- XIONG Dehua , WANG Shanshan. Study and practice of air-cavitation technology for CBM wells[J]. Coal Geology of China , 2010 , 22(10) : 26–27.
- [2] 张志刚,崔立平,王磊. 煤层气裸眼洞穴完井工艺技术与实践[J]. 断块油气田, 1999 , 6(6) : 63–66.
- ZHANG Zhigang , CUI Liping , WANG Lei. Techniques for open-hole cavity completed coal-bed gas wells and its application[J]. Fault-Block Oil and Gas Field , 1999 , 6(6) : 63–66.
- [3] 莫日和. 煤层气井造穴技术的实践与研究[J]. 中国煤层气, 2007 , 4(3) : 35–42.
- MO Rihe. Study and practice of air-cavitation technology for CBM wells[J]. China Coalbed Methane , 2007 , 4(3) : 35–42.
- [4] 敖卫华. 淮南煤田深部煤层煤级与煤体结构特征及煤变质作用[D]. 北京: 中国地质大学, 2013.
- [5] 徐建军, 韩保山, 吴信波. 地面钻井辅助消突与瓦斯抽采一体化工程实践[J]. 煤炭技术, 2014 , 33(8) : 289–292.
- XU Jianjun , HAN Baoshan , WU Xinbo. Intergrated engineering practice of auxiliary outburst elimination by drilling well from ground and production of CBM[J]. Coal Technology , 2014 , 33(8) : 289–292.
- [6] 李源, 周伟, 刘昆. 空气动力造穴工艺在石门揭煤钻井中的应用[J]. 煤矿安全, 2015 , 46(12) : 123–125.
- LI Yuan , ZHOU Wei , LIU Kun. Application of air - cavitation technology in rock cross cut coal uncovering well[J]. Safety in Coal Mines , 2015 , 46(12) : 123–125.
- [7] 吴望一. 流体力学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005 : 281–283.
- [8] 刘恺德, 王成, 姜在炳, 等. 空气动力掏煤工艺之压风排水排渣关键技术[J]. 煤炭学报, 2016 , 40(1) : 151–158.
- LIU Kaide , WANG Cheng , JIANG Zaibing , et al. Key techniques of gas injection , water drainage and slag discharge in aerodynamic excavating coal process[J]. Journal of China Coal Society , 2016 , 40(1) : 151–158.
- [9] 冉启平, 赵志发, 白新华, 等. 汪家寨煤矿松软高突煤层水力压裂试验研究[J]. 矿业安全与环保 , 2015 , 42(2) : 16–19.
- RAN Qiping , ZHAO Zhifa , BAI Xinhua , et al. Test research of hydraulic fracturing for loose outburst coal seam in Wangjiazhai mine[J]. Mining Safety & Environmental Protection , 2015 , 42(2) : 16–19.
- [10] 孙四清, 张俭, 安鸿涛. 松软突出煤层穿层洞穴完井钻孔瓦斯抽采实践[J]. 煤炭科学技术 , 2012 , 40(2) : 49–51.
- SUN Siqing , ZHANG Jian , AN Hongtao. Practices on gas drainage with cavity completion borehole passing through soft and outburst seam[J]. Coal Science and Technology , 2012 , 40(2) : 49–51.
- [11] 李晓益, 汪志明, 万鑫, 等. 煤层气裸眼洞穴完井注气增压数值试验[J]. 石油钻探技术 , 2012 , 40(2) : 14–19.
- LI Xiaoyi , WANG Zhiming , WAN Xin , et al. Numerical experiments of gas injection pressurization for CBM open hole cavity completion[J]. Petroleum Drilling Techniques , 2012 , 40(2) : 14–19.
- [12] 张亮, 姚磊华, 王迎东. 基于 COMSOL Multiphysics 的三维地质建模方法[J]. 煤田地质与勘探 , 2014 , 42(6) : 14–19.
- ZHANG Liang , YAO Leihua , WANG Yingdong. 3D geological modeling method based on COMSOL multiphysics[J]. Coal Geology & Exploration , 2014 , 42(6) : 14–19.
- [13] ANGEL R R. Volume requirements for air or gas drilling[M]. Houston : Gulf Publishing Company , 1958 : 29–36.
- [14] 苏义脑, 周川, 窦修荣. 空气钻井工作特性分析与工艺参数的选择研究[J]. 石油勘探与开发 , 2005 , 32(2) : 87–90.
- SU Yi'nao , ZHOU Chuan , DOU Xiurong. Operation characteristics analysis and process parameters selection of air drilling[J]. Petroleum Exploration and Development , 2005 , 32(2) : 87–90.
- [15] 刘建林. 气体钻井用贯通式潜孔锤关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.

(责任编辑 范章群)