

# 煤层气排采中煤粉产出量动态变化及影响因素

李 瑞<sup>1</sup>, 王生维<sup>1,2</sup>, 陈立超<sup>1</sup>, 张 晨<sup>1</sup>, 何俊铎<sup>1</sup>, 晁巍巍<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学(武汉) 资源学院 湖北 武汉 430074; 2. 山西晋城无烟煤矿业集团有限责任公司 国家能源煤与煤层气共采技术重点实验室 山西 晋城 048006; 3. 华北油田勘探开发研究院 河北 任丘 062552)

**摘 要:** 为了解煤层气排采过程中煤粉产出动态变化规律,对沁水盆地南部投产后的煤层气井不同排采阶段煤粉产出量进行记录和统计,分析了煤粉产出影响因素,并通过实例研究了煤粉产出量动态变化与产气量的关系。结果表明:产水阶段和产水产气两相流阶段是最易产出煤粉的阶段,其中产水产气两相流阶段煤粉产出量总体较高,且煤粉产出明显不稳定、不连续。导流裂缝发育特征、储层构造软煤带发育特征及其与导流裂缝的配置关系、地层流体携粉作用以及排采工作制度是影响煤粉产出量变化的主要因素。最后,提出了加强煤储层地质研究,避开原生煤粉源,研制便携式煤粉产出定量测定装置,制定煤粉预警措施,以及合理优化排采工作制度以减少煤粉对煤层气排采的危害。

**关键词:** 煤层气排采; 产粉规律; 产粉影响因素; 煤粉产出量

中图分类号: TD731; P618.11

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2014)06-0122-04

## Coal Powder Output Dynamic Variation and Influence Factors During Coalbed Methane Drainage

LI Rui<sup>1</sup>, WANG Sheng-wei<sup>1,2</sup>, CHEN Li-chao<sup>1</sup>, ZHANG Chen<sup>1</sup>, HE Jun-hua<sup>1</sup>, CHAO Wei-wei<sup>3</sup>

(1. School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. Key Laboratory of National Energy Coal and Coalbed Methane Joint Mining Technology, Jincheng Anthracite Mining Group Co., Ltd., Jincheng 048006, China; 3. Exploration and Development Institute, Huabei Oilfield Company, Renqiu 062552, China)

**Abstract:** In order to find out dynamic variation law of coal powder output during coalbed methane drainage, the coal powder output was recorded and counted during the drainage of coalbed methane in the south of Qinshui Basin. In addition, the influence factors of coal powder output were analyzed, and the relationship between coal powder output and gas production was studied based on cases. The results showed that water drainage stage and gas-water two-phase stage were the most likely coal powder output stage, of which the coal powder output during gas-water two-phase stage was generally high, and instability and discontinuous were main variation characteristic. The main influence factors on coal powder output were the characteristics of fractures, configuration relations between tectonic soft coal areas and fractures, carrying coal powder capacity of formation fluid, as well as drainage system. It was benefit to decrease coal powder to damage the coalbed methane drainage when strengthening coal reservoir geological study, avoiding primary coal powder, developing the portable detector to test coal powder content, formulating coal powder pre-warning measures, and optimizing drainage working system.

**Key words:** coalbed methane drainage; coal powder output law; coal powder output influence factor; coal powder output

## 0 引 言

煤岩具有较脆、胶结性差、易碎、易坍塌等特性,煤中广泛发育的双孔隙系统也大幅降低了煤岩的机械强度<sup>[1-3]</sup>。另外,煤储层受后期构造作用影响,本

身也可能发育构造软煤带。煤岩机械强度低加之煤层气生产对煤储层的改造作用,使得煤层气井排采过程中,井筒不同程度地都会产出煤粉,煤粉的产出是制约煤层气连续稳产、高产的关键因素,不仅会降低裂缝导流能力,导致煤层气井产气量严重降低,还

收稿日期: 2014-03-03; 责任编辑: 赵 瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2014.06.026

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2011ZX05034-002); 山西省煤层气联合研究基金资助项目(2012012007)

作者简介: 李 瑞(1989—),男,河南鹤壁人,博士研究生。通信作者: 王生维,教授,博士生导师, E-mail: swwang@cug.edu.cn

引用格式: 李 瑞,王生维,陈立超,等.煤层气排采中煤粉产出量动态变化及影响因素[J].煤炭科学技术,2014,42(6):122-125.

LI Rui, WANG Sheng-wei, CHEN Li-chao et al. Coal Powder Output Dynamic Variation and Influence Factors During Coalbed Methane Drainage [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6): 122-125.

会损坏井筒排采设备,影响煤层气开发经济效益<sup>[4-7]</sup>。对此,很多学者对煤粉来源、形成机理、起运机制及储层损害等方面开展了大量研究,取得了不少有益成果<sup>[8-12]</sup>。然而,对煤层气排采过程中煤粉产出变化规律方面的研究却很少<sup>[13-14]</sup>。开展不同排采阶段煤粉产出变化规律及其影响因素研究对制定合理排采制度,减轻煤粉产出对煤层气井负面影响具有重要意义。笔者以沁水盆地南部煤层气开发区块 60 余口煤层气井煤粉产出量进行记录和统计,研究了煤层气排采过程中煤粉产出动态变化规律及影响因素,并分析了煤粉产出动态变化与产气量的关系。在此基础上,提出了煤粉产出防控建议,以期为我国煤层气开发提供借鉴。

## 1 煤粉来源

从煤层气井钻井到排采的整个开发阶段都可能伴随有煤粉的产生。煤粉的来源包括原生煤粉与次生煤粉<sup>[8]</sup>。原生煤粉是煤层受后期构造作用后发育的,这部分煤粉主要赋存在断层面及层间滑动面内,包括断层煤粉与层间煤粉。次生煤粉是人工对煤储层改造及煤层气排采过程中形成的煤粉。煤岩机械强度较低且孔裂隙发育,在钻完井过程中,钻具对煤层的碾磨;压裂过程中压裂液造缝过程中对裂缝的强烈冲蚀,支撑剂对裂缝表面的磨蚀与嵌入;排采过程中有效应力的改变造成煤基质变形与破坏,气液固三相流对裂缝的冲蚀,都会产生次生煤粉。

## 2 煤粉产出影响因素

### 2.1 导流裂缝发育特征

煤储层导流裂缝发育特征对煤粉的产生和运移均有重要影响。对煤层气井开挖解剖发现,煤储层主干压裂裂缝形态主要有简单垂向裂缝与复合 T 型裂缝(图 1),且次级裂缝十分发育。简单垂向裂缝在走向上可能连通煤储层中连续的顺层煤粉源集合体及间断的“串珠状”断层煤粉源集合体,而复合 T 型裂缝中的水平裂缝可广泛沟通顶板附近的顺层煤粉源集合体,增加了气井煤粉产出的供给来源与导流通道。另外,壁面平直、连通性好、有一定宽度的裂缝更有利于煤粉的运移和产出。相反,壁面凹凸不平、连通性差、较窄的裂缝不仅在压裂或排采过程中,在流体强烈的冲蚀下产生更多的煤粉,而且煤粉在这些裂缝中运移

极易沉降甚至堵塞裂缝。

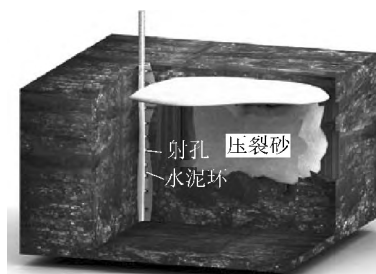


图 1 煤储层压裂形成的复合 T 型裂缝

### 2.2 储层构造软煤带与导流通道的配置关系

由于煤储层中可能发育构造软煤带,因此当压裂形成的裂缝通道或水平井井眼直接穿过构造软煤带后,排采过程中便会产出大量煤粉。若导流通道不直接穿过构造软煤带时,后期排采过程中软煤仍可能进入通道,随流体运移至井筒并产出,笔者称之为煤粉微突出。煤粉微突出是指压裂主裂缝靠近构造软煤带时,在排采过程中由于压力的变化,引起微观瓦斯突出并抛出煤粉的现象。由于硬煤岩壁存在易破碎的薄弱带,在排采过程中主干裂缝内流压的变化会打破上述的平衡状态,造成软煤层发生较大的流动变形,变形区内较高的瓦斯压力,会使硬煤岩壁产生拉伸应力发生破坏,导致软煤带内游离甲烷气体的喷出和煤层气的大量解吸,并最终带出大量的煤粉和碎煤。

### 2.3 地层流体携粉作用

煤粉在导流通道形成或进入导流通道以后,在一定的条件下会被导流裂缝中的流体携带。假设煤粉颗粒为圆球状,则流体对煤粉颗粒的冲刷力  $F = \pi r^2 \rho v^2 / 2$ , 其中:  $r$  为煤粉颗粒半径;  $\rho$  为流体密度;  $v$  为流体流速。由上式可知,地层流体对煤粉的携带运移与煤粉颗粒大小、流体密度及流速关系密切:对于一定粒径的煤粉,地层流体流速越大,流体密度越大,对煤粉的携带作用也越强。而流体密度决定于气液单(多)相流中各相含量,流速则决定于生产压差及地层供液能力。

### 2.4 排采工程作业

煤层气井排采是以调整井筒液位及井底流压为核心的。排采强度的高低决定着煤层气藏生产压差及地层流体流速的大小,从而影响地层流体的携粉能力。排采过程中的停泵、检泵等修井作业会导致地层流体的突然中断,打乱地层流体的连续、平稳产出。突然启动抽油泵极易扰乱已经在裂缝中沉降的煤粉,导致煤粉产出量的增加。

### 3 煤粉产出量动态变化规律

煤层气井生产过程中不可避免地会产生煤粉。当前,沁水盆地南部煤层气开发区块对排采过程中煤粉产出量的描述基本采用定性描述:一般根据地面取水样中煤粉含量划分为:清(含很少量的煤粉,产粉等级为 1 级)、浅灰(含少量的煤粉,产粉等级为 2 级)、深灰(含大量煤粉,产粉等级为 3 级)。笔者分别对 60 余口煤层气井排采各阶段煤粉产出量动态变化特征进行调研和资料分析统计。煤粉产出量动态变化曲线如图 2 所示。

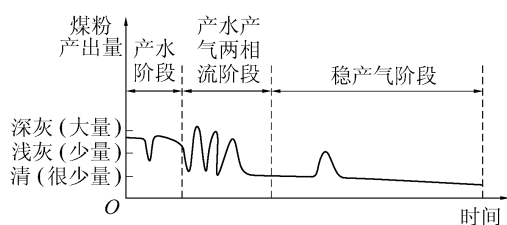


图 2 煤层气井煤粉产出量动态变化曲线

1) 产水阶段。钻完井、水力压裂后进入产水阶段,导流通道中均有原生煤粉和次生煤粉,且煤层气井投产初期产水量较大,因此该阶段煤粉产出量总体较多,但也有一些井煤粉产出量偏少。对煤储层进行开挖解剖发现,水平井井眼或压裂裂缝与煤储层构造软煤带的配置关系是决定该阶段煤粉产出的关键因素。若水平井眼穿过煤储层小微构造发育地带或压裂裂缝沟通了煤储层构造软煤带,煤粉将随地层水大量产出至地面。

2) 产水产气两相流阶段。煤层气排采进入该阶段后,煤层开始不断解吸气体并在裂隙系统中形成气液固三相流。煤层气的不断解吸促使地层流体中含气率不断增加,即流体性质不断发生变化。该阶段形成的煤粉主要为煤岩应力条件的改变及地层流体冲蚀产生的次生煤粉。产水产气两相流阶段煤储层变化十分敏感,一方面气体的产出引起排采正效应的增强,另一方面煤层气的产出滞后现象较为明显,不合理的排采强度极易引起煤层气解吸与渗流的不平衡,导致流体流速的突变和不连续。产水产气两相流阶段多变的煤储层物性及流体性质导致了该阶段多变的煤粉产出状况。

3) 稳产气阶段。该阶段抽油机绝大部分时间处于低速或者停止运转状态,产水量极少,绝大部分煤层气直井的日产水量不足  $0.5 \text{ m}^3/\text{d}$ 。由于储层裂隙系统沟通范围内的煤粉来源是有限的,且该阶

段储层物性与地层流体性质稳定,流体携粉能力较弱。另外,该阶段排采工作制度也较为稳定,故地面出粉情况总体为低含量且逐渐减少。

### 4 煤粉产出量动态变化与产气量变化关系

沁水盆地南部某区块 X-X1 井产气量与煤粉产出量动态变化如图 3 所示。该井煤粉产出量一般较低,地面取水样多为清,含很少量的煤粉。投产 140 d 以后开始进入产水产气两相流阶段,该阶段产气量和煤粉产出量均有波动,待产气量稳定后煤粉产出量基本都在较低水平,且波动次数较少。

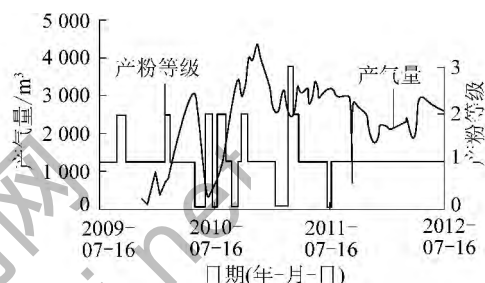


图 3 X-X1 井产气量与煤粉产出量动态变化

X-X1 井在 2010 年 4 月下旬产气量开始急剧下降,煤粉产出量增高。排采记录显示这一阶段并筒间断性产水,分析产气量突降的原因为煤粉堵塞了导流通道,造成产水、产气中断,检泵后该井产气量逐渐恢复。产气量增高后,因地层流体的携粉能力增强,则可能引起并筒煤粉产出量增大。如图 4 所示,沁南地区某区块 X-X4 井在 2010 年 2 月产气量开始逐渐增加,并在 2010 年 5 月初提高抽油机冲次后,产气量发生急剧增加,产气量快速增加的过程中,该井煤粉产出量也较大,地面取水样变为浅灰。排采记录显示这一阶段并筒产水量也从  $0.5 \sim 1.0 \text{ m}^3/\text{d}$  增加到了  $1.5 \sim 2.0 \text{ m}^3/\text{d}$ ,分析煤粉产出量增加的原因为产水产气两相流阶段煤层本身解吸气量的增加,加之排采强度的增加使地层流体快速且大量产出,导致产生并携带出了更多的煤粉。由此可知,煤层气井产粉与产气是相互影响的,产粉过

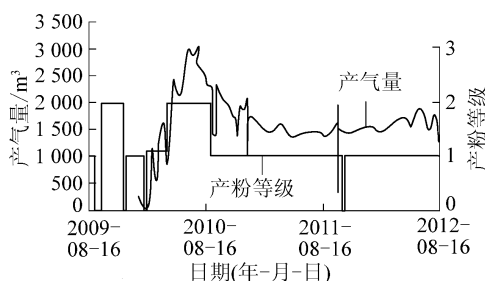


图 4 X-X4 井产气量与煤粉产出量动态变化

多或产气量过大均可导致煤储层损害,因此,应合理控制排采工作制度,使煤层气井适度产出煤粉<sup>[15]</sup>。

## 5 煤粉产出防控建议

1) 加强煤储层地质研究,避开原生煤粉源。煤层气开发前,加大矿井下煤储层地质研究,查明小微构造发育地带以及构造软煤带平面与纵向分布特征。对于垂直井应避开在构造软煤分布区域的钻井;对于水平井,水平井眼应避开穿过构造软煤带与小微构造发育地带。有研究表明,软煤自然伽玛、声波时差明显偏高<sup>[16]</sup>,因此,应结合煤储层地质研究与测井成果,优化射孔、压裂工艺,在煤粉发育位置不布置射孔孔眼,压裂过程中不压穿构造软煤带。

2) 研制便携式煤粉产出定量测定装置,制定煤粉预警措施。目前沁水盆地南部普遍采用的通过取水样观察颜色的方法,定性描述煤粉含量,不利于地面工控人员及时了解煤层气井煤粉产出量变化,不能及时采取有效措施减轻煤粉对煤层气排采的危害。因此,研制便携式煤粉含量测定仪,制定煤粉含量变化预警措施对于及时优化排采工作制度,减轻煤粉危害具有重要意义。

3) 优化排采工作制度。实践表明,排采过程中缓慢降低井筒液位及井底流压,尽量减少停泵、检泵等修井作业次数和时间,采用缓慢、连续、平稳的排采工作制度,更有利于防止煤粉的形成和导流通道的堵塞,尤其是产水产气两相流阶段,储层物性变化十分敏感,煤粉产出明显不稳定、不连续。此外,煤粉的产出会损坏抽油泵,从而不得不停泵、检泵,而频繁检泵作业极易导致煤粉大量产出,为避免煤粉产出造成的排采恶性循环,优化煤层气井排采制度更显得关键。不合理的排采工作制度易导致煤粉大量产出而通过优化排采工作制度来完全避免煤粉产出也足不现实。由于钻井、压裂和排采过程中不可避免地会在导流裂缝通道中产生煤粉,这些煤粉如果不及时随流体产出,极容易堵塞导流通道,引起储层伤害。因此,应合理控制排采工作制度,让煤层气井适度产出煤粉。

## 6 结 论

1) 煤粉的产出影响因素主要有导流裂缝发育特征、储层构造软煤带发育特征及其与导流裂缝的配置关系、地层流体携粉作用以及排采工作制度。

2) 产水阶段和产水产气两相流阶段是最易产

出煤粉的阶段。产水产气两相流阶段煤粉产出量一般较高,且时高时低,煤粉产出量明显不稳定、不连续。稳产气阶段煤粉产出总体较低,但偶尔会出现煤粉产出较高的情况。

3) 煤层气排采过程中,产粉与产气是相互影响的:产粉过多,容易造成导流通道的堵塞,可能引起产气量降低;但产气量增高后,地层流体的携粉能力增强,可能引起井筒煤粉产出量增大。因此应合理优化排采工作制度,让煤层气井适度产出煤粉。

4) 加强煤储层地质研究,研制煤粉产出定量测定装置,以减少煤粉产出对煤层气排采的危害。

### 参考文献:

- [1] 冯 晴,吴财芳,雷 波.沁水盆地煤岩力学特征及其压裂裂缝的控制[J].煤炭科学技术,2011,39(3):100-103.
- [2] Palmer I, Moschovidis Z, Cameron J. Coal Failure and Consequences for Coalbed Methane Wells[C]. Society of Petroleum Engineers, USA, 2005.
- [3] 白建梅,孙玉英,李 薇,等.高煤阶煤层气井煤粉产出对渗透率影响研究[J].中国煤层气,2011,8(6):18-21.
- [4] 邹雨时,张士诚,张 劲,等.煤粉对裂缝导流能力的伤害机理[J].煤炭学报,2012,37(11):1890-1893.
- [5] 马洪泽,李治平,刘翰林,等.煤粉对煤层气直井产量的影响[J].煤矿开采,2013,18(1):104-106.
- [6] Lehman L V, Blach M E, Robert L M *et al.* Desorption Enhancement in Fracture - Stimulated Coalbed Methane Wells[C]. Society of Petroleum Engineers, USA, 1998.
- [7] 张芬娜,慕耀光,徐春成,等.煤粉对煤层气井产气通道的影响分析[J].中国矿业大学学报,2013,42(3):428-435.
- [8] 赵俊芳,王生维,秦 义,等.煤层气井煤粉特征及成因研究[J].天然气地球科学,2013,24(6):1316-1319.
- [9] 刘升贵,贺小黑,李惠芳.煤层气水平井煤粉产生机理及控制措施[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2011,30(4):508-512.
- [10] 曹代勇,姚 征,李小明,等.单相流驱替物理模拟实验的煤粉产出规律研究[J].煤炭学报,2013,38(4):624-627.
- [11] 慕耀光,张芬娜,刘 冰,等.煤层气井产气通道内煤粉运动特征分析[J].煤炭学报,2013,38(9):1627-1632.
- [12] 张公社,田文涛,陶 杉.煤层气储层煤粉运移规律试验研究[J].石油天然气学报,2011,33(9):105-107.
- [13] 魏迎春,张傲翔,姚 征,等.韩城区块煤层气排采中煤粉产出规律研究[J].煤炭科学技术,2014,42(2):85-89.
- [14] 刘升贵,胡爱梅,宋 波,等.煤层气井排采煤粉浓度预警及防控措施[J].煤炭学报,2012,37(1):86-89.
- [15] 曹立虎,张遂安,石慧宁,等.沁水盆地煤层气水平井井筒煤粉迁移及控制[J].石油钻采工艺,2012,34(4):93-95.
- [16] 陈振宏,王一兵,孙 平.煤粉产出对高煤阶煤层气井产能的影响及其控制[J].煤炭学报,2009,34(2):229-232.