

煤层气井完井用 PE 筛管的地质适应性分析

时文^{1,2} 申瑞臣¹ 屈平³ 苏海洋² 付利¹

1. 中国石油集团钻井工程技术研究院 2. 中国石油勘探开发研究院 3. 中国石油海外勘探开发公司

时文等. 煤层气井完井用 PE 筛管的地质适应性分析. 天然气工业, 2013, 33(4): 85-90.

摘 要 煤层气井水平井段易垮塌是导致煤层气开发过程中产量难以提升的重要原因之一, 出于煤层气开采之后的采煤作业安全考虑, 金属材质的筛管被禁止下入煤层, 采用 PE 筛管完井则成为解决上述问题的重要途径。为分析 PE 筛管能否适用于易垮塌的煤层中, 利用断裂力学方法开展了煤层的井壁失稳机理分析, 并基于时间延迟效应原理分析了近井壁地带的煤岩裂纹尖端应力强度因子, 提出了在孔隙压力压降漏斗存在的情况下裂纹延展范围的判定方法。通过实例计算分析了煤岩垮塌可能对 PE 筛管造成的最大压力。利用室内单轴压缩机模拟大块煤岩掉落时 PE 筛管(外径 50.8 mm, 壁厚 4.6 mm)单轴受压变形工况, 得到了管体抗挤性能和 PE 管体挤压破坏判别标准; 以实验结果为基础, 采用数值模拟软件分析了直径分别为 50.8、63.5、76.2、88.9、101.6 mm 筛管的抗挤性能, 从而优选出了不同尺寸筛管的合理壁厚, 对煤层气井完井用的 PE 筛管的研制和应用具有一定的指导意义。

关键词 煤层气 完井 煤岩 裂纹 垮塌 PE 筛管 抗挤性能 优化设计

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2013.04.015

Geological adaptability analysis of PE screen pipes for coalbed methane (CBM) well completion

Shi Wen², Shen Ruichen¹, Qu Ping³, Su Haiyang², Fu Li¹

(1. *CNPC Drilling Research Institute, Beijing 100083, China*; 2. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100034, China*; 3. *China National Oil and Gas Exploration & Development Corporation, CNPC, Beijing 102249, China*)

NATUR. GAS IND. VOLUME 33, ISSUE 4, pp.85-90, 4/25/2013. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The collapse-proneness of coal beds in horizontal sections of a CBM well is one of the main inhibiting factors for CBM production enhancement. In view of the safety of following coal mining operation, metal pipes are not allowed to run under the coal beds. As a result, PE screen completion is an important solution to the above problem. In order to determine whether PE screen pipes are applicable or not to the coal beds susceptible to collapse, the wellbore instability mechanism of coal beds was analyzed by means of fracture mechanics, and the stress intensity factors at the fracture end of the coal rocks close to wellbore was discussed based on time delay effect, a method was further developed to judge the crack extension range in the presence of pore pressure drop funnel. The greatest potential compression force exerted on PE screen by collapsed coal rocks was investigated by example calculation. The uniaxial compressor was used in the laboratory to simulate the deformation of PE screen (outer diameter: 50.8 mm; wall thickness: 4.6 mm) caused by the falling of large coal rock blocks. The compression resistance and compression rupture judgment criteria of PE screen were determined in the test. Based on the test results, the simulation software was applied to analyze the compression resistance of screens with diameters of 50.8, 63.5, 76.2, 88.9, and 101.6 mm respectively. Finally, the optimal wall thickness of different-sized PE screen pipes was determined, which gives certain instructions to the development and application of PE screen pipes in CBM well completion.

Key words: CBM, well completion, coal rock, fracture, collapse, PE screen, compression resistance, optimal design

基金项目: 国家科技重大专项课题“煤层气井完井技术集团及装备”(编号: 2011ZX05037-001)。

作者简介: 时文, 1988 年生, 硕士研究生; 现在中国石油集团钻井工程技术研究院煤层气与储库工程所从事煤层气完井研究工作。

地址: (100034) 北京市海淀区四季青镇北坞村路甲 25 号静芯园 K 座 304。电话: (010) 52781875。E-mail: swdrf@cnpc.com.cn

水平井已经成为煤层气开发的重要方式之一,国内在煤层气井水平井段多采用裸眼完井,开采期间的井壁煤岩破裂垮塌阻塞流道已经成为制约煤层气效益开发的重要因素之一。出于后期采煤作业的安全需要,金属管材的筛管被禁止下入井内,一种类似于连续管的PE材质筛管已经规模应用于澳大利亚煤层气U型水平井及多分支水平井的水平井段完井,在国内也开始了研究应用工作。由于PE筛管的材质性能较普通石油用金属管有很大不同,其在井下的适应性有待考察论证。本文中地质适应性分析主要考察井壁失稳情况下PE筛管能否有足够的支撑能力。

1 煤层气井眼失稳类型

1.1 煤粉及小煤块堆积

在生产过程中,煤层气井水平井段若采用裸眼完井,受抽吸排水产生扰动和煤岩自身不稳定性的综合影响,极易出现大量煤粉产出和小煤块掉落的现象,严重时会出现井眼垮塌阻塞井眼流道,进而影响煤层气井产量。同时,大颗粒或高浓度煤粉会导致卡泵^[1]事故,影响排采效果。采用筛管完井可以有效地解决这些问题。煤粉的产出及小煤块的掉落虽然是煤层气井眼失稳的主要形式,但其对筛管的安全不构成直接威胁,故在此不进行详细讨论。

1.2 大块掉落

煤岩中发育自生裂缝,工程扰动亦会产生新的裂缝。当施工产生的裂缝延展交汇,或与煤岩自生的天然裂缝交汇贯通之后,水平井眼井筒上方的大块煤岩可能会掉落,形成对筛管造成挤压,对于PE筛管的适应性而言,这是主要考虑的问题。

2 煤岩掉落机理分析

2.1 裂缝类型及断裂判据

应用断裂力学对煤岩的破裂过程分析后认为,煤岩的破坏是一个裂缝的延展和交汇的过程。根据受力的情况,裂缝分为张开型(I型)、滑开型(II型)和撕开型(III型)。由于裂缝的复杂性,一般简化为二维裂纹^[2]来进行研究。裂缝的静止、平衡或发展,都与裂纹尖端附近的应力场有直接关系, Irwin 通过裂纹尖端附近应力场的研究,提出了裂纹尖端应力强度因子(简称应力强度因子)的概念,并据此建立了断裂判据。分别用 K_I 、 K_{II} 、 K_{III} 来表征 I 型、II 型、III 型三种裂纹的应力强度因子,当应力强度因子达到临界值时裂纹会发生延展。应力强度因子的大小同裂纹的形状、尺寸以及所在区域应力场有关^[3]。

2.2 煤层井壁失稳的时间延迟效应

在煤层钻井及排采过程中发现,原本稳定的井眼,在经过一段时间之后,经常会发生垮塌现象,在煤岩中穿行数百米甚至上千米的水平井眼中,此类现象更为严重。屈平等^[4]人据此分析了煤层井壁稳定的时间延迟效应,认为孔隙压力的变化是延迟效应的主因,孔隙压力主要通过影响应力强度因子的大小来决定裂纹是否开始延展。

对于如图1所示的一段受到压剪作用的裂纹,在孔隙压力 p_i 为0的情况下,其应力强度因子为:

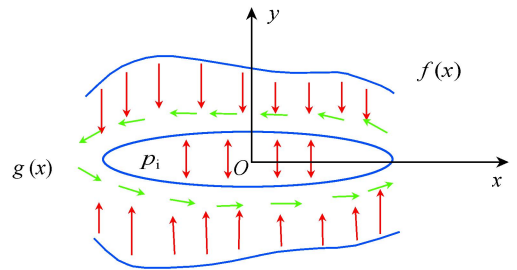


图1 裂纹受力示意图

$$K_I = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a f(x) \sqrt{\frac{a+x}{a-x}} dx \quad (1)$$

$$K_{II} = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a g(x) \sqrt{\frac{a+x}{a-x}} dx \quad (2)$$

式中 a 为裂纹的半长; x 为裂纹的局部坐标; $f(x)$ 和 $g(x)$ 分别为作用在裂纹表面的压力和剪切力^[5]。在考虑孔隙压力 p_i 的情况下:

$$K_I = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a [f(x) - p_i] \sqrt{\frac{a+x}{a-x}} dx \quad (3)$$

$$K_{II} = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a g(x) \sqrt{\frac{a+x}{a-x}} dx \quad (4)$$

孔隙压力的存在将缓解裂纹的受压作用,对 I 型裂纹的应力强度因子产生直接影响。其他条件不变的情况下,孔隙压力下降时, I 型裂纹的应力强度因子增大。近井壁地带由于排采形成压降漏斗,距离井眼不同距离的地层孔隙压力不同,当裂纹受力情况已知时,可以通过计算应力强度因子来判别裂纹是否会发生延展。

2.3 孔隙压力作用下的近井壁裂纹强度因子分析

对于某井眼附近的裂纹建立模型,如图2所示。

裂纹表面的压力和剪切力分别为:

$$f(x) = \alpha \sin^2 \beta + \alpha_0 \cos^2 \beta \quad (5)$$

$$g(x) = (\alpha - \alpha_0) \sin^2 \beta \cos^2 \beta \quad (6)$$

式中 α 与 α_0 分别为裂纹所在区域的垂直地应力和水平地应力; β 为裂纹轴线与垂直方向之间夹角, ($^\circ$)。

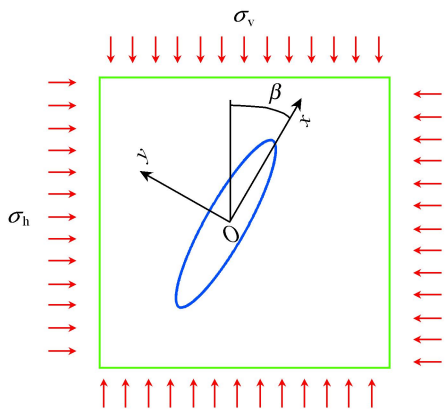


图 2 近井壁地带某裂纹模型图

由式(3)~(6),在孔隙压力存在的条件下,裂纹尖端强度因子为:

$$K_I = (\alpha \sin^2 \beta + \alpha \cos^2 \beta - p_i) \sqrt{\pi a} \quad (7)$$

$$K_{II} = (\alpha - \alpha) \sin^2 \beta \cos^2 \beta \sqrt{\pi a} \quad (8)$$

在裂纹延展的判断依据方面,由薛昌明在 1972 年提出的应变能密度因子断裂判据^[6],在裂纹端部,单位体积内的应变能密度可表示为:

$$W = \frac{1}{r} (\alpha_1 K_I^2 - 2\alpha_2 K_I K_{II} + \alpha_3 K_{II}^2 + \alpha_3 K_{III}^2) \quad (9)$$

式中系数 α_1 、 α_2 、 α_3 分别表示为:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \frac{1}{\pi \mu} [(3 - 4\nu - \cos \theta)(1 + \cos \theta)] \\ \alpha_2 = \frac{1}{16\pi \mu} (\cos \theta - 1 + 2\nu) 2 \sin \theta \\ \alpha_3 = \frac{1}{\pi \mu} [4(1 - \nu)(1 - \cos \theta) + (1 + \cos \theta)(3 \cos \theta - 1)] \\ \alpha_3 = \frac{1}{4\pi \mu} \end{cases} \quad (10)$$

式中 r 为单元距裂纹尖端距离; θ 为破裂角,即潜在裂纹延展方向同裂纹轴线之间的角度; ν 为泊松比; $\mu = E/[2(1 + \nu)]$; E 为弹性模量。

由上式可知, W 具有 $1/r$ 的奇异性,引入应变能密度因子 S ,有:

$$W = S/r \quad (11)$$

则式(9)可改写为

$$S = \alpha_1 K_I^2 - 2\alpha_2 K_I K_{II} + \alpha_2 K_{II}^2 + \alpha_3 K_{III}^2 \quad (12)$$

应变能密度因子理论有 2 条基本假设:

1) 裂纹沿应变能密度因子极小值 S_{min} 的方向延展,即破裂角 θ 应满足条件:

$$\frac{\partial S}{\partial \theta} = 0, \frac{\partial^2 S}{\partial \theta^2} > 0 \quad (13)$$

2) 当 S_{min} 达到一定临界值时裂纹开始延展。而在工程计算当中,可用 $K_I + K_{II} > K_{Ic}$ 作为裂纹开始延展的判定依据,其中 K_{Ic} 为临界应力强度因子。

在分析上井壁垮塌问题时,主要考虑裂纹向上延展的深度,认为裂纹延展到的层位均为潜在的垮塌区域。裂纹轴线在垂直方向时, $\beta = 0^\circ$, 裂纹为纯 I 型裂纹:

$$\begin{cases} K_I = (\alpha - p_i) \sqrt{\pi a} \\ K_{II} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

把式(10)、(12)带入式(13)计算,并把裂纹轴线在垂直方向的 K_I 、 K_{II} 计算式(14)带入式(13)解得破裂角为 0° 。

可见,对于垂直裂纹,其延展方向将沿着其轴线方向发生。由于排采作业持续进行,将在近井壁地带形成压降漏斗,孔隙压力随着距井眼距离的增加而逐渐恢复至其所在地的正常值。可认为在裂纹向上延展的过程中,裂纹长度增大,而孔隙压力同样存在一个增大的过程^[7]。裂纹每延展一定长度即重新判定裂纹的应力强度因子是否依然满足延展条件,通过不断迭代来判断裂纹延展的终止层位,继而判定可能的掉块最大高度。

2.4 实例计算

以某水平井为例,煤层顶部埋深 800 m,井眼上方煤层厚度 5 m,所在层垂直地应力 15 MPa,水平地应力 12 MPa,排采过程中井底压力控制在 4.15 MPa^[8],井眼直径为 152.4 mm,井筒周围孔隙压力分布如图 3 所示:

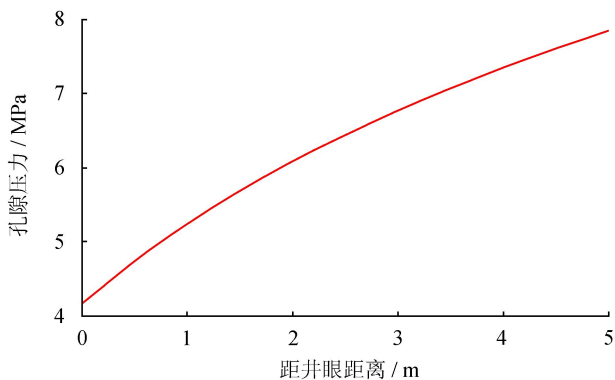


图 3 孔隙压力分布图

根据 Karl 等人的实验结果^[9],煤岩中裂纹的临界应力强度因子 K_{Ic} 取 $0.2 \text{ MPa}/\sqrt{m}$ 。分析 K_{II} 为 0 时 K_I 随延展长度的变化趋势(图 4),由图 4 可见应力强度因子随着距井眼距离的增加有一个递增到稳定的趋势,即达到了裂纹开始延展的条件后,裂纹将持续延展。

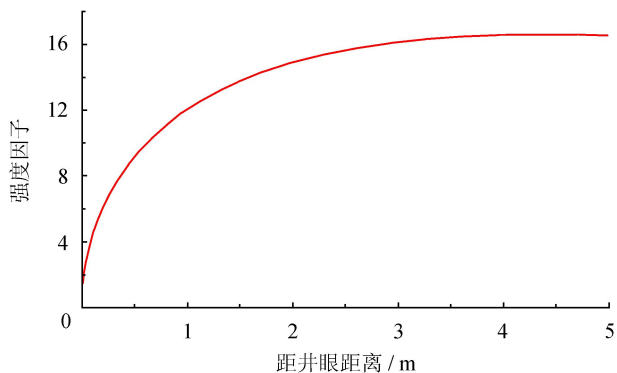


图 4 应力强度因子变化曲线图

为分析较大范围内裂纹的应力强度因子的总体变化情况,假设煤层为巨厚层,由图 5 可以看出裂纹开始延展之后,由于孔隙压力的变化, K_I 出现先增大后减小的波动,当孔隙压力达到所在地区的正常孔隙压力时, K_I 达到极小值,而通过计算对比,此时裂纹的应力强度因子依然要大于临界值,即裂纹将一直延展至煤层顶部。

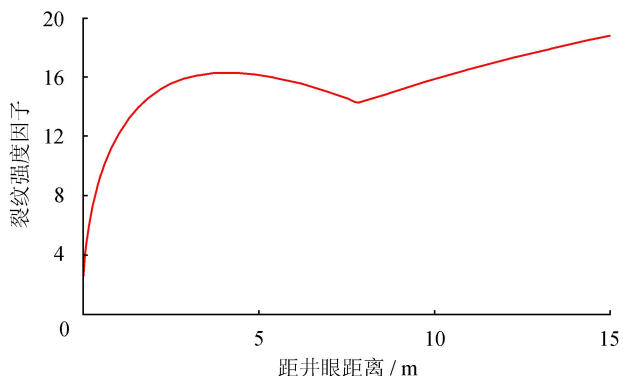


图 5 厚煤层应力强度因子变化曲线图

可见,裂纹在中途并未终止延展,将一直延展到煤层顶部,故对于筛管的地质适应性分析中,应按上部煤层整体掉落的极端条件来考虑。考虑到垮塌时能够作用在筛管上的最大掉块宽度为井筒直径,则可能掉落的最大煤岩造成的压力为:

$$F = \rho ghDL \quad (15)$$

式中 ρ 为煤岩密度, kg/m^3 ; h 为煤层厚度, m ; D 为井眼直径, m ; L 为掉落长度, m 。以煤层厚度 5 m、煤岩密度为 950 kg/m^3 计算,不考虑地层挤压等影响,作用在单位长度 (m) 筛管上的最大掉块压力为 7 094 N。

3 筛管抗挤性能分析

3.1 外挤工况模拟实验

煤岩掉落使筛管单侧受压,非均匀载荷增大了挤毁筛管的可能性^[10],大块煤岩掉落时筛管单侧受压的

工况在室内单轴压力试验机上进行了模拟实验。

实验选用已经在山西省沁水盆地水平井段完井应用的 PE 筛管,PE 筛管参数:外径 50.8 mm,壁厚 4.6 mm。截取 25 cm 长度的筛管,从 1 500 N 开始加压(图 6),一直加压至 9 000 N。图 7 为筛管受到 9 000 N 外挤力的变形情况。

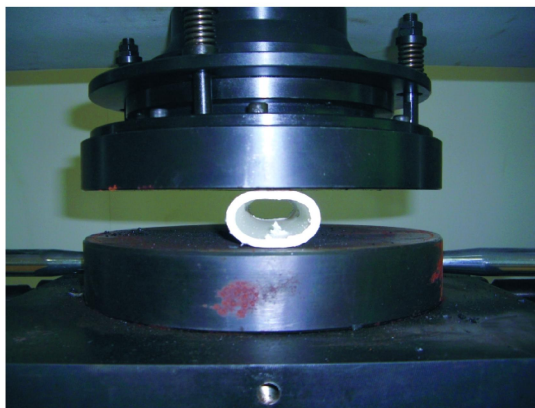


图 6 单侧受压实验图

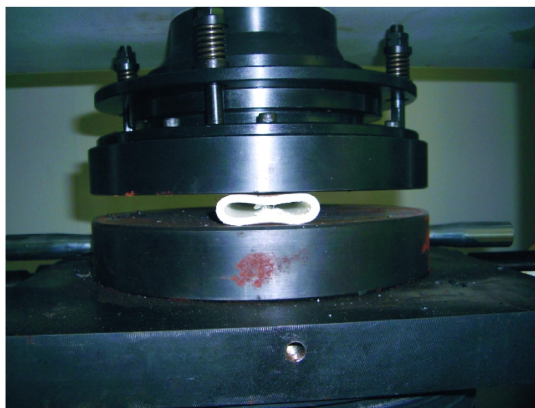


图 7 外挤力 9 000 N 下筛管变形图

实验每增加 500 N 的外挤力就压持 10 min,然后测量并记录筛管受压变形后的长短轴的长度,用长短轴之比定量表征 PE 筛管受压变形情况(图 8)。

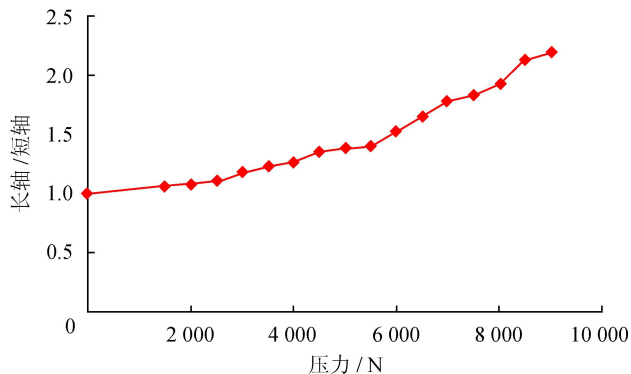


图 8 筛管受压变形情况图

可以看出,随着压力增加,曲线斜率有上升趋势,分析认为这是由于 PE 筛管抗挤性能随着初始椭圆度的增加而降低所致^[11];在 6 000 N 之后变形曲线上增加快。

3.2 管体破坏判别

从开始加压至 PE 筛管管体被压瘪期间断续出现轻微材料断裂声音,管体两侧出现微小裂纹,但继续加压并未出现明显管体破裂。将 PE 筛管压瘪后卸压,管体有 20%~40% 的圆度恢复率。可见,PE 筛管具有较好的韧性,对于筛管是否挤毁的判断,不宜以管体破裂作为依据。筛管变形过程中,流道面积不断减小,考虑到 PE 筛管的主要作用是井壁垮塌时支撑井壁提供过流通道,将变形后的筛管视作椭圆,分析流道面积的变化情况。

考虑管体自身的圆度恢复率,将 PE 筛管受压变形后长宽比达到 1.5、相对流道面积降到 80% 作为判断管体挤毁的标准(图 9),分析得出 PE 筛管的抗挤值为 24 000 N/m,并以此作为不同尺寸筛管壁厚优选的依据。以煤层气水平井常见的 $\varnothing 152.4$ mm 井眼为例, $\varnothing 50.8$ mm 的抗挤值折算为 16.58 m 垮塌煤层高度,超过绝大多数正在进行煤层气开发的煤层厚

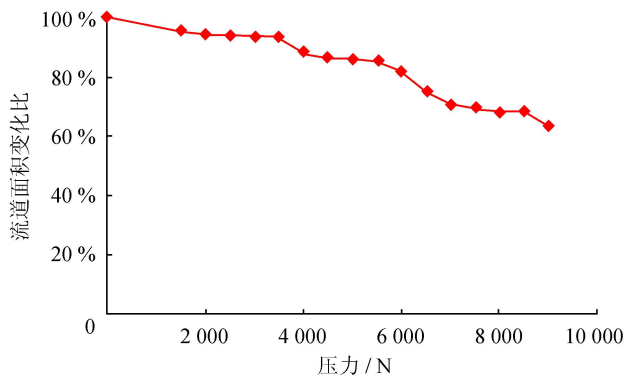


图 9 筛管受压变形的流道面积变化情况图

度^[12],可见目前使用的 $\varnothing 50.8$ mm PE 筛管的抗挤性能足以适应井下垮塌情况。

4 筛管尺寸优选

目前投入使用的筛管基本上全为 $\varnothing 50.8$ mm 筛管,更大尺寸的 PE 筛管系列尚未成型,利用数值模拟软件对不同尺寸的筛管进行抗单侧外压分析,以确定合适的筛管壁厚。为保证数值模拟结果的可信度,比照 $\varnothing 50.8$ mm 筛管的单轴压缩实验,模拟了同样工况下的筛管变形情况,图 10 为模拟筛管受压变形的云

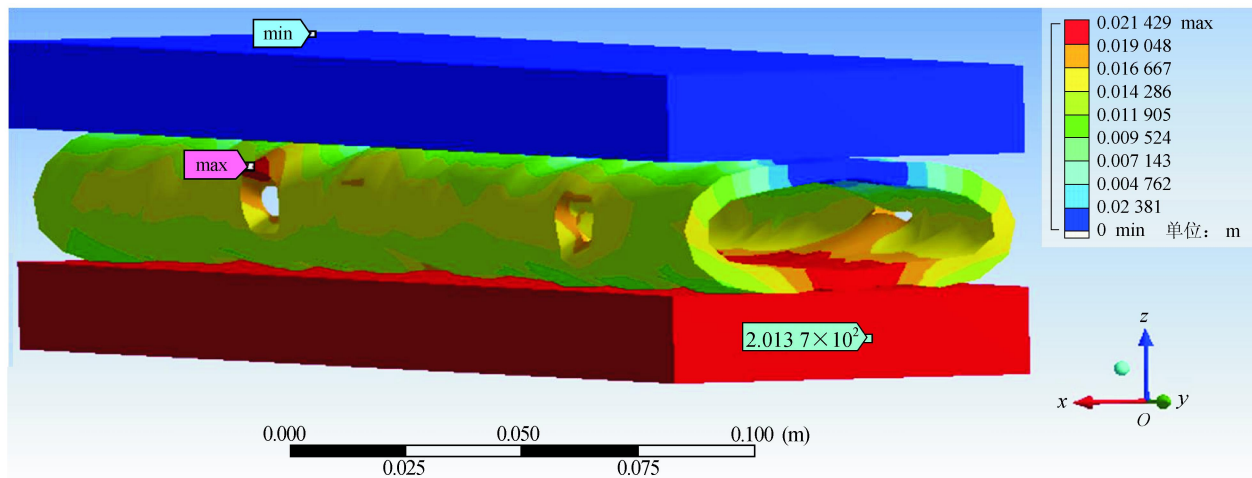


图 10 模拟 9 000 N 外挤力作用下筛管变形情况图

图,以不同颜色来表征不同的变形位移大小。

将模拟结果同实验结果进行对比(图 11):模拟结果同压缩实验结果基本一致,而在同样的压力作用下,模拟变形结果略大于实验结果,在抗挤实验确定的筛管挤毁判据下,利用软件优选的筛管厚度能够保证筛管的使用安全。以不同尺寸筛管受压模拟结果为基础,参考给水用 PE 管材国家标准 GB/T 13663—2000,优选出不同尺寸 PE 筛管的合理壁厚(表 1)。

5 结论

1)煤层气水平井段大量煤粉产出及小煤块掉落会对煤层气井产量造成较大影响。采用 PE 筛管完井可以有效地解决这一问题。钻井及排采过程中的工程扰动会造成煤岩中裂纹的延展及交汇,导致井眼中可能会出现大块煤岩掉落,这是对 PE 筛管的主要威胁。

2)排采过程中孔隙压力的不均匀分布对裂纹的延

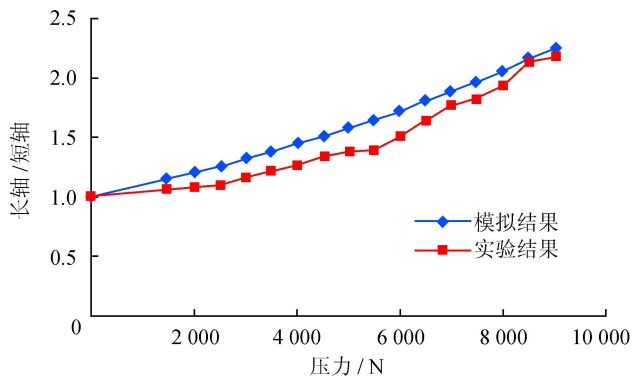


图 11 模拟与实验的长短轴比值对比图

表 1 不同尺寸 PE 筛管壁厚推荐表 mm

筛管外径	筛管壁厚	筛管外径	筛管壁厚
63.5	5.8	76.2	6.8
88.9	8.0	101.6	9.2

展有重要影响。在压降漏斗范围内,由于孔隙压力的变化,裂纹的应力强度因子会出现先增大后减小的波动,但裂纹会有一直延展到煤层顶部的可能性,因此筛管的适应性应考虑井眼上方煤岩整体掉落的极端情况。

3)通过对筛管的单轴压缩实验可知,PE 筛管在受压过程中并未出现明显的管体破裂,判断 PE 筛管挤毁应以一定程度的管体变形和管内流道面积变化作为判据。现有 $\varnothing 50.8$ mm 筛管具有足够的抗挤性能,能够适用于易垮塌的煤层环境。

4) $\varnothing 50.8$ mm 筛管受压的数值模拟结果同实验结果一致性较好,以数值模拟为基础优选出来的不同尺寸筛管壁厚规格具有较高的可信度。

参 考 文 献

[1] 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):86-90.
LIU Shenggui, HU Aimei, SONG Bo, et al. Coal powder concentration warning and control measure during CBM well drainage [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37 (1):86-90.

[2] 屈平.煤岩井壁稳定力学机理及工程应用研究[D].北京:中国石油勘探开发研究院,2011.
QU Ping. Mechanical analysis on borehole stability and application [D]. Beijing: Research Institute of Petroleum Exploration and Development, 2011.

[3] 李庆芬.断裂力学及其工程应用[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1998:17-25.
LI Qingfen. Application of fracturing mechanics [M]. Har-

bin: Harbin Engineering University Press, 1998:17-25.

[4] QU Ping, SHEN Ruichen, FU Li, et al. Time delay effect due to pore pressure changes and existence of cleats on borehole stability in coal seam [J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 85(2):212-218.

[5] GENTZIS T. Stability analysis of a horizontal coalbed methane well in the rocky mountain front ranges of south-east British Columbia, Canada [J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 77(3/4):328-337.

[6] 尹祥础.固体力学[M].北京:地震出版社,2011.
YIN Xiangchu. Solid mechanics [M]. Beijing: Seismological Press, 2011.

[7] 袁小平,李波涛,刘红岩,等.基于压缩载荷下微裂纹扩展的微观力学岩石弹塑性损伤模型研究[J].中南大学学报:自然科学版,2012,43(8):3201-3208.
YUAN Xiaoping, LI Botao, LIU Hongyan, et al. Elasto-plastic damage model of rock based on micro-crack propagation under compression [J]. Journal of Central South University: Science and Technology Edition, 2012, 43(8): 3201-3208.

[8] 刘新福,蔡耀光,刘春花,等.气水两相煤层气井井底流压预测方法[J].石油学报,2010,31(6):998-1003.
LIU Xinfu, QI Yaoguang, LIU Chunhua, et al. Prediction of flowing bottomhole pressures for two-phase coalbed methane wells [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(6):998-1003.

[9] KARL ZIPF R, Jr. BIENIAWSKI Z T. Mixed mode testing for fracture toughness of coal based on critical-energy-density [C]// paper 86-0016 presented at the 27th U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), 23-25 June 1986, Tuscaloosa, Alabama, USA. New York: SPE, 1986.

[10] 殷有泉,李平恩.非均匀载荷下套管强度的计算[J].石油学报,2007,28(6):138-146.
YIN Youquan, LI Ping'en. Computation of casing strength under non-uniform load [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28 (6):138-146.

[11] 王同涛,闫相祯,杨秀娟.基于塑性铰模型的煤层气完井筛管抗挤强度分析[J].煤炭学报,2010,35(2):273-277.
WANG Tongtao, YAN Xiangzhen, YANG Xiujuan. Collapse pressure of perforated liner casing in CBM exploration based on plastic hinge model [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2):273-277.

[12] 樊生利.沁水盆地南部煤层气勘探成果与地质分析[J].天然气工业,2001,21(4):35-38.
FAN Shengli. Exploration result and geological analysis of coal-bed gas in the south part of Qinshui Basin [J]. Natural Gas Industry, 2001, 21(4):35-38.