

沁水盆地南部煤层气井压裂失败原因分析

刘世奇¹, 桑树勋¹, 李仰民², 李梦溪², 刘会虎¹, 张建国²

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 华北油田公司 山西煤层气分公司, 山西 晋城 048000)

摘要: 依据煤层气井压裂施工的工艺参数, 以沁水盆地南部 12 口煤层气井压裂施工失败为例, 分析了沁水盆地南部煤层气井压裂失败的主要控制因素, 研究认为: 井口刺漏、高压停泵和煤储层力学性质是沁水盆地南部煤层气井压裂施工失败的主要控制因素; 井口刺漏主要是由施工压力过高、井口老化造成的; 高压停泵主要是由砂堵引起的, 井口刺漏、高压停泵与砂堵之间相互影响及促进; 砂堵受施工工艺及地质因素的影响; 研究区煤储层具有低弹性模量、高泊松比的特点, 地层开启难度大且裂缝难以延伸; 压裂施工前, 应做好煤储层特征的研究、压裂设备的选择、压裂工艺的设计等, 减少工程事故的发生。

关键词: 煤层气井; 水力压裂; 砂堵; 刺漏; 高压停泵; 沁水盆地南部

中图分类号: P618.11

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2012)06-0108-05

Analysis on Fracturing Failure Cause of Coal Bed Methane Well in South Part of Qinshui Basin

LIU Shi-qi¹, SANG Shu-xun¹, LI Yang-min², LI Meng-xi², LIU Hui-hu¹, ZHANG Jian-guo²

(1. MOE Key Lab of Coal Bed Methane Resources and Deposit Process, School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Shanxi Coal Bed Methane Branch, Huabei Oilfield Company, Jincheng 048000, China)

Abstract: Taking the technical parameters of the fracturing operations in the coal bed methane well as the basis and taking the fracturing failures of the 12 coal bed methane wells in south part of Qinshui Basin as an example, the paper analyzed the main control factors of the fracturing failures of the coal bed methane wells in south part of Qinshui Basin. The study held that the tabbing leakage of mine shaft head, the stop of the high pressure pump and the mechanics property of the coal seam would be the main control factors of the fracturing failure in the coal bed methane wells of the south part of Qinshui Basin. The stabbing leakage of the mine shaft head was caused by the construction pressure too high and the aging of the mine shaft head. The stop of the high pressure was mainly caused by the sand jammed. There were mutual influences and promotion between the stabbing leakage of the mine shaft head, the stop of the high pressure pump and the sand jammed. The sand jammed would be affected by the construction technology and the geological factors. The coal seams in the study area would have the features of the low elastic modules and high Poisson's ratio. The strata would have high difficult in excavation and the crack would be difficult to be expanded. Before the fracturing construction, the study on the coal seam features, the selection of the fracturing equipment and the design of the fracturing technology should be well done to reduce the project accident occurred.

Key words: coal bed methane well; hydraulic fracturing; sand jammed; stabbing leakage; stop of high pressure pump; south part of Qinshui Basin

煤储层裂隙是煤层气产出的主要通道。我国的煤储层裂隙连通性较差, 煤储层原始渗透率差, 不利于煤层气的产出。为了获得较高的煤层气井产

能, 必须对煤储层进行改造, 增大煤储层渗透率^[1]。煤层气井水力压裂是目前常用的煤储层改造措施, 煤层气井压裂施工是一个复杂的工程过

收稿日期: 2012-01-30; 责任编辑: 张 扬

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2007AA06Z220)

作者简介: 刘世奇(1984—), 男, 山东昌乐人, 博士研究生。Tel: 13407531129, E-mail: liushiqi19840920@163.com

网络出版时间: 2012-06-15 10:27:00; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20120615.1027.201206.108_029.html

引用格式: 刘世奇, 桑树勋, 李仰民, 等. 沁水盆地南部煤层气井压裂失败原因分析[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(6): 108-112.

程,受多种因素的影响,因而压裂施工的失败率较高,一旦压裂失败不仅会造成巨大的经济损失,还可能对煤储层造成伤害,影响到煤层气后续的开发,严重时甚至导致煤层气井报废。压裂过程中煤储层滤失系数过大、压裂液的配比、压裂砂的用量、泵排量、注入压力等均有可能造成煤层气井压裂失败。笔者以沁水盆地南部为研究区,针对该区煤层气直井压裂的施工工艺,对压裂失败的煤层气井进行分析,总结了压裂失败的原因,探讨了压裂施工成败的主要影响因素以及应采取的措施,为以后的煤层气井压裂施工提供参考。

1 工程概况

沁水盆地南部研究区自 2006 年以来共开发了近 400 口煤层气井,是中国唯一实现煤层气商业性开发的地区。研究区煤层气井在开发前基本实现水力压裂甚至二次压裂施工,压裂时采用的压裂液类型为清洁压裂液(活性水)。压裂时所使用的前置液量变化于 $150 \sim 2\,309\text{ m}^3$,携砂液量变化于 $150 \sim 290\text{ m}^3$,顶替液量变化于 $5 \sim 10\text{ m}^3$,前置液排量、携砂液排量、顶替液排量均为 $5 \sim 8\text{ m}^3/\text{min}$,前置液砂比 $5\% \sim 10\%$,携砂液砂比 $10\% \sim 15\%$,平均砂比在 $5\% \sim 30\%$ 变化,注砂量 $10 \sim 50\text{ m}^3$,破裂压力 $15 \sim 30\text{ MPa}$,停泵压力 $5 \sim 40\text{ MPa}$,前置液注入压力 $10 \sim 35\text{ MPa}$,携砂液注入压力 $10 \sim 30\text{ MPa}$,顶替液注入压力 $5 \sim 30\text{ MPa}$ 。研究区近 400 口煤层气压裂井,共有 12 口井在施工过程中出现故障,事故发生率约为 3.7% ,更多的压裂井虽然压裂施工完成,但压裂效果不明显。

沁水盆地南部煤层气井压裂施工的一般步骤是先进行循环试压,试压合格后开始注入前置液,并按照设计泵注程序开始加砂,加砂完毕开始注入携砂液及支撑剂,携砂液注入完毕后开始注入顶替液,最后测降压,施工完成。前置液注入阶段一般加粉砂或细砂,主要目的是防止滤失;携砂液一般加 $0.43 \sim 0.85$ 及 $0.85 \sim 1.18\text{ mm}$ 石英砂作为支撑剂;顶替液一般不加砂。

2 煤层气井压裂失败因素分析

煤层气井压裂施工失败的原因很多,为了分析沁水盆地南部煤层气压裂失败的主要因素,以研究区 12 口煤层气压裂井为例,通过对施工工艺参数

的分析,探讨该地区煤层气井压裂施工失败的主要因素。表 1 为沁水盆地南部 12 口煤层气压裂失败井工艺参数,1—3 号、5—10 号、12 号煤层气井压裂失败的原因是高压停泵;4 号、11 号煤层气井压裂失败的主要原因是井口刺漏。1 号井一次压裂在前置液注入阶段失败;2—4 号、8 号、10 号井一次压裂和 12 号井二次压裂在顶替液注入阶段失败;5—7 号、9 号、11 号、12 号井一次压裂和 8 号井二次压裂及 12 号井三次压裂在携砂液注入阶段失败。

表 1 沁水盆地南部 12 口煤层气压裂失败井主要工艺参数

井号	压裂次数	施工成败	破裂压力/MPa	施工压力/MPa	平均砂比/%
1	一次压裂	失败	18.99	5.99 ~ 35.03	5.87
	二次压裂	成功	19.74	3.74 ~ 19.74	2.78
2	一次压裂	失败	26.80	20.30 ~ 35.30	6.20
	二次压裂	成功	30.00	24.70 ~ 30.00	11.20
3	一次压裂	失败	26.38	17.39 ~ 38.02	20.37
	二次压裂	成功	32.33	13.91 ~ 32.33	13.94
4	二次压裂	成功	18.62	15.27 ~ 18.62	10.00
5	一次压裂	失败	20.50	20.07 ~ 31.94	4.00
	二次压裂	成功	34.00	20.79 ~ 32.13	12.00
6	一次压裂	失败	14.82	7.11 ~ 38.45	15.05
7	一次压裂	失败	19.50	15.70 ~ 35.00	9.10
	二次压裂	成功	34.05	16.40 ~ 30.40	10.40
8	一次压裂	失败	34.00	18.90 ~ 35.00	11.30
	二次压裂	失败	34.40	30.60 ~ 35.00	10.30
9	一次压裂	失败	22.90	19.50 ~ 35.00	13.70
	二次压裂	成功	32.10	18.80 ~ 32.10	7.10
10	一次压裂	失败	17.60	11.80 ~ 35.00	25.00
	二次压裂	成功	25.80	21.10 ~ 25.80	10.80
11	二次压裂	成功	18.00	13.88 ~ 23.58	11.60
12	一次压裂	失败	29.50	18.02 ~ 28.81	7.80
	二次压裂	失败	18.00	22.28 ~ 34.98	2.50
	三次压裂	失败	29.50	25.23 ~ 32.24	5.40

注: 4 号井一次压裂施工失败,井口发生刺漏,导致停泵时间过长,沉砂堵塞缝口;11 号井一次压裂施工失败,井口发生刺漏,导致井口脱落,被迫紧急停泵。

2.1 高压停泵导致的压裂失败

1) 压裂砂比例过大。1 号井、5 号井一次压裂高压停泵的主要原因是前置液压裂砂比例过大(如 1 号井一次压裂的前置液量是 160.08 m^3 ,为二次压裂 192.13 m^3 的 83% ,而加砂量 9.44 m^3 为二次压裂 5.35 m^3 的约 1.8 倍),携砂能力弱,无

法有效地将压裂砂携带至地层深处,压裂砂分布不均匀,在井筒附近堆积(图1a),造成砂堵,携砂液难以注入地层,造成施工压力过高,高压停泵。

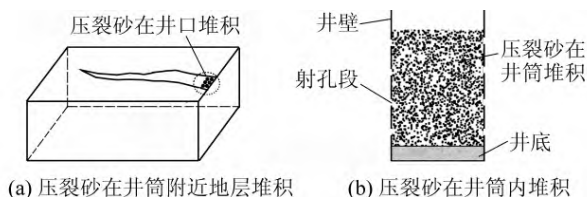


图1 压裂砂堆积示意

2) 射孔不完善。12号井二次压裂泵压过高是因为井段吃砂能力不足或细砂分布不均匀,在井筒内或井筒附近地层堆积,形成砂堵(图1)。井段吃砂能力不足的原因主要是射孔段打开不完全,射孔不完善,难以形成有效的压裂液流动通道。

3) 洗井不彻底。从后续的洗井情况来看,12号井三次压裂高压停泵是三次压裂前未进行洗井操作,一次、二次压裂的沉砂已经埋过射孔段(图1b),前2次压裂的压裂砂堆积,使得井底形成砂堵造成的。

4) 煤储层破裂压力较高。2号井、3号井、6号井、8号井、12号井一次压裂以及8号井二次压裂高压停泵的主要原因是破裂压力较高,施工压力过低或下降较快,导致裂缝未打开或打开不完全,造成砂堵或沉砂,后续压裂液难以注入地层,施工压力过高,被迫停泵。

5) 地层滤失系数较大。9号井、10号井高压停泵的主要原因是地层滤失系数较大,压裂液配比不成功或泵排量过小,导致压裂液在煤储层中滤失严重,施工压力下降过快^[2]。压裂液滤失量过大会大幅度降低压裂液在裂缝中的利用效率,使裂缝打开不完全,并造成裂缝端部脱砂^[3]。随着时间的增加,脱砂量增加,可能导致砂堵的形成,造成后续压裂液难以注入,高压停泵。9号井压裂液滤失严重的主要原因是压裂砂不合格,含有大块石块,导致3台主压泵车出现空泵而无法使用,施工排量最高只能达到 $5.2 \text{ m}^3/\text{min}$,排量过低;10号井压裂液滤失严重的主要原因是温度较低,压裂液配比不成功^[4]。另外,地层滤失系数较大还大幅度降低了1—4号井、8号井的压裂液携砂能力,促进了砂堵、沉砂的形成。

6) 裂缝打开不规则。7号井一次压裂是煤储

层自身原因造成的。7号井一次压裂高压停泵的主要原因是煤储层非均质性或自身结构发育,导致煤储层裂隙打开不规则,呈“之”字形(图2),石英砂在裂隙拐角处堆积,施工过程中没能冲开堆积的石英砂,形成砂堵,造成泵压过高,具体表现在注入压力波动性变化上。

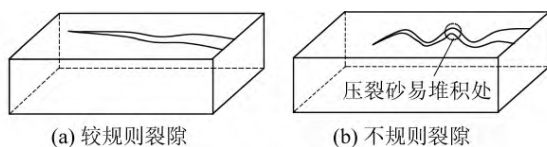


图2 裂隙示意

由前面的分析可以看出,高压停泵主要是由于压裂砂比例过大、射孔不完善、洗井不彻底、煤储层破裂压力较高、地层滤失系数较大、裂缝打开不规则等引起的砂堵造成的。

2.2 井口刺漏导致的压裂失败

4号和11号井一次压裂失败的原因是井口发生刺漏,被迫紧急停泵,施工失败。4号井由于停泵修井时间过长,还造成了沉砂,形成砂堵。井口刺漏主要是由施工压力过大、井口老化或不合格造成的,井口刺漏会导致井喷、砂堵等事故,造成压裂施工失败^[5]。一旦发生井口刺漏必须停泵检修,若检修时间过长,会导致压裂砂在井筒沉降,形成砂堵,严重时会造成砂埋。另外,砂堵、裂缝打开不完全、射孔不完善等可能造成施工压力明显上升,当压力上升到一定程度时可能引起井口刺漏。

2.3 煤储层力学性质导致的压裂失败

煤层气井压裂过程中,煤储层及其顶底板的力学性质很大程度上决定了压裂裂缝的开启、扩展及闭合,杨氏模量和泊松比是其中2个重要的力学参数。根据Lame方程,压裂过程中压裂裂缝宽度与杨氏模量成反比,在泵排量一定的情况下,杨氏模量越小,裂缝宽度越大,裂缝越难以延伸;而泊松比越高则地层水平应力增大,从而导致地层难以开启^[6-10]。表2为沁水盆地南部12口煤层气压裂失败井所在煤储层的主要力学参数。由表2可以看出,与煤层顶底板相比,12口煤层气井所在煤储层的泊松比与煤层顶底板相差不大,而杨氏模量远小于煤层顶底板,所以相对于煤层顶底板岩石,煤储层具有低弹性模量和高泊松比的特点。由于煤储层与煤岩顶底板的力学性质存在明显差异,压裂裂缝一般被限制在煤层层段内,且煤储层杨氏模量相

对较低, 裂缝延伸难度大, 煤储层的泊松比较高, 压裂过程中煤储层的破裂压力较大, 煤层难以压开, 且容易闭合。煤储层的这种特点决定了压裂过程中需要较高的施工压力压开地层, 且裂缝延伸困难, 一旦施工压力较低就容易造成裂缝打不开或打开不完全, 压裂施工失败, 严重时可能造成砂堵。

表 2 沁水盆地南部 12 口煤层气压裂失败井主要力学参数

井号	泊松比			杨氏模量 / (10^4 MPa)		
	煤储层	煤层顶板	煤层底板	煤储层	煤层顶板	煤层底板
1	0.24	0.29	0.31	0.84	2.59	2.74
2	0.23	0.31	0.32	0.69	2.69	2.68
4	0.23	0.32	0.32	0.74	2.28	2.30
5	0.23	0.32	0.32	0.70	2.18	2.67
6	0.22	0.32	0.33	0.69	2.20	2.05
7	0.23	0.33	0.32	0.63	2.05	2.35
8	0.23	0.33	0.31	0.70	1.88	1.74
9	0.23	0.31	0.31	0.68	2.66	2.45
10	0.23	0.31	0.30	0.85	3.18	4.38
11	0.23	0.33	0.33	0.68	2.17	2.29
12	0.23	0.32	0.30	0.72	2.50	2.73

2.4 高压停泵、井口刺漏与砂堵之间的关系

由前面的分析可知, 导致沁水盆地南部煤层气井压裂失败的原因主要为: 井口刺漏和高压停泵。高压停泵主要是各种因素造成的砂堵导致的, 而井口刺漏是砂堵形成的原因之一, 砂堵导致的施工压力过高又可能引起井口刺漏, 所以高压停泵、井口刺漏与砂堵之间存在着相互关系。

施工压力过高是发生井口刺漏的重要原因, 若井口老化严重或材料不合格, 在施工压力较高的情况下, 就可能导致井口刺漏。一旦发生井口刺漏, 就需要停泵检修, 停泵检修过程中井筒中残存的压裂砂会发生沉降, 修井时间过长就会造成井底压裂砂堆积, 形成砂堵或砂埋, 影响后续压裂施工的进行。修井后, 如果未进行洗井或洗井不彻底, 会造成后续的压裂液难以注入, 引起高压停泵。而砂堵出现后, 通常会造成施工压力明显上升, 导致高压停泵, 若井口安全性较低, 施工压力上升过程中可能首先造成井口刺漏的发生。因此, 高压停泵、井口刺漏与砂堵之间是相互影响和促进的关系。

3 砂堵形成原因

砂堵是造成煤层气井压裂施工失败的最重要的

原因, 压裂过程中一旦出现砂堵, 会造成后续的压裂液和压裂砂难以注入地层, 泵压明显升高, 最后高压停泵, 严重时还可能造成刺漏、砂埋, 必须进行修井。造成砂堵的原因很多, 既有工程因素的影响也有煤储层特征的影响。沁水盆地南部煤层气井压裂过程中出现砂堵的原因总结起来主要有以下 6 个方面。

1) 压裂液携砂能力不足。压裂液携砂能力不足可能有 2 方面的原因: 一是压裂液配比不成功, 压裂液黏度低或稳定性差, 本身的携砂能力弱; 另一方面是砂比过高, 超出了压裂液的携砂能力^[2]。压裂液携砂能力不足会导致压裂砂难以进入煤层深部, 在井筒内或井筒附近的储层中堆积, 严重时会造成砂堵。

2) 压裂液滤失量过大。压裂液滤失量大的原因也主要有 2 种, 一方面是压裂液配比不成功, 另一方面是储层滤失系数大。压裂液滤失速度过快会造成泵压下降过快, 同时压裂液过快的滤失掉, 使得压裂砂分布不均匀, 在井口附近堆积, 无法被携带至储层深部, 形成砂堵^[2]。

3) 地层吃砂能力不足或裂缝不规则。地层吃砂能力不足会造成压裂砂难以注入地层, 在井筒内沉降, 形成砂堵。裂缝打开形状不规则, 呈“之”字形, 或有较大拐角, 会造成在拐角处压裂砂堆积, 难以被冲开, 形成砂堵^[2]。

4) 施工压力过低或泵排量过小。施工压力若低于储层的破裂压力, 会造成裂缝无法打开或打开不完全, 压裂砂无法挤入地层或无法深入地层, 压裂砂在井底或井筒周围煤储层堆积, 造成砂堵。泵排量过低可能造成压裂的携砂能力不足或压裂液的注入量与滤失量相当, 甚至低于滤失量, 导致井底憋压困难, 压裂砂在井筒附近沉降, 形成砂堵。

5) 射孔不完善。若采用套管完井, 在压裂之前需要进行射孔, 若射孔弹密度过小、弹径过小或射孔压力不足, 会造成射孔段打开不完全, 在压裂过程中, 压裂液流动通道小, 难以将煤层压开, 造成井底沉砂、砂堵^[11]。

6) 井口刺漏等施工事故。井口刺漏、空泵等施工事故也可能造成砂堵。由于压力过高、井口老化等原因, 压裂过程中井口可能出现刺漏, 井口刺漏出现后需要停泵修井, 若修井时间过长, 会导致井筒内出现沉砂现象, 造成砂堵^[12]。由于压裂砂

质量不合格,例如压裂砂中有大块的石块,或泵本身出现问题,可能导致空泵,造成排量过低,施工压力难以上升,裂隙未充分打开,压裂砂在井筒内或井筒附近地层堆积,形成砂堵^[13]。

4 施工建议

1) 压裂施工前要对压裂施工的设备、材料进行详细检查,特别是井口的老化程度、压裂泵工作是否正常、压裂砂质量是否合格等,尽量减少设备、材料造成的施工事故。

2) 压裂施工前应对煤储层特征做好充分的勘查,特别是煤储层的滤失系数、构造应力场、煤体结构等,并根据煤储层特征做好压裂设计,避免出现压裂液滤失过快、施工压力过低或泵排量过小造成的裂缝打开不完全等现象^[14]。

3) 压裂液的配比十分重要,应根据煤储层特征、压裂砂的比例及用量,合理配置,避免出现携砂能力不足、滤失过快的情况,在煤储层滤失系数不大的情况下,前置液中尽量不要加砂,减少砂堵的出现^[15]。

4) 射孔时,应根据套管材料、煤层厚度等煤储层特征合理设计射孔密度、射孔强度、射孔弹径,使射孔段充分打开。

5) 压裂施工过程中,应根据施工情况,及时调整施工方案,一旦出现砂堵,应立即停泵抽砂、洗井,防止砂埋的发生;若施工压力上升过快,在强行注入不成功的情况下,也应立即停止,避免井口刺漏和砂堵的出现^[16]。

5 结 论

1) 沁水盆地南部煤层气井压裂施工失败的主要原因是井口刺漏、高压停泵和煤储层力学性质。井口刺漏主要是由施工压力过高、井口老化造成的,井口刺漏会造成井喷、砂堵等施工事故;高压停泵主要是由于压裂砂比例过大、射孔不完善、洗井不彻底、煤储层破裂压力较高、地层滤失系数较大、裂缝打开不规则等引起的砂堵造成的;而研究区煤储层具有低弹性模量和高泊松比的特点,造成地层开启难度大,裂缝延伸困难。

2) 井口刺漏、高压停泵与砂堵之间相互影响和促进。沁水盆地南部煤层气井压裂施工过程中,砂堵形成的原因受工程因素及地质因素2方面的影

响,主要包括压裂液携砂能力不足、压裂液滤失量过大、地层吃砂能力不足或裂缝打开不规则、施工压力过低或泵排量过小、射孔不完善以及井口刺漏、空泵等工程事故等。

3) 沁水盆地南部煤层气井压裂过程中应注意设备选择、压裂施工设计,特别是井口的安全性、压裂液的配比、石英砂的选择和用量等,减少人为因素造成的影响。压裂过程中应根据施工进度,及时调整施工方案,避免砂堵、井口刺漏发生。

参考文献:

- [1] WANG P, MAO X B, LIN J B, *et al.* Study of the Borehole Hydraulic Fracturing and the Principle of Gas Seepage in the Coal Seam [J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2009, 1 (1): 1561 - 1573.
- [2] 李勇明, 李崇喜, 郭建春, 等. M 气藏压裂施工砂堵原因剖析 [J]. *钻采工艺*, 2008, 31 (2): 55 - 57, 64.
- [3] 李勇明, 王中武, 郭建春, 等. 天然裂缝开启前后的煤层压裂液滤失计算 [J]. *油气井测试*, 2006, 15 (1): 8 - 9, 12.
- [4] 宋景远. 煤层气井压裂液和支撑剂 [J]. *探矿工程: 岩土钻掘工程*, 1996 (6): 55 - 57.
- [5] 崔长国, 马玉生, 尚素芹, 等. 抽油泵泵阀刺漏机理研究与对策 [J]. *石油机械*, 2001, 29 (3): 41 - 43, 62.
- [6] 倪小明, 苏现波, 张小东. 煤层气开发地质学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 88 - 156.
- [7] 孟召平, 田永东, 李国富. 煤层气开发地质学理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 209 - 235, 236 - 261.
- [8] 时 伟. 沁水盆地南部煤储层压裂缝几何特征预测 [J]. *科技情报开发与经济*, 2010, 20 (13): 147 - 149.
- [9] 朱宝存, 唐书恒, 张佳赞. 煤岩与顶底板岩石力学性质及对煤储层压裂的影响 [J]. *煤炭学报*, 2009, 34 (6): 756 - 760.
- [10] 朱宝存, 唐书恒, 颜志丰, 等. 地应力与天然裂缝对煤储层破裂压力的影响 [J]. *煤炭学报*, 2009, 34 (9): 1199 - 1202.
- [11] 王志信. 射孔安全技术浅析 [J]. *测井技术*, 1994 (5): 368 - 372.
- [12] 杜现飞, 王海文, 陈 实, 等. 含硫超深井试气技术难点分析 [J]. *油气井测试*, 2007, 16 (5): 67 - 69.
- [13] 代自勇, 王振铎, 崔明月. 塔里木盆地超深井压裂技术研究 [J]. *天然气工业*, 1996, 16 (5): 56 - 57.
- [14] 才 博, 蒋廷学, 许泽君, 等. 二连盆地第一口煤层气井压裂技术研究 [J]. *天然气技术*, 2007 (4): 35 - 37.
- [15] 曹学军, 叶晓端, 吕剑锋, 等. TX-7 井加砂压裂砂堵影响因素浅析 [J]. *钻采工艺*, 2006, 29 (4): 55 - 56, 118.
- [16] 郑彬涛, 郭建春. YQ 探区气井压裂砂堵分析与对策研究 [J]. *复杂油气藏*, 2010, 3 (1): 70 - 72, 76.