

# 低透气性煤层 CO<sub>2</sub> 增透预裂技术应用

张悦, 张民波, 朱天玲, 冯世梁, 雷博龙

中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083

**摘要** 针对低透气性煤层掘进过程中, 瓦斯抽放难度高、掘进效率低等难点问题, 提出应用 CO<sub>2</sub> 增透预裂技术, 提升煤层透气性系数与瓦斯抽放效率, 提高工作面掘进效率。应用岩土力学模拟软件, 模拟分析了煤层掘进过程中煤体破坏分布与应力分布状态。模拟结果表明: 掘进过程中, 巷道两帮破碎区域为距巷帮 0~3m 的范围, 巷帮主要应力集中区域为距巷帮 3~4m 的区域, 应力为 18.0~18.9MPa。根据数值模拟结果, 设计了煤层 CO<sub>2</sub> 增透的预裂孔与抽放孔的详细参数, 进行了现场验证。现场试验与效果分析表明: 预裂前后钻场瓦斯抽采瓦斯纯流量提高了 27%, 瓦斯抽放浓度提高了 1.7 倍, 可解吸瓦斯量由 7.27 降到 4.30m<sup>3</sup>/t, 掘进效率明显提高。

**关键词** 低透气性; CO<sub>2</sub> 增透预裂; 数值模拟; 钻孔设计

**中图分类号** TD712.62

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.23.005

## Application of CO<sub>2</sub> Anti-reflection Pre-split Technology in Low Permeability Coal Seam

ZHANG Yue, ZHANG Minbo, ZHU Tianling, FENG Shiliang, LEI Bolong

Faculty of Resource and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

**Abstract** Aiming at the highly difficult gas drainage and low efficient drivaging of low permeability coal seam drivaging process of a coal mine, CO<sub>2</sub> anti-reflection pre-splitting technology was put forward to improve seam permeability coefficient, gas drainage efficiency and working face drivaging efficiency. Rock mechanics simulation software was applied to simulate and analyze the coal damage distribution and stress distribution state in coal seam drivaging process. The simulation results showed that, the broken area on both sides of the roadway is 0~3m from one side, and the main stress concentrated area of roadway sides is 3~4m from roadway sides, the stress intensity ranges from 18.0 to 18.9MPa in the drivaging process. Meanwhile, according to the simulated conclusions, detail parameters of pre-splitting and drainage drill holes were designed specifically. Field tests and effect analysis showed that, the net flow of gas drainage is increased by 27%, drainage concentration by 1.7 times, and desorption gas quantity is reduced from 7.27 to 4.30 m<sup>3</sup>/t in each dill site after pre-splitting, significantly improving the drivaging efficiency.

**Keywords** low permeability; CO<sub>2</sub> anti-reflection pre-splitting; numerical simulation; design of drilling hole

### 0 引言

增强煤层透气性系数是解决煤层瓦斯抽采难等问题的根本方法, 如增加抽采钻孔密度、炸药预裂、水压预裂等均基于此目的。增加煤层裂隙, 提高透气性, 能促使瓦斯从煤层中尽快游离, 从而提高瓦斯抽采效率, 它是解决难抽采煤层瓦斯抽出难的中心指导思想。但由于技术缺陷和成本因素, 现有的增透方法均没有得到广泛的使用和推广。液态 CO<sub>2</sub> 对煤层预裂增透法, 充分利用了 CO<sub>2</sub> 的亲煤特性及液态 CO<sub>2</sub> 在煤

层中扩散时对所吸附瓦斯的驱赶作用, 极大地促进了煤层瓦斯的游离, 最终实现煤层瓦斯的大量解吸, 在低成本的前提下, 实现井下瓦斯的高浓度与高效率抽放, 从而保证矿井的安全生产<sup>[1,2]</sup>。

### 1 煤层掘进破坏状态模拟

#### 1.1 工作面概况

山西某矿工作面回风顺槽设计总长为 1130m, 巷道净宽

收稿日期: 2013-03-12; 修回日期: 2013-05-26

作者简介: 张悦, 博士研究生, 研究方向为安全系统工程等, 电子信箱: zhangyue032@163.com

4.5m,净高 3.6m,净断面 16.2m<sup>2</sup>,煤层厚度 4.70~7.30m,平均厚度 6.08m,含夹矸 0~2 层,结构简单;夹矸岩性多为炭质泥岩,少数为泥岩,煤层顶板岩性为泥岩、砂质泥岩、粉砂岩,局部为细砂岩、中粒砂岩,底板岩性为泥岩、砂质泥岩、粉砂岩、细粒砂岩,局部为中粒砂岩,见表 1。利用钻孔进行了地应力测试,测试段主要在孔深 480~610m 范围进行,结果表明最大水平主应力为 7.45~13.50MPa,最小水平主应力在 6.49~10.20MPa 范围内,岩石容重取 26.5kN/m<sup>3</sup>,垂直主应力值  $S_v$  为 12.93~16.03MPa。

表 1 工作面煤层顶底板岩层分布

Table 1 Terrane distribution of the coal seam roof and floor

层厚/m	岩石名称	岩性
3.85	中粒岩	灰色,水平层理,中厚层状,石英为主,长石次之,含暗色矿物
3.05	粉砂岩	灰黑色,块状,含云母碎片及植物化石,质较硬
5.66	3号煤	黑色,块状较多,结构简单,半坚硬
1.33	中粒岩	灰色,水平层理,中厚层状,含暗色矿物
1.33	粉砂岩	灰黑色,块状,质较硬

1.2 建立物理模型

岩土力学模拟软件主要适用模拟计算地质材料和岩土工程的力学行为。特别是材料达到屈服极限后产生的塑性流动、材料通过单元和区域表示,根据计算对象的形状构成相应的网格。每个单元在外载和边界约束条件下,按照约定的线性或非线形应力—应变关系产生力学响应。模型的底面和侧面限制水平移动和垂直移动,模型的上部施加覆岩层的自重应力与水平方向上的构造应力<sup>[3-5]</sup>。计算采用摩尔-库仑(Mohr-Coulomb)屈服准则,工作面顶底板岩石物理力学参数见表 2。

表 2 工作面顶底板岩石物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of the coal seam roof and floor

岩石种类	体积模量 $K/GPa$	剪切模量 $G/GPa$	内摩擦角 $\phi/^\circ$	黏聚力 $C/MPa$	抗拉强度 $R_t/MPa$	密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$
粉砂岩	0.202	0.171	33	4.100	0.860	2400
中砂岩	0.583	0.438	38	5.000	0.970	2610
煤	0.119	0.037	25	2.000	0.030	1400
泥岩	0.161	0.126	34	3.500	0.060	2100
细砂岩	0.591	0.462	38	5.000	1.030	2660

由于计算模型主要研究的是煤层和顶板的变形、破坏情况且计算模型的划分单元数有限,所以对计算模型单元进行不等划分,对工作面和巷道的研究区域采用细单元划分,采用周围稀疏中部密集划分单元,外部围岩区域的单元划分逐渐增大,建立走向长 500m,倾向长 40m,岩层厚度 43m

的物理计算模型,(见图 1),图中的颜色从上到下依次为底板,老底,直接底,煤,直接顶,老顶,粉砂岩。

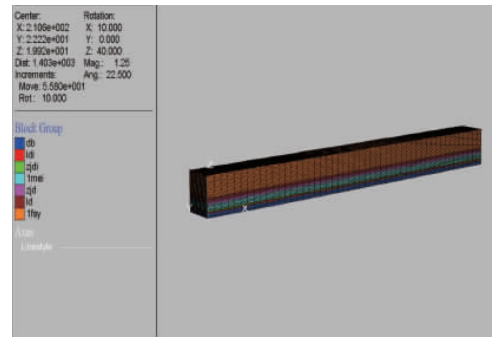


图 1 煤层掘进物理模型

Fig. 1 Physical model of coal seam driving

1.3 数值模拟分析

三维模拟过程为:生成模型→初始化原岩应力→掘进→计算稳定→各步计算平衡→输出计算结果,2101 工作面回风巷实行分步掘进,每步 20m,循环 22 步,模拟掘进 440m 后结束。巷道掘进到 440m 位置模拟结束后,每隔 20m 提取巷帮单元破坏状态分布与巷帮单元应力分布,最终模拟结果如图 2 和图 3 所示。

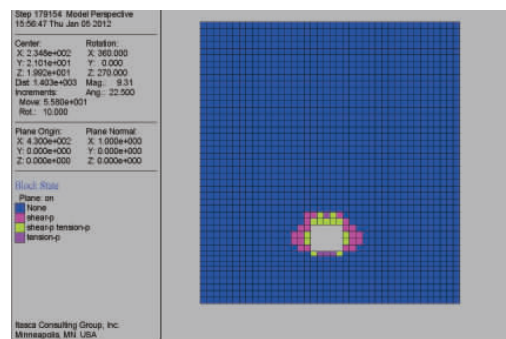


图 2 稳定后巷道两帮单元破坏状态

Fig. 2 Damage state on both sides of the roadway after stabilization

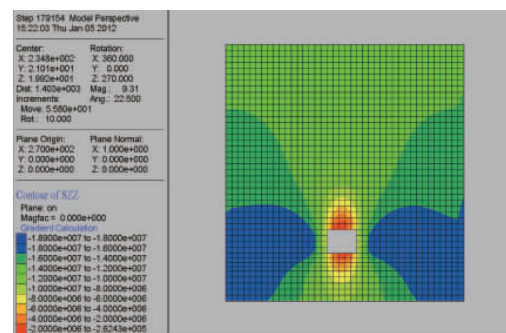
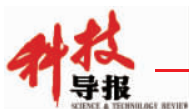


图 3 稳定后巷道两帮单元应力分布状态

Fig. 3 Stress distribution state on both sides of the roadway after stabilization



根据模拟分析结果,可以得到以下结论:

- (1) 巷道掘进到 40m 的位置时,巷道两帮的泄压带(破碎带)宽度已经处于平稳状态;
- (2) 掘进过程中,巷道两帮破碎区域为距巷帮 0~3m 的范围;距巷道顶板约 0~2m 厚度范围的上覆煤岩层与距巷道底板下约 0~1m 厚度的岩层区域均处于破碎状态;
- (3) 巷帮应力主要集中区域包括距巷帮 3~4m 的区域(应力为 18.0~18.9MPa) 与距巷帮 4~26m 的区域(应力为 16.0~18.0MPa)。

## 2 CO<sub>2</sub> 增透预裂技术应用

液态 CO<sub>2</sub> 受热成为气体后其体积是原来的 600 余倍, CO<sub>2</sub> 在 31.1℃ 以下加 8MPa 压力以液态存在, 而超过 31.1℃ 时, 无论加多大的压力也不会存在液态, 因此在钻孔中液态 CO<sub>2</sub> 预裂可对周围物体产生巨大的压强形成破坏。由于煤层并非一个致密物体, 本身就存在天然裂隙, 液态 CO<sub>2</sub> 气体会对这些天然裂隙撑大并沟通, 促成其透气性极大地改善(浅层时可造成其剥离), 由于 CO<sub>2</sub> 气体的带压膨胀过程必定会对煤层中所吸附的瓦斯产生驱赶作用, 加之其较强的亲煤特性, 使得煤体中的吸附瓦斯游离性大大增强(这对于难抽采煤层来说是极强的优势特性), 因此从根本上解决了难抽采煤层透气性差和煤层中瓦斯游离度低的瓦斯抽采的制约问题, 极大地提高了现有井下煤层瓦斯抽放效率<sup>[6-10]</sup>。

爆破孔孔径一般为 60mm 或 64mm, 高压管直径 54mm, 管长 1500mm (最高可延至 2500mm), 爆破深度一般不超过 2500mm。高压管在孔外的一端设有充放气阀, 另一端安设与起爆器连接的接线头。高压管以专用的高压泵预先注入液态 CO<sub>2</sub>, 工作面钻取爆破孔后, 逐一插入炮管, 并连接炮管与低压起爆器间的接线。高压管一端的起爆头接通引爆电流后, 活化器内的低压保险丝引发快速反应, 使管内的 CO<sub>2</sub> 迅速从液态转化为气态, 在 40ms 内, 体积瞬间膨胀达 600 多倍, 管内压力最高可剧增至 270MPa。待达到预设压力时, 释放头内的爆裂盘被打开, CO<sub>2</sub> 气体透过径向孔, 迅速向外爆发, 利用瞬间产生的强大推力, CO<sub>2</sub> 气沿自然或被引发的裂面松开物料, 并把它推离主体, 从而达到爆破效果, 全过程于 1s 内完成。

### 2.1 CO<sub>2</sub> 增透预裂钻孔设计

根据模拟结果可知, 掘进过程中巷道两帮约 3m 的范围是最容易破坏的区域, 所以将钻场中的抽放钻孔布置在距巷帮 2.5~3.5m 位置。详细钻孔设计如下: 在掘进工作面东帮及西帮施工 2 个平行位钻场(20# 与 21#), 前位水平与后位钻场相距 3m, 两个钻场各布置 5 个预抽钻孔, 用于增透分压及验证试验后抽采效果, 如图 4 所示, 设计孔深 80m, 方位角 0°, 倾角以煤层角度为准, 确保钻孔全煤, 现场施工过程中由于煤层倾角变化, 钻孔最深 72m; 工作面迎头正中施工一个预裂钻孔, 孔高 1.3m, 孔深 48m。

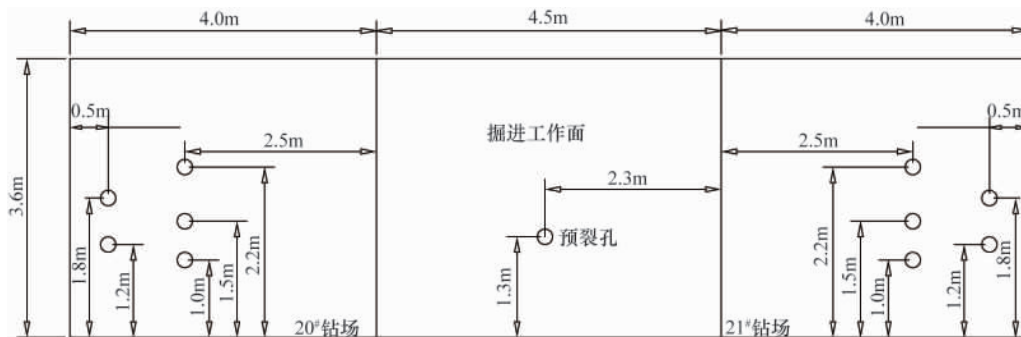


图 4 预裂孔及预抽孔布置

Fig. 4 Layout diagram of pre-splitting and pre-pumping holes

### 2.2 CO<sub>2</sub> 增透预裂效果分析

- (1) 试验前后工作面瓦斯参数对比分析。试验前, 掘进工作面瓦斯含量为 7.27m<sup>3</sup>/t, 钻屑量 K<sub>1</sub> 值最大为 0.31, 试验后第一时间测定工作面瓦斯参数, 瓦斯含量为 2.77m<sup>3</sup>/t, K<sub>1</sub> 值最大为 0.40; 工作面掘进 10m 后, 瓦斯含量为 4.30m<sup>3</sup>/t, K<sub>1</sub> 值最大为 0.32; 工作面掘进 25m 后, 瓦斯含量为 6.30m<sup>3</sup>/t, K<sub>1</sub> 值最大为 0.38。对比试验前, 瓦斯含量大幅下降, K<sub>1</sub> 值无明显变化。
- (2) 风排瓦斯涌出量对比。试验前, 工作面割煤期间瓦斯浓度最高达 0.63% (体积分数), 回风口瓦斯浓度最高为 0.30%, 风排瓦斯涌出量最大为 3.30m<sup>3</sup>/min; 试验后, 工作面割煤期间瓦斯浓度最高为 0.35%, 回风口瓦斯浓度最高为 0.36%, 风排瓦斯涌出量最大为 2.37m<sup>3</sup>/min, 降低了约 30%。

(3) 验证钻场抽采参数变化情况。CO<sub>2</sub> 增透预裂现场试验后, 两钻场瓦斯浓度、纯瓦斯流量均呈上升趋势。钻孔总孔板瓦斯抽采浓度稳定在 50% 左右, 较试验前上升约 30%; 纯瓦斯流量均为 0.1m<sup>3</sup>/min, 其中 20# 钻场较试验前提高 0.05m<sup>3</sup>/min, 为试验前的 2 倍。瓦斯抽采浓度、瓦斯混合量与纯瓦斯流量变化曲线如图 5、图 6、图 7 所示, 采集日期为 2012 年 10 月。

(4) 预裂前, 掘进工作面生产班平均掘进 2 排, 由于掘进期间工作面有放煤炮现象, 需停机稀释瓦斯, 致使每排掘进时间都在 90min; 预裂后, 队组反映工作面基本无放煤炮现象, 割煤期间工作面瓦斯浓度最高为 0.3%, 掘进速度提升, 平均 60min 掘进 1 排, 生产班至少可掘进 3 排, CO<sub>2</sub> 预裂增透试验后, 煤层突出危险性降低, 生产效率明显提高。

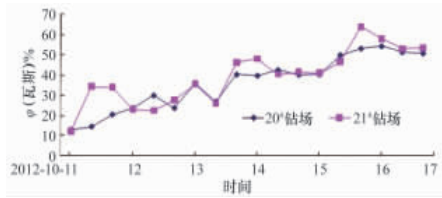


图5 CO<sub>2</sub>增透预裂钻场瓦斯浓度变化  
Fig. 5 Gas concentration changes of the dill site after CO<sub>2</sub> anti-reflection pre-splitting

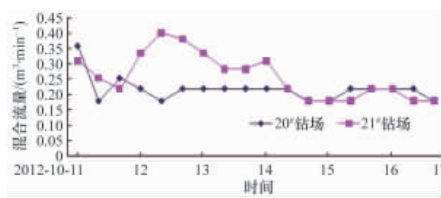


图6 CO<sub>2</sub>增透预裂钻场混合流量变化  
Fig. 6 Mixed flow changes of the dill site after CO<sub>2</sub> anti-reflection pre-splitting

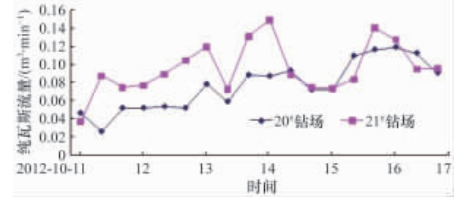


图7 CO<sub>2</sub>增透预裂钻场纯瓦斯流量变化  
Fig. 7 Net gas flow changes of the dill site after CO<sub>2</sub> anti-reflection pre-splitting

### 2.3 结果分析

掘进工作面试验前后抽采瓦斯纯流量由 0.59 增加到 0.75m<sup>3</sup>/min, 提高了 27%; 可解吸瓦斯量由 7.27m<sup>3</sup>/t 降低到 4.30m<sup>3</sup>/t, 在掘进作业过程中钻屑解吸指标 K<sub>1</sub> 值较低(表 3), 掘进效率提高了近 1 倍, CO<sub>2</sub> 预裂增透试验效果较为明显, 实验前后结果对比见表 3。表 3 中, W 表示瓦斯含量(m<sup>3</sup>/t); K<sub>1</sub> 表示钻屑量; C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>、C<sub>3</sub>、C<sub>4</sub>、C<sub>5</sub>、C<sub>6</sub>、C<sub>7</sub> 及 C<sub>8</sub> 分别表示停产时工作面最高瓦斯浓度、掘进时工作面最高瓦斯浓度、停产时中部最高瓦斯浓度、掘进时中部最高瓦斯浓度、停产时回风口最高瓦斯浓度、掘进时回风口最高瓦斯浓度、20# 钻场瓦斯浓度及 21# 钻场瓦斯浓度, 单位均为%, Q<sub>1</sub>、Q<sub>2</sub> 及 Q<sub>3</sub> 分别表示风排最高瓦斯涌出量、20# 钻场纯瓦斯流量及 21# 钻场纯瓦斯流量, 单位均为 m<sup>3</sup>/min。

表 3 试验前后各项参数对比

Table 3 Comparison of the parameters before and after tests

状态	W/(m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	K <sub>1</sub>	C <sub>1</sub> /%	C <sub>2</sub> /%	C <sub>3</sub> /%	C <sub>4</sub> /%	C <sub>5</sub> /%
试验前	7.27	0.31	0.10	0.63	0.12	0.35	0.16
稳定后	4.30	0.32	0.08	0.30	0.13	0.35	0.15
	C <sub>6</sub> /%	C <sub>7</sub> /%	C <sub>8</sub> /%	Q <sub>1</sub> /(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	Q <sub>2</sub> /(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	Q <sub>3</sub> /(m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	
试验前	0.30	23.80	23.00	3.30	0.05	0.08	
稳定后	0.28	52.60	50.40	2.37	0.10	0.09	

### 3 结论

- 掘进过程中, 巷道掘进到 40m 位置时, 巷道两帮的泄压带(破碎带)宽度已处于平稳状态, 水平距巷帮 0~3m、距巷道顶板 0~2m、巷道底板下 0~1m 区域处于破碎状态;
- 巷帮主要应力集中区域是包括距巷帮 3~4m 的区域(应力为 18.0~18.9MPa) 和距巷帮 4~26m 的区域(应力为 16.0~18.0MPa);
- 根据数值模拟结果, 对 CO<sub>2</sub> 增透预裂钻孔与抽放钻

孔进行了详细设计;

(4) 现场试验结果表明: 预裂前后钻场瓦斯抽采瓦斯纯流量提高了 27%、瓦斯抽放浓度大幅提高、掘进效率提高到原来的 2 倍、可解吸瓦斯量由 7.27 降到 4.3m<sup>3</sup>/t, 预裂增透效果明显。

### 参考文献 (References)

- 马健, 张春龙. CO<sub>2</sub> 压裂技术在杏南试验区的应用研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2008, 27(3): 98-101.  
Ma Jian, Zhang Chunlong. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008, 27(3): 98-101.
- 谢平, 侯光东, 韩静静. CO<sub>2</sub> 压裂技术在苏里格气田的应用 [J]. 断块油气田, 2009, 16(5): 104-106.  
Xie Ping, Hou Guangdong, Han Jingjing. Fault-Block Oil & Gas Field, 2009, 16(5): 104-106.
- 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.  
Chen Yumin, Xu Dingping. Foundation and engineering examples of FLAC/FLAC3D[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- 胡国伟, 靳钟铭. 基于 FLAC<sup>3D</sup> 模拟的大采高采场支撑压力分布规律研究[J]. 山西煤炭, 2006, 26(2): 10-12, 16.  
Hu Guowei, Jin Zhongming. Shanxi Coal, 2006, 26(2): 10-12, 16.
- 曾垒, 项一凡. 用 FLAC<sup>3D</sup> 实现综放工作面三维矿压模拟的探讨 [J]. 煤炭工程, 2007(6): 86-88.  
Zeng Lei, Xiang Yifan. Coal Engineering, 2007(6): 86-88.
- 潘晓梅, 沈文刚. 二氧化碳压裂增产技术在低渗透油田的尝试 [J]. 特种油气藏, 2005, 12(6): 85-87.  
Pan Xiaomei, Shen Wengang. Special Oil and Gas Reservoirs, 2005, 12(6): 85-87.
- 丛连铸, 吴庆红, 赵波, 等. CO<sub>2</sub> 泡沫压裂在煤层气井中的适应性[J]. 钻井液与完井液, 2005, 22(1): 51-52, 56.  
Cong Lianzhu, Wu Qinghong, Zhao Bo, et al. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2005, 22(1): 51-52, 56.
- 刘晓明, 蔡明哲, 蔡长宇. CO<sub>2</sub> 泡沫压裂液性能评价 [J]. 钻井液与完井液, 2004, 21(3): 1-4.  
Liu Xiaoming, Cai Mingzhe, Cai Changyu. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2004, 21(3): 1-4.
- 刘明军. CO<sub>2</sub> 泡沫压裂在大牛地低渗透气田先导性试验 [J]. 内蒙古石油化工, 2008(17): 108-110.  
Liu Mingjun. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2008 (17): 108-110.
- 谭明文, 何兴贵, 张绍彬, 等. 泡沫压裂液研究进展 [J]. 钻采工艺, 2008, 31(5): 129-132.  
Tan Mingwen, He Xingui, Zhang Shaobin, et al. Drilling & Production Technology, 2008, 31(5): 129-132.

(责任编辑 赵业玲)