

# 煤矿立井微孔隙岩体注浆防渗及机理分析\*

## Seepage prevention grouting in coalmine shaftwall and mechanism analysis

隋旺华

(中国矿业大学资源与环境科学学院, 徐州, 221008)

李永涛

李贯田 王国庆

(兖州矿业集团, 邹城, 273500) (中煤大屯矿建工程公司, 沛县, 221611)

**文 摘** 从古山立井的地质工程条件出发, 针对微孔隙岩体注浆防渗的技术难点, 在分析前几次注浆失效原因的基础上, 选择合适的注浆材料和注浆工艺, 在古山立井主、副井各 300 m 的渗漏段注浆, 将涌水量由原来的 37 m<sup>3</sup>/h 降至 5 m<sup>3</sup>/h 以下。注浆前后采取了井壁及岩石样品, 用扫描电子显微镜和压汞试验对样品的微观结构进行了测试分析, 从微观机理上解释了前几次注浆工程失效和本次注浆成功的原因。

**关键词** 空隙结构, 注浆, 防渗, 立井, 扫描电镜, 压汞试验

**中图法分类号** TD 265.4

**作者简介** 隋旺华, 男, 1964 年生, 工学博士。现为中国矿业大学副教授, 从事工程地质与岩土工程的教学和研究工作。

*Sui Wanghua*

(China University of Mining and Technology, College of Resources and Environment Sciences, Xuzhou, 221008)

*Li Yongtao*

(Yanzhou Coal Mining Group Corporation, Zoucheng, 273500)

*Li Guantian Wang Guoqing*

(Datun Coal Mining Construction Corporation, Peixian, 221611)

**Abstract** According to the engineering geological conditions of a shaft in Gushan coalmine (Inner Mongolia) and the technical difficulties of grouting into media with micropores, suitable materials and technology were applied to a 300m section. The hydraulic discharge was reduced from 37 m<sup>3</sup>/h to less than 5 m<sup>3</sup>/h. Samples of shaftwall and rocks were collected before and after grouting. The pore structure of the samples was analyzed by SEM and mercury penetrometer. The reason why the latest grouting is successful and preceding ones were unsuccessful is explained.

**Key words** pore structure, grouting, seepage prevention, shaft, SEM, mercury penetration

## 1 引 言\*

煤矿深井微孔隙发育的围岩的注浆防渗技术是当前国内外井巷工程的难题。这种渗漏的特点是无明显的出水点, 往往经过多次注浆治理, 总涌水量不大, 但是使生产条件恶化, 给安全生产带来很大的隐患。本文介绍在古山立井一次防渗注浆工程的成功实例, 并试图从微观机理上分析前几次注浆工程失效和本次注浆成功的原因。

## 2 工程概况

### 2.1 井筒概况

平庄煤田古山立井, 位于内蒙古自治区赤峰市。主井井口标高+ 527.7 m, 井深 519.5 m, 井筒净径 5 m; 副井井口标高+ 524.2 m, 井深 548.5 m, 井筒净径 6 m。

### 2.2 地质工程条件

井筒通过的地层自上而下分别为第四纪松散层和侏罗纪成岩程度较差的杏园组地层。

第四系厚度在主井和副井处分别为 58.35 m 和 67.8 m, 主要由粘土、砂质粘土和砂砾层组成, 其中砂砾层累计厚度在主、副井处分别为 15.6 m 和 6.8 m。

上部砂砾层接受大气降水的补给, 底砾层受老哈河地下径流的补给, 富含承压水。据主井检查孔资料, 承压水头标高+ 503.1 m, 单位涌水量为 0.25 L/s·m, 渗透系数为 10.63 m/d。主井凿井中, 自井深 55 m 开始涌水。井深 58.38 m 处实测涌水量 70 m<sup>3</sup>/h; 副井自井深 31 m 处开始涌水, 至 55 m 处涌水量为 10 m<sup>3</sup>/h, 56 m 处达 78.73 m<sup>3</sup>/h。

侏罗系杏园组上段有两个孔隙-裂隙含水层组。第 1 段含水层组自井深 57.8 m 至 131.0 m, 主要由粗砂岩组成, 较为松散, 局部夹泥岩透镜体。抽水试验表明, 水位标高+ 487.8 m, 单位涌水量为 0.0048~0.0143 L/s·m, 渗透系数为 0.00221 m/d。第二段以粗砂岩和砂砾岩为主, 多为泥质胶结, 结构松散, 并发育三层破碎带, 含水层主要位于井深 168~415 m, 累计厚度 160 m 左右, 检查孔抽水表明, 水位标高+ 487.17 m, 单位涌水量为 0.071 L/s·m, 渗透系数为 0.033 m/d。凿井过程中, 除由于构造因素造成封闭不良钻孔突水外, 其余含水层均以渗水方式充水。以副井为例, 凿井过程中, 由上往下涌水量不断增加, 至井深 361 m 处时,

\* 到稿日期: 1999-03-08

涌水量增至  $87.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 。井筒施工过程中的不断涌水,造成井筒混凝土质量低劣,微孔隙发育,成为地下水渗出的重要通道。

第四系松散含水层与基岩含水层呈不整合接触,二者间存在明显的水力联系,第四系含水层的地下水沿基岩面垂直向下渗透,成为基岩含水层的直接补给水源。

### 2.3 注浆工程概况

由上述地质工程条件可见,井筒注浆防渗关键要解决以下三个问题:①封堵第四系与基岩的水力联系;②封堵基岩下段微孔隙岩体的孔隙-裂隙水;③封堵井壁内混凝土的微孔隙水并进行混凝土的补强。其中,有效地充填基岩和混凝土中的微孔隙是关系到注浆成败的最关键因素。井筒施工过程中和竣工后,曾多次对壁后进行注浆,但是剩余水量较大,仍不能达到规范要求。例如,副井曾进行过两次注浆,第一次为1992年7月至8月在井深303 m至361 m段注浆,涌水量由  $87 \text{ m}^3/\text{h}$  降至  $49.1 \text{ m}^3/\text{h}$ ,第二次为1993年2月至4月在65 m至430 m范围内进行注浆,涌水量降至  $8.99 \text{ m}^3/\text{h}$ (1993年4月14日实测),1993年6月16日涌水量升至  $24 \text{ m}^3/\text{h}$ ,同年9月24日涌水量回升至  $29 \text{ m}^3/\text{h}$ ,本次注浆前实测涌水量为  $36.9 \text{ m}^3/\text{h}$ 。出水特征是无明显的出水点,表现为全段高“汗渗”。本次注浆前压水试验结果如表1,井深120 m以下单位吸水量均小于  $0.01 \text{ L}/\text{min}\cdot\text{m}\cdot\text{m}$ 。

可见,前几次注浆效果不佳正是由于没有充分重视注浆的具体工程地质条件,即忽视了对微孔隙水的封堵。对微孔隙注浆的关键是要选择可灌性好、胶结强度高的注浆材料和合理的注浆工艺。为此,本次采用了不

同孔深组合水泥浆液和化学浆液分阶段灌注的复合注浆工艺技术<sup>[1]</sup>。以副井为例,注浆工程实施情况见表2。注浆后井筒剩余涌水量为  $4.83 \text{ m}^3/\text{h}$ ,堵水率达87%,效果稳定,竣工后一年,涌水量为  $5.71 \text{ m}^3/\text{h}$ ,回升很小。

表1 压水试验结果

井筒深度/m	65	90	120	190	310	400
单位吸水量 / $\text{L}(\text{min}\cdot\text{m}\cdot\text{m})^{-1}$	0.065	0.0204	0.0016	0.0054	0.0049	0.0026

## 3 注浆前后井壁与岩石微结构的 SEM 分析

Camberfort 曾从微观上分析了水泥粉粒在孔隙通道口形成的圆拱及注入松散沉积物中的浆液的沉淀情况<sup>[2]</sup>。通过分析注浆前后井壁和岩石样品微孔结构的变化情况,可以从微孔上判断注浆的效果。

本次注浆前后分别对361 m深度以下井壁和壁后岩体采样,采用SEM观测和压汞测试,以获得注浆前后微观结构、孔隙率及其孔隙大小变化情况,分析注浆成败的原因。

样品G1为注浆前井壁混凝土,由图1(a)可见,结构疏松,微孔发育,呈不规则状,直径为10~80  $\mu\text{m}$ 。图1(b)为水泥形成团粒的局部放大。样品G8为注浆后井壁混凝土样,图1(c)显示了注浆后颗粒及微孔情况,颗粒尺寸比图1(b)明显增大,孔隙数量减少,连通程度降低,胶结强度增大。图1(d)为注浆后颗粒与水泥胶结的形貌,胶结边缘可清晰地看到化学浆液干缩形成的网纹状充填,这种结构可较好地起到防渗作用。

表2 副井井筒注浆堵水实况

Table 2 The actual situation of grouting in auxiliary shaft

注浆段井深 与段高/m	地质工程条件	布孔参数 <sup>①</sup>	注浆工艺	注浆量 / $10^3\text{kg}$
58~72/14	第四系底部砂砾石孔隙含水层及基岩风化带孔-裂隙含水层,井壁为厚度1 m的双层及单层素混凝土	孔径42~32 mm,孔深底砾层处1.5 m,风化带处4 m	均匀布孔,复合注浆	79.4
74~112/38	基岩孔-裂隙含水层,井壁为厚度500 mm的300号单层素混凝土	孔径42~32 mm,孔深1.5~3.5 m	均匀布孔,复合注浆	182.4
114~132/18	粗砂岩孔-裂隙含水层,井壁为厚度500 mm的300号单层素混凝土	同上	均匀布孔,复合注浆	36.0
165~205/40	粗砂岩孔-裂隙含水层,断层破碎带,井壁为厚度500 mm的300号单层素混凝土	孔径42~32 mm,孔深1.5~3.5 m	单孔少注,群孔多注,复合注浆,接缝式注浆	161.5
208~377/165	粗砂岩、砂砾岩孔-裂隙含水层,断层破碎带,井壁为厚度550 mm的350号单层素混凝土,井壁质量差,局部接茬外露黄砂	孔径42~32 mm,孔深2~4 m	断层带:深孔注浆,井壁质量差者:先浅孔低压灌浆,后深孔高压灌浆,可灌性差者:诱导注浆,复合注浆	240.5
380~415/35	砂砾岩孔-裂隙含水层,井壁为厚度500 mm的300号单层素混凝土,井壁质量差,局部接茬外露黄砂	同上	诱导注浆,复合注浆,接缝式灌浆	52.0

① 布孔密度为  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 。

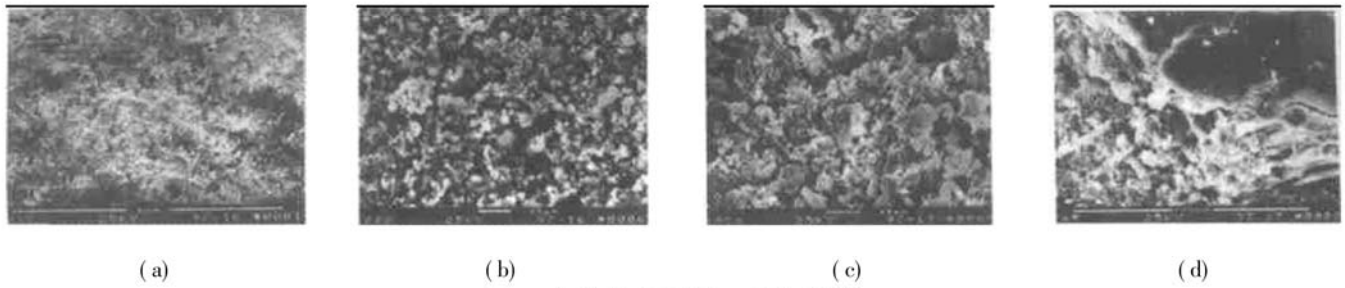


图1 注浆前后井壁样品的微观结构

Fig. 1 Microstructure of shaftwall samples before and after grouting

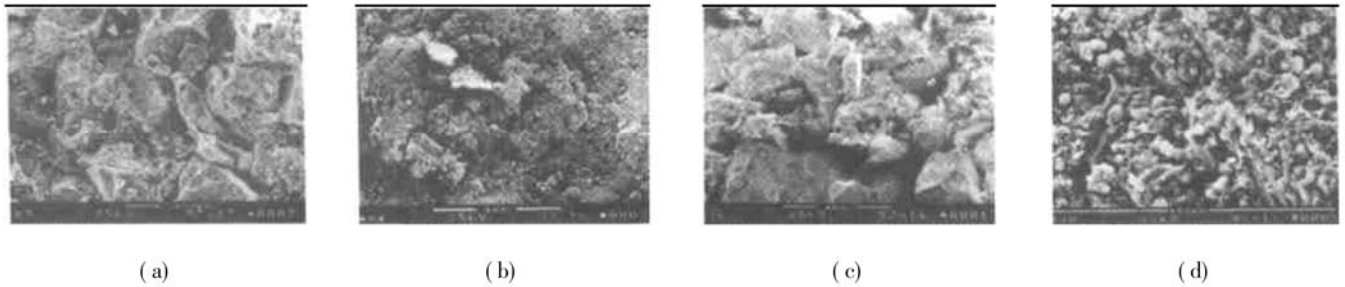


图2 注浆前后岩样的微观结构

Fig. 2 Microstructure of rock samples before and after grouting

表3 注浆前后孔隙分布

Table 3 Void distribution before and after grouting

孔隙直径/ $\mu\text{m}$	阶段进汞量/ $(\text{mL}\cdot\text{g}^{-1})$					
	G1(注前)	G8(注后)	G6(注前)	G2(注后)	G3(注前)	G5(注后)
> 500	0	0	0	0	0	0.0006
500~ 100	0.0153	0.0035	0.0034	0.0013	0.004	0.0019
100~ 75	0.0116	0.0006	0.0012	0.0007	0.001	0.0007
75~ 50	0.005	0	0	0	0.001	0
50~ 10	0.0516	0.0040	0.0314	0.0022	0.011	0
10~ 5	0.005	0.0021	0.0058	0.0023	0.005	0.0012
5~ 2	0.0075	0.0032	0.0126	0.0056	0.012	0.0007
2~ 1	0.0047	0.0032	0.0092	0.0039	0.011	0.0012
< 1	0.0036	0.0030	0.0057	0.0045	0.015	0.0013
孔隙度/%	21.7	3.9	14.5	3.7	17.8	1.4

G6样品为本次注浆前采自深度382 m的壁后灰白色粗砂岩,图2(a)是其总体形貌,碎屑颗粒为主,少量胶结物,水泥粉粒零星分布;可见粒间孔隙呈不规则状,相互连通,尺寸10~50  $\mu\text{m}$ 不等。G2样品为与G6对应的注浆后的砂岩,图2(b)为颗粒被水泥胶结覆盖的情况,大部分粒间孔隙已被充填。

G6和G2形成了鲜明的对比,本次注浆对充填砂岩的粒间孔隙起到了良好的作用,有效地降低了砂岩的孔隙度和连通性,而前几次注浆均未对微孔隙进行有效充填。

样品G3为本次注浆前采自深度374 m处的灰色粗砂岩,图2(c)为形貌特征,可见其孔隙发育,结构疏松,颗粒以石英和长石为主,颗粒大小为0.5~0.7 mm,颗粒间的孔隙,尺寸从几十  $\mu\text{m}$ 至百余  $\mu\text{m}$ ,胶结物较少。样品G5为与G3对应的注浆后的砂岩,图2(d)为注浆后颗粒表面被细粒晶体和水泥粉晶覆盖的情况。

#### 4 微结构压汞分析

用美国9310型微孔结构分析仪,测试不同直径孔隙的比例和总孔隙度。注浆前后孔隙分布情况见表3。

水文地质研究表明,孔隙愈小,透水性愈差。孔隙直径在小于两倍结合水的厚度,在寻常条件下便不透水<sup>[3]</sup>。李云峰对黄土进行的实验研究表明, $d \geq 2.5 \mu\text{m}$ 的孔隙是导水孔隙, $d < 2.5 \mu\text{m}$ 的孔隙是不导水孔隙<sup>[4]</sup>。注浆前井壁及岩石的孔隙比较发育,孔隙度为14.5%~27.1%,其中尤以2~100  $\mu\text{m}$ 范围的孔隙比例较大,占总孔隙的比例超过85%,这说明以前几次注浆均没有充填井壁及围岩中的微孔隙。本次注浆后总孔隙度降至1.4%~3.9%。直径2~100  $\mu\text{m}$ 的孔隙减少幅度达80%以上,小于2  $\mu\text{m}$ 的孔隙也有不同程度的减少,说明采用的浆液对微小孔隙的渗透能力和充填效果较好。图3中a,b曲线分别为注浆前后井

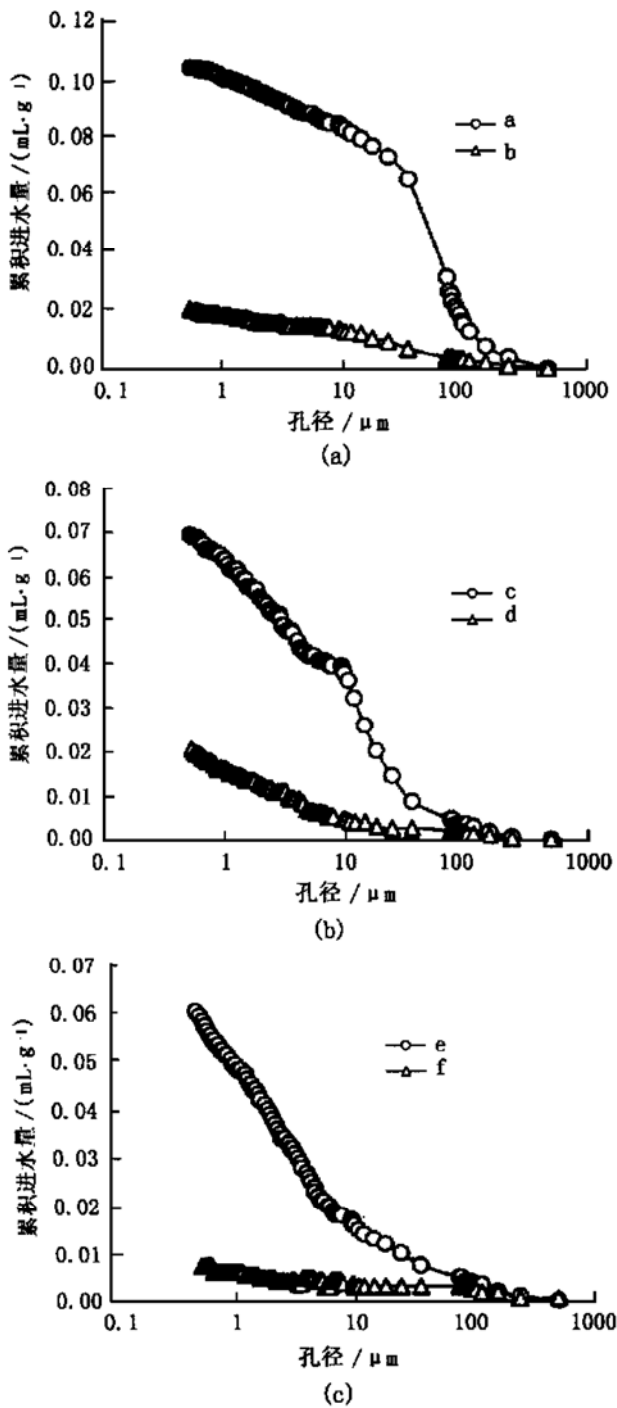


图 3 注浆前后样品的累计压汞量曲线

Fig. 3 Curves of cumulative pore volume per gram of the samples before and after grouting

壁样的累积压汞量曲线, 可见, 注浆前不但大孔隙发育, 并且连通性也很好; 注浆后井壁样的累积压汞量降

低了 82%。以 2~ 100 μm 孔隙减少最显著, 减少了 87.7%; 2 μm 以下的减少了 25%。

图 3 中 c, d 曲线分别为 382 m 深度的壁后粗砂岩在注浆前后的压汞曲线, 可见注浆前岩层胶结程度较差, 孔隙率较高, 其中大于 2 μm 孔隙占总孔隙的比例达 95%。注浆后 2~ 100 μm 的孔隙减少了 78.8%, 2 μm 以下的减少了 43.6%, 由于较大孔隙被有效充填, 孔隙间的连通性明显减弱。

图 3 中 e, f 曲线分别为采自 374 m 深度注浆前后的壁后粗砂岩样, 压汞情况反映出注浆前岩样大孔隙发育, 孔隙中 2~ 100 μm 孔隙占 93% 以上, 并且连通性良好; 注浆后不但孔隙率降低, 2~ 100 μm 孔隙数量减少了 90%, 直接反映在连通性的下降, 压汞过程曲线表现为台阶状, 与扫描电镜分析显示的结构形貌相符合。

### 5 分析讨论

古山立井本次注浆防渗工程成功的重要原因就是采取了符合当地地质工程条件的注浆材料和注浆工艺。从微观分析明显可见, 前几次注浆均未能较好地充填井壁混凝土和壁后砂岩层中的微孔隙, 主要是注浆工艺、材料选择上不当, 未能针对岩体微孔隙的特征布孔。而本次注浆, 针对微裂隙和微孔隙岩体的特点, 有效地充填了渗水微孔隙, 达到了理想的效果。采取扫描电镜和压汞试验分析可以从微观机理上分析注浆防渗成功与否的原因。这一方法可以推广应用于检验注浆效果和分析原因。本文研究为建立适合于微孔隙岩体注浆运移和扩散的理论奠定了初步基础。

### 参 考 文 献

- 1 姜振泉, 许大雄, 隋旺华等. 深井下微裂隙岩体防渗透注浆材料及注浆工艺研究(煤炭科技发展项目报告). 1998
- 2 Jaroslav, Verfel. Rock grouting and diaphragm wall construction. Elsevier, 1989. 252~ 254
- 3 王大纯, 张人权, 史毅红. 水文地质学基础. 北京: 地质出版社, 1980
- 4 李云峰. 粘性土孔隙分布改变的水文地质效应. 见: 西安工程学院. 地质工程与水资源新进展. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997. 222~ 227