

# 煤矿防治水注浆堵水工艺优化探讨

王 浪

陕西华电榆横煤电有限责任公司 陕西 榆林 719000

**摘 要:** 本文首先介绍了注浆堵水的基本原理,在此基础上阐述了浆液在裂隙介质中扩散以及凝固过程,提出了“可注性—凝胶时间可控性—耐久性”的浆液选择标准并总结了水泥基浆液、化学浆液及复合浆液的应用范围;其次从钻孔角度考虑,研究了孔距、孔向、倾角与裂隙产状的关系;最后从工艺的角度出发,讨论了注浆压力、注入速度、浆液浓度变化以及间歇注浆等因素对注浆效果的影响。综上所述,注浆堵水工艺优化需基于详细的地质情况,将浆液流变性和裂隙开度结合在一起,采用压力—流量—时间监控的方式进行控制,同时合理施工才能达到经济有效而且可靠的注浆堵水目的。

**关键词:** 煤矿防治水; 注浆堵水; 工艺优化; 浆液扩散; 注浆参数

## 引言

煤矿水灾严重威胁矿井安全,而导水断层、裂隙带、陷落柱以及封闭不良钻孔等隐蔽通道活化则是诱发突水主要原因。注浆堵水由于其灵活、快速、干扰小的优势被作为封堵这些导水通道的方法。它是通过将具有一定流动性和胶凝性能的浆液注入到裂缝或者孔洞中,在压力作用下填充、弥散而后固化形成一个不透水的岩石状物体从而阻隔水源与采掘工作面之间的水力联系。虽然使用较为普遍但是目前注浆还是较为粗放:设计大多依靠经验,不能准确预测浆液在裂缝中的流动情况;所用材料也沿用老配方,未考虑裂缝尺寸大小、流速以及水质的影响;注浆结束的标准也不明确,容易造成注浆不足或者浪费。这导致工程效果参差不齐。因此有必要对注浆方法进行总结归纳并且对其参数进行研究以提高其合理性、经济性和可靠性。

## 1 注浆堵水的基本原理与适用条件

### 1.1 浆液在裂隙介质中的扩散与凝固机制

注浆堵水主要取决于浆液向地层裂缝内运移以及固化过程。浆液扩散受到推动力(注浆压力与静水压力差)、阻力(浆液粘度及裂缝壁面阻力)以及裂缝几何尺寸(裂缝宽度、粗糙度、连通性)相互作用影响。对于牛顿流体(例如稀水泥浆),其扩散半径与注浆压力及裂缝宽度平方成正比,而与粘度成反比;而非牛顿流体(如化学浆液或者高浓度水泥浆),由于具有剪切变稀性质,在流动过程中表现为柱塞流或幂律流,因此其扩散规律更加复杂。同时在流动中伴随着凝结反应发生,凝结时间与温度、pH值以及催化剂浓度有关:如果太短会造成裂

缝前端过早凝结形成“封口”,从而阻止进一步注入;如果太长又会导致过多浆液流失到地下水中造成浪费和环境污染。所以如何使扩散距离和凝结时间恰到好处才能保证浆液能填充到预定位置并且形成结石。

### 1.2 注浆堵水的适用条件与局限性

注浆堵水应用范围受地质情况限制。最佳地层为裂隙宽度在0.1~5mm之间、连通良好中等透水岩层,而且水压应小于10MPa、流速小于0.5m/s,以免浆液被稀释。微裂缝(<0.05mm)要用超细水泥或者化学浆液;而大裂缝或者溶洞(>10mm)就要用骨料充填与注浆相结合方法<sup>[1]</sup>。另外,注浆效果不可逆转,一旦失败,前期形成的结石体堵塞通道,难以修复,所以第一次成功很重要,这也是为什么需要进行工艺优化的原因。

### 1.3 注浆工艺优化的总体目标与约束条件

注浆工艺优化以四个方面为目标进行:即提高堵水可靠度,达到封堵后剩余涌水量小于允许值;其次是降低成本,在保证质量的情况下尽可能节约浆液;再次是加快施工速度,减少对采掘接替影响;最后是保证施工安全,防止高压注浆造成次生灾害。而受到井下作业空间有限、钻孔设备不足、浆液制备场地不足等因素制约。因此优化工作就是把各种因素有机结合起来,在此基础上找到最优解。

## 2 注浆材料的优选与配比优化

### 2.1 水泥基注浆材料的性能特征与适用性

水泥是注浆堵水最基本的材料,来源广泛、价格低廉、强度较高、耐久性良好。普通硅酸盐水泥可用于

裂隙宽度大于 0.5mm、流速较慢的静水中。但是水泥浆凝结时间较长（一般初凝为 2-4h）、抗水冲刷能力较差、易发生收缩等问题。超细水泥（比表面积大于 800m<sup>2</sup>/kg）可以将可注裂隙下限降低到约 0.1mm 以下，并且可以调节其凝结速度，因此目前已经成为煤矿注浆的主要发展方向。而在配比上，水灰比起着决定性的作用——低水灰比（0.5~0.8）的水泥浆体密度较大、结石强度较高，但是流动性差、难以泵送；高水灰比（1.0~1.5）的水泥浆体流动性较好，但是凝固之后收缩较大、结石体强度较低。因此要尽量使用高效减水剂使水灰比降低的同时保证流动性，还要添加膨胀剂来弥补由于水分蒸发带来的体积收缩，从而达到更好的封堵效果。

## 2.2 化学浆液及复合浆液的特性与选用

微细裂隙或动水情况下，应采用化学浆液（聚氨酯、水玻璃等）。聚氨酯遇水发泡膨胀，适合处理大量涌水问题，凝胶时间可调但是价格较高并且部分成分有毒；水玻璃和水泥形成双液系统，凝胶时间可调而且经济实惠，在动水中可以迅速止水。复合浆液结合水泥强度以及化学浆液快硬性能，是目前研究热点<sup>[2]</sup>。材料的选择要根据地下水化学成分做适当试验，以防硫酸根离子、镁离子等对材料造成破坏。

## 2.3 浆液配比的现场调控方法

浆液配比根据注浆压力及流量变化进行调整，在开始时用较稀浆液探测裂隙可注性，然后加大浆液比重提高充填效果，如果压力不上升、流量稳定，说明浆液扩散过多，可以减少凝胶时间；如果压力上升迅速、流量下降明显，可能是被堵或者凝胶过快，要降低浓度或者增加凝胶时间使浆液能够更好地扩散。双液注浆是通过改变水泥与水玻璃的比例来控制凝固速度，在现场必须有可变比例混合器防止管路堵塞。所有这些都要以实际监测情况为基础，把主观经验变成具体数值。

## 3 注浆钻孔设计与布孔参数优化

### 3.1 钻孔空间布局与裂隙产状的匹配

钻孔设计首先要尽量保证钻孔轴线尽可能多地穿过有效裂隙通道而不是单纯依靠运气，这就需要在施工之前先对所要施工的地层裂隙系统进行详细构造几何学研究，了解其裂隙组的方向、倾向、倾角以及间距等信息，在此基础上理想的钻孔方向应当是垂直于主要裂隙面的方向，在单位进尺条件下能够切割更多的裂隙从而更有利于浆液灌注覆盖范围扩大，而对于倾斜角度比较大的裂隙可以考虑用较大角度的斜孔沿着裂隙倾向方向进入以增加钻孔在裂隙带内的长度；而对于接近水平的

裂隙则可以用水平孔或者是接近水平孔即可。钻孔终孔点应该位于突发性透水地段“上游”，也就是补给水源一侧，以便于浆液受到水压推动而向裂隙通道流动达到“逆流封堵”的目的而不是“顺流流失”。

### 3.2 孔距、孔数及钻孔顺序的优化

孔距大小应根据浆液有效扩散半径来确定，使相邻两排孔之间浆液扩散区域有所重叠，不留空白。对于均质裂隙岩层中，扩散半径可依据注浆压力大小、裂隙宽度以及浆液屈服应力等因素粗略估计，但由于实际情况中的裂隙是非均质并且具有各向异性，因此更为准确的办法是通过对先导钻孔进行注浆试验得到相应压力-流量关系后反推出实际扩散范围。一般情况下孔距约为预测扩散半径的 1.5 到 2 倍，以达到重叠效果。钻孔数量要遵循“少而精”的原则，在裂隙密集处或者构造交叉部位优先布置，而不宜均匀分布造成资源浪费<sup>[3]</sup>。钻孔施工顺序也要注意，“由外到内”或者“从下至上”，即外围钻孔先进行注浆形成挡板防止浆液大量溢出，然后下游钻孔先使用快凝浆液进行封堵，最后上游钻孔使用流动性较好的慢凝浆液灌入深层逐步缩小水量，从而提高封堵质量。

### 3.3 钻孔结构设计及孔口装置配置

钻孔布置要有利于钻进安全以及灌浆操作的要求，对于高压灌浆（压力大于等于 5MPa）宜采用分级套管结构，即表层套管隔离松散破碎岩层，技术套管隔断上部含水层，灌浆段裸孔或者下放花管。花管孔眼尺寸及孔间距根据预计灌浆量以及裂隙发育情况确定，花管孔眼总面积需满足最大灌浆流量时的流通面积，以免造成节流而使孔口压力偏高，在孔口处应设置压力表、流量计、混合器和快速切断闸门等组成一套较为完善的灌浆管路系统。灌浆完毕后在孔口应用止浆塞或者灌浆封堵，以防封堵层被后期地下水压力冲毁。

## 4 注浆工艺参数的动态优化策略

### 4.1 注浆压力的控制原则与分级调整

注浆压力是使浆液扩散的动力，但是压力过大容易造成地层劈裂、隆起，甚至引发突水事故，压力过小浆液不能到达预定位置。优化的原则是“分段升压、逐级稳压”，即首先用较小的压力（一般为静水压力的 1.2~1.5 倍）进行灌注来探测裂隙开启压力；当浆液充满大的裂隙后，再慢慢增加压力达到预定的最大压力值（一般为含水层水压的 2~3 倍，但不超过围岩破裂压力）。而在稳压过程中应注意观察流量变化情况：如果流量平稳说明裂隙通道畅通可以保持该压力继续灌注；如果流量

不断减少说明裂隙正在逐渐被充填此时可以适当地加大压力促使浆液进入更细微的裂隙中去；但如果压力突然降低而流量大幅度增加那么可能是裂隙扩宽或者串浆现象发生应及时减压并且改变浆液凝胶时间。注浆压力不宜过高以防超过岩体临界破裂压力。

#### 4.2 注入速率与浆液浓度的耦合调节

注入速度直接影响浆液在裂隙内流动以及压力大小，速度过快会造成浆液紊流并且会把裂隙表面细小颗粒冲走，造成裂隙张开程度加大、浆液损失严重；速度过慢则会增加施工时间，而且浆液在管道内也会发生初步固化。最优方案为“先快后慢”或者“变速注入”，即开始时用大流量快速充填主要裂隙，当压力达到一定值以后减小速度，让浆液有更多时间进入微细裂隙<sup>[4]</sup>。同时浆液浓度也需要根据注入速度进行相应改变，在高注入速度下使用低浓度（低黏度）浆液以减小阻力，在低注入速度下使用高浓度（高黏度）浆液以提高充填密实度。而这一速度-浓度配合需要有可变频率注浆泵以及在线密度计才能实现。

#### 4.3 间歇注浆与多次注浆的合理应用

对于宽大的裂隙或者涌水量较大的通道，在连续注浆的情况下由于浆液被水冲淡不易固化。间歇注浆是断续地进行一次注浆、停止一段时间后再注一次的过程，每一下注浆后有足够的时间让这一次注浆初步固化形成“骨架”，之后再注的浆液就在这个“骨架”的基础上逐渐扩大直至最后全部封闭。间歇注浆的时间间隔要根据浆液凝胶时间和地下水流动速度来定，一般为凝胶时间的60%-80%。多次注浆（同一个孔按顺序分别注入不同比例或者不同类型浆液）可以发挥各种材料的优点：比如第一下注速凝水泥-水玻璃浆液封堵主要通道，第二下注慢凝超细水泥浆填充小缝隙，第三下注化学浆液提高整个止水效果等。这种方法适合用于复杂的地质情况下的精细止水。

#### 4.4 注浆结束标准的量化判定

注浆终止条件不能仅根据“注浆量达到预定值”或

者“压力达到最大值”，而应当结合压力-流量-时间三个指标来确定。最理想的终止条件是，在设计注浆压力下，继续注浆10~20min，注浆速度降到开始时的10%以下，而且压力也不再降低，说明该裂隙已经被很好填充。另外还可以用压水试验来进行检测，在注浆完毕后，从这个孔内打入清水，以相同压力测出其透水率，如果比注浆前减少两个数量级并且绝对值小于规定限值（例如每米每分钟小于0.1L），那么就可以认为满足要求；或者相邻孔返浆或者水位有明显变化也可作参考。结束条件应写入施工规范中，防止出现“为了注浆而注浆”。

### 5 结语

本文从浆液在裂隙中的扩散凝固机制出发，系统探讨注浆材料优选与配比调控、钻孔布局与参数优化、注浆压力—速率—浓度—间歇方式的动态匹配等关键环节。研究指出，工艺优化本质是将经验施工升级为“地质表征—浆岩匹配设计—实时反馈调控—效果验证”的闭环流程。实现该转变需多手段协同：精细勘探提供地质基础，室内流变试验确定浆液参数，现场监测支撑动态调控，压水试验与物探验证封堵效果。未来，结合智能注浆系统与数字孪生技术，有望实现参数自动寻优与自适应调控，显著提升堵水工程的可靠性与经济性，为深部煤矿安全开采提供高效水害防控支撑。

### 参考文献

- [1] 王杰, 刘长友, 张海波. 裂隙岩体注浆浆液扩散规律与可注性评价研究进展 [J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(增刊 1): 3210-3220.
- [2] 陈志国, 李明, 王建军. 超细水泥—水玻璃双液注浆材料性能调控及其在煤矿堵水中的应用 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(7): 156-163.
- [3] 张伟, 赵永刚, 刘洋. 动水条件下注浆浆液抗冲稀性能评价与配方优化 [J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(3): 78-84.
- [4] 周晓峰, 刘慧, 吴昊. 基于裂隙产状统计的注浆钻孔空间优化设计方法 [J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(4): 112-119.