

注浆配比参数优化在煤矿采空区治理中的应用

王永健

中冶地勘岩土工程有限责任公司, 河北 廊坊 065201

[摘要] 随着国民经济的持续发展, 煤矿采空区的处理问题日益突出, 采空区的治理越来越受到岩土工程界的重视, 注浆是最常用的处理方式, 在注浆的实践方面, 目前仍停留在实际工程项目的个例经验总结阶段, 存在包括注浆材料、注浆工艺、注浆效果监测与分析等多方面的技术性难题。通过具体工程实例, 优化注浆配比参数提高注浆效果, 为本地区的采空区注浆治理提供合适的施工参数具有很大的实践意义。

[关键词]: 采空区治理; 优化参数; 注浆效果; 施工质量

DOI: 10.33142/ec.v2i9.687

中图分类号: F426.92

文献标识码: A

Application of Grouting Ratio Parameter Optimization in Goaf Treatment of Coal Mine

WANG Yongjian

Zhongye Geological and Geotechnical Engineering Co., Ltd., Hebei Langfang, 065201 China

Abstract: With the sustainable development of national economy, the treatment of goaf in coal mine is becoming more and more prominent, and the treatment of goaf has been paid more and more attention by the field of geotechnical engineering. Grouting is the most commonly used treatment method. In the practice of grouting, it is still in the stage of summing up the experience of practical engineering projects, and there are many technical problems, such as grouting material, grouting technology, monitoring and analysis of grouting effect and so on. Through concrete engineering examples, it is of great practical significance to optimize grouting ratio parameters to improve grouting effect and to provide suitable construction parameters for grouting treatment in goaf in this area.

Keywords: Goaf treatment; Optimization parameters; Grouting effect; Construction quality

引言

煤矿采空区治理工程领域施工相对少, 在最近几年刚刚接触, 缺少成熟的施工经验, 煤矿的采空区情况复杂、残留的空洞并未完全密实, 使得采空区治理初期, 单孔吸浆量巨大, 如按照原浆液配比设计的经验参数进行施工, 不仅将会造成远超成本预算, 增加投资, 而且直接影响工期及注浆效果。为此寻求水泥用量最经济合理且满足结石体抗压强度要求的优化浆液配比, 是煤矿采空区注浆治理工程成败的关键。

1 工程概况及工程地质条件

1.1 工程概况

七里河煤矿采空区位于太行山东麓, 为山前倾斜平原区的七里河新近冲洪积平原河漫滩地小区, 地面标高+54~+90m, 地形较为平缓, 南侧为七里河, 河道宽约 500m,

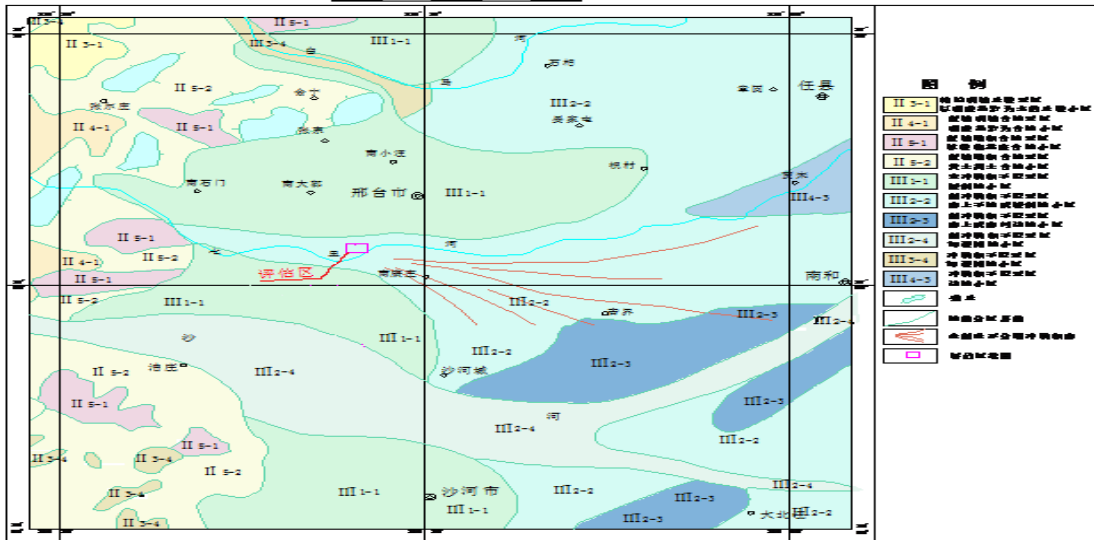
总体地势北高南低, 为不对称宽浅河谷地貌的一侧。建设场地被新生界第四系松散沉积层覆盖, 第四系与下伏各层呈不整合接触。此外, 场区内第四系地层构造复杂, 覆盖较厚由于煤层自燃真空垮塌, 造成岩石破碎, 发育大量节理、裂隙; 在基岩顶界面之下, 受第四系风化作用, 形成 5~20m 风化裂隙带。

1.2 地形、地貌、水文条件

本区属半干旱暖温带大陆性季风气候。四季分明、雨热同期, 昼夜温差大。1995~2005 年, 年平均气温 13.4 °C, 流域内多年平均降水量 562.5mm, 多年平均水面蒸发量 1268.3mm。多年平均日照时数 2532.7 小时, 多年平均风速 1.9m/s, 多年平均无霜冻期 199 天, 最大冻土深度 46cm。本场地位于太行山东麓, 为山前倾斜平原区的七里河新近冲洪积平原河漫滩地小区, 地面标高+54~+90m, 地形较为平缓, 南侧为七里河, 河道宽约 500m, 总体地势北高南低, 为不对称宽浅河谷地貌的一侧。

地貌图

比例尺



1.3 地层条件

1.3.1 地层岩性

建设场地被新生界第四系松散沉积层覆盖，第四系与下伏各地层呈不整合接触。根据邢台矿钻孔及矿井开采掘进揭露的地层情况，本区自下而上有奥陶系中统峰峰组 (O₂f)、石炭系中统本溪组 (C₂b)、石炭系上统太原组 (C₃t)、二叠系下统山西组 (P₁s)、二叠系下统下石盒子组 (P₁x)、二叠系上统上石盒子组 (P₂s)、新生界第四系 (Q)。详见综合地层柱状图 (图 2-3-1) 及地质剖面图 (图 2-3-2)。地层由老至新描述如下：

①奥陶系 (O)

奥陶系中统 (O₂)

主要岩性为厚层状灰黄、深灰、灰色石灰岩，局部层段为花斑状、角砾状白云质石灰岩夹泥质石灰岩，区域厚度 400m~600m。

②石炭系 (C)

本溪组 (C₂b)

底部为褐灰色、浅紫红色铝土岩及铝土质泥岩，含菱铁质鲕粒及结核，其上为 1~2 层浅灰色中厚层状石灰岩夹薄煤 1 层，为 10 号煤，俗称尽头煤。上部为深灰色粉砂岩、泥岩，致密，呈水平层理，含植物化石。均厚约 30m。与下伏奥陶系中统峰峰组呈平行不整合接触。

太原组 (C₃t)

由深灰、灰色泥岩、粉砂岩，灰、灰白色砂岩及四层灰~深灰色石灰岩组成，含煤 8~14 层，其中 9 号煤是主要可采煤层，该组为矿区主要含煤地层。平均厚度 150m。与下伏太原组呈整合接触。

③二叠系 (P)

山西组 (P₁s)

主要由深灰、灰、黑色粉砂岩、砂质泥岩，灰至灰白色砂岩组成，含煤 3~5 层，其中 2 号煤为本矿主要可采煤层。本组为矿区主要含煤地层，平均厚度约 60m，与下伏太原组呈整合接触。

下石盒子组 (P₁x)

主要岩性为浅黄、灰黄、土黄色中~细粒砂岩、粉砂岩、泥岩，夹土黄、紫红、花斑状铝土质泥岩，铝土质泥岩含铁质，

具鲕状结构。区域厚度约 40m~100m，与下伏山西组呈整合接触。

上石盒子组 (P₂s)

主要为灰绿、紫灰色、黄、紫黄色砂岩、粉砂岩及泥岩，底部以黄、灰白色厚层状含砾粗砂岩与下石盒子组分界，

顶部以暗紫色粉砂岩夹砾质泥岩与石千峰组分界。平均厚度约 120m。与下伏下石盒子组呈整合接触。

④新生界第四系 (Q)

为坡积、洪积冲积物松散沉积，以杂色砂土为主，发育卵砾石层。平自下而上分为下、中、上更新统和全新统。下更新统由冰水堆积的含粘土砾卵石（泥砾）等组成；中更新统为冰水相、冲湖积相沉积的含砂粒粘土和粉质粘土夹风化砂层，偶夹薄层砂砾石；上更新统为冲洪积粘性土夹砂、砂砾石层及坡洪积的粉质粘土、碎石土；全新统为冲积、洪积的粉质粘土和粉土。与下伏各地层呈不整合接触。第四系层厚度为 220m 左右。详见第四系等厚线图（图 2-3-3）。

地层综合柱状图

图 2-3-1

地界	层单位			地层代号	标志层或煤层号	柱状	地层厚度		累计深度 (米)	岩性描述
	系	统	组				平均	最小-最大		
新生界	第四系			Q			127.2 20.00-213.00	127.20	上部和中部为砂、粘土互层地层， 上部和底部为砾石层	
				二叠系	下统	上石盒子组			117.71	244.91
古生界	二叠系	下统	下石盒子组	P ₂ sh	石盒子砂岩		16.17	261.08	砂、页岩互层；灰绿，灰紫花色， 含铝土质，具鲕状结构，上、下部 含砂稍多。	
							20.92 8.89-29.41	282.00	细砂岩：灰色中细粒砂岩，具带黑色 线状相间的水平层理和斜层理。	
古生界	石炭系	山西组	P ₁ s	1煤			0.61 0-1.13	328.98	含煤地层，厚约60m，以粉砂岩为 主，含煤5层。	
				2煤		6.20 1.19-9.17				
新生界	石炭系	太原组	C ₂ t	3			0.58 0.37-1.27	474.64	含煤地层，厚约150m，以砂、页岩为主， 含煤14层和薄层灰岩4层！	
				野青灰岩		2.25 0.50-5.18				
				4		0.87 0.22-1.82				
				5		1.47 0.87-2.67				
				6		0.60 0.10-1.65				
				伏青灰岩		1.61 0.20-2.91				
				7		0.97 0.50-1.57				
				大青灰岩		5.60 1.18-11.64				
				8		1.10 0.24-2.14				
				9		5.54 4.30-10.16				
古生界	石炭系	中溪组	C ₂ t	10			0.36 0.19-0.66	492.75	以泥质页岩和砂岩为主，含有不稳定的 层煤和薄层灰岩，平均厚度30m左右。	
				本溪灰岩		3.05 0.32-7.18				
奥陶系	中统		O ₂	奥陶系灰岩		563 484-600		灰岩：青灰色，岩性及厚度大体与 区域情况一致，质纯致密，中下部 夹有豹皮状泥灰岩，含头足类珠角 石化石，岩层中裂隙溶洞极其发育， 特别是中上部喀斯特化，富水性极 强。		

1.3.2 煤层情况

邢台矿筹建于1961年11月，1968年10月1日正式投产，设计生产能力90万吨/年。2007年，邢台矿原煤产量达250万吨。邢台矿目前开采深度在-450m水平以上，采煤方法为走向长壁法。主要含煤地层为二叠系下统山西组和石炭系上统太原组，含煤19层，可采与局部可采煤层8层，自上而下依次为：1#煤、2#煤、4#煤、5#煤、6#煤、7#煤、8#煤、9#煤，煤层总厚度17.3m，其中山西组2#号煤平均煤厚6.20m，太原组9#煤平均煤厚6.17m。现邢台矿开采煤层为2#煤、5#煤。

采煤工艺分为综采、综放、轻放三种开采方式，工作面之间实行无煤柱开采，支护方式采用锚网支护。预计剩余可开采储量还可开采26年。

评估区范围内只开采了2#煤。

各煤层特征见表2.3-2。

表2.3-2 可采煤层特征表

煤层 编号	厚度 (m)			煤层可采 指数 (km)	煤层变异 系数 (r)	稳定性	备注
	最小	最大	平均				
一	0	1.18	0.61	0.35	42.5	极不稳定	
二	4.19	9.47	6.20	1.00	13.47	稳定	
四 _F	0.22	1.82	0.67	0.36	39.18	极不稳定	
五	0.87	2.67	1.47	0.95	34.00	稳定	
六	0	1.99	0.74	0.39	53.70	极不稳定	
七	0.5	1.57	0.97	0.88	22.00	较稳定	
八	0.24	2.14	1.10	0.74	49.00	不稳定	
九	3.12	10.16	6.17	1.00	37.00	稳定	

2#煤层（俗称“大煤”）

2#：2#煤层位于山西组地层下部，煤层上距下石盒子组底部骆驼钵砂岩平均厚38.55m。煤层分布广，厚度大，层位稳定，为邢台煤矿主采煤层之一。煤层厚度2.42~9.46m，平均6.20m。煤层倾角一般为15°左右。详见二煤底板等值线图（图2-3-4）

5#煤层（俗称“山青小煤”）

5#：该煤层位于太原组地层中上部，煤层厚度0.00~2.77m，平均1.31m。煤层厚度多集中在0.8~2.2m之间。为较稳定的可采中厚煤层。

9#煤层（俗称“下架煤”）

该煤层位于山西组地层下部，下距本溪组顶界11.70m左右，距本溪组灰岩7.38~27.75m，平均15.85m。煤层分布广，厚度大，层位稳定，为邢台煤矿主采煤层之一。煤层厚度3.12~10.16m，平均6.17m。为可采稳定厚煤层。

2 方案设计

2.1 采空区治理范围的确定

根据地质灾害评估报告，开采时间比较早的采空区处于稳定状态，本次注浆治理范围主要是对2008年开采的7802工作面范围内进行注浆孔设计，注浆面积约27000平方米。

2.2 采空区注浆量设计

煤矿治理采空区最大注浆量可根据下列公式进行估算： $Q=(1+\lambda)\beta ksm$ 注浆量估算约为80000立方米。（采空区厚度按6.2米计算）

2.3 注浆孔布设原则

浆液在岩体裂缝中的流动规律，可参照刘嘉材推导出的公式（1）：

$$R = \sqrt{\frac{0.093(p_c - p_0) T \delta^2 r_c^{0.21}}{\mu}} + r_c \quad (1)$$

其中：R 为影响半径(cm)； p_c 为注浆孔内压力(kPa)； p_0 为裂缝内地下水压力(kPa)；T 为注浆时间(s)； δ 为裂缝宽度(cm)； r_c 为注浆孔半径(cm)； μ 为浆液粘度(MPa·s)。

根据岩层倾角、断层倾角、注浆材料、浆液流动与凝固时间，可得到浆液在横向上的扩散范围为 12~15m 之间，竖向扩充距离为 15~30m 之间。考虑一定的安全系数，根据治理采空区实践经验，该场地注浆孔按 25—30 米间距布设。

采空区注浆孔的设计深度为开孔至采空区底板以下 1.5m，灌浆孔的灌注长度为最上部完整基岩下 6m 至灌浆孔底板的深度，注浆管的长度为地面之上 1m 至完整基岩下 6m 处深度。

注浆孔结构：设计钻孔的开孔孔径为 130mm，终孔孔径不小于 91mm。钻孔结构及注浆孔口管结构如图 3-1 和 3-2 所示。冲积层护壁套管直径 127mm，注浆孔止浆套管直径为 110mm。在冲积层很薄的区域，可直接下入止浆管。钻孔施工过程中应每 30m 测斜一次，终孔孔斜不应超过 1°。注浆管应选用直径不小于 50mm 的钢管。

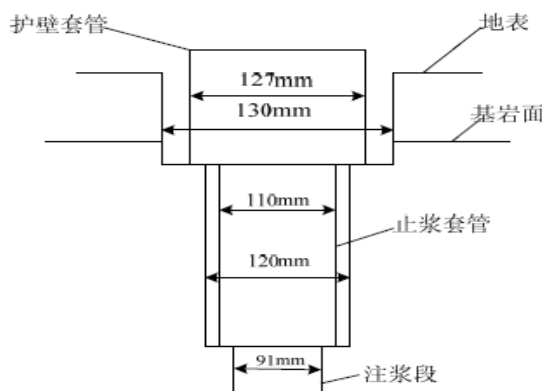


图 2.3.1 注浆钻孔结构示意图

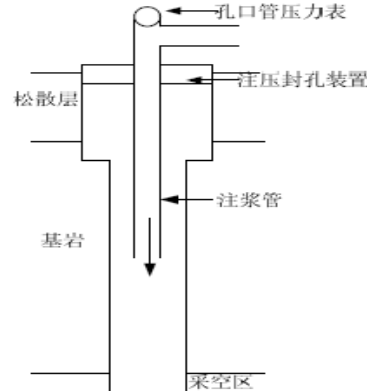


图 2.3.2 注浆孔口管结构示意图

3 注浆材料及配比设计

上述复杂的地质条件因素导致施工过程中注浆的浆液用量大，施工中根据地质情况的变化须优化注浆浆液的配合比设计参数，以提高注浆效果，节约工程造价。由于七里河煤矿采空区复杂的工程地质、水文地质条件，该采空区第四系覆盖层较厚，开采时间也是较晚，整个采空区还处于极不稳定的状态，洞隙较大，注浆过程及其不好掌握，且钻进深度较深，给施工带来很大的困难，因此浆液配合比的优劣直接关系到工程质量的好坏，因此注浆浆液配合比参数的优化是提高注浆效果、节约工程成本的关键。

目前对注浆材料的选择及其配比还是比较混乱，基本是以工程个例现场试验为准，或参照其他比较成功的工程实例，没有统一的标准可以参考。根据以往的注浆施工资料，浆液配比通常依据经验取值设计，经验值的优点是保守，但不经济，有时甚至是浪费，这是极其不科学的，也是不负责任的，没有可靠性，虽然最终结石体抗压强度满足要求，但是在总注浆量需求相当大，造成治理成本费用太高，不符合降耗减排。

3.1 注浆材料及配比的经验值

根据采空区治理的工程实践，注浆配比选取的经验参数：水固比：1：1.1~1：1.2；固相比（水泥：粉煤灰）：3：7。但在采空区治理的后期注浆效果检测时发现：在检查孔中采取的结石体，经检测其抗压强度均为 1.5~2.0MPa，结石率为 85%~87%，而结石体抗压强度的设计值仅为 1MPa，通过进一步对注浆后结石体的综合分析，结石体的抗压强度与浆液固相中水泥用量有关，而结石率与浆液固相中的粉煤灰含量有关，所以以往采空区治理的注浆配比参数选取不合理，材料太浪费，造成投资过大，不符合节能减排。

3.2 通过现场试验优化配比参数

3.2.1 水固比的优化选取

施工现场选择水泥及粉煤灰的混合浆液作为研究对象，在浆液的固相比相同的情况下，获得不同水固比的浆液结

石体抗压强度数据，通过对获取的数据分析，从而总结出浆液的固相比相同的情况下，不同水固比对浆液性能参数的影响情况，分析浆液结石体结石率的变化趋势。

表 1 不同水固比浆液性能试验成果

编号	固相比 (%)		水固比	黏度 (s)	结石率 (%)
	水泥	粉煤灰			
1	10	90	1:1.0	21	76
2	10	90	1:1.2	22	78
3	10	90	1:1.5	19	79
4	15	85	1:1.0	20	78
5	15	85	1:1.2	29	80
6	15	85	1:1.5	20	81
7	20	80	1:1.0	19	79
8	20	80	1:1.2	30	81
9	20	80	1:1.5	22	82
10	30	70	1:1.0	18	81
11	30	70	1:1.2	32	83
12	30	70	1:1.5	24	85

由表 1 数据分析得出：

相同固相比的水泥粉煤灰混合料浆液的结石率随着浆液水固比在一定范围内的减小或浓度的增加而增加，根据施工经验及工程实践，浆液的水固比可选取优化值 1:1.2~1.3。

3.2.2 外掺剂掺量的选取

在浆液的固相比相同及水固比 1:1.2 的情况下，外掺剂的含量不同对浆液结石体结石率影响数据，通过对获取的数据分析，从而总结出不同外掺剂掺量对浆液性能参数的影响情况。

表 2 水泥粉煤灰浆液性能试验成果

编号	固相比 (%)		水玻璃	水固比	黏度 (s)	结石率 (%)
	水泥	粉煤灰				
1	10	90	3	1:1.2	39	79
2	10	90	4	1:1.2	38	80
3	10	90	5	1:1.2	40	82
4	15	85	3	1:1.2	28	95
5	15	85	4	1:1.2	28	94
6	15	85	5	1:1.2	29	95
7	20	80	3	1:1.2	21	90
8	20	80	4	1:1.2	22	87
9	20	80	5	1:1.2	21	88
10	30	70	3	1:1.2	23	87
11	30	70	4	1:1.2	24	86
12	30	70	5	1:1.2	25	88

根据表 2 的数据分析可得：

相同水固比和相同固相比的水泥粉煤灰浆液结石率加以对比，加入不同比例的外掺剂（水玻璃）后均较大程度的提高了浆液的结石率。根据施工经验，外掺剂的最优掺量 3%~5%。

3.2.3 固相比的优化选取

在浆液的水固比相同的情况下，获得不同固相比的浆液结石体抗压强度及结石率的数据，通过对获取的数据分析，从而总结出浆液的水固比相同的情况下，不同固相比对浆液结石体抗压强度及结石率的影响程度及其变化趋势。

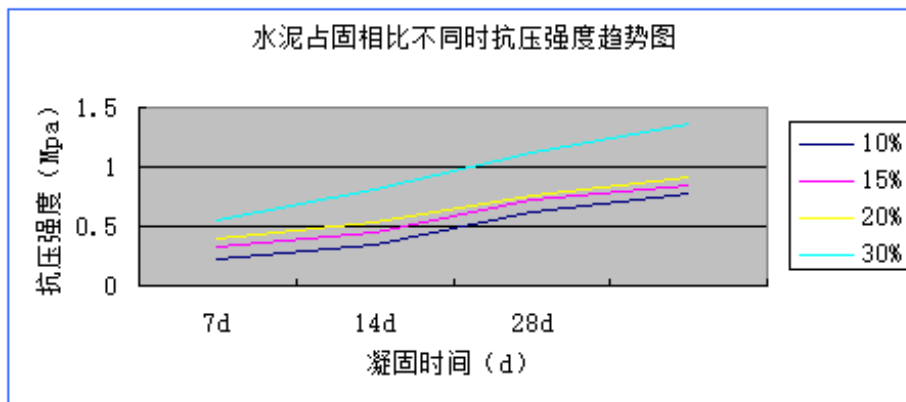
根据试验结果数据进行分析以及现场结石体强度试验，得出水泥、粉煤灰结石体强度试验成果如下表 3。

表 3 水泥、粉煤灰结石体强度试验成果表

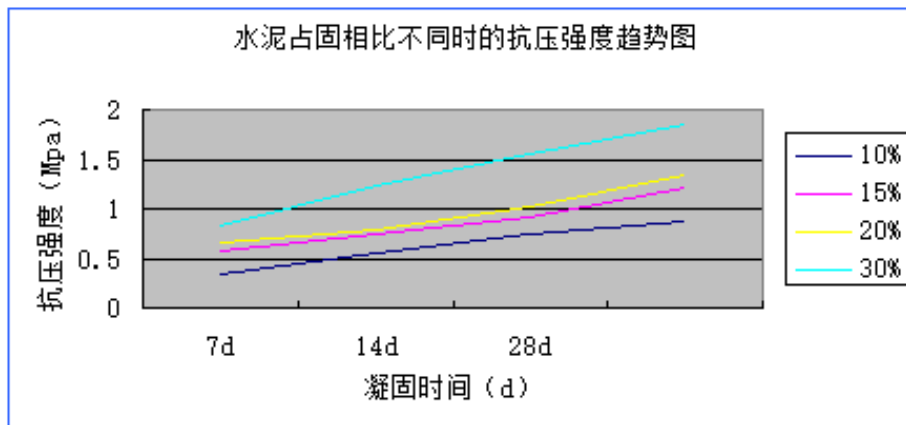
编号	固相比 (%)		水固比	抗压强度 (Mp)		
	水泥	粉煤灰		D7	D14	D28
1	10	90	1:1.0	0.26	0.33	0.58
2	15	85	1:1.0	0.38	0.51	0.80
3	20	80	1:1.0	0.40	0.52	0.86
4	30	70	1:1.0	0.45	0.67	1.35
5	10	90	1:1.2	0.31	0.54	0.67
6	15	85	1:1.2	0.42	0.72	0.95
7	20	80	1:1.2	0.46	0.87	1.28
8	30	70	1:1.2	0.57	1.06	1.85
9	10	90	1:1.5	0.32	0.55	0.73
10	15	85	1:1.5	0.45	0.74	0.98
11	20	80	1:1.5	0.49	0.89	1.40
12	30	70	1:1.5	0.65	1.26	1.85

由上表可以得出，当浆液水固比分别为 1:1.0、1:1.2、1:1.5 时，结石体抗压强度随水泥占固相比不同的趋势图。

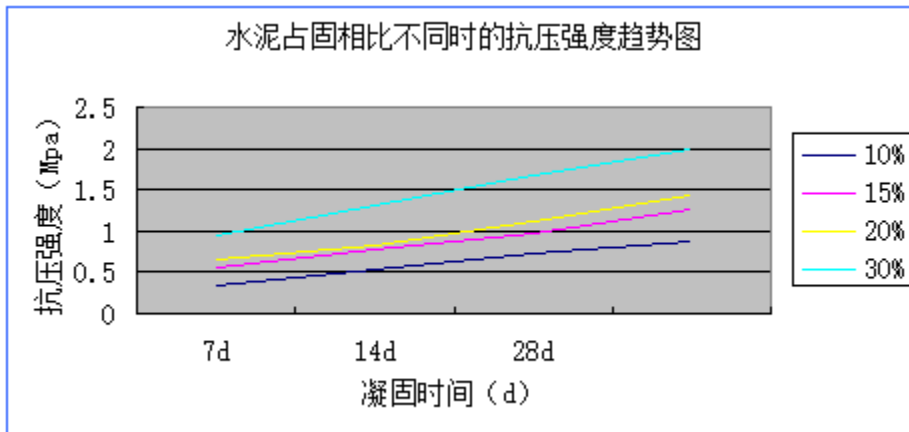
① 当浆液水固比为 1:1.0 时，水泥占固相比不同百分比时抗压强度趋势如下图 1。



② 浆液水固比为 1:1.2 时候水泥占固相比不同百分比时抗压强度趋势如下图 2。



③ 浆液水固比为 1:1.5 时候水泥占固相比不同百分比时抗压强度趋势如下图 3。



观察上图 1、图 2、图 3，除了能直观得知抗压强度随龄期的增长而增大外，还可得知，浆液结石体抗压强度随着水固比的减小而增大，同时结石体抗压强度也随水泥占固相比的增大而增大；水固比相同的水泥粉煤灰混合料浆液的结石率随着水泥组分的增加而增加。

① 当浆液固相比中水泥占 10%、水固比在 1:1.2-1:1.5 区间变化，结石体凝固时间达到 28 天后，结石体抗压强度接近 0.7MPa 左右，不满足结石体抗压强度设计值 1.0MPa 的要求。

② 当浆液固相比中水泥占 15%、水固比在 1:1.2-1:1.5 区间变化时，结石体凝固时间达到 28 天后，结石体抗压强度接近 1 MPa 以上，最为符合设计要求。

③ 当浆液固相比中水泥占 20%、水固比在 1:1.2-1:1.5 区间变化时，结石体凝固时间达到 28 天后，结石体抗压强度接近 1.3MPa 以上，超过设计值 1.0MPa 的要求。

④ 当浆液固相比中水泥占 30%、水固比在 1:1.2-1:1.5 区间变化时，结石体凝固时间达到 28 天后，结石体抗压强度接近 1.5 MPa 以上，远远超过设计值 1.0MPa 的要求。

所以，当浆液固相比中水泥占 15%、水固比在 1:1.2-1:1.5 区间变化时，结石体凝固时间达到 28 天后，结石体抗压强度接近 1 MPa 以上，最为符合设计要求。

4 采用优化注浆配比参数达到的施工效果

通过检验注浆效果，对比分析可以看出：通过选取优化浆液配比参数，优化降低了固相比中水泥的含量，在使得注浆治理过程中浆液的配比参数更趋合理经济，尤其是采空区治理区域，表明该地层的注浆治理效果与资源配置最佳。

4.1 抗压强度效果

通过检查孔进行取芯检查对比分析，结石体的抗压强度在满足设计要求的前提下，有了较大的程度的优化，这为降低浆液固相比中水泥的用量提供了前提，以达到满足设计要求的降耗节能。

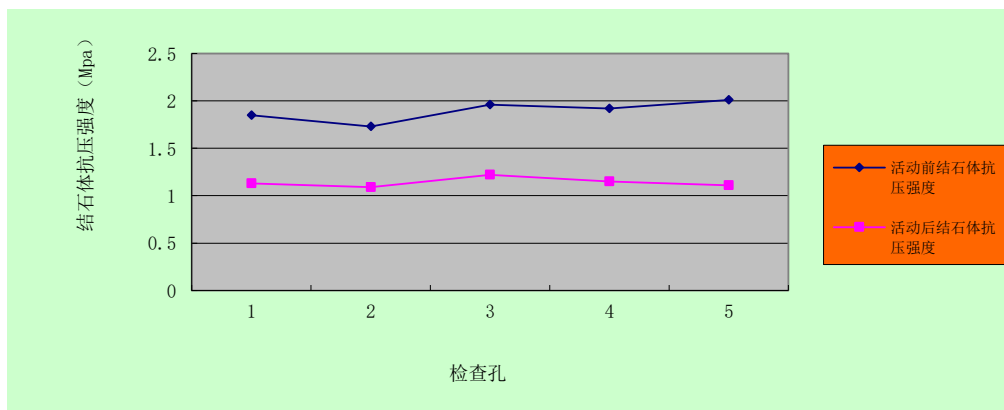


图 4.1 试验前后结石体抗压强度对比图

4.2 波速效果

在检查孔内进行波速测试，采空区治理后，其横波速均大于 180m/s。

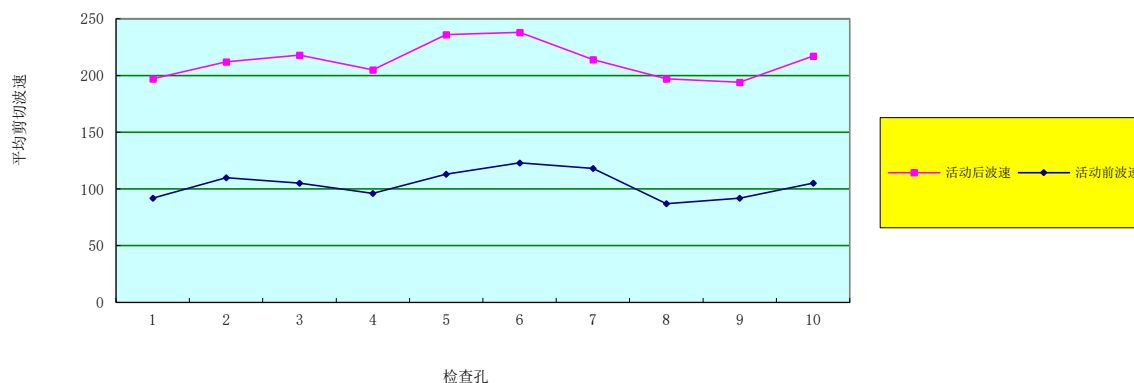


图3 试验前后波速对比图

5 结论

5.1 根据本工程实际施工情况以及试验结果，可以得出结论：在本工程采空区注浆处理中，外加剂只对浆液的和易性及结石体的结石率有较大影响，只要添加外加剂在合理的范围之内，浆液的结石率和和易性就能得到很好的优化控制，由试验结果及施工经验，外加剂优化取值为 3%-5%之间效果相对较好。

5.2 浆液的结石体强度曲线虽然是一条正态增长曲线，但实际结石体的抗压强度并不是一直增大的，而且，浆液的稠度会随着水固比降低而增加，使浆液的可注性受到限制，综合考虑，配比参数选取的区间值，不仅满足了结石体抗压强度的设计要求，又不造成主材的浪费或者浆液难以凝固，从而减少工程造价，达到减耗节能的目的。

[参考文献]

[1]张曙光. 采空区注浆配合比试验优化分析[J]. 西部探矿工程, 2008(20): 114-116.

[2]葛洪臣, 刘立兵. 煤矿采空区注浆工艺及加固效果检测[J]. 矿业研究与开发, 2012(05): 24-26.

作者简介: 王永健 (1963-), 毕业学校: 河北农业大学; 现就职于中冶地勘岩土工程有限责任公司总经理。