

深部采空区注浆效果即时检测方法

赵 文,邵红旗

(中国煤炭科工集团 西安研究院有限公司,陕西 西安 710077)

摘要:为了即时检测采空区地基充填治理过程中的注浆效果,动态评判治理质量,以济宁某深部条带采空区治理控制注浆为对象,开展治理过程中注浆效果即时检查方法研究,提出了多系数法定量即时检测注浆效果,结合施工过程中的钻探、注浆数据,给出了 4 项系数指标的计算方法,并确定了指标量化评价标准。结果表明:后序钻孔注浆量衰减系数 s 越大,表明采空区注浆目标层段可注性越差,注浆充填效果越好。Ⅱ序孔注浆量衰减系数不宜低于 0.3,Ⅲ序孔注浆量衰减系数不宜低于 0.9。后序钻孔循环液全漏失高度下行系数 l 越大,表明采空区地层剩余空隙率越小,注浆充填效果越好。Ⅱ序孔全漏失高度下行系数不宜低于 0.15,Ⅲ序孔全漏失高度下行系数不宜低于 0.20。各注浆单元注浆量空间分布差异系数 c 越小,表明存在注浆薄弱区域风险越低,注浆充填效果越好。空间分布差异系数不宜超出 ± 0.15 范围。同一次序钻孔注浆量离散系数 δ 越小,表明注浆过程控制效果越好,注浆充填质量越高。单孔注浆量离散系数不宜超过 1.2。工后质量检测验证了多系数指标法的可靠性,多系数指标方法点面结合,各指标检测结果相互验证,准确反映了施工过程中的注浆效果。利用即时分析结果可对注浆施工过程中的注浆工艺及其参数进行动态优化调整,强化注浆施工的过程质量控制,提高注浆治理质量。

关键词:深部采空区;充填治理;注浆效果;即时检测;多系数法

中图分类号:TD325 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2021)S2-0621-08

Instant detection method of grouting effect in deep mine goaf

ZHAO Wen, SHAO Hongqi

(Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to obtain the grouting effect and dynamically evaluate the treatment quality in the process of foundation filling treatment of mine goaf, the grouting effect instant inspection method was studied for a deep strip mined out area in Jining, China. The multi-coefficient method was proposed to quantitatively and timely detect the grouting effect. Combined with the drilling and grouting data in the construction process, four coefficient indexes were given, and the index evaluation standard was determined. The results show that the larger the attenuation coefficient s of grouting amount in the later sequence drilling, the worse the injectability of the goaf stratum is, the better the grouting filling effect is. The attenuation coefficient of grouting amount in sequence II should not be lower than 0.3, and that in sequence III should not be lower than 0.9. The larger the downward coefficient l of the total leakage height of circulating fluid in the subsequent drilling holes is, the smaller the residual void ratio of the grouting target layer in goaf is,

收稿日期:2020-11-27 修回日期:2021-01-13 责任编辑:郭晓炜 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2020.1844

基金项目:中国煤炭科工集团有限公司科技创新创业资金专项重点资助项目(2018-2-ZD007);中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金资助项目(2019XAYZD05)

作者简介:赵文(1990—),男,河南驻马店人,工程师,硕士。E-mail:1318958520@qq.com

引用格式:赵文,邵红旗.深部采空区注浆效果即时检测方法[J].煤炭学报,2021,46(S2):621-628.

ZHAO Wen, SHAO Hongqi. Instant detection method of grouting effect in deep mine goaf[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2): 621-628.



移动阅读

and the better the grouting filling effect is. The total leakage height downward coefficient of the second sequence drilling should not be less than 0.15, and the downward coefficient of the total leakage height of the third sequence drilling should not be less than 0.20. The smaller the difference coefficient c of grouting amount in each grouting unit, the lower the risk of weak grouting area and the better the grouting filling effect. The coefficient of difference should not exceed ± 0.15 . The smaller the dispersion coefficient δ of grouting amount in the same drilling sequence indicates that the better the grouting process control effect and the higher the grouting filling quality. The dispersion coefficient should not exceed 1.2. The reliability of the multi-coefficient index method is verified by the quality inspection after construction. The multi-coefficient index method is combined with each other and the detection results of each index are verified each other, which accurately reflects the grouting effect in the construction process. Using the instant analysis results, the grouting technology and its parameters can be dynamically optimized and adjusted in the process of grouting construction, so as to strengthen the process quality control of grouting construction and improve the quality of grouting treatment.

Key words: deep mine goaf; filling treatment; grouting effect; real-time detection; multi-coefficient method

煤矿采空区地表变形极易造成地表建(构)筑物墙体裂缝、倾斜、不均匀沉降等问题,甚至造成地基失稳或结构破坏。城市发展迫切需要开展采空区治理,使煤矿采空区成为可供城市发展利用的土地资源^[1-2]。煤矿采空区地基处理方法较多,常用的方法有注浆充填法、跨越法、砌筑法、强夯法、堆载预压法等^[3-5],其中注浆充填法技术可靠、适用范围广,广泛应用于高等级采空区地基处理,尤其是对于深部采空区的治理具有显著的技术优势。注浆质量是注浆充填法施工的核心问题,其工后质量检测及效果评价较为成熟,已形成一整套检测方法和评价指标^[6-9],并已列入国家规范^[3]、行业标准^[4]及团体标准^[5]。规范^[3]提出钻探、室内试验方法检测结石体抗压强度,孔内电视、开挖、压浆试验检测充填系数,孔内测井或跨孔CT检测横波波速,变形监测测量倾斜值、水平变形值及曲率值。此外,工程实践中还广泛利用瞬变电磁法、高密度电法及地震法等物探方法^[10-17],通过检测采空区岩土体治理前后物理性质的变化,对注浆效果进行区域性的检测。但工后检测如果发现工程质量有问题,补救不便且延误工期,经济效益低下,甚至引发灾害性的工程事故。

根据注浆施工过程中的实时注浆效果对注浆工艺及其参数进行及时优化调整,只有真正做到动态设计、信息化施工,才能既保证治理质量,又不至于盲目增大工程量。然而采空区注浆工程属于地下隐蔽工程,在注浆过程中很难直观了解注浆效果,注浆质量受控因素复杂,注浆浆液扩散范围和充填率具有较大的不确定性^[7,13],尤其是技术复杂的局部充填控制注浆,对其过程质量控制一直是个难题。制定有效的定量即时检测方法对采空区注浆过程质量控制十分重要,即时检测指标及其评判标准的确定尤为关键。刘

强^[18]、柴建禄^[19]等通过注浆前后区域水文地质条件变化对矿山帷幕注浆效果作了过程分析评价,而目前采空区注浆充填效果的即时检测方面研究仍较欠缺,尚未形成系统完善的采空区注浆效果即时检测分析方法和评价体系。笔者拟结合深部条带采空区治理注浆工程,对治理过程中的注浆效果进行定量即时检测分析,根据分析结果指导注浆施工,有助于注浆过程中的质量控制。

1 工程地质背景及注浆治理方案

济宁北某深部煤矿采空区治理工程场地为近代形成的汶泗河冲洪积平原,地面标高为+37.93~+39.87 m,地表自然地形坡度为2‰。采空区整体由东北向西南倾斜,倾角 $6^{\circ}\sim 7^{\circ}$,处于全充水状态。采空区底板标高-469.6~-563.5 m,顶板全部垮落法管理,采空区“三带”发育特征明显,覆岩裂隙主要发育在底板以上40 m范围,实测垮落带高度8.00~9.58 m;断裂带高度18.85~77.72 m;弯曲变形带已发育至地表。项目区分布3个短壁条带采空区,其中南区包含7334、7338等2个工作面,煤层采高平均2.80 m,工作面倾向长度50 m,煤柱宽度100 m,采空区平面分布如图1所示。

项目区拟进行高强度商业开发,拟建建(构)筑物密集,人口众多。根据采空区工程地质条件及变形监测数据,结合相关研究^[20-22],评价采空区对项目区地表工程建设的影响程度中等~大。为了场地可正常开展工程建设,采用注浆法对项目场地采空区地基进行充填治理。注浆治理方案提出煤柱保护^[23]与采空区控制充填相结合的方法,采用分序分段注浆工艺,注浆浆液主要为水泥基浆液及自研颗粒型再生充填料浆,浆液材料主要为水泥、粉煤灰、建筑再生骨料

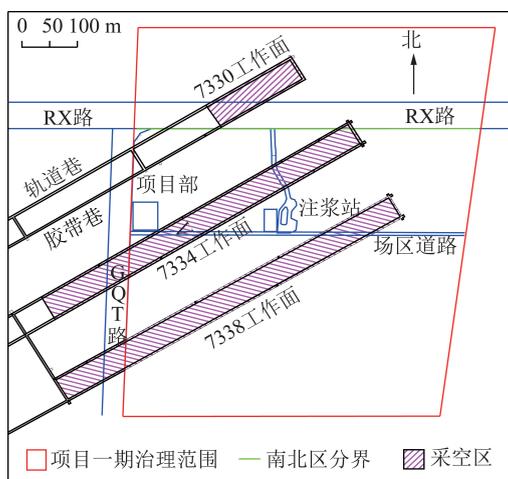


图 1 项目采空区平面分布范围

Fig. 1 Goaf plane distribution range of Jining project

等,根据需要添加外加剂。在未掉钻采区主要灌注水泥基浆液,掉钻较小区域灌注低浓度再生充填料浆,掉钻较大区域灌注高浓度再生充填料浆。

根据设计方案钻孔布设形式及浆液扩散范围,将每个采空区工作面划分为若干注浆控制单元,每个单元内钻孔分三序施工。项目一期南区共分为 9 个注浆控制单元,平面位置如图 2 所示。

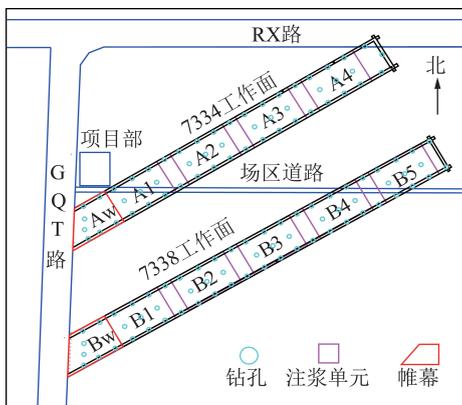


图 2 各注浆单元平面分布

Fig. 2 Plane distribution of each grouting unit

2 注浆效果定量即时检测方法研究

为实时掌握采空区充填治理过程中的注浆效果,结合注浆钻孔钻探过程中循环液全漏失情况,注浆过程中各序次钻孔实时注浆量及注浆工艺等对注浆效果的定量即时检测方法开展研究。提出 4 个系数作为注浆效果即时检测分析指标。

2.1 后序钻孔注浆量衰减系数

采用注浆法充填采空区地基,钻孔分序注浆具有叠加效应^[18]。随着注浆施工的分序进行,采空区地层的可注性逐渐降低,呈现出后序钻孔注浆量小于前序孔的规律。因此,可采用后序钻孔注浆量衰减系数

即时检查注浆效果。

后序钻孔注浆量衰减系数 s 计算公式为

$$s = \frac{n \sum_{i=1}^m q_i - m \sum_{i=m+1}^{m+n} q_i}{n \sum_{i=1}^m q_i} \quad (1)$$

式中, $q_i (i = 1, 2, \dots)$ 为钻孔单孔注浆量, m^3 ; m 为某一次序钻孔数; n 为后序钻孔数。

后序钻孔注浆量降低越多,注浆量衰减系数 s 越大,表明采空区注浆目标层段可注性降低越明显,注浆充填效果越好。

2.2 后序钻孔循环液全漏失高度下行系数

对于断裂带的裂隙注浆,研究表明^[24-25],裂隙内同一点的压力随注浆压力的增大和裂隙开度的减小而增大。在开度较小的裂隙中注浆,水泥基颗粒型浆液在高压作用下加速析水,从而缩短了凝结时间,先于大尺度裂隙被弥合封堵。试验验证^[26-27],随着裂隙开度及浆液水灰比的减小,裂隙注浆的堵漏效率增高。此外,颗粒型浆液具有结石率效应,尺度较大的空隙需重复多次注浆才能逐渐充填饱满,其堵漏难度明显高于小开度裂隙。

受采动影响的覆岩垮落断裂带内,随着岩层埋深的减小,空隙率逐渐降低^[28]。采用全孔段一次性充填或分段下行式充填工艺时,垮落断裂带上部小裂隙最先被浆液充填弥合,在后序钻孔揭露该裂隙层段时不再出现循环液漏失现象,表现出后序钻孔循环液全漏失位置下行的规律。以上分析表明分序钻进成孔过程中,钻孔循环液全漏失位置距底板高度(称全漏失高度)逐序下行。在钻探过程中,统计后序钻孔循环液全漏失高度下行系数可有效反映浆液在注浆目标层段的充填效果。

后序钻孔循环液全漏失高度下行系数 l 计算公式为

$$l = \frac{n \sum_{i=1}^m h_i - m \sum_{i=m+1}^{m+n} h_i}{n \sum_{i=1}^m h_i} \quad (2)$$

式中, h_i 为钻孔循环液全漏失高度, m 。

后序钻孔循环液全漏失高度下行系数 l 越大,表明采空区地层剩余空隙率越小,注浆充填效果越好。

2.3 单元注浆量空间分布差异系数

对于治理范围较大的采空区,可根据充填方案分成若干注浆控制单元,每个单元控制一定区域。同一采区的各个注浆单元可注性基本一致。当倾向长度相同的条带采空区采用相同的注浆工艺时,可通过分

析各注浆单元沿工作面走向每米注浆量差异来判断浆液在空间上的扩展是否存在薄弱区域^[29]。单元注浆量空间分布差异系数 c 计算公式为

$$c = \frac{aQ_x/L_x - \sum_{j=1}^a Q_j/L_j}{\sum_{j=1}^a Q_j/L_j} \quad (3)$$

式中, $Q_{x/j}$ ($x/j = 1, 2, \dots$) 为注浆单元累计注浆量, m^3 ; $L_{x/j}$ 为注浆单元沿工作面走向长度, m ; a 为项目区注浆单元个数。

各注浆单元注浆量空间分布差异系数 c 变化范围越小, 表明存在注浆薄弱区域的风险越低, 注浆充填效果越好。在注浆过程中, 依次分析不同注浆单元同一次序钻孔的注浆量差异系数 c , 可根据分析结果对注浆薄弱高风险区域的注浆工艺进行针对性的动态调整, 实时消除注浆薄弱区域。

2.4 钻孔注浆量离散系数

在采空区治理过程中, 为提高注浆充填率, 通常采用分序注浆。同一采区、同一次序钻孔可注性接近, 钻孔之间注浆量离散程度应较小。注浆量离散系数可直观反映各钻孔注浆量的离散程度^[18], 可通过各序钻孔注浆量离散系数来评价注浆充填质量。钻孔注浆量离散系数 δ 计算公式为

$$\delta = \sqrt{\frac{m^2 \left(\sum_{i=1}^m q_i^2 \right) - m \left(\sum_{i=1}^m q_i \right)^2}{(m-1) \left(\sum_{i=1}^m q_i \right)^2}} \quad (4)$$

对于同一次序钻孔, 在注浆工艺相同的情况下, 注浆量离散系数 δ 越小, 说明注浆过程控制效果越好, 注浆充填质量越高。

此外, 在施工过程中还可以根据后序钻孔进尺速度变化、是否掉钻、取芯情况等施工信息动态辅助判断注浆效果^[19]。

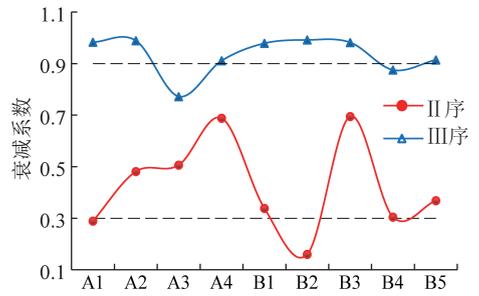
3 多系数即时检测分析方法应用

3.1 后序钻孔注浆量衰减系数计算分析

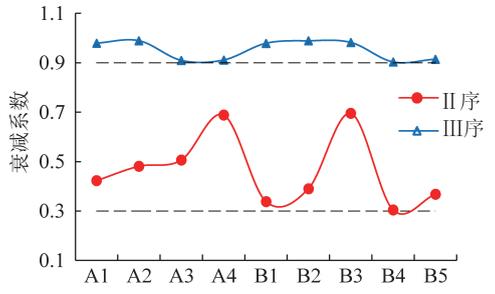
利用自动化注浆控制系统实时记录钻孔注浆量, 将统计数据代入式(1), 计算出9个注浆单元的后序钻孔注浆量衰减系数, 如图3所示。

从图3(a)可知, A1, B2注浆单元II序孔注浆量衰减系数小于0.3, 明显低于其他单元; A3, B4注浆单元III序孔注浆量衰减系数小于0.9, 明显低于其他单元。

结合2.1节理论分析, 对A1, B2注浆单元II序孔及A3, B4注浆单元III序孔先后采取扫孔、补孔等



(a) 优化调整前



(b) 优化调整后

图3 各注浆单元后序钻孔注浆量衰减系数

Fig. 3 Attenuation coefficient of subsequent drilling grouting amount in each grouting unit

补浆措施。

从图3(b)可知, 在优化调整完成后, 9个注浆单元的II序孔注浆量衰减系数均超过0.3; III序孔注浆量衰减系数均超过0.9。

通过以上计算分析, 可得出II序孔注浆量衰减系数不宜低于0.3, III序孔注浆量衰减系数不宜低于0.9。对注浆量衰减系数较小单元应采取针对性的补浆措施。对II序钻孔衰减系数远超平均值的单元, 应重点关注其III序孔衰减系数是否异常, 并在后续优先安排钻孔取芯验证, 及时排除因浆液扩散范围过小等问题导致的注浆量异常衰减。

3.2 循环液全漏失高度下行系数计算分析

在注浆钻孔钻进过程中, 整理9个注浆单元各序次钻孔循环液平均全漏失高度, 见表1。

将表1数据代入式(2), 计算出9个注浆单元的后序钻孔循环液全漏失高度下行系数(图4)。

从图4(a)可知, A3, B2, B4注浆单元II序孔循环液全漏失高度下行系数小于0.10, 而其他6个注浆单元的钻孔全漏失高度下行系数均大于0.15, 这3个单元的下行系数明显低于其他单元。

结合2.2节理论分析, 提出在A3, B2, B4注浆单元的II序孔注浆过程中, 采取针对性扫孔、补孔等措施, 补浆完成后, 再进行III序钻孔钻探施工。

从图4(b)可知, 通过II序钻孔注浆动态调整, 9个注浆单元的III序钻孔全漏失高度下行系数均超过

0.20,尤其是 B4 注浆单元 II 序孔全漏失高度下行系数较低,优化注浆工艺后,III 序孔全漏失高度下行系数达到 1.4,下降明显。

表 1 注浆单元各序次钻孔全漏失高度
Table 1 Total leakage height of the each sequence drilling in grouting unit

注浆单元	I 序	II 序	III 序
A1	47.75	38.74	26.30
A2	52.55	39.65	30.37
A3	44.82	41.70	27.20
A4	49.39	40.07	32.10
B1	56.63	46.79	38.40
B2	58.25	56.57	37.84
B3	44.73	36.90	21.56
B4	52.49	49.75	20.69
B5	40.24	31.23	21.44

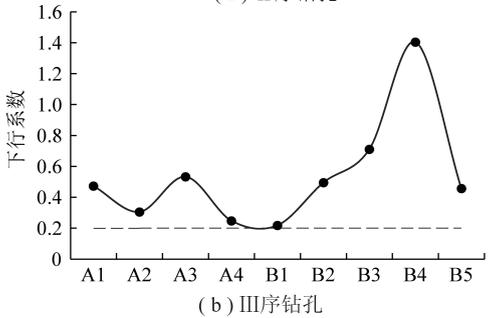
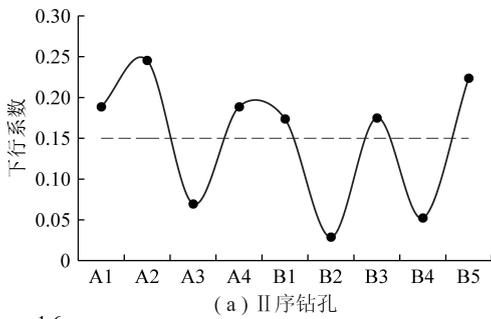


图 4 各单元后序钻孔全漏失高度下行系数
Fig. 4 Total leakage height downward coefficient of subsequent drilling in each unit

通过以上计算分析,可得出 II 序孔全漏失高度下行系数不宜低于 0.15, III 序孔全漏失高度下行系数不宜低于 0.20。对全漏失高度下行系数较小区域应采取针对性补浆。对全漏失高度下行系数远超平均值的钻孔,应注意结合其他指标分析下行原因是否异常。对 III 序钻孔全漏失高度下行系数高于 0.5,尤其是大于 1.0 的注浆单元,应在后续优先安排钻孔取芯验证等自检工作,及时排除因钻孔偏入煤柱等问题造成的下行系数异常。

3.3 单元注浆量空间分布差异系数计算分析

7334,7338 工作面包含 9 个采空区注浆单元,及

2 个治理边界的帷幕单元。在注浆过程中,实时记录 11 个单元钻孔注浆量,将统计数据代入式(3),计算出各单元注浆量空间分布差异系数(图 5)。

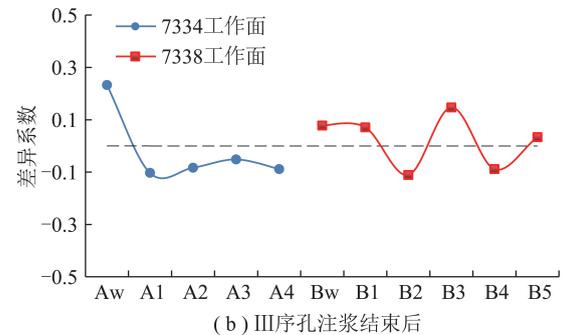
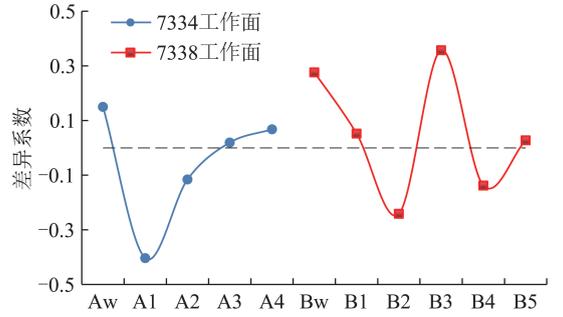


图 5 各注浆单元注浆量空间分布差异系数
Fig. 5 Difference coefficient of grouting amount space distribution in each grouting unit

从图 5(a)可知,在 I 序钻孔注浆结束后,各单元注浆量空间分布差异系数变化范围较大,其中, A1, B2 及 B4 单元的差异系数均低于 -0.15,注浆质量薄弱的风险较高。结合 2.3 节理论分析,在 II, III 序钻孔注浆过程中,对 I 序孔注浆量空间分布差异系数异常低的 A1, B2 及 B4 单元采取针对性的扫孔、补孔等补强措施。

此外,对差异系数异常高的单元动态优化注浆工艺,控制浆液扩散范围。7338 工作面帷幕区 Bw 单元的差异系数达到 0.25,应注意在帷幕区后序钻孔注浆时,采取措施防止浆液扩散范围过大造成不必要的浪费。B3 单元的差异系数高达 0.34,需调整该单元注浆工艺及浆液配比,控制浆液扩散范围,避免不必要的损耗,并在后序钻孔施工过程中,重点分析该单元注浆效果。

从图 5(b)可知,III 序钻孔注浆结束后,采空区各单元注浆量空间分布差异系数均在 ±0.15 范围以内。Aw 差异系数略超 0.15,推测 7334 工作面帷幕区浆液扩散范围稍大。分析认为,经过 3 个序次的注浆,各单元注浆量在空间分布上差异较小,项目一期南区 11 个注浆单元存在注浆薄弱区域的风险较低。

通过以上计算分析,可得出单元注浆量空间分布

差异系数不宜超出 ± 0.15 范围。当差异系数为负时,宜重点关注该区域注浆效果,当差异系数小于 -0.15 时,应及时采取针对性的补浆措施。差异系数为正代表区域单位注浆量高于平均值,表明该区域注浆效果较好,但差异系数大于 0.15 时,应结合其他指标综合分析,必要时调整注浆工艺,预防浆液扩散范围过大造成不必要的损耗,且应优先自检该区域注浆效果。

3.4 钻孔注浆量离散系数计算分析

在注浆过程中,实时汇总2个条带采空区各序次钻孔注浆量,代入式(4)计算出各序次钻孔注浆量离散系数(图6)。

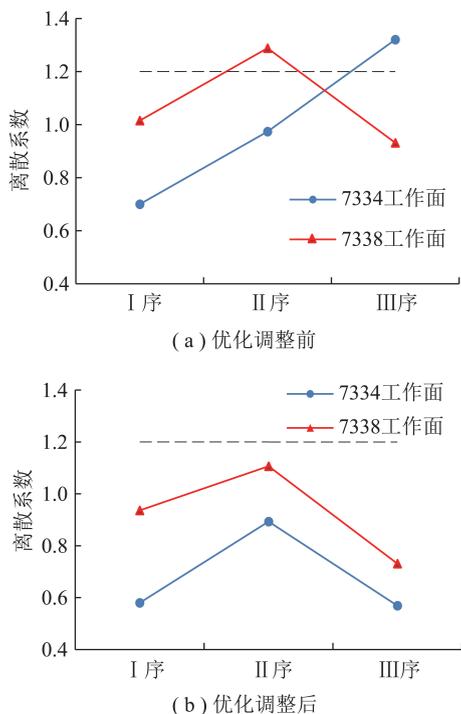


图6 各序次钻孔注浆量离散系数

Fig. 6 Dispersion coefficient of grouting amount in each sequence drilling

从图6(a)可知,各序次钻孔注浆量离散系数在 $0.70\sim 1.32$,其中7334面III序钻孔及7338工作面II序钻孔注浆量离散系数超过 1.2 。

从图6(b)可知,根据3.1~3.3节措施动态优化调整后,各序次钻孔注浆量离散系数在 $0.57\sim 1.11$,均有所降低。

通过以上计算分析,验证同一序次钻孔注浆量离散系数越小,注浆过程控制效果越好,注浆充填质量越高。在注浆过程中,若钻孔注浆量离散程度过大,需警惕是否有钻孔非正常结束注浆,当离散系数达到 1.2 以上,应排查原因,采取针对性补浆措施。

有研究^[18]指出,在矿山堵水帷幕注浆中不同序次钻孔注浆量离散系数呈逐序递减规律。根据项目一期南区3个序次131个钻孔注浆量样本统计结果

显示,各序次钻孔注浆量离散系数并未出现逐序递减现象。钻孔注浆量离散系数不仅受钻孔注浆量的影响,同时也受地层剩余裂隙特征的动态影响。因此,工程地质条件、注浆工艺不同的项目,各序钻孔注浆量离散系数变化特征不同。对于采空区充填注浆,并不能将离散系数逐序递减作为检测注浆效果的依据。

4 注浆效果检测评价与结果验证

利用多系数定量即时检测方法实时掌握注浆效果,动态优化调整注浆工艺,在注浆过程中即时消除注浆薄弱区域。为验证多系数定量即时检测方法的准确性,体现过程质量控制的成效。在注浆结束6个月,通过第三方工后质量检测科学评价采空区治理质量,得出以下检测结论:

(1)检测孔在钻探过程中,垮落断裂带的岩芯采取率超过 90% ,岩芯采取率和RQD指标相较于治理之前有显著提高,钻进速度比治理之前降低了约7倍,表明注浆治理后,垮落断裂带岩层的完整性显著增强,注浆效果良好。

(2)通过对检测孔测井数据的分析,横波波速远大于 300 m/s ,满足治理设计要求,检测孔垮落带、断裂带测井数据与勘察期间的勘察孔测井数据对比,体积密度、自然伽玛均有显著提高,间接表明注浆效果良好。

(3)根据钻孔电视,检测孔垮落断裂带位置明显可见浆液结石体,经对垮落断裂带的残余空隙进行统计,得到残余空隙率为 3.55% ,显著高于治理设计及规范的要求。

(4)对钻孔取芯获取的浆液结石体样品标养72 h后进行室内试验,结果显示结石体单轴抗压强度平均值达到 11.6 MPa ,显著高于治理设计要求的 2 MPa 。

(5)对5个检测钻孔开展压浆试验,平均压浆量为 11 m^3 ,不足评价区注浆钻孔平均单孔注浆量的 5% ,注浆效果良好。计算得出检测孔压浆量离散系数为 0.707 ,与注浆期间III序钻孔注浆量离散系数接近。

(6)根据工后变形监测报告,从2019年12月至2020年5月共进行9次监测,时间跨度为6个月,对3条剖面线的工后累计沉降和沉降速率进行统计,监测点工后6个月累计沉降最大为 7.0 mm ,最大沉降速率为 0.039 mm/d ,得出注浆治理后,地表沉降速率很小,地表变形已处于稳定状态,预计残余变形较勘察时期降低 88% 以上。

通过第三方工后质量检测,综合评定采空区地基

治理注浆工程质量合格。结果验证采用多系数定量即时检测方法可对注浆效果进行全面准确的评价。多系数指标方法点面结合,各指标检测结果相互验证,可定量反映施工过程中的注浆效果。

5 结 论

(1)多系数检测方法可在注浆过程中定量即时检查分析注浆效果,根据检测分析评判结果及时优化调整注浆工艺及其参数,确保达到注浆效果,具有快速高效、动态化及操作简便等特点。

(2)后序钻孔注浆量衰减系数 s 越大,表明采空区注浆目标层段可注性越差,注浆充填效果越好。I序孔注浆量占总注浆量的55%以上,II序孔 s 不宜低于0.3,III序孔 s 不宜低于0.9。 s 较小的单元应采取优化补浆措施; s 远超平均值的单元,宜在后续优先安排自检验证。

(3)后序钻孔循环液全漏失高度下行系数 l 越大,表明采空区地层剩余空隙率越小,注浆充填效果越好。各单元II序孔 l 不宜低于0.15,III序孔 l 不宜低于0.20。 l 较低的单元应采取优化调整措施;而对于 l 远高于正常值范围的单元,应结合其他系数指标综合分析原因。

(4)单元注浆量空间分布差异系数 c 越小,表明存在注浆薄弱区域的风险越低,注浆充填效果越好。各单元差异系数 c 不宜超出 ± 0.15 范围。对于 c 为负的单元,宜持续关注该区域注浆效果,当 c 超出 ± 0.15 范围时,应及时采取优化调整措施。

(5)同一序次钻孔注浆量离散系数 δ 越小,说明注浆过程控制效果越好,注浆充填质量越高。但不同序次钻孔注浆量离散系数并未呈现逐序递减的规律。当 δ 较大时,需警惕是否存在钻孔非正常结束注浆,当 δ 大于1.2时,应排查原因,采取优化调整措施。

(6)本文给出的即时检测评价指标阈值依托于具有“三带”发育特征的条带式采空区充填注浆,对于其他工程地质条件的采空区地基处理质量即时检测尚需结合实际工程条件进一步分析验证指标上下限值的合理性。

参考文献 (References):

[1] 张志沛,刘旭,徐汉民,等.[J].岩土工程学报,2005,27(5):604-606.
ZHANG Zhipai, LIU Xu, XU Hanmin, et al. Experimental studies on grouting quality examination of gob of coalmine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(5): 604-606.

[2] 王彦君.煤矿采空区场地注浆设计及治理效果检测分析[J].中国煤炭地质,2017,29(11):54-59.

WANG Yanjun. Coalmine worked-out area site grouting design, governing effect detection and analysis [J]. Coal Geology of China, 2017, 29(11): 54-59.

[3] GB 51180—2016, 煤矿采空区建(构)筑物地基处理技术规范[S].

[4] JTG/T D31-03—2011, 采空区公路设计与施工技术细则[S].

[5] T/CAGHP 059—2019, 采空塌陷防治工程施工规范(试行)[S].

[6] 刘小平,李姗,刘新星,等.煤矿采空区注浆治理工后质量检测技术与实践[J].煤田地质与勘探,2020,48(5):10.
LIU Xiaoping, LI Shan, LIU Xinxing, et al. Method and practice of quality test after grouting in coal mine goaf[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(5): 10.

[7] 李森林,马博恒,王哲英,等.采空区注浆处理质量检测指标及评价标准的探讨[J].工程勘察,2009(S2):307-312.
LI Senlin, MA Boheng, WANG Zheyang, et al. Discussion on quality inspection index and evaluation standard of goaf grouting treatment [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009(S2): 307-312.

[8] 李光勇,李生生,周禹良.建筑物下伏采空区充填注浆效果综合检验技术[J].煤炭技术,2018,37(10):86-88.
LI Guangyong, LI Shengsheng, ZHOU Yuliang. Combined examine technique for results of backfill grouting for goaf beneath buildings [J]. Coal Technology, 2018, 37(10): 86-88.

[9] 贾新果,孙春东.基于变形监测的采空区注浆加固治理效果评价[J].煤炭工程,2017,49(8):74-77,81.
JIA Xinguo, SUN Chundong. Evaluation of goaf grouting reinforcement effect based on deformation monitoring [J]. Coal Engineering, 2017, 49(8): 74-77, 81.

[10] 彭永良,胡卸文,宋大各,等.大型复杂采空区注浆效果检测方法研究[J].工程地质学报,2013,21(4):664-671.
PENG Yongliang, HU Xiewen, SONG Dage, et al. Method for grouting effect in treating large complicated cavities due to mining [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(4): 664-671.

[11] 吴圣林,丁陈建.综合检测法在采空区注浆效果检测中的应用[J].岩石力学与工程学报,2005,24(S1):5271-5274.
WU Shenglin, DING Chenjian. Application of comprehensive measurement method to check grouting effect in mined-out region [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S1): 5271-5274.

[12] 薛国强,潘东明,于景邨.煤矿采空区地球物理探测应用综述[J].地球物理学进展,2018,33(5):2187-2192.
XUE Guoqiang, PAN Dongming, YU Jingcun. Review the applications of geophysical methods for mapping coal-mine voids [J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(5): 2187-2192.

[13] 曲相屹,李学良.钻、物探技术在采空区注浆效果检测中的应用[J].金属矿山,2013(2):151-155.
QU Xiangyi, LI Xueliang. Application of drilling and geophysical prospecting in detection of grouting effects in goaf area [J]. Metal Mine, 2013(2): 151-155.

[14] 杨镜明,魏周政,高晓伟.高密度电阻率法和瞬变电磁法在煤田采空区勘查及注浆检测中的应用[J].地球物理学进展,2014,29(1):362-369.
YANG Jingming, WEI Zhouzheng, GAO Xiaowei. The application of the methods of high density resistivity method and transient electromagnetic to detecting coal mining goaf and to inspect grouting

- effect[J].Progress in Geophysics,2014,29(1):362-369.
- [15] 刘菁华,王祝文,朱士,等.煤矿采空区及塌陷区的地球物理探查[J].煤炭学报,2005,30(6):715-719.
LIU Jinghua, WANG Zhuwen, ZHU Shi, et al. The geophysical exploration about exhausted area and sinking area in coal mine[J].Journal of China Coal Society,2005,30(6):715-719.
- [16] LI Hai, XUE Guoqiang, ZHOU Nannan, et al. Appraisal of an array TEM method in detecting a minedout area beneath a conductive layer[J]. Pure and Applied Geophysics, 2015, 172 (10): 2917-2929.
- [17] 蒋辉,柳超,贾超,等.地震散射方法在注浆效果检测中的应用[J].工程地球物理学报,2015,12(2):260-265.
JIANG Hui, LIU Chao, JIA Chao, et al. The application of seismic scattering technology to detection of grouting effect[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2015, 12(2):260-265.
- [18] 刘强,张可能,尹琼.矿山帷幕注浆过程控制及注浆效果评价[M].长沙:中南大学出版社,2018.
LIU Qiang, ZHANG Keneng, YIN Qiong. Process control and grouting effect evaluation of mine curtain grouting[M]. Changsha: Central South University Press, 2018.
- [19] 柴建禄,姬中奎,杨帆,等.大型烧变岩帷幕预注浆工程的即时检验技术[J].煤炭工程,2019,51(5):73-77.
CHAI Jianlu, JI Zhongkui, YANG Fan, et al. Instant inspection technology of large-scale burnt rock curtain pregrouting project[J]. Coal Engineer, 2019, 51(5):73-77.
- [20] 王正帅,邓喀中.老采空区地表残余变形分析与建筑地基稳定性评价[J].煤炭科学技术,2015,43(10):133-137,102.
WANG Zhengshuai, DENG Kazhong. Analysis of surface residual deformation and stability evaluation of buildings foundation in old goaf[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(10):133-137,102.
- [21] 任连伟,周桂林,顿志林,等.采空区建筑地基适宜性及沉降变形计算工程实例分析[J].岩土力学,2018,39(8):2922-2932,2940.
REN Lianwei, ZHOU Guilin, DUN Zhilin, et al. Case study on suitability and settlement of foundation in goaf site[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8):2922-2932,2940.
- [22] 郭惟嘉,王勇义.采空区上方修建大型建筑物地基稳定性评价[J].岩土力学,2004,25(S1):57-59.
GUO Weijia, WANG Yongyi. Stability evaluation of constructing large-scale building-toft above mine goaf[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(S1):57-59.
- [23] 李兴尚,许家林,朱卫兵,等.条带开采跨落区注浆充填技术的理论研究[J].煤炭学报,2008,33(11):1205-1210.
LI Xingshang, XU Jialin, ZHU Weibing, et al. Theoretical study on the back fill grouting in caving area with strip mining[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(11):1205-1210.
- [24] LIU Bin, SANG Haomin, LIU Quansheng, et al. Laboratory study on diffusion and migration of grout in rock mass fracture network[J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(1):04020242.
- [25] 董书宁,柳昭星,郑士田,等.基于岩体宏观特征的大型帷幕注浆保水开采技术及应用[J].煤炭学报,2020,45(3):1137-1149.
DONG Shuning, LIU Zhaoxing, ZHENG Shitian, et al. Technology and application of large curtain grouting water conservation mining based on macroscopic and mesoscopic characteristics of rock mass[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3):1137-1149.
- [26] LEE Hangbok, OH Taemin, PARK Euseob, et al. Factors affecting waterproof efficiency of grouting in single rock fracture[J]. Geomechanics and Engineering, 2017, 12(5):771-783.
- [27] 王晓晨,刘人太,张春雨,等.裂隙注浆浆液浓度分布试验研究与机制探讨[J].煤炭学报,2020,45(8):2872-2879.
WANG Xiaochen, LIU Rentai, ZHANG Chunyu, et al. Experimental study on concentration distribution of fracture grouting and discussion on its mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8):2872-2879.
- [28] 宋颜金,程国强,郭惟嘉.采动覆岩裂隙分布及其空隙率特征[J].岩土力学,2011,32(2):533-536.
SONG Yanjin, CHENG Guoqiang, GUO Weijia. Study of distribution of overlying strata fissures and its porosity characteristics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(2):533-536.
- [29] 张民庆,张文强,孙国庆.注浆效果检查评定技术与应用实例[J].岩石力学与工程学报,2006,25(S2):3909-3918.
ZHANG Mingqing, ZHANG Wenqiang, SUN Guoqing. Evaluation technique of grouting effect and its application to engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2):3909-3918.