

注浆法在采空区治理工程中的应用

马孟尧

中铁十四局集团城市发展有限公司

摘要：中国铁建·圣井商业项目位于煤矿井田范围内，场区下存在大范围不稳定的采空区，为避免工程建设过程中发生地面坍塌、建筑物沉降、开裂等严重问题，需要对采空区地基进行加固处理。针对本项目采空区特点、分布及地表建筑规划，通过对建筑地基稳定性影响较大的采空区进行注浆，充填采空区残余空隙及加固采空地层，以提高采空地层的承载能力和减小采空区地层的残余变形值，最终满足拟建场地内拟建建（构）筑物修建和运营地基稳定的条件，保证地表拟建建（构）筑物的安全修建和运营。

关键词：中国铁建·圣井商业项目；采空区治理；注浆法

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.07.036

引言

注浆法是一种常用的地基处理加固方法，是把能凝固的浆液（水泥浆或其他化学浆液）注入岩土地基的裂缝或孔隙中，驱走其中的水分和气体，增强土颗粒间的连接，待硬化后岩土可胶结成一个强度大、防水性能好、化学稳定性良好的整体，从而达到加固地基、防止或减少渗透及不均匀沉降的目的。

一、工程概况及地层条件简介

中国铁建·圣井商业项目位于山东省济南市经十东路以南，项目地块面积共计26158m²（合计39.20亩），拟建项目包括：两栋22层办公楼，4-5层小型办公楼多栋，地下1-2层停车场。主体拟采用钢筋混凝土框架结构，基础形式拟采用筏板+独立基础。根据项目前期采空区勘察报告和详勘报告评估结果采空区对拟建工程的影响程度为大，采空区场地的稳定性为不稳定。场地地下存在不稳定的煤矿采空区，工程建成后将增加较大的地面荷载，有可能引发或加剧采空塌陷及伴生裂缝地质灾害，因此需要对采空区进行治理^[1]。

根据已有的地质资料、采空区勘察出具的物探结果、钻孔资料项目地块存在3煤、4煤、9煤采空区，其中3煤埋深41.8-64.0m，采厚0.5-0.70m，平均采厚0.6m，采空区面积约为19808.33m²；4煤埋深69.4~96.0m，采厚0.5-0.70m，平均采厚0.6m，采空区面积约为18866.26m²；9煤埋深188.7~216.3m，平均采厚1.3m，采空区面积约24771.36m²。以往勘查工作对采空区静水位进行观测，采空区静水位为-28.40m~-53.10m，说明采空区已完全充水。

二、注浆法治理

（一）治理范围及深度

项目拟建22层办公楼的煤矿采空区地基处理设计等级为甲级；多层办公楼的煤矿采空区地基处理设计等级为丙级，其中围护带宽度可按照表1取得。

表 1：维护带宽度取值表

地基处理设计等级	围护带宽度 (m)
甲级	20
乙级	10-15
丙级	5-10

因圣井煤矿煤层倾角为8°左右，将其视为近水平煤层采空区。近水平煤层采空区水平处理范围，可由建（构）筑轮廓尺寸、围护带宽度及采空区覆岩移动的影响宽度按下式确定。

$$B = D + 2d + D'$$

式中：

D——建（构）筑轮廓宽度（m）；

d——围护带宽度（m），按照表4.1取值；

D'——采空区覆岩移动影响宽度（m）。

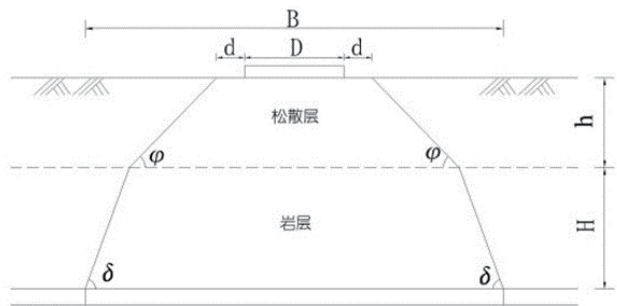


图 1：水平或近水平煤层开采治理宽度计算简图

采空区覆岩移动影响宽度由下式计算得到：

$$D' = 2(h \cot \varphi + H \cot \delta)$$

式中：h——第四系松散层厚度，m；

H——上覆岩层厚度，m；

φ——第四系松散层移动角，°；

δ——采空区上覆岩层移动影响角，°。

根据计算得到的采空区治理范围及采空区分布情况（9煤采空区东部和北部存在自然边界），并考虑到周边具体施工条件圈定了项目区采空区治理范围，其中北部3煤和4煤采空区外扩40m，9煤采空区以开采边界为治理边界；东侧以9煤采空区开采边界为治理边界；南侧以项目用地红线为治理边界；西侧考虑到用地权属及建设进度，以建设用地红线为治理边界，各煤层采空区治理面积见表3。

各煤层采空区治理面积

表 2：治理面积表

采空区名称	治理面积 (m ²)
3煤采空区	20567
4煤采空区	19747
9煤采空区	31901
合计	72215

同时，治理深度含各开采煤层的冒落带、空洞和裂隙带。

(二) 钻孔注浆施工过程

钻孔布置：《煤矿采空区建（构）筑物地基处理技术规范》GB51180-2016，并考虑建筑物重要程度，最终帷幕孔孔间距为15m；注浆孔采用梅花形布置，最终项目区钻孔布置图如图2所示。

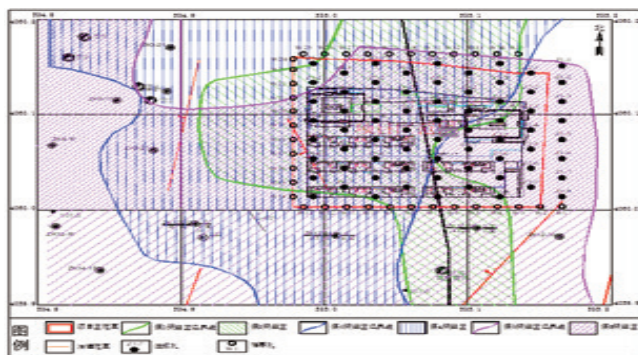


图 2：场区钻孔布置图

1. 钻孔施工

注浆钻孔开孔孔径不小于Φ130mm，钻孔穿过松散层钻进至完整基岩段5m后下套管，并用水泥砂浆固管护壁，孔口管固结后进行压水试验，其最大压力不低于3MPa，保证不窜浆。之后再向下钻进不小于Φ89mm的钻孔，至所需要充填的煤层底板以下2m终孔。所有钻孔孔位偏差小于1m，孔斜小于1°。

钻孔完成后应及时安装注浆管，注浆管采用不小于Φ50mm普通无缝钢管，管壁厚度不少于4mm，采用管箍连接。注浆管与注浆管之间用管箍连接，在中部或上部用一个反丝接箍连接，以便在注浆结束后是的上部注浆管能够反转提出重复使用，注浆管长度根据现场实际情况不超过20m。

2. 注浆材料

本项目采空区注浆填充材料压缩系数小，就地取材经济便宜，所以选择电厂粉煤灰作为注浆液的主要材料。对于采空区内较大的空洞，要求填充骨料，可采用石子（Φ0.5~10mm）填充较大空洞。由于电厂粉煤灰粘接强度不好，活性差，浆液中必须加一定比例的水泥，以提高填充的强度和防止震动液化^[2]。

填充材料：充填水泥为32.5普通硅酸盐水泥，电厂粉煤灰不低于“水工混凝土用粉煤灰技术规范”Ⅲ级标准。充填石子可采用当地石料厂岩石碎渣，其粒径为Φ0.5~10mm。采空区充填料浆为水泥、粉煤灰混合料浆。水泥与粉煤灰的比例为4：6，水固比的使用应由浓到稀为1：1、0.8：1。

封孔材料：本次注浆区域地面建设高层建筑物，为保证建筑物的安全，将注浆钻孔作为小桩基，增强对高层建筑物的支撑能力，因此本次封孔料浆采用水、水泥为0.5：1的浓水泥浆料浆。

3. 注浆施工工艺及参数

本项目治理区域内分布有3煤、4煤和9煤采空区，因3煤和4煤间距较小，两层采空区连通性较好，故将视为一个注浆治理层位；9煤采空区距离4煤采空区较远，视为一个注浆治理层位。对于只有一层治理层位的区域采用“一次注浆工艺”，对于有两个治理层位的区域采用“上行式注浆工艺”。

一次注浆工艺：①：钻孔钻进至所需治理采空区底板2m后停止钻进；②安装注浆管路并封孔；③对注浆孔进行压水冲洗，其目的是检查注浆管里是否通畅及漏水，冲洗堵塞岩层裂隙；④注浆；⑤达到终孔压力停止注浆，取出注浆管路。

上行式注浆工艺：对于有两个注浆层位的区域，①将注浆孔钻至9煤底板以下，②安装注浆管路并封孔（封孔位置在4煤底板以下完整基岩）；③对注浆孔进行压水冲洗，其目的是检查注浆管理是否通畅及漏水，冲洗堵塞的岩层裂隙；④注浆；⑤达到终孔条件后停止注浆，取出注浆管路；⑥安装注浆管路并封孔（封孔位置在3煤顶板以上完整基岩）；然后重复第三至第五步，具体工艺流程见图3。

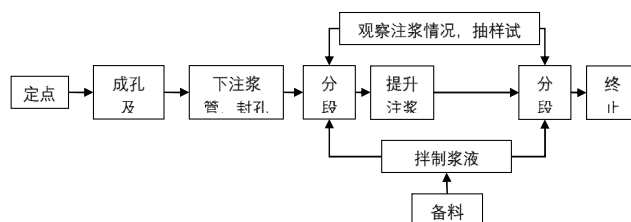


图 3：工艺流程

4. 钻孔和注浆顺序

钻孔应按次数间隔成孔，分四个次序成孔，成孔过程中应根据前次序注浆孔的注浆情况，结合地层及采空区特征对后次序的孔位、孔距、孔数、孔深进行调整。

注浆施工应先施工帷幕孔，后对中间的孔进行注浆施工，根据项目建设实际情况，北侧1#、2#、3#楼为负二层车库，受施工工期、施工顺序影响以及东侧未进行大范围采煤，先进行西侧帷幕孔（W14-W24）和北侧（W25-W35）帷幕孔注浆，帷幕孔注浆完成后，由北向南顺序施工。

5. 注浆工程量

根据《煤矿采空区建（构）筑物地基处理技术规范》（GB51180-2016），采空区注浆量可按下述计算公式进行估算：

$$Q = \frac{\tau \cdot S \cdot M \cdot N \cdot n \cdot \eta}{c \cdot \cos \alpha}$$

式中：Q—采空区注浆量，m³；
 τ—浆液损耗系数，取1.2-1.5之间；
 S—采空区治理面积，m²；
 M—采空区煤层厚度，m；
 N—煤层采出率；

N —采空区剩余孔隙率，根据现场采空区勘察孔内空洞和裂隙统计资料选取；

η —充填系数；

C —浆液结实率，取85%。

α —煤层倾角，°，取8°。

根据前期勘察成果及设计的各采空区治理范围最终计算得到本项目的注浆工程量为25928m³。详见表4。

表 4：注浆量计算一览表

煤层	损耗系数	治理面积	充填系数	厚度	回采率	剩余孔隙率	结石率	倾角	注浆量
3煤	1.35	20567m ²	0.85	0.6m	80%	30%	85%	8°	4039m ³
4煤	1.35	19747m ²	0.85	0.6m	80%	30%	85%	8°	3878m ³
9煤	1.35	31901m ²	0.85	1.3m	91%	35%	85%	8°	18012m ³
合计		87222m ²							25928m ³

三、注浆施工要点控制

(一) 施工前

根据项目场地实际情况，进场前修建场内道路，保证钻孔设备、注浆设备和料车正常出入，以免影响施工连续性；钻孔和注浆用水量需求极大，在场地内打设水井作为施工水源；根据设计方案及图纸，进行帷幕孔和注浆孔位测放，一般性注浆孔位误差不大于50cm，特殊孔位误差不大于10cm，测放后采用木桩喷漆涂红漆标示。

(二) 钻孔施工

1. 根据施工顺序和作业程序，采用不同型号钻机进入指定位置，整平作业场地，将钻机摆放平稳，钻机就位过程中不断调整位置，确保钻机水平。

2. 钻机施工过程中进入成孔阶段，每钻进50m校正孔深一次，同时校正孔斜，孔深误差不大于5cm，孔斜误差不大于1%。

3. 注浆前如果注浆孔发生堵塞导致该孔无法进行注浆作业时，采用钻机进行扫孔。将孔口管上的法兰盘堵头卸下，钻机钻杆从孔口重新扫孔，将堵塞段打通，保证后续注浆作业的顺利实施。

(三) 注浆施工

1. 填充料制备前，对进场材料进行取样，每300t材料进行一次取样，取样后贴封条报送检测单位。制备时严格按照设计要求配料，按照规定要求将各种原材料置入浆池内，同时加水进行机械搅拌，制备时间不小3分钟，而后水泥浆放入二次搅拌池待用并储蓄搅拌在注入钻孔前按照设计要求添加外加剂，拌制完成后进入注浆系统注入钻孔。由于本项目注浆设计浓度较大，浆液进入储浆池后容易产生沉淀，因此在搅拌池中应充分搅拌，浆液在储浆池中的停留时间不大于2h。

2. 注浆施工前，首先对注浆管路及钻孔进行清洗，注浆系统启动后，现场施工人员随时对管路进行检查，随时关注是否出现跑冒滴漏等现场，同时做好施工记录，详细记录孔口注浆压力和注浆流量。

3. 同一钻孔的同一注浆层位的浆液浓度应先稀后

浓，先注水固比1：1的浆液，待注浆量达到单孔单一层位平均注浆量的20%后且浆液压力和泵量均无改变或改变不明显时，换水固比0.8：1的浆液继续注浆。

4. 当注浆量达到单孔单一层位平均注浆量的80%后可向浆液中添加一定比例的骨料（浆液体积的10%）继续注浆，同一钻孔的同一注浆层位的注浆量超过单孔单一层位平均注浆量后采用间歇式注浆直至达到终孔要求。

(四) 注浆结束

终量终压，对3煤和4煤采空区进行注浆时，当注浆孔孔口管压力为1.2MPa，泵量小于50L/min，稳定15min以上结束该孔注浆；对9煤采空区进行注浆时，当注浆孔孔口管压力为2.4MPa，泵量小于50L/min，稳定15min以上结束该孔注浆。

四、治理效果检测

采空区治理工程属于隐蔽工程，治理效果的好坏直接影响新建（构）筑物的安全，因此必须对治理效果进行检测。效果检测宜在治理完成3个月之后进行，检测内容包括：钻探描述与孔壁完整性、结石体无侧限单轴抗压强度、横波波速、二次压浆。

其中，钻孔取芯应采用回转钻进、全孔取芯钻探工艺，单一回次岩芯采取率不宜小于90%。岩芯描述应符合现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021的有关规定。对充填胶结结石体应重点描述浆液对空隙和裂隙的充填胶结程度、浆液结石体的坚硬程度、完整性等。要求：检测孔钻进过程中无刁钻、循环液漏失、孔口吹西风等钻探异常现象，采空区冒落段浆液结石体明显。

五、结语

注浆法已成为采空区特别是深部采空区治理的主要方法之一，同时在边坡加固、地基处理、地下工程防渗堵水等工程中应用效果良好^[3]。由于不同采空区岩层性和埋深不同，注浆封堵、加固得效果关键取决于注浆工艺的设计及施工控制，特别是要根据采空区实际情况做好注浆试验，设计合理的注浆顺序、浆液配比、注浆压力等相关参数。其次根据实际施工过程中钻孔掉钻、透水的情况合理调整注浆压力。

中国铁建·圣井商业项目在采空区治理过程中，受场地范围限制，西侧与南侧注浆范围经验算后调整至红线内；北侧由于地下管线分布复杂对注浆孔作出了合理调整；施工过程中根据前期注浆情况，将注浆压力由0.6MPa调整至1.2MPa，通过以上措施保证工期的同时取得了良好的注浆效果。

参考文献

[1] 杨国栋. 试论注浆填充法在采空区的应用[J]. 西部探矿工程, 2019, 31(01): 119-120.
 [2] 张勇, 曲华锋, 佟照辉, 孙志全. 章丘市复杂采空区场地的灾害治理方案研究[J]. 山东国土资源, 2013, 29(21): 70-72+75.
 [3] 王兵强. 深部条带采空区注浆效果综合评价技术与应用[J]. 煤炭工程, 2021, 53(08): 98-104.