

煤层底板注浆加固的定向孔钻进工艺

譙寅初

天地科技建井研究院 北京中煤矿山工程有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v9i2.2455

[摘要] 本文阐述了煤矿底板注浆加固定向钻进整套工艺体系,包含钻探设备与钻具组合、定向钻进实施工艺以及注浆加固工艺三部分内容。设备选型依据钻孔深度等条件确定,目前主流采用地面定向钻机,如ZJ30、ZJ40、车载钻机等,搭配对应规格的螺杆钻具、PDC钻头以及随钻测量系统,其中MWD无线随钻测量系统属于常用测量设备。定向钻进包含开孔造斜、主孔顺层、分支孔以及梳状钻孔施工等方面,明确各个阶段的关键参数与操作要求。注浆加固采用粘土水泥浆,明确了水灰比、外加剂掺量等配比参数。采用低压起步然后逐步升压的压力控制方式,通过钻孔取心等三种方法检验施工情况,核心数据均符合工程标准。

[关键词] 煤层底板; 注浆加固; 定向钻孔; 钻进工艺; 随钻测量; 轨迹控制

中图分类号: P618.11 **文献标识码:** A

Directional Drilling Technology for Coal Seam Floor Grouting Reinforcement

Yinchu Qiao

InstituteOfMineConstructionTiandiScience& Technology Co.,Ltd.

Beijing China Coal Mine Engineering Co.,Ltd.

[Abstract] This paper elaborates on the complete technological system of directional drilling for coal seam floor grouting reinforcement, covering three main parts: drilling equipment and bottom hole assembly (BHA), directional drilling implementation technology, and grouting reinforcement technology. Equipment selection is determined based on factors such as borehole depth. At present, the mainstream choice is surface directional drilling rigs such as ZJ30, ZJ40, and truck-mounted rigs paired with screw drills of corresponding specifications, PDC bits, and measurement-while-drilling (MWD) systems, among which MWD wireless measurement-while-drilling system is commonly used MWD tools. Directional drilling includes open-hole deflection, main borehole bedding, branch borehole, and comb-like borehole construction, clarifying the key parameters and operational requirements for each stage. Grouting reinforcement uses clay-cement slurry (P.C.42.5 or M 32.5), specifying mix parameters such as the water-cement ratio and admixture dosage. A pressure control method of starting at low pressure and gradually increasing the pressure is adopted. Construction conditions are inspected using three methods, including borehole coring, and the core data all meet engineering standards.

[Key words] coal seam floor; grouting reinforcement; directional borehole; drilling technology; measurement while drilling (MWD); trajectory control

随着我国煤矿开采深度不断持续增加,煤层底板灰岩岩溶承压含水层水害威胁日益突出。当承压含水层与开采煤层之间隔水层能承受的水头值小于实际水头值时,就需采取注浆加固底板或改造含水层等相关措施^[1]。定向钻进技术具备轨迹可控、分支灵活、单孔覆盖范围大的特点,被应用于煤层底板注浆加固工作当中。

1 地面区域水害治理钻探设备及钻具组合

1.1 地面定向钻机选型

地面定向钻机选型依据钻孔设计深度、孔径、轨迹复杂度及施工场地条件确定。当前主流采用ZJ30、ZJ40型石油钻机或车载钻机,均应用于地面区域水害治理工程。ZJ30型钻机额定钩载1700kN,钻深能力可达3000m,配套使用Φ89mm钻杆;ZJ40型钻机额定钩载2250kN,钻深能力为4000m,相较于ZJ30型钻机,其额定钩载和钻深能力均有提升。车载钻机与ZJ30、ZJ40型石油钻机相比,最大特点是机动性强,可快速完成孔位迁移,适配多孔位连续作业场景。所有应用于该工程的钻机均配备顶驱系统或

转盘驱动,两种驱动方式可根据实际钻孔需求灵活选用,能够实现定向钻进及复合钻进工艺,适配不同轨迹复杂度的钻孔作业,满足不同孔径和深度的施工要求,适配不同的施工场地条件^[2]。

1.2 三开变径结构及钻具配置

地面区域水害治理定向孔采用三开变径结构,一开为直孔段,孔径设定为350mm,该孔段下入 $\Phi 273.05\text{mm}$ J55钢级石油套管,套管材质与孔径规格精准匹配,适配直孔段施工需求。二开为造斜段,孔径调整为241.3mm,对应下入 $\Phi 193.68\text{mm}$ J55钢级石油套管,与造斜段孔径适配,满足造斜施工的结构要求。三开为水平段,孔径确定为152.4mm,该孔段不进行套管下入,采用裸孔形式施工。螺杆钻具的规格选择以孔径为核心依据,根据各开孔径的差异选用对应规格,其中一开因孔径最大,采用大直径螺杆钻具,二开和三开则分别根据各自孔径大小,选用与孔径相适配的螺杆钻具型号。钻头统一选用PDC聚晶金刚石复合片钻头,各开钻头规格与对应孔段孔径严格对应,一开选用 $\Phi 350\text{mm}$ PDC钻头,适配一开350mm孔径的直孔段施工;二开选用 $\Phi 241.3\text{mm}$ PDC钻头,匹配二开241.3mm孔径的造斜段施工;三开选用 $\Phi 152.4\text{mm}$ PDC钻头,适配三开152.4mm孔径的水平段裸孔施工,各规格钻头与对应孔段施工需求精准契合。

1.3 MWD无线随钻测量系统

随钻测量系统采用MWD无线随钻测量系统,以泥浆脉冲作为传输载体,将钻孔倾角、方位角和工具面向角等关键测量参数实时、连续地传输至地面接收设备,实现相关参数的实时获取,无需人工干预进行参数的人工传递。MWD无线随钻测量系统在结构设计上无需在钻杆内部额外敷设电缆,可应用于深孔定向钻进作业,其各项测量参数均有明确的范围界定和误差控制标准:倾角测量范围覆盖 -90° 至 $+90^\circ$,测量误差严格控制在 $\leq \pm 0.1^\circ$ 以内;方位角测量范围为 0° 至 360° ,测量误差不超过 $\pm 1^\circ$;工具面向角测量范围同样为 0° 至 360° ,测量误差与方位角保持一致,均 $\leq \pm 1^\circ$ 。在实际工程施工过程中,定向工程师严格按照钻进进度开展测量工作,每完成5至10m的钻进作业后,便对井斜角和方位角的偏移量进行一次精准测量,同时同步收集地层反馈数据、钻时波动情况以及摩阻变化等相关现场信息,据此对钻井参数进行针对性调整^[3]。该系统的测量参数传输方式、结构特点、具体测量范围及误差标准,以及施工中的测量频率和参数调整依据,共同构成其核心运行及操作相关内容。

2 地面区域水害治理定向钻进施工工艺

2.1 一开直孔段施工

一开直孔段孔径设定为350mm,施工选用常规回转钻进工艺,钻机进行开孔操作前,依照既定设计方位与垂直倾角完成设备定位固定。开孔钻进深度结合场地松散层实际厚度、基岩风化带发育厚度进行确定,钻进作业需深入稳定基岩,入岩深度控制在10m至15m范围。一开钻进施工全部结束后,下放 $\Phi 273.05\text{mm}$ 规格J55钢级石油套管,固管施工选用P. C. 42.5标号单液水泥浆,现场调配的水泥浆密度维持在 $1.65\sim 6.68\text{g}/\text{cm}^3$,施工过程中的

替浆量参照并眼理论容积进行测算统计,套管安放及固管工序完成后,水泥浆静置候凝的时长不少于72h,各项施工参数依照地层实际条件直接对应选取,钻进、下管、固管各环节依次分步开展实施。

2.2 二开造斜段施工

二开施工孔径采用241.3mm规格,现场钻具搭配PDC钻头、弯外管螺杆钻具与MWD无线随钻测量系统组合使用。造斜钻孔区段完成孔体角度转换,孔体由垂直形态逐步过渡至目标层位对应倾角,造斜率数值维持在 $0.3^\circ/\text{m}\sim 0.5^\circ/\text{m}$ 之间。定向作业人员接收MWD设备实时传输的钻孔轨迹各项参数,根据实时采集的监测数据,调节螺杆钻具的工具面角,完成钻孔延伸方位的调节作业。造斜段钻进施工抵达预设深度位置后,下放 $\Phi 193.68\text{mm}$ 规格J55钢级石油套管,固管作业选用P. C. 42.5单液水泥浆完成浇筑操作,水泥浆灌注完成后静置存放,静置时长达到72h,后续开展套管试压的专项检测工作。

2.3 三开水平段钻进与轨迹控制

三开水平段孔径为152.4mm,施工采用裸孔完井形式,钻进作业顺着目标含水层的岩层走向开展顺层推进。钻进过程中,以5~10m为间隔采集井斜角与方位角实测数据,通过实测数据核算实钻轨迹和设计轨迹之间的偏差数值。轨迹偏差超出限定区间时,调节螺杆钻具的工具面角,完成钻孔轨迹纠偏操作,每完成3~5m的钻进进度,重新检测并记录各项轨迹参数。针对底板灰岩含水层开展顺层钻进作业时,统计钻孔在指定目标层位的穿行范围,层位钻遇率统计数值以90%作为基础参照标准,全程依照现场实测数据开展各项参数记录与调整操作。

2.4 分支孔开设与梳状钻孔施工

在原有分支孔完成钻取后要实施侧钻来施工新分支孔时,首先需要在主孔内预定分支点位置设置人工孔底,现场普遍采用注水泥塞并且扩孔造台阶的处理方式确保孔底稳固,人工孔底布设完成之后,要替换掉原有常规钻具,装配带有弯外管且角度更大的螺杆钻具以适配分支孔与主孔间形成固定夹角的需求以及定向仪器组合。钻井液参数的合理调控对侧钻成功起着至关重要的作用,通常要将钻井液密度控制在 $1.10\sim 1.25\text{g}/\text{cm}^3$ 区间以维持孔壁稳定并防止水泥塞被压裂,把漏斗粘度调节至35~45秒,确保良好携岩能力及及时清除侧钻产生的岩屑。将中压失水量控制在 $5\sim 8\text{ml}/30\text{min}$ 以内,且滤饼厚度小于0.5mm,减少滤液侵入水泥塞界面,让固相含量低于8%避免对螺杆钻具及定向仪器造成磨损,使pH值维持在8.5~9.5之间抑制黏土水化膨胀。在梳状钻孔施工模式当中,沿主孔轴线方向按固定间隔开设多处分支孔,相邻分支孔的布设间距结合浆液有效扩散半径来划定,数值选取该半径的1.5倍至2.0倍,各分支孔依照现场孔位布局依次排布并逐孔侧钻以完成点位标定与施工排布。

2.5 钻进参数优化与孔内故障预防

三开水平段采用PDC钻头开展钻进作业时,对应施工参数设定明确,钻压取值范围为 $10\sim 30\text{kN}$,回转转速区间控制在 $40\sim 80\text{r}/\text{min}$,配套冲洗液的循环流量保持在 $250\sim 350\text{L}/\text{min}$ 。钻进

作业期间,孔内易出现多种异常状况,卡钻、钻具断裂、孔壁坍塌均为该施工阶段多发问题。现场作业过程中,可放缓或调整瞬时钻进行进速度,保持冲洗液不间断循环流动,定时对钻杆、钻头整套钻具进行逐项查验,对孔壁稳定性较差的孔段开展局部注浆作业,依托多项现场操作方式,应对各类孔内突发问题,贴合水平段钻进的现场实操流程与工况条件。

3 注浆加固工艺

3.1 浆液配比设计

注浆施工选用粘土水泥浆,配套使用P.C.42.5或M32.5标号水泥,粘土水泥浆以水泥、粘土、水为基础原料,搭配各类外加剂混合拌和制成。制浆选用的粘土材料,均选取塑性指数大于17的膨润土或高岭土,现场常规拌合配比中,水泥与粘土比例区间为1:0.3~1:0.5,水固比取值范围0.8:1~1.2:1。拌和完成的浆液密度保持在 $1.3\sim 1.5\text{g}/\text{cm}^3$,屈服强度参数为 $0.5\sim 1.5\text{Pa}$ 。浆液配制阶段可掺入减水剂,掺量不超过水泥质量的1.0%,也可掺入速凝剂或缓凝剂,以此改动浆液基础理化指标,全程依照原料比例参数完成浆液的现场配制与调和操作。

3.2 注浆压力控制与注浆工艺

注浆压力结合地层裂隙发育程度、含水层水压和注浆深度等因素确定。初始注浆阶段用低压注浆,压力控制在2至4MPa,随着浆液充填裂隙、地层吸浆量减小,注浆压力逐步提高。注浆工艺有孔口静压注浆和分段注浆两种。孔口静压注浆用于孔壁稳定、钻孔深度不大的场景,浆液从孔口注入,依靠自重和压力自然扩散。分段注浆用于长距离钻孔或地层吸浆量不均的场景,将钻孔划分为若干注浆段,用止浆塞分段注入,按自下而上的顺序操作。每次注浆结束后闭浆养护,闭浆时间不少于8h,浆液初凝后再进行下一段注浆。裂隙发育复杂的地层,可采用孔口静压高压注浆工艺,在孔口安装耐压注浆装置,将浆液以高压注入孔内。

3.3 注浆效果检验

检验方法有钻孔取心、压水试验和物探探测三种。钻孔取心在检验孔中获取注浆后地层的岩心样品,观察裂隙中浆液的

充填情况和结石体强度。压水试验向检验孔内注水测定地层的单位吸水率。底板全覆盖注浆加固后,钻孔涌水量整体减水率92%以上,检验钻孔涌水量 $0.4\sim 1.7\text{m}^3/\text{h}$,孔口水压 $0.15\sim 0.50\text{MPa}$ 。突水系数为底板承压水压与隔水层厚度的比值,计算公式为 $K = \frac{P}{M}$ (其中K为突水系数,P为底板承压水压,M为隔水层厚度)。注浆加固后,底板隔水层突水系数可降至 $0.003\sim 0.010\text{MPa}/\text{m}$ 。

4 结语

定向钻进和注浆加固应用于煤矿底板治理作业,各施工环节相互衔接,各项施工参数统一设定。施工选用ZJ30、ZJ40地面定向钻机与车载钻机设备,搭配三开变径孔体结构,涵盖一开350mm直孔、二开241.3mm造斜段、三开152.4mm水平段,结合MWD无线随钻测量系统,实时采集钻孔轨迹相关数据。一开、二开固管施工取用P.C.42.5单液水泥浆,注浆工序使用P.C.42.5或M32.5水泥调配粘土水泥浆,依照既定原料配比与注浆压力数值开展施工操作,浆液在岩层空间内自然扩散,注浆工序结束后,采用多种检测方式并行的模式,开展现场各项数据的采集与登记工作,全程依照现场施工条件落实各项工序操作。

[参考文献]

- [1]赵文斌,曾畏,马琳,等.近距离煤层群底板定向长钻孔拦截抽采研究及应用[J].能源技术与管理,2025,50(03):42-45.
- [2]陈知豪.底板承压水区域注浆水平定向钻孔设计系统开发及注浆效果评价研究[D].中国矿业大学,2025.
- [3]刘和平.陷落柱注浆加固效果评价及应用[J].煤,2024,33(08):47-48+59.

作者简介:

雒寅初(1999--),男,陕西汉中,硕士研究生,初级工程师,主要研究方向为地面区域水害治理。