

多源物性耦合下深部三软煤层底板地面注浆定量评价体系研究

徐福建

郑州煤电股份有限公司芦沟煤矿 河南 郑州 452370

摘要: 针对郑州深部三软煤层底板地面定向注浆隐蔽性强、现有检测手段单一、仅能定性判别、缺少多维度定量评判标准的行业难题,以芦沟煤矿31采区31071工作面工程为依托,提出多源物性耦合评价思路,综合煤岩室内力学试验、井下瞬变电磁与高密度电法全域探测、钻孔高压压水渗透测试、采动-渗流耦合数值模拟多源检测手段,系统揭示岩层力学、渗透、电磁多源物性内在耦合规律,阐明浆液充填与岩体微观交互机制,建立电阻率、吕荣值、突水系数多级量化判定阈值,构建集全域物探普查、定点钻孔定量校核、数值安全模拟、理论验算于一体的底板注浆定量评价体系。试验结果表明:底板泥岩抗拉强度仅0.630MPa,为原生突水薄弱带;含水破碎区呈低阻响应,浆液固结岩体表现高阻特征,渗透系数降幅可作为注浆质量核心定量指标;工程应用后工作面奥灰突水系数降至0.04~0.05MPa/m,远低于0.1MPa安全阈值。该体系突破单一检测手段局限性,实现深部三软煤层底板注浆效果从定性筛查到多源耦合定量综合评判,可为新密煤田同类高承压水矿井区域治理提供标准化检测技术支撑。

关键词: 深部三软煤层;底板地面注浆;多源物性耦合;压水试验

引言

新密煤田芦沟煤矿主采二₁煤层属典型三软煤层,随开采深度延伸至-530m水平,煤层底板下伏L₁-L₅太原组灰岩、O₂奥陶系灰岩岩溶裂隙发育,两层含水层水力连通性强,最大底板承压水压达5.86MPa,断层切割隔水层易诱发突水事故,矿井历史突水事故中底板突水占比超50%。地面定向分支孔区域注浆是深部底板水害核心治理手段,通过顺层注入浆液封堵导水裂隙、加厚有效隔水层,但注浆工程埋深大、隐蔽性极强。现阶段注浆效果检测多单独采用钻孔压水、井下电法、单一数值模拟手段,仅能实现局部定性判断,多指标耦合定量评价理论与成套技术体系缺失,无法系统判定浆液充填完整性、隔水层加固可靠性,制约深部三软煤层安全回采。因此构建多源检测融合的注浆综合评价体系,是保障矿井防治水安全生产的关键工程需求。

以芦沟煤矿31采区31071工作面地面注浆工程为试验载体,创新开展分层煤岩原位力学测试,建立岩层物性与井下电磁响应定量关系;揭示钻孔渗透参数与浆液固结微观交互规律;融合物探、钻探、渗流模拟多维度指标,构建适用于三软高承压煤层底板注浆的综合评价体系,创新实现“宏观全域筛查+微观定点定量检测+采动安全校核”三级分级评价模式。

1 工程地质概况

1.1 矿井与试验区基本条件

芦煤矿井核定产能60万t/a,开采标高+210~-600m,水文地质类型复杂,主采二₁三软煤层,31采区地面治理范围0.62km²,治理区段煤底板标高-210~-530m,目标工作面31071煤层厚度4.6~16.77m,平均8.0m,倾角12°~22°。区域发育魏寨正断层、DF1、DF13导水正断层,断层错动导致灰岩含水层与煤层对接,形成天然突水通道^[1]。地面治理采用三开式定向分支钻孔:一开隔离松散层、二开造斜、三开沿L₁-L₄灰岩顺层裸孔注浆,D1孔组总钻探进尺7464.68m,累计注浆26803.80t。

1.2 含水层与隔水层赋存特征

1) 充水含水层:①太原组上段L₇-L₈灰岩,距煤层平均10.02m,富水性中等;②太原组下段L₁-L₄灰岩,层间距60.96m,富水性强;③奥陶系马家沟灰岩,距煤层平均84.7m,渗透系数5.1086~6.7595m/d,为本区主要高承压水源,治理前最高水头标高+100.4m。2) 隔水层:二₁煤底板砂泥岩隔水层平均厚度仅7.24m,受采动裂隙、断层切割完整性差,天然阻水能力不足,必须通过注浆改造加厚、加固。

1.3 工作面水害风险

31071工作面底板最大水压5.86MPa,天然隔水层安全厚度9.66m<实际层间距60m,但断层破碎带会大幅削弱隔水性能;地面定向注浆改造后实测突水系数0.04~0.05MPa/m,满足《煤矿防治水细则》≤0.1MPa/m安全开采标准。

2 试验方案与测试方法

2.1 煤岩取样与室内力学试验

2.1.1 取样布置

井下2个专用取芯钻孔：31采区探巷底板孔（标高-321m，取二₁煤底板岩层）、31回风下山顶板孔（标高-390.3m，取顶板岩层）；二₁煤块取自21煤柱完整无构造区段，严格遵循GB/T23561加工标准制备标准试件。岩芯加工：砂岩、灰岩加工φ50mm×100mm圆柱试样；软煤加工50mm×50mm×100mm长方体试样，采用ZS-50B钻机、DQ锯石机、SHM200磨平机精加工。

2.1.2 测试设备与指标

采用RMT-150C电液伺服刚性试验机开展单轴压缩、巴西劈裂抗拉试验，同步测定视密度、弹性模量、泊松比、动态破坏时间DT；采集应力-应变全程曲线、破坏形态数据，共完成20组煤样、55组分层顶底板岩样力学测试。

2.2 井下电磁物探方案

注浆前后分别采用井下高密度直流电法、瞬变电磁

开展巷道全域扫描探测，采集底板0~100m深度地层电阻率数据，对比注浆前后高低阻异常演化，建立岩层完整/破碎/浆液充填区电磁识别判据^[2]。

2.3 钻孔渗透性检测方案

对地面治理分支孔、井下验证孔实施高压压水试验，测定吕荣值、渗透系数，分析裂隙浆液充填程度；选取物探低阻异常区、断层破碎带布置专项验证钻孔，实现电磁异常定点定量校核。

2.4 数值模拟方案

采用FLAC3D建立注浆前后底板地质模型，耦合采动应力—地下水渗流场，模拟回采过程底板塑性区、渗流通道演化，校核注浆加固后隔水层抗突水安全储备。

2.5 整体技术路线

分层煤岩力学试验→建立岩层物性-电磁响应关联→注浆前后电磁全域普查→异常区钻孔渗透定量检测→采动渗流数值模拟→多指标融合综合评价体系构建，完整技术路线见图1。

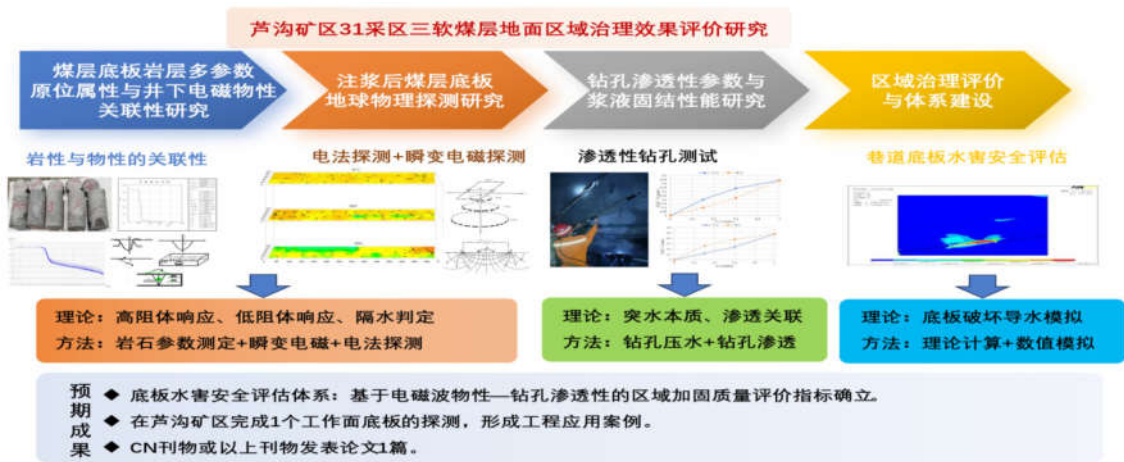


图1 完整技术路线

3 煤岩物理力学参数特征

3.1 二₁煤层力学特性

二₁煤视密度均值1685 kg/m³；单轴抗压强度5.529~19.339MPa，平均11.699 MPa；动态破坏时间207~806ms，均值531ms，煤体偏软、塑性变形明显，采

动易产生贯通裂隙，为底板水提供渗流通道。

3.2 顶底板分层岩层力学差异

分层岩样力学参数如表1所示，岩层力学性能差异显著：

表1 芦沟矿区顶底板岩层平均力学参数表格

岩性分组	视密度 /(kg·m ⁻³)	抗拉强度 / MPa	弹性模量 / GPa	隔水性能特征
I组（灰岩）	2655	6.828	41.051	坚硬、裂隙发育、富水
A/B/G/K 砂岩	2672~2729	3.351~4.199	22.742~46.832	完整性好，弱透水
E/H 砂质泥岩	2643~2707	2.612~2.640	12.866~14.834	中等隔水
D组泥岩	2606	0.630	9.048	强度极低，采动极易破坏失隔

灰岩抗拉强度是泥岩10倍以上,天然泥质隔水层力学性能薄弱,是底板突水薄弱环节,注浆固结后岩体强度大幅提升,形成复合隔水层^[3]。

3.3 上覆岩层载荷计算

采用多层薄板载荷公式计算各分层载荷集度,泥岩类载荷仅0.066~0.163MPa,灰岩、硬砂岩载荷0.162~0.257MPa;采动应力叠加后软泥岩最先产生破坏裂隙,验证底板注浆优先加固泥质薄弱带的必要性。

3.4 岩层原位属性与电磁响应关联规律

完整致密灰岩、注浆充填固化岩体电阻率高,呈现高阻响应;未注浆破碎泥岩、含水导水裂隙表现明显低阻异常。力学强度越低、渗透性越大的岩层,电阻率数值越低;浆液填充裂隙后,孔隙水被水泥结石置换,地层电阻率显著抬升。井下电磁探测可快速圈定全域注浆薄弱低阻异常区,作为定点钻孔验证靶区,实现“先普查、后精检”。

3.5 钻孔渗透性与浆液固结微观交互机制

1)未治理破碎岩层:渗透系数大、压水吸水量高,吕荣值>10Lu,裂隙无浆液充填;2)局部充填区:渗透系数下降30%~60%,仍存在微小渗流通道;3)完全固结加固区:渗透系数降低90%以上,吕荣值<1Lu,裂隙被浆液结石致密充填。渗透系数可作为注浆效果定量核心指标,弥补物探仅能定性的缺陷。注浆前后同一钻孔渗透系数降幅越大,底板加固质量越好。

3.6 采动渗流数值模拟结果

注浆前,工作面回采会在底板泥岩隔水层形成贯通塑性渗流区,承压水沿断层、采动裂隙导入采掘空间;经地面顺层注浆改造后,底板形成连续高强度隔水复合层,塑性区发育深度降低70%,无贯通渗流通道,突水风险完全受控。模拟结果与现场涌水量实测(治理后正常涌水37m³/h,最大50m³/h)匹配良好。

4 多维度一体化注浆效果综合评价体系

4.1 体系构建逻辑

针对单一检测手段局限性,建立6层级递进评价流程:巷道电磁全域普查→钻孔电磁精细检测→高压压水渗透定量测试→岩样力学参数校核→采动渗流数值模拟→突水系数理论安全验算,形成从宏观到微观、从定性到定量的完整评价链条^[4]。

4.2 各层级评价判定标准

1) 电磁普查分级标准

Ⅰ级(优良区):高阻均匀无异常,裂隙全部充填;

Ⅱ级(待验证区):零星低阻点状异常,布置钻孔检测;

Ⅲ级(薄弱区):条带状连片低阻,需补充补孔注浆。

2) 钻孔渗透定量判定标准

合格:压水吕荣值≤1Lu,渗透系数降幅≥90%;

基本合格:1Lu<吕荣值≤5Lu,局部微小裂隙,无需复注;

不合格:吕荣值>5Lu,裂隙未封堵,必须补注浆。

3)安全理论校核标准底板突水系数≤0.1MPa/m为安全区间;本工程治理后0.04~0.05MPa/m,满足回采安全要求。

4.3 体系工程应用流程

1)注浆完工后,井下沿工作面上下巷实施瞬变电磁、高密度电法扫描,绘制底板电阻率平面分区图,圈定低阻异常靶区;2)在低阻异常、断层、隔水层变薄区段施工验证钻孔,开展取芯、高压压水试验,测定渗透系数;3)结合室内煤岩力学参数,建立注浆后底板复合岩体力学模型,FLAC3D模拟回采全过程渗流演化;4)突水系数、隔水层厚度双重理论校核,综合分级给出注浆治理合格/需补注结论;5)编制工作面底板注浆治理效果专项评价报告,作为工作面回采审批依据。

5 结论与展望

5.1 主要结论

1)芦沟矿区三软煤层底板岩层力学性能差异巨大,泥质隔水层抗拉强度仅0.630MPa,采动极易产生导水裂隙,必须依靠地面定向注浆加固改造;二,煤平均单轴抗压强度11.699MPa,塑性变形突出,加剧底板隔水层破坏风险。2)岩层力学强度、渗透性与井下电磁电阻率存在显著耦合关系,含水破碎带呈低阻特征,浆液固结岩体表现高阻,电磁探测可实现工作面全域注浆薄弱带快速筛查。3)钻孔高压压水渗透系数是注浆充填效果定量核心指标,吕荣值≤1Lu可判定裂隙完全封堵;融合物探、钻探、数值模拟、理论计算构建的六级一体化评价体系,实现底板注浆效果从定性到定量综合判别。4)31采区地面定向注浆工程实施后,工作面奥灰突水系数降至0.04~0.05MPa/m,低于国家0.1MPa/m安全阈值,综合评价判定治理工程合格,工作面具备安全回采条件。

参考文献

- [1]国家矿山安全监察局.煤矿防治水细则[S].2018.
- [2]吴基文,姜文忠.煤层底板注浆加固效果综合检测技术研究[J].煤炭科学技术,2019,47(06):178-184.
- [3]王涛,刘启蒙.井下三维高密度电法在底板注浆检测中的应用[J].工矿自动化,2021,47(09):89-94.
- [4]苑尚志,王皓.基于组合赋权TOPSIS法的底板注浆效果评价模型[J].采矿与岩层控制工程学报,2024,39(05):112-119.