

浅析矿区注浆材料的应用与发展

张林林 刘衢州

国家煤化工产品质量监督检验中心(安徽)淮南市产品质量监督检验所 安徽淮南 232001

摘要:注浆技术是保障矿区安全开采与生态环境修复的关键技术之一,其核心在于注浆材料的性能^[1]。随着矿井开采向深部延伸及绿色矿山建设的推进,注浆材料的研究重点已从传统单一组转向高性能复合、固废资源化及功能智能化的新阶段。本文系统剖析当前矿区注浆材料的主要类型及其特性,详细探讨其在围岩加固、水害防治及固废处置等场景的具体应用,并指出现阶段材料在应对深部复杂环境时存在的技术挑战。最后,结合最新研究成果对未来注浆材料向绿色化、高性能化、智能化发展路径进行展望,为矿区注浆材料的研发与工程应用提供参考。

关键词:矿区注浆;注浆材料;固废利用;深部开采

引言

注浆技术本质上是将具备流动性与胶凝特性的浆液,通过压力输送至岩土体的裂隙或孔隙网络中,经充填、渗透与固化过程,从而达到提高岩体整体性、阻隔水流及控制变形等目的。自19世纪应用于矿山工程以来,已成为解决巷道稳定、水害防治、地表沉陷等问题的关键手段。从1864年英国硬煤矿首次采用水泥注浆法开凿井筒,到20世纪50年代化学注浆材料的规模化应用,注浆材料的迭代升级始终引领着矿区注浆技术的发展方向。

当前,我国煤炭资源开采深度逐年增加,深部开采环境普遍呈现“三高”(高地压、高水压、高地温)特征,这对注浆材料的渗透能力、粘结效能及长期耐久性提出了苛刻要求。与此同时,每年产生巨量煤矸石、粉煤灰等固体废弃物,其堆存引发的环境与土地压力日益严峻^[2]。在此背景下,研发既能满足苛刻工程需求,又能实现固废大规模消纳的新型注浆材料,已成为推动矿业可持续发展的必然选择,兼具重大的安全效益与环境效益。

一、注浆材料的分类体系与性能特征

根据材料化学构成与胶凝机理,可将矿区主流注浆材料划分为无机类、有机类及复合类三大体系,各类材料性能各异,适用于不同工程场景。

1.无机注浆材料

无机注浆材料以天然矿物或工业废渣为主要胶凝组分,具有成本低、耐久性好、抗压强度高、环境相容性强等特点,适用于大规模充填与加固工程。

水泥基材料是最传统的无机注浆材料^[3],包括普通

硅酸盐水泥、超细水泥及水泥-水玻璃双液浆等。普通水泥浆液结石体抗压强度可达20-40MPa,耐久性优异,但粒径较大(通常>30μm),难以渗透宽度<0.5mm的微裂隙,且凝固时间长达数小时至数十小时,不适用于抢险救灾场景^[3]。超细水泥通过粉磨工艺将粒径控制在5μm以下,可灌入0.1mm级裂缝,在顶板裂隙封堵中表现出良好的渗透性能,但存在易析水、稳定性差的缺陷。水泥-水玻璃浆液通过硅酸盐水化与硅酸钠凝胶化协同反应,凝固时间可缩短至几十秒,抗压强度达10-25MPa,广泛应用于动水条件下的堵水工程,但结石体易收缩开裂,长期抗渗性不足。

煤基固废基注浆材料是近年发展的绿色无机材料,以粉煤灰、煤矸石为主要原料,通过激发剂诱导Si—O—Si和Al—O—Al键断裂重组形成凝胶相。此类材料在降低原料成本的同时,实现了矿区固废的就地转化。

KEP(Keep Elastic and Plastic)新型无机材料突破传统无机材料脆性缺陷,以煤矸石、废陶瓷等为前驱物,固化后兼具弹性与塑性特征。研究表明,其在水流冲刷环境下具有优异的抗分散能力与留存率,特别适用于煤层顶底板高压水的防治工程。

2.有机注浆材料

有机注浆材料以高分子聚合物为核心组分,具有黏度低、渗透性强、凝固时间可控等特点,适用于微裂隙加固、瓦斯封堵等精细作业。

聚氨酯类材料是矿区应用最广泛的有机浆液,分为水溶性与油溶性两类。溶性聚氨酯能有效渗透至毫米级以下的裂隙,其弹性固化体可适应围岩持续变形,显著提升破碎岩体整体稳定性。油溶性聚氨酯通过发泡膨胀

快速充填空洞，能有效隔绝氧气与瓦斯。但聚氨酯材料存在闪点低、易燃烧的隐患，且部分产品会释放甲醛等有害气体，限制了其在高瓦斯矿井的应用。

酚醛树脂类材料以A组分（酚醛树脂）与B组分（酸固化剂）混合反应，固化后形成高强泡沫体。其阻燃性能优异，有毒气体释放量远低于安全标准，在瓦斯裂隙密闭与防灭火工程中表现突出，可使漏风率降低80%以上。但该材料固化后脆性较大，在强采动条件下易开裂，需通过改性提升韧性。

丙烯酰胺类材料曾因优异的渗透性被誉为“20世纪魔水”，但由于其单体具有神经毒性，已逐渐被丙烯酸盐类材料替代。丙烯酸盐浆液黏度接近水，凝胶时间可精准控制，结石体抗渗系数达10~8cm/s，在小流量漏水治理中效果显著，但成本较高，限制了大规模应用。

3.复合注浆材料

复合注浆材料通过无机与有机组分的协同作用，兼具两者优势，是解决复杂工程难题的重要方向。强黏亲煤型复合材料采用纳米改性技术，将无机颗粒与有机聚合物形成核壳结构，通过pH响应型调节剂改善煤岩界面浸润性，黏结强度较传统材料提升3倍以上，成功解决深部煤巷“注不进、黏不住”的难题。

水泥-聚氨酯复合浆液以水泥为骨料、聚氨酯为胶结剂，既保留水泥的高强度与耐久性，又具备聚氨酯的高渗透性，抗压强度可达35MPa，渗透半径较纯水泥浆扩大50%。黏土-环氧树脂复合材料则以黏土为填料，降低成本的同时提升材料弹性，适用于采动影响区的长期加固。

二、矿区注浆材料的工程应用

注浆材料的应用需结合工程场景需求合理选型，不同材料在围岩加固、堵水防渗、固废处置等领域形成差异化应用体系。

1.巷道围岩加固

巷道开挖后围岩裂隙发育，易发生冒顶片帮事故，注浆加固需兼顾渗透性与黏结强度。浅部缓倾斜煤层巷道多采用水泥-粉煤灰浆液，利用粉煤灰改善浆液流动性，在新汶华丰煤矿应用中，使巷道变形量减少60%。深部高应力破碎煤巷则需采用强黏结复合材料，李嘉峰团队研发的纳米改性复合浆液在千米深井应用中，使支护失效概率降低90%，每年服务40余座煤矿。

沿空掘进巷小煤柱加固常用润固恒盛无机注浆材料，其早期强度发展快，24小时抗压强度可达15MPa，能快速控制煤柱变形，在回撤巷道加固中保障了设备安全回

收。对于断层破碎带，通常采用“先有机后无机”的复合注浆工艺：先用聚氨酯浆液渗透微裂隙，再用水泥-水玻璃浆液充填大裂隙，晋煤集团采用该工艺后，断层带掘进效率提升30%，冒顶事故零发生。

2.矿井堵水防渗

矿井水害是采矿工程的重大隐患，堵水材料需具备抗水分散性与耐水压性能。顶板裂隙水治理多采用水泥基材料，裂隙不发育时用纯水泥浆，裂隙发育时改用水泥-水玻璃双液浆，在曹家滩煤矿应用中，使涌水量从80m³/h降至5m³/h。

底板承压水治理对材料抗分散性要求极高，KEP材料在水中基本不分散，在高家堡煤矿应用中，成功封堵水压3MPa的导水裂隙，堵水成功率达100%。小流量裂隙漏水则适合采用丙烯酸盐或水溶性聚氨酯材料，其可渗透至细微裂隙形成柔性封堵层，长期耐水压性能稳定。

井筒开凿中的涌水控制多采用地面预注浆技术，早期使用普通水泥浆，现多采用超细水泥与化学浆液复合注浆。法国迪普港矿井采用该技术后，井筒涌水量控制在0.5m³/(h·m)以下，保障了施工安全。

3.地表沉陷控制与固废处置

离层注浆技术是控制地表沉陷的有效手段，同时实现煤基固废资源化。该技术通过向覆岩离层空间注入煤矸石基或粉煤灰基浆液，充填采动空隙，减缓地表下沉。许家林等在12个煤矿35个工作面应用该技术，地面保护区域下沉系数控制在0.1以内，释放压覆煤炭资源0.15×10⁸t。

夏店煤矿采用丛式井技术施工注浆孔，注入煤矸石基浆液规模化处置固废，年处置量达20万吨，地表沉陷量减少70%，实现“减沉、处废”双重效益。新浦磷矿则利用粉煤灰基浆液进行老空区注浆增载，提高地基承载力，为地表建筑保护提供了技术支撑。

4.防灭火与瓦斯治理

煤自燃与瓦斯积聚是煤矿重大安全隐患，注浆材料需具备封堵性与阻燃性。酚醛树脂发泡材料用于构筑防火墙时，密闭性好且阻燃，可有效阻止空气进入采空区，在垣曲县煤矿应用中，使采空区自燃发火期延长至18个月以上。

聚氨酯泡沫材料用于瓦斯裂隙封堵时，能快速填充孔隙，降低瓦斯浓度。德国鲁尔矿区采用聚氨酯注浆后，巷道瓦斯浓度从0.8%降至0.2%以下，杜绝了瓦斯爆炸风险。但在高瓦斯矿井需选用阻燃型聚氨酯，并严格控制施工过程中的静电产生。

三、矿区注浆材料应用中的关键问题

1. 深部开采适应性不足

埋深超1000米的深井面临30MPa以上的地应力与高温高湿环境,传统材料存在三大瓶颈:一是无机材料脆性大,在采动应力作用下易开裂,结石体残余变形量几乎为零,无法适应围岩大变形;二是有机材料与疏水煤体界面黏结弱,如同“饺子馅一动就散”,加固效果随时间衰减;三是高温环境加速有机材料老化,使用寿命缩短50%以上。

2. 绿色环保性能待提升

部分化学注浆材料存在环境风险:丙烯酰胺类材料单体有毒性,已被限制使用;普通聚氨酯材料燃烧时释放氰化氢等剧毒气体,不符合安全环保要求。同时,传统注浆材料制备过程能耗较高,水泥生产每万吨排放CO₂约0.8万吨,与“双碳”目标存在差距^[2]。

3. 性能调控精准度不够

现有材料性能调控多依赖经验配比,缺乏量化标准:水泥基材料凝固时间受温度影响显著,在-5℃环境下几乎不凝固,而在35℃以上则过快凝固导致注浆不充分;有机材料发泡倍数与强度的平衡难以控制,发泡倍数过高则强度不足,反之则渗透性下降。

4. 固废基材料性能不均

煤基固废成分波动大导致注浆材料性能不稳定:不同矿井的煤矸石SiO₂与Al₂O₃含量差异可达20%,使浆液凝固时间波动范围超10天;粉煤灰细度不均则影响浆液流动性,导致注浆扩散半径差异显著,影响工程质量稳定性。

四、未来发展趋势

1. 绿色化: 固废高值利用与低碳制备

固废基材料将向高值化方向发展,通过精准分选与改性技术提升性能稳定性。李嘉峰团队正开发煤矸石基储能注浆材料,不仅实现固废处置,还能兼具储能功能。同时,低碳水泥基材料通过掺入矿渣、钢渣等工业废渣,可降低CO₂排放40%以上,符合绿色矿山建设需求。

2. 高性能化: 适配深部复杂条件

深部开采需求推动材料向“强黏结、高弹塑、耐极端环境”发展。强黏结亲煤型材料通过分子链端基活化技术,实现数均分子量30万以上的嵌段共聚物合成,煤岩界面黏结强度提升3倍,已在千米深井应用中验证效果。

弹塑性无机材料将进一步优化配方,KEP材料通过调整激发剂比例,可使塑性强度在500~2000kPa范围内调控,满足不同水压条件需求。耐极端环境材料通过纳米改性,在150℃高温与40MPa高压下仍能保持稳定性,使用寿命延长至10年以上。

3. 智能化: 响应型与自调控材料

智能响应型材料(如pH响应、温敏型)可根据地层环境自动调整其性能状态,实现精准注浆。自修复材料则能在受损后自行修复裂隙,提升工程的长期可靠性。结合数字化技术,构建从材料设计到效果预测的全流程智能系统是未来趋势。

4. 一体化: 材料-工艺-设备协同发展

未来注浆技术将形成“材料定制-工艺优化-设备适配”的一体化体系。针对不同矿区地质条件,可定制专用注浆材料,如高瓦斯矿井的阻燃型材料、富水矿井的抗分散材料;配套研发智能化注浆系统,实现流量、压力的实时调控,如集成化高泵压大流量系统,注浆效率提升50%以上。

结束语

矿区注浆材料历经百年发展,已形成无机、有机、复合三大体系,在围岩加固、堵水防渗、固废处置等领域发挥核心作用。面对深部开采与绿色矿山建设的双重需求,传统材料在性能、环保、适应性等方面短板日益凸显。未来注浆材料将以绿色化、高性能化、智能化为发展方向,通过固废高值利用、纳米改性、智能响应等技术突破,实现材料性能与工程需求的精准匹配。同时,需加强材料-工艺-设备的协同创新,建立量化评价体系,推动注浆技术从经验型向精准化、智能化转型,为我国煤炭资源安全高效开采与生态保护提供坚实保障。

参考文献

- [1] 赵光明,王艳芬,艾洁,等.矿用水泥基注浆材料的发展及展望[J].中国矿业大学学报,2024, 53 (1): 1—22.
- [2] 冯志强.高分子注浆材料在我国矿区的应用现状及发展前景[J].煤炭工程,2023, 55 (8): 45—51.
- [3] 刘辉,陈明,王涛.煤矸石基注浆材料的制备与性能研究[J].非金属矿,2024, 47 (3): 67—71.