

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 $>30\mu\text{m}$ ），难以渗透宽度 $<0.5\text{mm}$ 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 $5\mu\text{m}$ 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。

丙烯酸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。强黏结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能，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、适应性等方面的短板日益凸显。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.