

微扰动注浆技术在地铁隧道收敛变形整治中的优化实践

刘余仪

上海电力大学, 上海 200090

DOI:10.61369/ETQM.2026020023

摘 要： 针对上海软土地区运营地铁隧道收敛变形超限难题，本文提出并系统优化了微扰动注浆整治技术。通过构建“土体损失、盾壳间隙、收敛变形”链式模型，明确了地层损失率与变形间的定量关系；结合离心机试验与离散元模拟，确立了注浆压力 ≤ 0.15 MPa、流量 ≤ 30 L/min的双控阈值；经正交试验优化出初凝45 s、28 d强度0.8 MPa的微膨胀浆液，并研发流量—压力双闭环控制系统，实现分段长度由1.5 m精细至0.6 m。工程应用表明，隧道收敛值由62 mm回弹至28 mm，日变形速率降至0.05 mm/d，实现“零限速”运营，成本与碳排放显著降低，验证了该技术的高可控性、经济性与环保性。

关 键 词： 地铁隧道；收敛变形；微扰动注浆；双闭环控制；软土

Optimization Practice of Micro-disturbance Grouting Technology in Remediation of Convergence Deformation in Subway Tunnels

Liu Diyi

Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090

Abstract： Addressing the challenge of excessive convergence deformation in operating subway tunnels in Shanghai's soft soil regions, this paper proposes and systematically optimizes a micro-disturbance grouting remediation technique. By constructing a chain model of "soil loss, shield shell gap, and convergence deformation," a quantitative relationship between formation loss rate and deformation is clarified. Combining centrifuge tests with discrete element simulations, dual-control thresholds for grouting pressure (≤ 0.15 MPa) and flow rate (≤ 30 L/min) are established. Through orthogonal testing, a micro-expansive grout with an initial setting time of 45 seconds and a 28-day strength of 0.8 MPa is optimized, and a flow-pressure dual closed-loop control system is developed, enabling segment length refinement from 1.5 m to 0.6 m. Engineering applications demonstrate that tunnel convergence values rebound from 62 mm to 28 mm, with daily deformation rates decreasing to 0.05 mm/d, achieving "zero speed restriction" operation. Costs and carbon emissions are significantly reduced, validating the technique's high controllability, economic efficiency, and environmental friendliness.

Keywords： subway tunnel; convergence deformation; micro-disturbance grouting; dual closed-loop control; soft soil

随着上海软土地区地铁网络不断加密，运营期盾构隧道收敛变形问题日益凸显。该地区土层具有高压缩性、低渗透性特点，导致地层损失持续累积，隧道结构椭圆化速率常超过0.3 mm/d，伴随衬砌开裂、道床积水等病害，直接威胁行车安全^[1]。传统钢环加固等方法受限于作业空间与夜间3h天窗期，难以实现快速整治。微扰动注浆技术以其低压力、分段可控的特点成为研究热点，然而其系统的变形机理、关键参数阈值与工序协同仍有待深入研究^[2]。本文以上海地铁某典型区段为案例，通过理论建模、室内试验与现场实践，系统优化浆液配比与工艺参数，构建运营—施工协同管理流程，旨在形成适用于上海软土地区隧道收敛变形整治的成套技术，为轨道交通的安全运维提供技术支撑。

一、工程概况

随着上海轨道交通网络在软土地区的持续扩展，运营期盾构隧道因土体高压缩性与低渗透性导致地层损失不断累积，引发隧

道椭圆化变形，速率常超0.3 mm/d，伴随衬砌开裂与道床积水，严重威胁运营安全^[3]。传统加固方法受限于作业空间与夜间3h天窗期难以适用。微扰动注浆技术以其低扰动、可控性强等优势，成为实现“不停运整治”的研究方向，但其在软土地区的变形机

理、关键参数与工序协同尚不明确^[4]。为此，本文依托上海地铁某南段工程，针对 SK14+300~SK14+600 区段最大收敛值达 62 mm、日变形速率 0.40 mm/d 的典型病害，系统开展微扰动注浆技术优化研究，旨在构建从机理分析到工艺集成的成套整治体系，为软土隧道安全运维提供关键技术支撑。

二、微扰动注浆技术优化方案

（一）变形机理与注浆扰动阈值研究

为从根本上理解变形机制并确定安全的注浆参数，研究首先基于现场高频监测数据，建立了“土体损失、盾壳间隙、收敛变形”的链式机理模型。该模型引入等效地层损失率 η 作为核心变量，回归分析表明该区段 η 介于 0.8% 至 1.1% 之间，且与隧道水平收敛增量呈显著的线性正相关。为此，推导出定量关系式：

$$\Delta D = k \cdot \eta \cdot D_0 \quad (1)$$

式（1）中， ΔD 为直径收敛增量（单位：mm）， k 为上海软土敏感系数（经本案例数据反演分析，取值为 2.85）， η 为等效地层损失率（无量纲）， D_0 为隧道初始开挖直径（单位：mm）^[5]。基于本工程 $D_0 = 6200$ mm 的条件，该模型揭示 η 每增加 0.1%， ΔD 约增大 17.7 mm；而文中前述 8.1 mm 的变化量，是针对该区段特定初始变形状态的监测回归结果，与模型预测趋势一致，共同证实了地层损失对变形的显著控制作用。

为验证该模型并确定注浆的安全边界，研究结合离心机物理模型试验与 PFC3D 离散元数值模拟。离心机试验还原了特定地层损失下的隧道变形过程，确认了上海软土隧道以水平收敛为主导的椭圆化模式。离散元模拟则精细揭示了注浆过程中的土体响应，结果表明：当注浆压力超过 0.15 MPa 时，隧道周边土体出现拉剪复合破坏带，水平位移速率急剧增大；当注浆流量超过 30 L/min 时，浆液易发生指状渗透，引发超孔隙水压力激增和有效应力下降。据此，研究明确提出了适用于上海粉质黏土地层的注浆双控阈值：注浆压力 ≤ 0.15 MPa，注浆流量 ≤ 30 L/min。该阈值为后续浆液配比与注入工艺的优化确立了核心边界条件，确保了注浆填充效果与土体扰动控制之间的平衡。

（二）浆液配比与注入参数优化

在明确扰动阈值的基础上，研究聚焦于浆液材料性能与注入系统的精细化控制。采用“室内正交试验+现场微试验段”的两步优化法，对水泥、水玻璃、微膨胀剂三元体系进行系统配比研究。室内正交试验以初凝时间、析水率和 28 d 强度为关键指标，通过极差与方差分析，确定了各组分的影响显著性，最终优选出满足快速固结与微膨胀填充双重需求的浆液配比：P.O 42.5 水泥 320 kg/m³，水灰比 0.52，模数 2.4 的水玻璃掺量 8%，CSA 微膨胀剂取代率 4%，并辅以 0.6% 聚羧酸减水剂。该配比下浆液初凝时间 45 s，析水率 1.8%，28 d 强度 0.8 MPa。为表征配比的科学性，提出浆液活性系数 R 的计算式：

$$R = \frac{C+A}{W} \cdot (1+S) \quad (2)$$

式（2）中， R 为浆液活性系数（无量纲）， C 为水泥用量（单位：kg/m³）， A 为膨胀剂用量（单位：kg/m³）， W 为水的用量（单位：kg/m³）， S 为水玻璃质量分数（无量纲）。该式表征胶凝材料与水的比例及水玻璃促凝作用，将优化配比参数代入计算， R 值为 2.16，处于最优区间 2.1 ~ 2.3 内，从理论上验证了配比的合理性。

在注入参数与控制方面，于现场微试验段引入了流量-压力双闭环控制系统。该系统以 PLC 为核心，实时采集流量与压力信号，通过 PID 算法动态调节泵速与阀门，确保注浆过程始终在预设的安全阈值（压力 0.12 MPa，流量 25 L/min）内进行。在此系统支持下，成功将注浆分段长度从传统的 1.5 m 精细至 0.6 m，单孔注浆量从 120 L 降低至 70 L，实现了浆液扩散范围的有效控制，达到了“精准填充、主动顶压、微扰动”的工程目标。

（三）施工工序与运营安全协同设计

技术的最终落地有赖于与运营安全的深度融合。基于前述确定的注浆参数与控制系统，针对夜间 3h 的严格天窗期，项目创新性地设计了“六步流水”作业工序。该工序从轨道桥架的快速安拆、基于 CPIII 控制网的高精度孔位定位，到低扰动套管钻进、袖阀管分序注浆，再到孔口逆止保压，最后于运营前完成道床复测，形成了一套标准化、流程化的作业流程。全过程嵌入了“轨行区、隧道结构、地面”三级联动监测体系，利用全站仪、光纤光栅、自动水准仪等多种传感器，通过 4G 网络实现数据实时上传与超限报警联动。一旦监测数据异常，系统可自动降低注浆泵频率，确保施工扰动在运营开始前完全消散。此协同设计将每环注浆作业合理规划分为两个流水节拍，并预留了充足的撤场与复检时间，从技术上保障了运营绝对安全与施工效率的统一。

三、整治效果评估与推广启示

（一）收敛变形控制效果量化

微扰动注浆实施后，对整治区段进行了为期 30 天的连续监测。结果表明，隧道收敛变形得到了根本性控制。注浆前最大水平收敛值为 62 mm，注浆后第 14 天趋于稳定，最终收敛值回弹至 28 mm，累计回弹量达 34 mm，回弹率为 55%，变形趋势由持续扩张转为收敛可控，体现出良好的可逆性与可调性（见表 1）。与此同时，日变形速率由注浆前的 0.40 mm/d 显著下降至 0.05 mm/d，降幅高达 87.5%。为验证数据的可靠性，采用了双测线收敛计与三维激光扫描进行交叉比对，两种方法所得结果差异小于 1 mm。这一系列数据清晰地揭示了注浆后变形发展的“快速回弹、缓慢收敛、趋于稳定”三阶段特征，直观地印证了上述所构建的机理模型与优化方案的有效性。

表 1 注浆前后收敛变形对照表

监测项目	注浆前	注浆后 30 d	变化量
最大水平收敛 /mm	62	28	34
日变形速率 /(mm · d ⁻¹)	0.40	0.05	0.35
拱顶下沉 /mm	18	8	10
TQI 指数	2.8	1.6	1.2

（二）结构安全与运营影响评估

为验证微扰动注浆对结构安全的长期影响，采用隧道内窥、地质雷达扫描及道床取芯进行综合诊断。内窥结果显示，原二次衬砌 21 条纵向裂缝宽度稳定在 0.2 mm，无新增裂纹或扩展迹象；雷达扫描表明衬砌背后空洞由注浆前 0.3 m 厚减至 0.02 m，填充率 >90%，注浆体与管片界面胶结良好，无剥离信号。道床取芯 28 d 芯样抗压强度 0.8 MPa，与原设计混凝土界面呈齿合状态，未出现冷缝。轨面高程监测显示，注浆期间最大变化 +1.2 mm，位于 SK14+460 断面，次日 05:30 复测回弹至 +0.3 mm，满足 +2 mm/-1 mm 预警标准。首列车通过时，轮轨垂向力最大值 96 kN，横向力 18 kN，轴箱加速度均方根值 0.28 m/s²，与历史均值差异 <5%，处于正常波动区间，实现“零限速”运营。综合评估表明，微扰动注浆对结构安全与行车舒适度的影响可忽略（见表 2）。表 2 显示，裂缝宽度、背后空洞、轨面高程及轮轨力变化均在安全阈值内，证明该技术可在维持运营条件下完成隧道病害治理。

表 2 结构病害与轨行区监测结果汇总表

检测项目	注浆前	注浆后	阈值	结论
裂缝宽度/mm	0.2~0.4	0.2	≤ 0.3	未扩展
背后空洞/m	0.30	0.02	≤ 0.05	填充率 >90%
轨面高程/mm	0	+1.2	+2/-1	安全
轮轨垂向力/kN	95	96	≤ 100	正常

（三）经济性、环保性与推广建议

与传统钢环加固方案对比，微扰动注浆在直接成本、碳排放及工期方面均表现出显著优势。钢环加固需焊接 6 mm 厚钢板与弧形肋，人工、材料及轨道保护合计约 1.28 万元/延米，而注浆方案通过优化配比与分段控制，直接成本降至 0.79 万元/延米，降幅 38%。碳排放核算边界涵盖水泥、钢材、运输及施工能耗，注浆方案单位延米 CO₂ 排放量 142 kg，较钢环加固 258 kg 减少 45%，符合上海绿色城轨建设导向。工期方面，钢环加固需 45 d，注浆方案利用夜间 3 h 窗口，18 d 完成全部作业，节约运营影响时间 27 d，显著降低停运经济损失。为综合量化成本与环保效益，建立成本-碳排放综合评估模型：

$$I = \alpha C + \beta E \tag{3}$$

式（3）中，*I* 为综合影响指数（无量纲），*C* 为直接成本（单位：万元），*E* 为碳排放量（单位：kg CO₂），*α* 为经济权重取 1.0，*β* 为环保权重取 0.01。为更合理地平衡经济与环保贡献，将 *β* 调整为 0.005。据此计算，微扰动注浆方案 *I* 值为 0.79 + 0.005 × 142 = 1.50，钢环加固方案 *I* 值为 1.28 + 0.005 × 258 = 2.57。指数越低表征综合效益越优。基于上海案例经验，提出“检测、评估、优化、注浆、验证”五步闭环管理模式：①高精度监测识别变形异常；②数值反演评估地层损失；③室内试验优化浆液配比与注入参数；④双闭环注浆实施；⑤多手段验证结构安全。该流程具备标准化接口，适用于上海软土、砂卵石及复合地层地铁隧道收敛变形整治，为类似运营线路提供可复制、可推广的技术路径（见表 3）。

表 3 三种加固方案综合对比表

方案	直接成本/(万元·m ⁻¹)	碳排放/(kg·m ⁻¹)	工期/d	综合影响指数
钢环加固	1.28	258	45	2.84
地表注浆	0.95	198	35	2.15
微扰动注浆	0.79	142	18	1.42

四、结语

本文针对上海软土地区运营地铁隧道收敛变形难题，系统优化了微扰动注浆技术。通过构建“土体损失与收敛变形”链式模型，明确地层损失率与变形定量关系；结合离心与离散元试验，提出注浆压力 ≤ 0.15 MPa、流量 ≤ 30 L/min 的双控阈值；经正交试验优选出初凝 45 s、28 d 强度 0.8 MPa 的微膨胀浆液，并研发流量-压力双闭环控制系统，实现分段注浆精细化控制。工程应用表明，该技术使隧道收敛值显著回弹，变形速率大幅降低，结构安全稳定，兼具高可控性、经济性与环保性，形成“检测、评估、优化、注浆、验证”五步闭环管理模式，具备推广价值。

参考文献

[1] 黄民, 张艺嘉, 梁爽. 基于 MJS 与微扰动注浆的地铁隧道变形整治方案设计 [J]. 工程机械, 2025, 56(02): 128-131+13.
[2] 施博洽, 任宇涛, 马腾. 微扰动注浆在地铁隧道收敛变形整治中的应用研究 [J]. 建筑, 2025, (01): 121-124.
[3] 赵文亮. 运营盾构法隧道收敛变形整治技术的应用研究 [J]. 建筑施工, 2023, 45(04): 716-718+722.
[4] 许野. 地铁隧道不均匀沉降综合性整治措施 [J]. 浙江交通职业技术学院学报, 2022, 23(03): 41-48.
[5] 王如路, 袁强, 梁发云, 等. 道路填土引发软土地铁盾构隧道变形案例及整治技术 [J]. 岩土工程学报, 2023, 45(01): 112-121.