

复杂地质条件下地铁盾构泥浆渣土减量化-资源化协同处置技术及同步注浆应用研究

浙江鲤航轨道交通产业发展有限公司

一、背景与挑战

随着中国城市化的快速发展，城市地面可用空间变得越来越有限。地下空间尤其是地铁、隧道、管廊等轨道交通设施的大规模开发和利用成为趋势。国家层面的政策和规划，如《交通强国建设纲要》和“十四五”规划都支持和推动这种发展。浙江省作为轨道交通发展的重要区域，计划构建更加一体化和高质量的轨道交通网。然而轨道交通的混凝土结构在施工、使用和运营过程中面临诸多挑战，如技术不当、复杂的运营环境等，可能导致结构劣化和安全风险。混凝土作为基础建材，其性质和分布的不均匀性导致了内部的微小裂缝，影响着结构的耐久性和安全性。目前，浙江省内的轨道交通基础设施在都在不同程度上面临着劣化问题。随着城市地下空间开发的高速发展，盾构法作为一种具有高效、安全、机械化程度高等优点的施工方法，已被广泛应用于轨道交通、市政公路、城市综合管廊等工程建设中。与此同时，盾构施工过程中产生的盾构渣土也逐年陡增，据统计，中国在建的盾构工程预计将产生 2.96 亿 m^3 盾构渣土，处置费预计将需要 766 亿元。如果能将盾构渣土回收再利用，可以产生巨大的经济效益。然而中国对于巨大量级的盾构渣土资源化利用不足 5%，远低于欧美和日韩等发达国家，带来了严重的环境污染和资源浪费等问题。在发展绿色低碳交通的时代背景下，盾构渣土资源化再利用已成为研究热点。



盾构渣土处置

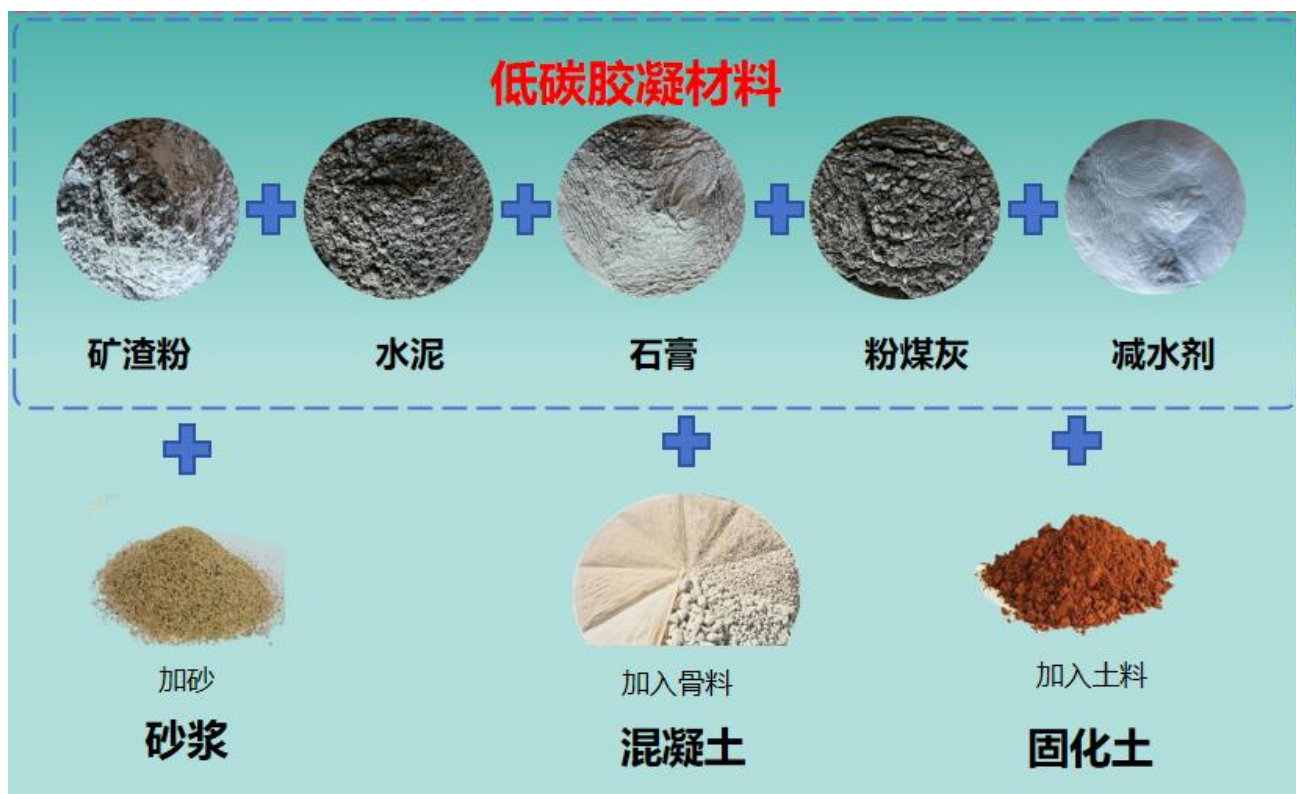


资源再利用

实现盾构法隧道“零渗漏”目标的关键在于使用具有特定特性的材料，同步注浆材料在盾构隧道施工中起着至关重要的作用。其主要包括流动性好、稳定性好、强度高等特性。其中流动性于 230-260mm，体积泌水率小于 2%，3 天强度大于 0.653Mpa。建筑渣土处置总体规划思路，目前消纳方式主要为“填埋、回填、焚烧”等。填埋是将建筑渣土运输到指定的渣土消纳场中，可以减少渣土对环境的污染，但需要占用大量的土地资源，并且可能产生二次污染。为解决城市固体废物减量、回收、利用与处置问题，建设“无废城市”，加快实现碳达峰、碳中和目标。根据《浙江省建筑垃圾资源化利用技术导则》（2017 年 12 月），建筑渣土应按照不同的渣土类别，遵循“全过程智能化监管”原则，采用“源头减量、消纳、资源化利用”，解决城市固体废物减量、回收、利用与处置问题、建设“无废城市”的重要工作、加快实现碳达峰、碳中和目标。

二、解决方案与创新点

低碳胶凝材料是一种由 85%以上的工业废渣及其他高分子外加剂组成的环保型胶凝材料，其可直接应用于软土、泥浆、渣土，提高固化体强度、耐久性，缓解工业废弃物数量大、碳排放带来的环境压力。低碳胶凝材料具有环保价值、经济价值、使用价值等多方面的优势。



低碳胶凝材料可应用于各类搅拌桩、旋喷桩、工法桩、路基固化土填料、盾构同步灌浆料、渣土预制桩等场景；废弃泥浆制备流态固化土用于基坑肥槽回填、管线/管沟回填等应用场景。低碳胶凝材料在土体应用中可以 100% 替代水泥。

纳米矿物胶凝材料水化机理与水泥水化机理相似，其独有的成分填充土壤空隙，致使结构更为致密，特有的高分子外加剂均匀分散，促使水化产物分布更加均匀。

结构致密：在 1000X 的倍数下，纳米矿物胶凝材料结构较水泥土更为完整、致密。在 3000X 的倍数下，纳米矿物胶凝材料固化土表面可观察到棒状、片状及絮状水化物，孔隙分布较少，水泥土表面孔隙较大。

均匀分散：纳米矿物胶凝材料固化土水化物分布均匀，水泥土分布杂乱。

水化充分：水泥土中仍有水化中间产物 $\text{Ca}(\text{OH})$ ，说明水泥水化反应较慢，反应未完全，纳米矿物胶凝材料固化土反应较为完全。

低碳胶凝材料制备盾构同步灌浆料的组成：

盾构土-浆液主要填充料、低碳胶凝材料-胶凝材料，提供浆液凝结强度和调节浆液凝结时

间、水-改善浆液的稠度（流动性）



全自动计量控制系统



制浆设备

解决方案工艺工法：

浆液配比：本技术旨在用于盾构隧道管片壁后注浆，主要控制浆液流动性、强度、凝固时间等性能，通过泥浆比重及低碳胶凝材料掺入比进行调整控制。

抗压强度试验数据

泥浆比重	低碳胶凝材料掺入比	含水率	初凝时间	1天强度 (MPa)	3天强度 (MPa)	7天强度 (MPa)	14天强度 (MPa)	28天强度 (MPa)
1.45	20%	60%	6h-7h	0.156	0.372	0.51	0.88	1.124
1.50	20%	50%	5h-6h	0.235	0.467	0.689	1.054	1.367
1.55	20%	40%	4h-5h	0.324	0.653	0.865	1.376	1.869

浆液拌制：

- ①泥浆制备：直接利用盾构废弃渣土加水进行拌合。
- ②加入低碳胶凝材料：按照盾构渣土比例加入低碳胶凝材料，经过制浆系统进行充分搅拌后，在输浆管出浆口取样检查。



运输、泵送：基于浆液连续性拌制及直接运输至隧道内，可以使盾构施工过程中同步浆液能正常满足使用的基本要求。

拌制完成后的浆液需经过中转储存，需配备具有搅拌功能的储浆罐，保持存储过程中浆液的流动性及均匀性，满足盾构机同步注浆泵送使用条件。

砂浆与盾构土浆液对比分析：

环号	管片平偏 (mm)	管片高偏 (mm)	本次 实测管片平偏 (mm)	本次 实测管片高偏 (mm)	累计 上浮/下沉 (mm)
169	-14	-60	4	90	155
170	-17	-59	-15	93	152
171	-17	-58	-15	80	138
172	-12	-62	-10	65	126
173	-6	-76	-22	45	120
174	4	-82	-24	30	112
175	-1	-74	-11	18	92
176	-1	-80	-4	13	93
177	6	-78	-8	7	85
178	-1	-81	-10	6	86
179	0	-82	-13	13	95
180	-2	-92	-7	12	104
181	-2	-104	3	13	117
182	17	-107	15	10	117
183	19	-101	16	8	108
184	18	-105	10	6	111

175 环~179 环使用盾构土浆液，其余为不掺水泥的砂浆浆液。从监测数据显示，使用不掺水泥的砂浆浆液，管片沉降最大为 169mm。使用盾构土浆液，管片沉降最大为 95mm。使用盾构土浆液后，管片上浮降低了 74mm，且监测数据显示管片上浮呈现明显递减趋势。

水泥砂浆与盾构土浆液对比分析：

环号	管片上浮 (mm)	管片下沉 (mm)	本次 实测管片上浮 (mm)	本次 实测管片下沉 (mm)	累计 上浮/下沉 (mm)
1310	9	-103	47	-38	69
1311	13	-103	37	-49	34
1312	7	-101	2	-42	59
1313	21	-97	19	-34	63
1314	12	-91	18	-20	71
1315	13	-89	5	-9	80
1316	6	-74	-4	-7	66
1317	7	-74	2	-9	64
1318	1	-86	16	-19	67
1319	4	-88	14	-24	64
1320	2	-100	35	-39	60
1321	11	-98	25	-41	56
1322	10	-98	20	-47	51
1323	19	-102	35	-51	51
1324	20	-103	25	-60	42
1325	26	-111	44	-60	30
1326	26	-110	66	-67	48
1327	46	-114	45	-67	46

1319 环~1378 环使用盾构土浆液，其余为每立方掺 50Kg 水泥的水泥砂浆。从监测数据显示，盾构土浆液沉降比水泥砂浆沉降减小 20-30mm, 且盾构土浆液填充区域未出现渗漏现象，地面及管线沉降均在范围以内。

创新点：

- 1、采用盾构渣土作为主要原材料，实现了盾构废弃渣土的再利用，浆液制备生产工艺简单。
- 2、减少了盾构废弃渣土的外运，一定程度解决了盾构渣土外运难、费用高等问题，符合绿色低碳环保要求，且有利于实施性施工组织的落实。
- 3、采用新型低碳胶凝材料作为胶凝材料，制备的浆液早期强度高、泌水率小，能有效控制管片上浮、结构渗漏、地表沉降等问题，显著提高隧道施工质量。

三、成果与效益

已获得发明专利：土体微扰动深层搅拌装置、一种高含水率废弃泥浆的固化剂、制备方法及其资源化利用方法。

应用案例：

低碳胶凝材料应用于搅拌桩-杭州地铁 15 号线丰北站

[illegible]

杭州地铁 15 号线丰北站基槽加固采用 CS-DSM 搅拌桩+低碳胶凝材料成桩工艺。28 天龄期后委托浙江久正工程检测有限公司进行取芯检测。18%的低碳胶凝材料掺量，抗压强度为 6.99Mpa, 均大于设计抗压强度 0.8Mpa, 均满足设计要求。

可应用场景：



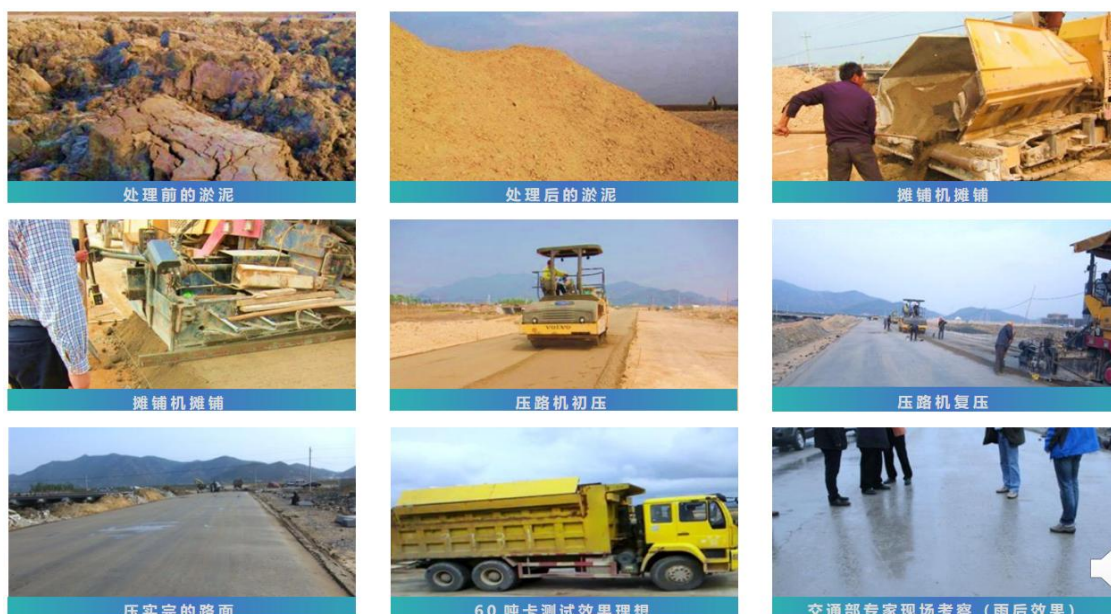
制备盾构土灌浆料



基坑肥槽回填



流态固化土回填



路基土填料



制备免烧砖

经济效益：

降本增效：减少企业的废物处理费用，企业并将建筑废弃物转化为新产品或材料，从而降低生产成本并提高企业利润。打造无废城市，解决地级建设城市 4000—8000 万方泥浆渣土外运，再循环利用实现效益 10 亿以上。

资源节约：降低废弃物管理的成本,有效降低物流运输成本，预计可实现 20-30% 的成本节省。

高效管理：通过大数据平台，使泥浆渣土的运送、管理、再利用等达到最高效的利用，可以实现泥浆渣土市场的精确跟踪、安全核算和实时监控，并为政府和企业提供智能化的决策支持，预计可减少 50% 的人力成本。

推动创新：激发企业创新意识和能力，推动技术和工艺革新，并开发出更多具有竞争力的新产品。

减少占地，促进土地资源利用开发：如果泥浆渣土资源化比率能达到 30%，可以大大释放因堆放垃圾占用的土地，有利于保护耕地红线和提高土地资源利用效率。

推动循环经济：泥浆渣土的自循环利用是循环经济发展的重要组成部分，可增加 2~3%的第二产业生产总值。

社会效益：

促进政府及企业效能：信息化平台和可视化远程控制系统为泥浆渣土的来源、去除及再利用提供了高度的数据透明度。为政府和企业提供智能化的决策支持。

提高居民生活质量：资源化项目改善了先前坑洼的建筑垃圾堆放面貌，改善城市整体环境状况。

促进科技水平发展：资源综合利用业的发展提高了相关产业的科研经费，促进科技水平发展。

提升城市形象：贯彻实施建材废弃物再循环利用政策，改善了城市的整体环境状况，提升企业社会责任感和城市形象。

提高社会满意度及公众对环保的意识和重视程度。

四、可复制性与展望

盾构渣土资源利用技术，实现了将盾构法施工产生的废弃渣土、废浆资源再利用至施工生产中，废弃渣土、泥浆加入低碳胶凝材料通过搅拌系统拌合后形成新的灌浆料，使用盾构渣土资源利用技术拌制的浆液具有更好的流动性、稳定性及适用性，能更有利于施工质量控制。

由于新技术的使用，相对于传统同步浆液，配比可根据不同工况、地质条件的施工需求进行调整，所使用的拌制材料可实现工业废渣和渣土资源再利用，具有资源利用率高、绿色设计和生产的优势，同时具有较大的经济、环境效益。

- 1、通过对建筑渣土的深入研究，实现建筑渣土低成本、大体量、综合性的利用。
- 2、研制既高效又经济的淤泥固化剂以实现淤泥的资源化利用。
- 3、从强度特性、防水特性、耐久特性等方面全面分析固化土的路用性能。
- 4、继续完善建筑渣土相关规范、法律法规制度，加大再生产品在市场中的推广力度。

五、项目团队

浙江大学：杨仲轩、潘剑超

浙江鲤航：邹红湘、付顺义、于宏刚、陈思好

联系人：邹红湘 13867151299