

城市地下空间开发新型材料的现状与发展趋势

吴弘宇^{1,2}, 董梅^{1,2}, 韩同春^{1,2}, 徐日庆^{1,2}, 龚晓南^{1,2}

(1. 浙江省城市地下空间开发工程技术研究中心, 杭州 310058; 2. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 杭州 310058)

摘要: 地下空间向更深、更广开发是我国城市化进程的必然趋势, 新型工程机械设备和技術对工程材料提出了更高要求。文章从开挖机械材料、支护材料、环境保护材料三个方面, 分析了目前地下工程中主流材料的使用现状以及新型材料的发展趋势。除了要满足强度的要求, 新材料还应当具备环境友好的特性。因此, 自愈合材料、生物材料以及绿色支护材料的使用将是未来地下空间开发的发展方向。

关键词: 城市地下空间; 新型材料; 盾构; 注浆; 环境保护

中图分类号: TU504 **文献标识码:** A

Review and Prospects of New Materials in Urban Underground Development

Wu Hongyu^{1,2}, Dong Mei^{1,2}, Han Tongchun^{1,2}, Xu Riqing^{1,2}, Gong Xiaonan^{1,2}

(1. Engineering Research Center of Urban Underground Development of Zhejiang Province, Hangzhou 310058, China;

2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The main prospects of the urban underground development in China are a greater depth and a wider dimension. Advanced devices and technologies require the development of new materials. From the aspects of excavation mechanical materials, support materials, and environmental protection materials, this study summarizes the status of the main materials in use and the prospects of new materials. Aside from the strength requirement, an environment-friendly feature is the main requirement of new materials. Thus, self-healing, biological, and green support materials are demonstrated as future prospects.

Keywords: urban underground space; new materials; shield tunneling; grouting; environmental protection

一、前言

近年来, 由于我国经济迅速发展、城市人口急剧增长, 为解决城市交通与环境问题, 修建各式地下工程成为必然趋势, 如各种点状地下空间设施 [1] (站前广场、市民广场、绿化广场等)、线性地下空

间设施 (地铁、综合管廊、排水暗沟等) 以及网络状地下空间。城市地下空间开发有利于国土资源的充分开发利用, 但同样面临着许多问题与挑战。工程中采用何种材料将极大地影响施工进度以及施工质量。因此, 研究新型高效的工程材料是地下空间开发领域一个重要而紧迫的问题。

收稿日期: 2017-12-10; 修回日期: 2017-12-25

通讯作者: 董梅, 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 讲师, 主要从事工程地质研究工作; E-mail: mdong@zju.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“城市地下空间开发规划战略研究”(2015-XZ-16)

本刊网址: www.enginisci.cn

城市地下空间因其开发环境复杂, 周边构筑物密度大的特点, 不仅要保证开挖、支护的安全施工, 同时还要尽量减少对周围构筑物的影响。且随着地下空间开发向更广、更深方向发展, 亟需新型材料支撑工程技术的发展。本文从开挖机械材料、支护材料、环境保护材料三个方面出发, 首先分析了当前城市地下空间开发过程中所使用的主流材料及其优缺点, 例如盾构刀圈刀具易磨损、崩裂; 钢筋混凝土盾构管片工艺简单但易破损、生产繁琐; 传统支护方法水泥用量大, 污染严重; 水泥注浆简单可靠但可灌性差, 化学注浆可灌性好但有毒、耐久性低等。然后, 对新型材料的使用现状以及未来趋势进行分析, 如粗晶硬质合金刀具、纤维混凝土管片、超细水泥注浆等, 有些仍处于试验阶段, 但拥有不错的发展前景, 如自愈混凝土、生物注浆等绿色环保材料。最后总结了地下空间开发过程中各类型材料存在的问题, 并提出未来的发展方向, 为今后的材料研发提供参考依据。

二、开挖机械材料

在城市地铁隧道施工中, 最常用的施工机械是盾构机。盾构机在施工过程中, 通过刀盘上的刀具对前方岩土进行切削, 刀具大体可分为滚刀与切刀两类。刀具的性能和寿命直接影响整个盾构过程的效率。刀具的失效形式主要包括刀具磨损、刀圈崩裂、轴承或密封损坏, 以及合金脱落。因此高性能的滚刀刀圈、切刀刀头、堆焊材料缺一不可。

(一) 刀圈材料

对于坚硬的岩石, 盾构机利用滚刀对岩石进行滚压破岩, 滚刀刀圈在掘进过程中, 不仅受到径向的破岩压力, 还与岩石发生强烈的摩擦。因此需要刀圈材料具备极高的硬度、强度以及冲击韧性 [2]。

国内的刀圈材料一般选取 H13 热作模具钢, 但是其含碳量稍低, 不够理想。株洲硬质合金集团有限公司生产了一种新型可锻硬质合金刀圈 [3], 其表面硬度达到 60 HRC 以上, 冲击韧性 $\geq 15 \text{ J/cm}^2$, 其性能与国外产品相当。该种硬质合金具有良好的淬透性、淬硬性和红硬性, 并且硬度呈梯度分布, 入口硬度高且耐磨, 内部硬度低韧性好, 不易崩坏, 兼具耐磨性和抗冲击性。

(二) 刀头材料

硬质合金是盾构刀具的常用材料。导致刀具失效的主要原因为冲击、冲击疲劳以及热疲劳裂纹。因此, 要求刀具具有高导热性和低热膨胀系数, 以限制热裂纹的生长速率, 提高刀具的耐冲击疲劳。

硬质合金按碳化钨 (WC) 晶粒度可以分为纳米晶、细晶和粗晶等。根据瑞典 Sandvik 公司的标准, 晶度大于 $3.5 \mu\text{m}$ 则可以归于粗晶硬质合金。

目前国际上先进的掘进机械工具刀头都采用特粗晶硬质合金材料。粗晶硬质合金因其晶粒尺寸较大, 与传统硬质合金相比, 具有更强的硬度、冲击韧性、红硬性, 以及更高的导热率 [4]。有研究认为硬质合金晶度在 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 时的性能最佳, 耐磨并且不易破碎 [5]。

(三) 堆焊材料

为保证在盾构施工过程中, 硬质合金刀头不会与母体分离, 通常会在硬质合金的母体周围堆焊耐磨层。普通的铸造碳化钨焊条由于 WC 含量过高导致表面裂纹很多, 焊层易脱落, 不耐冲击。

目前国内外市场上的高温耐磨材料主要分为三类: 钴基、镍基和铁基高温耐磨堆焊材料。钴基、镍基材料耐磨耐高温, 综合性能优异, 但其价格昂贵, 在应用成本上没有优势。研究人员通常在铁基中添加少量的 Cr、W、Mo、V、Ti 等元素以提升材料性能, 制备出的耐磨合金硬度可达 70 HRC。目前的铁基堆焊材料耐磨性能都比较好, 但高温工作性能较差。因此保证铁基耐磨焊条在 650°C 高温仍具有相当的可靠性能具有重大意义 [6]。

三、支护材料

在盾构施工中, 预制管片是主要的衬砌结构。管片必须满足工程所要求的抗压、抗变形、抗渗防漏、服役年限等要求, 因此管片材料的选择极为重要。目前的盾构管片主要以钢筋混凝土管片为主, 但其有如下一些缺陷 [7]: ①运输安装过程中边角易破损, 如图 1 所示 [8]; ②易产生裂缝, 影响耐久度; ③耐火性较差; ④钢筋配置繁琐, 生产功效低等。除此之外, 传统的支护方式因其水泥用量大, 会造成材料浪费及环境污染, 新型绿色支护技术及材料有助于解决这些问题。

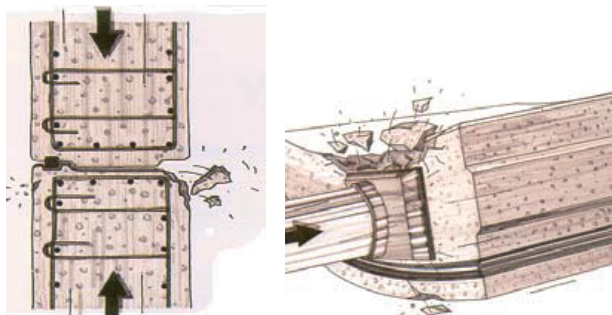


图1 管片破损示意图

(一) 预制管片材料

1. 纤维混凝土

纤维混凝土管片主要采用高模量的钢纤维与低模量的聚丙烯纤维，取代传统钢筋混凝土管片中的部分甚至全部钢筋。

纤维混凝土管片与普通混凝土管片相比，主要优点包括 [9]：抗拉、抗弯、抗剪等力学性能提高；韧性增强，耐疲劳性能提高；抗冻、耐热、耐腐蚀等化学性能提高。钢纤维混凝土的抗疲劳性能为普通混凝土的 10 倍 [10]，其中聚丙烯纤维还可以提升管片的抗火性能以及外观质量。复合纤维混凝土材料不仅在力学性能上有所提升，同时还兼具经济优势：①节省钢筋水泥用量；②减少钢筋加工工序；③降低设备磨损等。

纤维混凝土在国外已经得到了广泛的应用，最新的如巴塞罗纳地铁 9 号线 [11]，都取得了比较好的使用效果。在国内，纤维管片大多处于试验阶段，例如，上海地铁 6 号线工程以及北京地铁 10 号线工程等。混杂纤维管片兼具工程效果与经济效应，应大力推进研究及在工程中应用。

2. 自愈合混凝土

近年来，不同学者提出了多种水泥基材料自愈合的理论 [12]。关于自愈合材料的分类和名称，尚未统一。根据机理，可分为以下几类：管状载体自愈合材料；微胶囊载体自愈合材料；形状记忆合金自愈合材料；微生物自愈合材料。前两者是在混凝土拌合过程中置入特殊的复合材料（如含修复剂的胶囊或者玻璃管）。当混凝土材料出现裂缝时，载体（玻璃管或胶囊）在裂缝工作环境下破裂，修复剂流出并填充裂缝，裂缝得到愈合，如图 2 所示 [13]。愈合之后，裂缝的生长被阻止，材料性能得到恢复甚至提高。

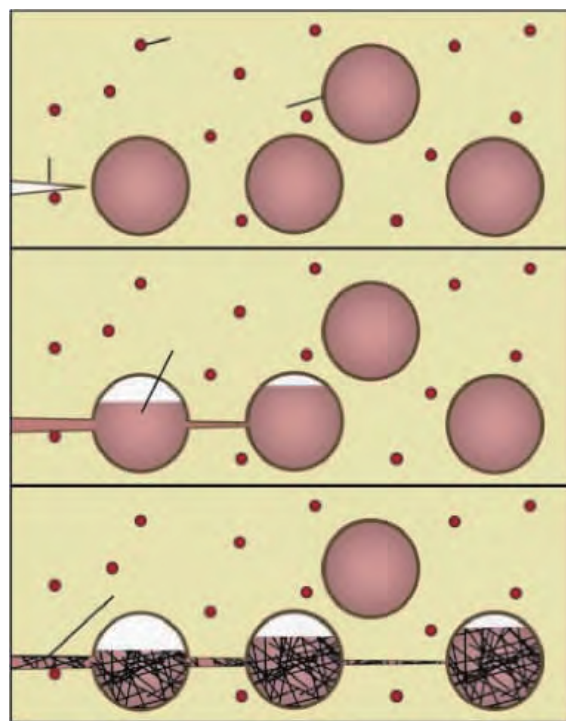


图2 聚合物材料微胶囊自愈合原理

一般认为，甲基丙烯酸甲酯（MMA）和硅胶是比较合适的微胶囊载体自愈合材料和壳体 [14]。而管状载体自愈合材料一般采用空心玻璃纤维加装环氧树脂或者聚氨酯等黏结材料。相比较而言，管状载体更容易在裂缝下破碎，从而更高效地修复裂缝。但正是由于这一特性，置入管状载体的混凝土不易搅拌成型，加工难度大。

Sakai 等 [15] 首先提出了基于形状记忆合金（SMA）的裂缝修复系统。试件在荷载作用下产生裂缝，当荷载卸除后，裂缝在 SMA 作用下完成机械性愈合。SMA 虽然能够很好地限制裂缝的生长，但其成本极高并且对工作环境要求很高。这些缺点限制了 SMA 材料在水泥基材料自愈合中的应用 [16]。

微生物自愈合是一种利用微生物制造方解石（ CaCO_3 ）填充混凝土裂缝的方法，通常采用土壤中常见的细菌巴氏芽孢杆菌来制造 CaCO_3 沉淀。

微生物自愈合目前还存在很多难以解决的问题：①微生物会消耗水泥基体中的氢氧化钙来制造 CaCO_3 沉淀，从而降低混凝土内部碱度，导致钢筋腐蚀；②微生物载体会造成水泥基体内部缺陷，降低混凝土结构的强度和耐久性；③微生物自愈合不是一种即时修复方法，而且对于较宽的裂缝修复能力有限。微生物自愈合尚处于初步研究阶段 [17]，

如需应用到工程实践当中, 还需进行大量的试验研究。

3. 其他混凝土

通过在混凝土中加入高效减水剂, 无需振捣即可达到自密实的效果。同时由于泌水性小, 混凝土表面不会产生乳皮层, 新老混凝土接触面连接性能良好, 具备优异的一体化效果。

纤维自密实混凝土除了能够提高混凝土的流动性, 减少泌水性。同样也兼具了纤维混凝土的一些优势, 例如, 抗冲击性能、抗拉能力、耐腐蚀性、防火性能、耐疲劳性能等 [18,19]。

(二) 绿色支护材料

在城市地下空间开发的过程中, 桩锚支护加降水技术是主要的工程形式, 造成大量的资源浪费以及环境污染, 并且会影响地下工程的后续施工。为解决这些问题, 开发了一系列相对绿色环保的技术与材料。例如, 采用长螺旋压灌水泥土桩墙止水防渗, 水泥土浆原位取土与水泥在地面搅拌; 水泥土桩墙内插入型钢与可回收锚索构成围护结构, 基坑支护作用结束后, 回收型钢与锚索钢绞线; 使用钢管内支撑代替混凝土内支撑等。

这些绿色支护材料不仅节省资源、保护环境, 还有利于临近建筑物的施工。符合节水、节材、节地、节能、环境保护的“四节一环保”工作要求。

四、环境保护材料

在地下工程的防渗堵漏中, 采用注浆、防水材料(混凝土自防水、防水卷材、防水涂料)是常用手段。传统的注浆材料存在不少缺陷, 例如, 水泥类注浆可灌性低; 水玻璃类注浆固结强度差; 化学类注浆有毒并且耐久性差等。防水材料大体上分为两类, 一类是柔性防水材料, 一类是刚性防水材料。而柔性防水材料又分为防水卷材、防水涂料以及密封材料。地下工程的防水通常强调“以防为主、刚柔结合、多道防线、综合治理”的原则, 各类防水材料都有其独特优势与发展空间。

(一) 注浆材料

1. 超细水泥注浆材料

超细水泥是采用超细粉磨技术对普通水泥颗粒

进行细化, 生产方法分为干磨和湿磨两种。超细水泥注浆有如下特点 [20,21]: 渗透性更好, 可注入细砂, 可灌性与化学浆材类似; 悬浮液更加稳定, 析水时间延长, 析水率降低; 抗压强度、早强性能高; 抗渗性能好; 凝结时间短。

超细水泥注浆发展时间较早, 并在三峡工程中得到大规模应用。但其生产成本较高, 储存、运输难度较大等缺点制约其使用范围。除此以外, 超细水泥的生产技术与设备亟待提高, 有关超细颗粒特性的理论研究有待深入。

2. 碱激发材料

工业废渣能被碱激发, 可作为注浆材料的原材料, 并且固体颗粒比水泥小, 颗粒级配也更为合理。主要包括粉煤灰、矿渣、钢渣。

碱激发的注浆材料具有非常高的早期强度和最终强度, 耐久性好、耐酸碱腐蚀、抗渗性高、抗冻性好, 不会导致碱集料反应。但在材料干缩性能方面, 碱激发的注浆材料一般比水泥注浆材料要敏感 [22]。

粉煤灰来源广泛, 价格低廉, 并且其化学组分与水泥类似, 因此通常作为水泥材料中的添加材料使用。但粉煤灰中 CaO 含量相对不足, 导致其活性较低, 凝结性能差, 尤其是早强性能差, 因此无法单独作为胶凝材料使用。

矿渣化学成分主要为 CaO、Al₂O₃、SiO₂, 含量一般达 90% 以上, 化学活性优异并且可以辅助减水。双掺、三掺工业废渣无水泥熟料双液注浆材料体系较单掺体系具有更合理的颗粒级配效应和更高的固结强度。

使用碱激发工业废渣不仅是出于对材料性能的考虑, 同时还考虑到环境保护, 可以减少二氧化碳的排放。

3. 生物注浆材料

微生物诱导碳酸钙沉积 (MICP) 是一种新兴的岩土工程加固技术。MICP 注浆通过向原位砂土中传输菌液 (如产脲酶的微生物) 以及尿素和钙源等营养盐, 从而使砂土孔隙被沉积的碳酸钙填充, 使软弱砂土地基得到加固, 承载力提高。

国内外针对 MICP 的研究还是处于实验室试验阶段, 初步实验研究表明, MICP 注浆加固技术, 可以有效提高地基的刚度、承载力及抗液化能力, 相对化学注浆加固的砂土而言 [23], 同时又能维持

一定的渗透性。这就使 MICP 注浆技术相对于传统的水泥或化学注浆技术具有一定优势：①无需过大的注浆压力，即可到达较广的范围，减小了施工对周边环境的影响；②可以对已建成基础设施的地基劣化处进行直接处理；③施工时间短，而且作用周期长，无需进行养护 [24]。

（二）防水材料

1. 防水卷材

防水卷材主要包括改性沥青防水卷材和高分子防水卷材。其种类繁多，选择范围比较广。

改性沥青卷材主要包括苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物（SBS）改性沥青防水卷材、无规聚丙烯（APP）改性沥青卷材、丁苯橡胶改性沥青卷材等。高分子防水卷材主要有三元乙丙橡胶（EPDM）防水卷材、聚氯乙烯（PVC）防水卷材、氯化聚乙烯（CPE）防水卷材、CPE 与橡胶共混防水卷材、三元丁橡胶防水卷材、再生胶油毡，以及热塑性聚烯烃（TPO）防水卷材等。

与改性沥青材料相比，高分子卷材的耐腐蚀、老化性能更好，并且拉伸强度高，柔性好，延展率大。

2. 防水涂料

（1）丙烯酸盐喷膜

丙烯酸盐喷膜材料以不饱和羧酸盐水性单体为主液，加入水、填料、助剂，与引发剂通过喷射混合，引发聚合反应，瞬间在材料表面形成厚度为 2~3 mm 的具有防水和隔离功能的复合材料防水膜 [25]。

丙烯酸盐防水材料在 20 世纪 80 年代首先由日本提出。之后，美国、德国、加拿大等国相继开展研究，但均处于试验和研究阶段，并未进入实质性的工程应用。我国西南交通大学一直在进行相关的研究，并且从 2005 年开始，相继在一些工程中进行了应用 [26]。

丙烯酸盐喷膜材料克服了防水板防水系统的缺点，具有与围岩完全密贴、有效封闭围岩裂隙、防水效果好、施工快速方便、无裂缝等特点。但是在强碱环境下，其性能大幅度降低，因此仍需对其填料进行研究 [27]。

（2）喷涂聚脲防水材料

喷涂聚脲防水材料克服了许多传统防水材料的缺点，与传统的防水材料相比，喷涂聚脲防水材料

具有如下优点 [28]：①固化快，可在任意曲面喷涂成型，不产生流挂现象；②对湿度不敏感，可带湿施工；③耐老化性能好；④拉伸强度高、伸长率好；⑤涂层致密连续，无裂缝；⑥不含溶剂，环境友好。

结合以上特点，喷涂聚脲防水材料特别适合地下隧道的施工及维修 [29]。但其黏结力不够强，易出现针眼气泡的缺点亟待解决。

（3）水泥基渗透结晶防水材料

水泥基渗透结晶防水材料是一种刚性防水材料，以硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥、石英砂或硅砂为基材，添加带有活性功能基团的化学复合物、填料、外加剂等组成。与水作用后，材料中含有的活性化学物质通过载体向混凝土内部渗透，形成不溶于水的结晶体，填充裂缝，从而使内部变得致密 [30]。

水泥基渗透结晶防水材料的防水功能由两部分组成，一是在内部填充裂缝，二是在表面补偿收缩。除此之外，还具有耐水压、抗腐蚀、渗透深度大、防水时间长、无毒环保等优点 [31]。水泥基渗透结晶防水材料不仅可以单独作为防水层，还可以作为内防水，与其他材料形成高效的复合防水层。

水泥基渗透结晶防水材料在我国很多工程中都得到了应用，防水效果显著，但其机理研究以及产品研发工作还不够深入，主要仍依靠产品进口。

（三）降噪材料

城市地下空间大都属于半封闭空间，尤其是地铁隧道、公路隧道等，交通噪声、风机噪声经过壁面的多次反射叠加，形成混响声场，不仅影响空间内乘客的舒适度，且对周边范围造成噪声污染。降噪材料通常可分为隔声材料和吸声材料，然而对于地下空间这样的半封闭空间，隔声材料反而会恶化空间内噪声环境。因此在城市地下空间中，往往在道路、立壁以及顶板安装吸声材料，构成一个立体的吸声体系，从而有效降噪。根据吸声原理，可将吸声材料分为多孔吸声材料和共振吸声材料。

1. 多孔吸声材料

多孔吸声材料利用的原理是，当声波接触到材料时，引起材料空隙内空气振动，由于空气与材料间的黏滞力，动能不断转化为热能，致使噪声逐步衰减。近年来，多孔吸声材料的研制与应用不断增长，并且向“环保”型的新兴复合材料方向发展。

例如,朱万旭等 [32] 利用陶粒混凝土制成的新型吸声结构,铺设在轨道的钢轨之间建立降噪系统,实验证明降噪效果可达 4~5 dB 并且具有较宽的降噪频段。

魏定邦 [33] 将开级配抗滑磨耗层 (OGFC) 型混合料作为低噪音沥青路面,利用驻波管法和混响室法测得其降噪系数为 0.45,其降噪效果与普通混凝土路面相比噪声降低了 6.79 dB。

李鹏等 [34] 则以钢渣为主,掺以少量粉煤灰、微硅粉等,制备多孔吸声材料,获得了不错的吸声效果。同时提出了最佳的制备条件,制备出的材料在 630~1 600 Hz 之间都有较好的吸声系数。

郭凯 [35] 研究了不同粒径的淤污泥陶砂与膨胀珍珠岩对水泥基材料的吸声性能、强度以及耐久性的影响。研究表明,淤污泥陶砂材料降噪系数低于传统的膨胀珍珠岩材料,但在交通噪声较为集中的 800~1 200 Hz 间,吸声系数达到 0.85,并且以淤污泥陶砂制备的吸声材料具有更高的抗压强度以及耐久性。

2. 共振吸声材料

共振吸声材料利用的原理是,材料在声波的激发下产生振动,材料自身的内摩擦以及和空气间的摩擦将声能转化成热能,从而降低噪声。

常见的共振吸声材料包括波浪吸声板、铝合金穿孔吸声板、铝纤维吸声板、无纺布和铝合金吸声板的组合等。上述吸声板的吸声效果大多在 8~15 dB 之间 [36],并大规模应用于南京、北京等地的地铁工程中。共振吸声材料正向着结构优化、复合型的方向发展。

五、总结与展望

城市地下空间的开发不仅依赖于设计方法、施工手段,积极开发绿色、环保、高效、经济的新型材料同样会帮助推动城市地下空间更好更快地发展。但如前文所述,目前工程中所用的材料仍存在不少缺陷,主要问题总结如下:

(1) 开挖刀具的强度,耐久性仍然不足,刀具组合形式不够理想。焊材的耐磨性能、工作性能仍需提高。

(2) 传统混凝土管片抗裂性差、耐久性低、生产效率低下。新型材料例如自愈合混凝土材料的相

关机理研究不够完善,也缺乏相应的工程实际应用。

(3) 在支护结构中大量采用水泥混凝土材料,造成大量的资源浪费和环境污染。

(4) 在注浆材料中,水泥类注浆可灌性低;水玻璃类注浆固结强度差;化学类注浆有毒并且耐久性差等。总体而言,缺乏综合性能优异的注浆材料,同时新型生物注浆材料的潜力有待进一步挖掘。

(5) 防水材料、降噪材料的综合性能有待进一步提升,并且需要相对统一的选用原则。

针对以上问题,对城市地下空间开发新型材料提出如下建议:

(1) 开发强度更高、更耐磨的盾构刀具设备。改进其生产技术,制定更为完善的标准,推动刀具生产的国产化。

(2) 推动自愈合材料发展。自愈合材料有助于解决混凝土在服役状态下对裂缝的控制,减少后期维护成本。同时加强对其进一步研究,例如,愈合材料及壳体材料的选择、裂缝宽度的控制、配合比的计算、愈合效果的评估等。

(3) 进一步开发绿色可回收材料。减少水泥的使用,尽量使用可回收的钢材。坚持“四节一环保”的工作要求。

(4) 更加注重环境污染控制材料的使用。在城市地下空间开发过程中,噪声污染、地下水的渗透、地表沉降、施工对临近建筑物的影响等都是值得关注的问题。合理选用注浆材料、防水材料、降噪材料是建设的关键。

参考文献

- [1] 钱七虎. 现代城市地下空间开发利用技术及其发展趋势 [J]. 铁道建筑技术, 2000 (5): 1-6.
Qian Q H. Modern technology of underground space development and utilization in city and its developing trend [J]. Railway Construction Technology, 2000 (5): 1-6.
- [2] 张忠健, 张璐, 贺军, 等. 盾构刀具产业现状及发展 [J]. 硬质合金, 2015, 32(5): 340-346.
Zhang Z J, Zhang L, He J, et al. The status and prospect of shield cutters industry [J]. Cemented Carbide, 2015, 32(5): 340-346.
- [3] 陈馈. 盾构刀具关键技术及其最新发展 [J]. 隧道建设, 2015 35(3): 197-203.
Chen K. Key Technologies for cutting tools of shield and their latest development [J]. Tunnel Construction, 2015 35(3): 197-203.
- [4] 李勇, 谢淑华. WC 粗晶硬质合金的研究进展 [J]. 材料研究与应用, 2009, 3(2): 77-80.
Li Y, Xie S H. Progress in research on the coarse grain cemented carbides [J]. Materials Research and Application, 2009, 3(2):

- 77–80.
- [5] 刘学红, 邹爱忠. 盾构硬质合金分析与应用 [J]. 超硬材料工程, 2016, 28(2): 24–26.
Liu X H, Zou A Z. Analysis and application of shield cemented carbide [J]. Superhard Material Engineering, 2016, 28(2): 24–26.
- [6] 唐方. 铁基高温耐磨堆焊焊条及其堆焊合金的组织与性能(硕士学位论文) [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.
Tang F. High wear-resistant iron-based overlaying welding electrode and its organization and properties of the hardfacing layer (Master's thesis) [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2014.
- [7] 鞠丽艳, 王量, 张雄. 地铁隧道复合纤维混凝土管片新技术 [J]. 混凝土, 2004 (8): 69–71.
Ju L Y, Wang L, Zhang X. Composite fiber concrete in subway tunnel [J]. Concrete, 2004 (8): 69–71.
- [8] Rivaz B D. Steel fiber reinforced concrete (SFRC): The use of SFRC in precast segment for tunnel lining [J]. Water & Energy International, 2009, 65(3): 47–56.
- [9] Song F, Breitenbücher R. Load-bearing behavior of steel fiber-reinforced concrete for precast tunnel lining segments under partial-area loading [C]. Geo-Shanghai. Shanghai: Tunneling and Underground Construction, ASCE, 2014.
- [10] 宁博, 欧阳东, 易宁, 等. 混杂纤维混凝土在地铁管片中的应用 [J]. 混凝土与水泥制品, 2011 (1): 50–53.
Ning B, Ouyang D, Yi N, et al. Applications of hybrid fibers reinforced concrete for subway concrete segment [J]. China Concrete and Cement Products, 2011 (1): 50–53.
- [11] Hilar M, Vitek P. Experimental loading tests of steel fibre reinforced and traditionally reinforced precast concrete segments for tunnel linings [J]. Tunnel, 2012, 21(4): 54–65.
- [12] 吕忠, 陈惠苏. 水泥基材料裂缝自主愈合研究进展 [J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(2): 156–168.
Lv Z, Chen H S. Autonomous healing of cracks in cementitious materials—A short review [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, 42(2): 156–168.
- [13] White S R, Sottos N R, Geubelle P H, et al. Correction: Autonomic healing of polymer composites [J]. Nature, 2002, 409(415): 817.
- [14] Zhou S, Zhu H, Yan Z. Materials, theories and experiments of microcapsule self-healing method—A review [C]. Geo-Shanghai. Shanghai: Tunneling and Underground Construction, ASCE, 2014.
- [15] Sakai Y, Kitagawa Y, Fukuta T, et al. Experimental study on enhancement of self-restoration of concrete beams using SMA wire [C]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. Bellingham: SPIE Digital Library, 2003.
- [16] 崔迪, 李宏男, 宋钢兵. 形状记忆合金在土木工程中的研究与应用进展 [J]. 防灾减灾工程学报, 2005, 25(1): 86–94.
Cui D, Li H N, Song G B. Progress on study and application of shape memory alloy in civil engineering [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2005, 25(1): 86–94.
- [17] 张鸣. 水泥基材料用微胶囊自修复技术与原理的研究(博士学位论文) [D]. 长沙: 中南大学, 2013.
Zhang M. A study on microcapsule based self-healing method and mechanism for cementitious composites (Doctoral dissertation) [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [18] Pereira E N B. Steel fiber-reinforced self-compacting concrete: Experimental research and numerical simulation [J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(8): 1310–1321.
- [19] Dobashi H, Konishi Y, Nakayama M, et al. Development of steel fiber reinforced high fluidity concrete segment and application to construction [J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2006, 21(3): 422.
- [20] 管学茂. 超细高性能灌浆水泥研究(博士学位论文) [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2002.
Guan X M. Research on micro-fine high performance grouting cement (Doctoral dissertation) [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2002.
- [21] 米承勇, 王道平, 何智海. 超细水泥灌浆材料的研究与发展 [J]. 粉煤灰综合利用, 2008 (6): 51–53.
Mi C Y, Wang D P, He Z H. Study and development of ultra-fine cement grouting materials [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2008 (6): 51–53.
- [22] Chi M, Chang J, Huang R. Strength and drying shrinkage of alkali-activated slag paste and mortar [J]. Advances in Civil Engineering, 2012 (5): 1–7.
- [23] 张振远. 碳酸盐矿化菌的分离筛选及生物注浆实验研究(硕士学位论文) [D]. 衡阳: 南华大学, 2014.
Zhang Z Y. Isolation and screening of carbonate mineralization bacteria and biogrouting experiments in sand (Master's thesis) [D]. Hengyang: University of South China, 2014.
- [24] 麻强. 微生物注浆加固砂土地基的抗液化能力研究(硕士学位论文) [D]. 北京: 清华大学, 2013.
Ma Q. Anti-Liquefaction performance study of sand foundation improved by bio-grouting (Master's thesis) [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [25] 蒋雅君, 杨其新. 黏着型高分子防水层力学特征与防水效能探讨 [J]. 新型建筑材料, 2005, 32(9): 40–43.
Jiang Y J, Yang Q X. Probe into mechanical character of adhesive high polymer waterproof layer and waterproofing efficiency [J]. New Building Materials, 2005, 32(9): 40–43.
- [26] 杨娟. 隧道工程丙烯酸盐喷膜防水层效能体系及其评价方法研究(硕士学位论文) [D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
Yang J. Research on the effectiveness system and its evaluation method of spray-applied acrylate waterproof membrane layer used in tunnel engineering (Master's thesis) [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [27] 姜浩. 隧道及地下工程丙烯酸盐喷膜防水材料耐强碱腐蚀性性能研究(硕士学位论文) [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
Jiang H. Alkaline corrosion resistance and engineering application of spraying waterproof material on tunnel and underground engineering (Master's thesis) [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [28] 郁维铭. 聚氨酯及聚脲防水涂料技术综述 [J]. 新型建筑材料, 2009, 36(12): 64–67.
Yu W M. Introduction of polyurethane and polyurea waterproof coatings technology [J]. New Building Materials, 2009, 36(12): 64–67.
- [29] 朱祖熹. 喷涂聚脲防水涂料在地铁与隧道工程中的应用 [J]. 中国建筑防水, 2010 (21): 43–48.
Zhu Z X. Application of spray polyurea waterproofing coating in subways and tunnels [J]. China Building Waterproofing, 2010 (21): 43–48.
- [30] 鲍旺, 韩冬冬, 倪坤, 等. 水泥基渗透结晶型防水涂料作用机理研究进展和分析 [J]. 新型建筑材料, 2011, 38(9): 79–83.
Bao W, Han D D, Ni K, et al. The analysis and research status on mechanism of cementitious capillary crystalline waterproofing

- coating [J]. *New Building Materials*, 2011, 38(9): 79–83.
- [31] 李兴旺. 水泥基渗透结晶型防水涂料的研制及性能研究(硕士学位论文) [D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- Li X W. Research on the composition and properties of cementitious capillary crystalline waterproofing coating mixture (Master's thesis) [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [32] 朱万旭, 张庆, 李丽, 等. 轨道交通陶粒混凝土吸声板降噪效果的测试分析 [J]. *铁道标准设计*, 2016 (1): 48–51.
- Zhu W X, Zhang Q, Li L, et al. Test and analysis of noise reduction effect of ceramsite concrete sound-absorbing board [J]. *Railway Standard Design*, 2016 (1): 48–51.
- [33] 魏定邦. 隧道降噪材料体系的制备及性能研究(硕士学位论文) [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- Wei D B. Research on preparation and properties of the tunnel noise reduce materials (Master's thesis) [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [34] 李鹏, 郭占成, 孙朋, 等. 利用钢渣制备多孔吸声材料的研究 [J]. *环境工程学报*, 2014, 8(10): 4409–4414.
- Li P, Guo Z C, Sun P, et al. Study on preparation of porous sound absorbing material using steel slag [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(10): 4409–4414.
- [35] 郭凯. 利用淤污泥集料制备高速公路声屏障降噪材料的研究(硕士学位论文) [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- Guo K. Study on preparation of noise reduction material of highway noise barriers by sludge aggregate (Master's thesis) [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [36] 胡连军, 杨吉忠, 于翔麟, 等. 城市地铁吸声降噪分析及工程措施概述 [J]. *铁道工程学报*, 2015, 32(8): 111–115.
- Hu L J, Yang J Z, Yu X L, et al. Analysis of sound absorption and summary of engineering measures in urban metro [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2015, 32(8): 111–115.