

引用格式 韩宇栋, 谢月, 岳清瑞, 等. 水泥基灌浆材料应用研究评述[J]. 工业建筑, 2024, 54(1): 31-45. HAN Y D, XIE Y, YUE Q R, et al. Review on Application of Cementitious Grouting Materials[J]. Industrial Construction, 2024, 54(1): 31-45 (in Chinese). DOI: 10.3724/j.gyjz G23073008

水泥基灌浆材料应用研究评述

韩宇栋¹ 谢月^{1,2} 岳清瑞³ 李威¹ 彭博¹

(1. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088; 2. 北京纽维逊建筑工程技术有限公司, 北京 100088;
3. 北京科技大学城镇化与城市安全研究院, 北京 100083)

摘要 水泥基灌浆材料以其高流动性、微膨胀和高强度等重要特征, 在各类工程中得到广泛应用, 并呈现出性能不断分化的发展趋势。针对水泥基灌浆材料的发展和应用, 首先总结了其发展阶段及概况; 然后系统分析了水泥基灌浆材料按性能特征的分类和按应用领域的分类以及二者之间的相关性, 进一步结合应用领域分类介绍了不同用途的水泥基灌浆材料典型应用案例; 最后, 对水泥基灌浆材料国内标准化发展历程进行了重点梳理, 对水泥基灌浆材料的未来发展和应用前景进行了展望, 并提出了若干研究和工程应用建议。

关键词 水泥基灌浆材料; 特征性能; 应用; 分类; 标准

Review on Application of Cementitious Grouting Materials

Han Yudong¹ Xie Yue^{1,2} YUE Qingrui³ LI Wei¹ PENG Bo¹

(1. Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., MCC Group, Beijing 100088, China; 2. Beijing New Vision Building Construction Technology Co., Ltd., Beijing 100088, China; 3. Research Institute of Urbanization and City Safety, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Because of the significant characteristics of cementitious grouting materials ('CGM') include high fluidity, micro expansion, and high strength, it has been widely used in various engineering projects and showing a trend of continuous differentiation in properties. For the development and application of CGM, the development history has been summarized in stages firstly. For the second, the classification of CGM based on its characteristics of properties, application field, and the correlation between each other has been analyzed and summarized systematically. Typical application cases of CGM with different uses were introduced according to its classification by application field. Finally, by combing through the development situation of CGM standardization in China, the future of development and application of CGM is prospected, and several suggestions of research and engineering application were proposed.

Key words: cementitious grouting material; characteristic properties; application; classification; standardization

*国家自然科学基金资助项目(52178263); 北京市科技新星计划(Z201100006820024); 中冶集团“181计划”重大研发项目(CBN2022Kt01)。

第一作者: 韩宇栋, 博士, 正高级工程师, 硕士生导师, 主要从事水泥基材料研究。

电子信箱: hanyudong@cribc.com

收稿日期: 2023-07-30

0 引言

水泥基灌浆料 (Cementitious Grouting Materials, 简称“灌浆材料”) 主要原材料包括水泥、矿物掺和料、骨料、高效减水剂、膨胀剂、消泡剂、调凝剂、纤维材料、纳米功能材料、拌和水等。原材料的配合比和种类发生变化, 会使灌浆材料表现出不同的性能特征, 这进一步决定了灌浆材料的主要用途及其基本分类。基于此, 根据不同环境所需的不同性能灌浆材料, 可通过对原材料进行组合调整, 制备出相应性能的灌浆材料。如: 通过掺入早强剂制备早强型灌浆材料应用于早强抢修工程, 通过掺入水下抗分散剂制备水下施工型灌浆材料应用于海洋工程或海上风电工程等。

灌浆材料从 20 世纪 80 年代引入我国应用至今, 其相关的材料、试验方法、施工应用技术方面的标准化工作取得了不断的发展进步。为系统梳理灌浆材料应用研究进展, 本文从灌浆材料的发展概况、基本用途分类、重大工程典型应用情况以及标准化历程等 5 个方面进行分析评述, 并结合实际工作中面临的问题、挑战和机遇, 提出未来灌浆材料应用和发展的相关重要建议。

1 灌浆材料发展概况

1.1 技术萌芽期

灌浆技术最初起源于欧洲, 并经历了较为漫长的萌芽和缓慢发展时期。根据当时所使用原材料的不同, 可大致分为 19 世纪上半叶的黏土注浆时期、19 世纪中下半叶的水泥注浆时期、19 世纪末至 20 世纪 70 年代的化学注浆时期^[1]等几个发展阶段。在各时期, 通过原材料和灌浆技术的不断革新, 为现代灌浆材料的出现、技术快速发展成熟、工业化规模化生产应用奠定了基础。

1.2 技术成熟期

1982 年至 21 世纪初, 灌浆材料经历了飞速发展并趋于技术成熟的阶段。Shimoda 和 Clarke 分别在 1982 年和 1984 年使用超细水泥浆体加固具有微细裂隙的岩土体。1985 年第 15 届国际大坝会议后, 日、美、法等国开发了超细水泥、湿磨水泥灌浆技术, 灌浆材料进入加速发展时期。在这一时期, 随着国内工业化发展, 为安装大型工业机器设备, 国内也逐渐开始研究灌浆材料并高速发展。1987 年中国建材研究院成功研制出无收缩超早强二次灌浆系列产品, 并先后成功应用于多项大型机器设备安装工程^[2]。1991 年宝钢五冶和冶金工业部建筑研究总院共同研制成功一种新型灌浆料, 是国内首次选用普通硅酸盐水泥、砂石和复合外加剂配制而成, 可满足高精度、大吨位等设备的安装要求^[3]。1993 年冶金工业部建筑研究总院材料所研制出了新型设备灌浆材料 type-C Grout Material 称 CGM, 该新型设备灌浆材料的物理力学和施工性能在当时已完全满足设备安装要求^[4];

1996 年在研制出常温型灌浆料 (CGM-2) 的基础上, 冶金工业部建筑研究总院又研究开发出了适用于低温条件下的 (CGM-1) 和适用于夏季施工 (CGM-3) 两种产品。该系列产品于 1997 年 2 月通过了冶金部和建设部的技术鉴定, 同年获国家重点新产品称号^[5]。随着灌浆材料的应用范围越来越广, 该行业在国内迅速发展壮大。2008 年正式发布国内第一本灌浆材料国家标准 GB/T 50448—2008《水泥基灌浆材料应用技术规程》^[6], 标志着国内灌浆材料的发展已逐渐进入成熟期。

1.3 性能分化期

2010 年前后, 灌浆材料的发展进一步进入超高性能和性能分化期。国内外研究者们尝试了包括提高原材料的品质、基于最紧密堆积理论调整各原材料的掺量配比、掺加纤维^[7]和纳米功能材料等各种手段, 以期提高灌浆材料的各项性能。Khayat 等^[8]研究表明在水泥基材料中加入水溶性聚合物增稠材料能改善水泥基材料的粘聚力和保水性, 抗离析并防止集料下沉, 改善其抗冻耐久性和力学性能, Sahmaran 等^[9]发现在灌浆材料中加入天然浮石粉和超塑化剂能明显改善灌浆材料的流变性能。德国 BASF 公司研制的 MASTERFLOW® 系列灌浆材料 28 d 抗压强度可以达到 140 MPa 以上^[10], 并于 2009 年开始投入工程。瑞士 Sika 公司与丹麦 Densit 公司也先后研制了 SikaGrout® 系列、DUCORIT® 系列灌浆材料, 28 d 抗压强度分别可以达到 125 MPa、140 MPa 以上。而这一时期, 国内的高性能灌浆材料主要依靠国外进口, 迫切需要生产出高性能灌浆材料, 以打破国外对高端灌浆材料市场的垄断。在此背景下, 国内灌浆材料研发生产的高性能化和细分化快速发展。截至 2015 年, 国内从事水泥基灌浆料生产的企业就已经达到五百余家, 年产量达 300~500 万 t^[11]。北京纽维逊建筑工程技术有限公司、中交港湾 (上海) 科技有限公司、江苏苏博特新材料股份有限公司等研制出的 WP、优固特® 和 JGM-SP 系列灌浆材料, 28 d 抗压强度均可以达到 120 MPa 以上, 性能优异。此外, 随着灌浆材料的深入发展, 其性能越来越高并可针对性调控特定性能, 使得灌浆材料由最先广泛应用于设备基础安装与地脚螺栓锚固、混凝土结构改造与加固、工程修补和抢修领域, 先拓展应用于铁路桥梁支座灌浆、预应力工程孔道灌浆、装配式建筑套筒灌浆等领域, 再拓展应用于陆上风电工程塔筒基础法兰锚栓连接、海上风电工程塔筒单桩或导管架基础连接、核电工程耐热灌浆、极地工程负温灌浆、冲击打击防护工程等领域。

纵观 40 余年来灌浆材料的发展历程, 该材料在诸多领域中都发挥了举足轻重的作用。但国内发展研究水平与国外依然有一定的差距, 存在不适应国内能源、建材、交通运输等行业经济发展, 以及与社会产业升级不匹配

的问题。在此背景下,需要进一步对灌浆材料的国内外研究进展进行客观的评述分析。

2 水泥基灌浆材料的分类

目前灌浆材料通常有两种分类方式,按用途分类和按性能特征分类。以下详述其按材料性能特征分类的基本情况,并厘清灌浆材料基本组成、性能分类和工程应用分类三者之间的关系。

2.1 普通型及经济型

普通型灌浆材料通常用于地脚螺栓锚固、植筋、设备基础二次灌浆,以及建筑物的梁、板、柱、基础和地坪的补强加固等场景,具有较高强度、较大流动度以及一定程度的微膨胀,应用最为广泛。经济型灌浆材料,通常是为了降低原材料成本、节约资金,缓解工业固体废物、城市建筑垃圾的环境问题以及天然河沙、水泥等传统原料紧缺的问题^[12],本着节材、就地取材、废弃物资源化利用的原则,用部分固体废物作为其原材料。如:陈嘉康^[13]利用未经处理的磷石膏和原状粉煤灰作为主要胶结材,添加10%以内的硅酸盐水泥作为胶凝材料,制备出一种具有自流平特性、性能稳定的填充灌浆料;赵

佟庆^[14]使用废弃黏土砖粉、矿渣粉为主要原材料,制备出一种满足绿色化要求的新型高性能灌浆料。

2.2 早强抢修型

在工业与民用及市政混凝土工程中,经常发生混凝土道路、基础、结构的破损,须要进行紧急抢修和加固,以保证正常生产和运输。在工程抢修及加固施工中,要求混凝土在数小时甚至1 h内达到相当高的强度及其他物理力学性能,以满足恢复交通、快速安装设备、恢复正常生产的需要,因此早强型灌浆料应运而生,一般可以通过表1所示的技术路线进行制备。

2.3 高强和超高强型

当前国内灌浆材料(不掺加任何增强纤维)的抗压强度多数难以突破130 MPa,这使得国内高强度灌浆材料市场绝大部分被进口品牌垄断,因此国内亟需自主研发、生产高强水泥基灌浆料。基于材料学基本原理,表2所示技术路线可为实现灌浆材料高强化提供参考。

2.4 超流态型

在预应力箱梁等工程构件中,预应力筋后张法施工通常须要使用超流态的灌浆材料,一般可以通过表3中的方法来提高灌浆材料的流动度。

表1 早强抢修型灌浆材料制备技术路线与研究结果

Table 1 The preparation technology and research results of early strength and rush repair type CGM

技术路线	具体方法	研究结果
使用早强型水泥	硫铝酸盐水泥 ^[15] 、高铝水泥、硫铝酸盐水泥与硅酸盐水泥复配 ^[16] 、磷酸镁水泥等	李峤玲 ^[17] 通过研究普通硅酸盐水泥与硫铝酸盐水泥按不同比例复配对早强灌浆料性能的影响发现,普通硅酸盐水泥掺量越多则胶凝体系的力学性能越差,对灌浆料的收缩影响也很明显,大大的增加了收缩率。当普通硅酸盐水泥掺量从0%增加到60%,硬化浆体2 h抗压强度从30 MPa降低到12 MPa,28 d干缩值从 271.87×10^{-6} 增加到 432×10^{-6}
使用磨细矿物掺和料 ^[18] 或超细水泥	优质粉煤灰、磨细大理石粉、硅灰、超细偏高岭土、超细硅酸盐水泥等	张岩等 ^[19] 以优质粉煤灰与磨细大理石粉调配不同细度的复合掺和料(730,760,790,820 m ² /kg),研究其对灌浆材料强度和收缩的影响发现,复合掺和料比表面积为790 m ² /kg时综合效果最好,相比于比表面积为730 m ² /kg的试件,其1 d、28 d抗折强度提升11.5%、32.0%,7 d、28 d抗压强度均提升2.9%,72 d自收缩和干燥收缩分别降低16.6%、44.4%
使用早强型外加剂	氯化钙、氯化钠、石膏、硫酸钠、硫酸铝、氟化钠、三乙醇胺、复配化学添加剂 ^[20] 等	庞超明等 ^[21] 认为早强剂的选用须基于胶凝材料特性进行匹配。基于胶材的组成、水化历程和原理,选用合适的早强剂,大幅加快水泥水化速度或较快激发掺和料活性,从而实现材料的早强。如对于Al相含量高的胶凝材料体系,选用含Ca的早强剂可加快AFt的生成,促进早期强度的发展
提升施工工艺和养护制度	喷洒养护剂、覆盖塑料薄膜、加盖湿草袋、蓄热法养护、电加热法养护、蒸汽养护、暖棚施工 ^[22] 等	李晓明等 ^[23] 通过研究养护温度对灌浆材料强度发展的影响发现,相比于-15℃环境下的试件,标准养护试件的2 h抗压强度提升了6.6%,1 d抗压强度提升了22.2%。可见对试件的养护条件进行干预可实现材料的早强

表2 高强和超高强型灌浆材料制备技术路线与研究结果

Table 2 The preparation technology and research results of high and ultra-high strength type CGM

技术路线	具体方法	研究结果
降低水胶比	在保证一定水化程度条件下,合理降低水胶比	在一定范围内降低水胶比可以提高灌浆材料的抗压强度;罗晓峰等 ^[24] 研究表明,当水胶比从0.25降至0.10时,材料1,3,7,28 d抗压强度分别提升31.3%、25.9%、10.6%、11.5%,继续降低水胶比至0.07,各龄期抗压强度呈现不同程度降低,因为不足的水分限制了反应体系中大量水泥颗粒的水化反应,从而导致灌浆料后期强度无法进一步提高
提高胶凝材料和骨料等原材料强度	采用高标号水泥、强度更高的骨料等	对于高强灌浆材料,基材的强度可能小于骨料的强度,故提高基材强度则可提高材料整体强度;此外,还可以采用强度更高的金刚砂或者刚玉等作为骨料

续表 2

技术路线	具体方法	研究结果
提高材料堆积密度	对各种原材料按照粒径分布曲线进行紧密堆积设计, 提高整体堆积密度	胡星等 ^[25] 基于 Dinger-Funk 方程的最紧密堆积理论对灌浆材料进行配合设计, 通过调整不同细度原材料的掺量, 使体系处于最紧密堆积状态。此时, 材料 1, 3, 28 d 抗压强度均最高, 较最低堆积密度时提高 106.7%、26.0%、20.0%
纤维材料增强	掺入钢纤维、聚丙烯纤维、玄武岩纤维等对灌浆材料增强、增韧 ^[7]	丁成 ^[27] 通过对水胶比、胶砂比、各原材料的掺量进行筛选研究, 得到 28 d 抗压强度最高为 120.8 MPa 的灌浆材料, 后通过掺入体积掺量为 0.5%、1.0% 的 12 mm 短切钢纤维实现材料 28 d 抗压强度分别提升到 145.2 MPa, 158.2 MPa, 抗折强度也均明显提升
纳米材料改性	掺入纳米 SiO ₂ 、碳纳米管、纳米 TiO ₂ 、纳米 Al ₂ O ₃ 、氧化石墨烯等, 提高材料密度 ^[27]	罗晓峰 ^[23] 等通过调整水胶比、胶砂比、矿物掺和料得到灌浆材料 28 d 抗压强度最高为 101.89 MPa, 而后分别单掺占胶凝材料 0.9% 的纳米 SiO ₂ 、0.6% 的碳纳米管、0.3% 的氧化石墨烯后, 其 28 d 抗压强度依次对应达到 132.89, 125.16, 135.87 MPa

表 3 超流态型灌浆材料制备技术路线与研究结果
Table 3 The preparation technology and research results of ultra-high fluidity type CGM

技术路线	具体方法	机理或相关研究结果
通过水的作用	增大水胶比	提高灌浆材料流动性传统的方法就是增加用水量, 即提高水胶比, 但这将明显降低材料的强度
	增大高效减水剂掺量	高效减水剂能有效改变颗粒的表面性质, 打破颗粒间的团聚, 释放被包裹的游离水, 从而显著提高水泥基材料浆料的流动性
考虑固体原料颗粒几何因素的影响	骨料级配参数	冷达 ^[28] 等的研究表明, 一定范围内, 灌浆材料的流动性与砂的细度模数呈正相关关系, 此外, 形状圆润的河沙以及球形人工砂对灌浆材料流动性有较明显的正作用
	合理提高粉煤灰、微珠的掺量	黄维蓉等 ^[29] 研究发现, 粉煤灰可以提高灌浆材料流动性的主要原因是, 其微观形态是一个表面光滑的球形玻璃体, 可以减少细骨料与浆体之间的摩擦, 也被称为滚珠效应。但过多掺量的粉煤灰也会导致吸附大量水分而降低流动度 ^[30]
	减少或不用骨料	公路铁路箱梁压浆料、地下工程注浆加固灌浆材料等一般在配制过程中不使用细骨料, 而使用纯胶凝材料粉料并辅以外加剂, 从而可实现超流态, 适宜灌注较小的孔道或裂隙孔隙

2.5 低、负温施工型

我国幅员辽阔, 工程建设环境条件复杂。华北、东北和西北地区受地理位置和气候的影响, 冬季持续时间比较长, 长期的低温会严重影响施工效率和工程质量。对于一些极地工程, 其环境温度则非常低, 普通灌浆料根本无法自发硬化。因此研究者们不断探索研制低、负

温环境可以使用的低、负温施工型灌浆材料, 其制备可通过表 4 所示的技术路线进行。

2.6 耐热、耐高温型

冶金、核电、建材行业的设备设施基础、工业建筑、管道塔壁内衬等常会遇到高温服役的工况, 这些环境的温度范围可从 200℃ 直至 1 000℃ 以上, 同时还要求结构

表 4 低、负温施工型灌浆材料制备途径与研究结果
Table 4 The preparation technology and research results of negative temperature construction type CGM

技术路线	具体方法	研究结果
快硬水泥等	采用快硬早强硫铝酸盐水泥、磷酸镁水泥 ^[31] 、高标号硅酸盐水泥、高铝水泥中的一种或几种互掺 ^[32]	马正先等 ^[33] 通过研究负温条件下以普通硅酸盐水泥为基本胶材, 掺加高铝水泥和硫铝酸盐水泥发现, 单掺高铝水泥时, 当其掺量从 0% 增加到 50% 时, 其 1 d 抗压强度从无强度提升到 40 MPa 以上, 3 d 抗压强度从 10 MPa 左右提升到接近 60 MPa; 复掺高铝水泥和硫铝酸盐水泥时, 当其掺量从 5%+5% 增加到 15%+20% 时, 其 1 d、3 d 抗压强度分别提升 1 983.9%、365.9%
早强型掺和料	硅灰、石膏、纳米早强剂等	硅灰、石膏等对灌浆材料有早强作用、早期水化成核作用。李本友等 ^[34] 研究表明在 -5℃ 条件下, 当石膏的掺量从 5% 增加到 15% 时, 硬化浆体的 1 d 抗压强度提升 17.3%; 当硅灰的掺量从 0% 增加到 4% 时, 硬化浆体的 1 d 抗压强度提升约 13.9% ^[33]

续表 4

技术路线	具体方法	研究结果
防冻剂、早强剂、激发剂等外加剂	常用包括碳酸锂、甲酸钙、硝酸钠、碳酸钠、硫酸钠等；激发剂常用七铝酸十二钙 ^[35]	马正先 ^[36] 等研究表明，碳酸锂作为促凝剂对负温灌浆材料有明显的促凝和提升抗压强度的作用，当碳酸锂掺量由 0%增加到 0.25%时，其 1, 3, 28 d 抗压强度分别提升约 23.5%、17.6%、3.1%，初凝、终凝时间分别降低 70.4%、67.0%；硝酸钠、甲酸钙、硫酸钠作为防冻剂均对负温灌浆材料抗压强度有一定程度的促进作用，研究表明当硝酸钠、甲酸钙、硫酸钠掺量分别为 0.6%、0.2%、1.6%时，其对 1 d 抗压强度提升分别约为 8.4%、1.4%、9.9%
热养护	蓄热法养护、电加热法养护、蒸汽养护等	孙小巍等 ^[37] 发现，升高拌和水温度和预热养护有助于提高负温环境灌浆料的早期强度，当环境温度分别为 5℃、0℃时，拌和水温从 0.5℃提高到 30℃，1 d 抗压强度分别提高 105.1%、278.9%；当环境温度分别为-5℃时，在 (20±3)℃温度条件下预养 10 h，灌浆材料 1, 3, 28 d 抗压强度分别提升 512.5%、23.1%、13.0%

材料常温下即具有较高的早期强度和最终强度，由此推动了耐热和耐高温灌浆料的研发和应用。叶显等^[38]研究了不同掺量粉煤灰、S95 矿粉、超细矿粉、硅灰对灌浆料的耐高温性能的影响，发现粉煤灰掺量为 10%时，灌浆料在 300℃和 400℃时的残余强度比分别高达 141.01%和 119.74%；掺入 S95 矿粉、硅灰、超细矿粉后灌浆料在 300℃时均可提高材料的残余强度比，此外均可一定程度降低材料体积损失率，但掺入超细粉体不利于灌浆料热震性能的提高。叶显等^[39]研究发现玄武岩纤维可明显提高灌浆材料的耐热性能，通过对试件分别进行 110℃烘干处理、300℃、400℃、500℃热处理后，发现外掺不同质量分数的玄武岩纤维可提高试件抗压强度比，最高分别为 6.9%、8.2%、18.0%、8.3%，此外掺入玄武岩纤维可有效降低高温后至冷却期间产生的体积收缩，并且抑制高温条件下的体积膨胀，以及一定程度提高其抗热震性能。

2.7 水下施工型

对于需要水下注浆的工程，如海上风电灌浆尤其是导管架灌浆、水下结构修复加固等，要求材料在泵送流态阶段具有较高流动黏稠性和高度稳定性。一般通过添加不同功能的外加剂来实现材料的水下可施工。赖洋羿等^[40]通过在水泥基灌浆料中掺入 UWB-III型抗分散剂，实现了良好的水下工作性能和强度性能，当其掺量为胶材的 1.0%时，水下浇筑成型试块 28 d 抗压强度比水上浇筑成型试块提高 1.5%。UWB-III型抗分散剂的有效成分为聚糖类高分子化合物，其较长分子链的活性官能团可吸附细小颗粒，将颗粒链接成稳定的网状结构，从而具有优良的絮凝效果，但会一定程度降低浆体流动度。高鑫等^[41]掺入纤维素醚可使水下修补灌浆料具有良好的保水效果，同时水化体系稳定且具有增稠效果；而掺入胶粉后，胶粉分散水化并与水泥硬化浆体形成理想的黏结体系，且二者复掺有利于提高灌浆料的拉伸黏结强度。

2.8 含豆石粗骨料型

灌浆料相比传统混凝土价格高。对于灌浆料体量较

大的工程，为了降低成本，通常采用在普通灌浆料中加入一定量豆石的方法，以期达到降低成本、提升力学性能、减缩抗裂的综合目的。吕阔等^[42]通过加固工程实例说明加入适量的豆石的灌浆料能满足工程应用的要求。研究发现，在用水量 13%的条件下，灌浆料硬化后的抗压强度随着豆石含量的增加呈下降趋势，当掺量从 0%增加到 40%时，3 d、28 d 抗压强度分别降低 13.8%、12.5%。但豆石含量不超过 30%时，灌浆材料流动度较好，强度下降不明显。吴元等^[43]通过研究用水量和豆石掺量对豆石型灌浆料的影响发现，豆石型灌浆料的力学强度随加水量的增大而降低。当豆石掺量为 25%时，用水量从 12%增加到 14%，材料 28 d 轴心抗压强度下降约 32.4%。当用水量小于 14%时，其力学强度随豆石掺量的增大而提高，当豆石掺量从 0%增加到 35%时，材料 28 d 轴心抗压强度提高约 8.5%。此外，研究还发现，豆石型灌浆料的抗拉强度比同等级的普通混凝土高 40%左右。汪秀石等^[44]研究发现，豆石型灌浆料具有早强特性，3 d 抗压、抗拉强度可达到 28 d 值的 80%左右；且豆石型灌浆料标准立方体抗压强度与标准棱柱体轴心抗压强度的转化系数明显大于普通混凝土，为 0.91，说明豆石型灌浆料的轴心抗压强度高于同等级的混凝土。

3 水泥基灌浆材料组成与分类相关关系分析

由文献[25-27, 29]分析可见，灌浆材料的组成不同会直接影响其性能，因此可通过调控原材料组分实现对灌浆材料性能的针对性调节，并可根据表现出来的主要性能进行分类。不同性能分类的灌浆材料可应用于不同的工程领域，满足不同的用途。以下将详细说明不同用途灌浆材料的工程应用情况。经梳理，灌浆材料的基本组成、性能分类、工程应用分类三者关系见图 1。由此可见灌浆材料应用领域非常广阔，涵盖大部分工业与民用建筑和基础设施。

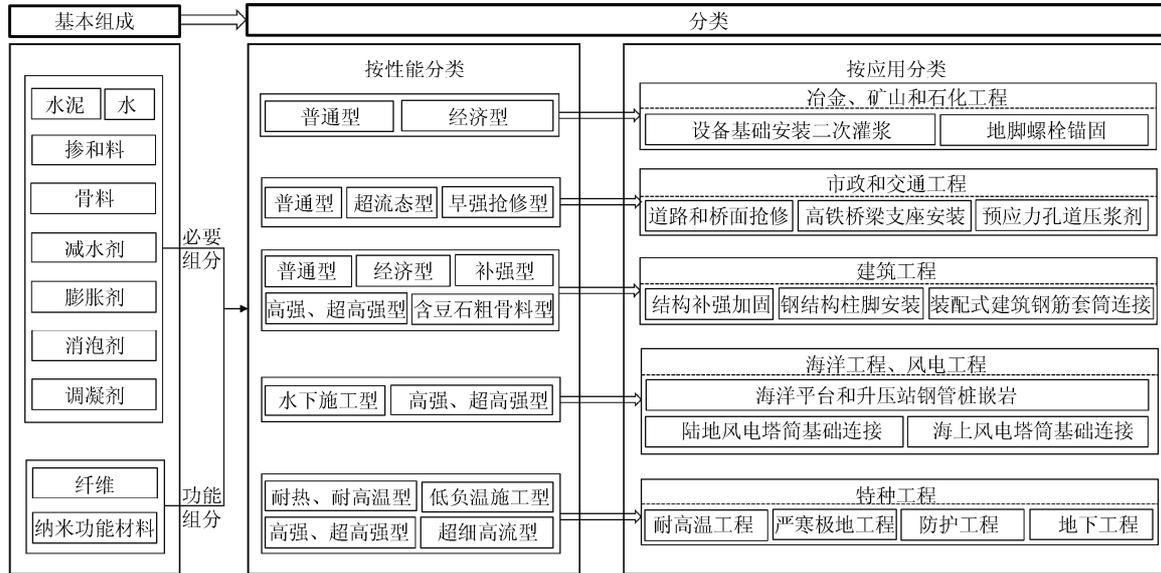


图1 水泥基灌浆材料基本组成、按性能分类、按应用分类三者关系
Fig.1 The correlation among the basic composition, classification by properties and application of CGM

4 水泥基灌浆材料工程应用典型案例

4.1 冶金、矿山和石化工程

由于灌浆材料具有高强度、微膨胀、较高的流动性、抗油渗性和较强的钢筋握裹力, 施工方便, 不受现场条件限制^[45]等特性, 刚好可满足 90 年代冶金工业、钢铁工业、机械工业中大型设备安装、地脚螺栓锚固等的重要需求, 因此灌浆材料也从这时候开始正式发展起来。中国建筑材料研究院于 1987 年成功研制出无收缩超早强二次灌浆系列产品, 并先后应用于大连重型机器厂 12 m 长高精度大型数控键铣床的安装、哈尔滨飞机制造公司 1300 t 大型锻压机床底座注浆、北京第一机床厂 23.8 m 长的导轨磨床和 5 m 长桥式铣床安装, 以及天津大港发电厂两台意大利汽轮发电机组安装等工程^[46]。设备基础安装二次灌浆典型示意图如图 2 所示。

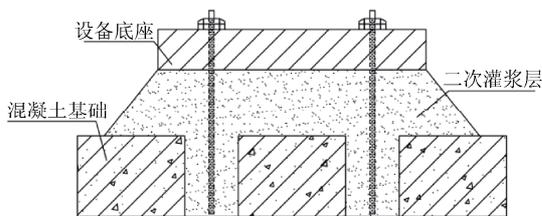


图2 设备基础安装二次灌浆
Fig.2 Secondary grouting for installation of equipment foundation

4.2 市政和交通工程

4.2.1 道路和桥面抢修灌浆材料

对于铁路、公路、机场、桥梁等工程的抢修, 通常

要求在很短的时间内即可恢复交通和正常使用, 因此对于此类工程, 通常采用具有超早强、早高强特性的灌浆材料。中冶集团建筑研究总院新型建材研究所 2004 年成功开发出一种水泥基抢修料, 流动度大于 270 mm, 1 h 抗压强度大于 30 MPa, 并应用于北京某地铁工程中, 晚间进行施工, 次日便顺利通车, 取得良好效果; 应用于秦皇岛码头沉箱修复工程中, 施工后 1 h 便可承载, 2 h 后可正常浸泡在海水中, 性能不受影响^[47]。

4.2.2 高铁桥梁盆式橡胶支座安装用灌浆材料

在高速铁路或客运专线工程中, 梁体支座与墩台之间空间小, 存在支座固定以及支座墩台有机结合比较困难、混凝土浇筑振捣不便、强度增大慢、不利于工程进度等缺点, 引入具有高流态、高强度性能的灌浆材料可以有效解决该问题。我国京沪高铁、武广客专、郑西客专、成昆线、京广线、京九线等都应用了初始流动度 320 mm、30 min 流动度 300 mm、2 h 抗压强度大于 30 MPa, 28 d 抗压强度达 50~70 MPa 的支座灌浆材料。薄祥照使用 HGM 高强无收缩灌浆材料对杭州湾跨海大桥箱梁支座进行灌浆, 发现采用该种材料具有提高工程质量、加快工程进度、提高安全度、改善环保条件、节约成本等优点^[48]。

4.2.3 预应力孔道压浆剂

预应力孔道压浆剂在预应力混凝土结构(一般是预应力箱梁、节段拼装式桥梁)中广泛应用。对于后张梁预应力管道, 需要充填压浆剂使孔道内浆体饱满密实, 以有效防止预应力钢材锈蚀、保证预应力束与混凝土结构之间的有效应力传递, 因此预应力孔道压浆剂的显著特征就是超高流态, 其流动性通过专门的流锥试验进行

测试评价。此外,硬化浆体还需要具有较高的强度、无收缩微膨胀性、较高的弹性模量以及黏接力,从而消除预应力混凝土结构或构件中应力变化对锚具的影响,延长锚具的使用寿命。2018年在佛开高速桥梁修补工程中,工程人员采用压浆剂对九江大桥段破损孔洞管道不密实处进行补充压浆,通过内窥和开槽检测,均未发现不良情况,且对现场留样试块进行力学性能测试,7 d、28 d抗压/抗折强度分别达到60.2 MPa/12.7 MPa、74.1 MPa/14.6 MPa^[49]。

4.3 建筑工程

4.3.1 结构加固修复、性能提升用灌浆材料

对于出现破坏、承载力不足的混凝土结构,为提升性能、延长使用寿命,可使用灌浆材料进行改造加固。加固方法通常分为三类,即混凝土柱加大截面法灌浆加固、混凝土柱外粘型钢法灌浆加固和混凝土柱外包钢法灌浆加固,示意图见图3。李祖辉等^[50]利用灌浆材料采用扩大截面法对钢筋混凝土梁进行加固,并测试加固后力

学性能,得出加固后的钢筋混凝土梁的开裂承载能力较加固前可提高5~7倍的结论。

4.3.2 装配式建筑钢筋套筒连接用灌浆材料

装配式建筑是通过节点将整个建筑的承重及维护辅助构件连接起来的,因此构件节点连接的可靠性是衡量建筑物是否安全、可靠的关键。大量研究已经表明采用钢筋套筒连接件作为节点连接方式是安全可靠的^[51]。套筒灌浆连接分为半套筒灌浆连接和全套筒灌浆连接两种,如图4^[52]所示,可以看出连接套筒与钢筋的灌浆材料的性能将决定整个建筑结构的可靠性和安全性,因此通常采用高强并具有一定膨胀性的灌浆材料。灌浆完成后,通常还需要对套筒灌浆饱满度、施工缺陷、黏结滑移等因素进行研究。杜永潇等^[53]采用压电法进行灌浆饱满度测试,并发现灌浆后与灌浆前的电压比小于0.40时可认为套筒灌浆饱满。北京中建建筑科学研究院^[54]推荐采用气测容积法进行钢筋套筒灌浆密实度的检测,并开发出专门的检测仪器,至今已有一定的工程应用。

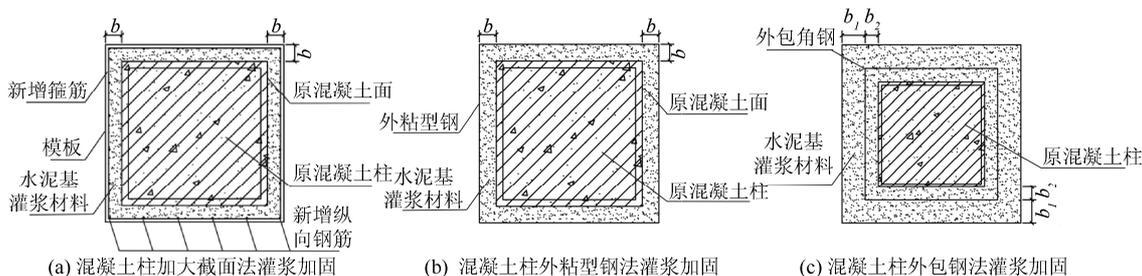


图3 混凝土柱结构改造加固方法

Fig.3 Renovation and reinforcement of concrete structures

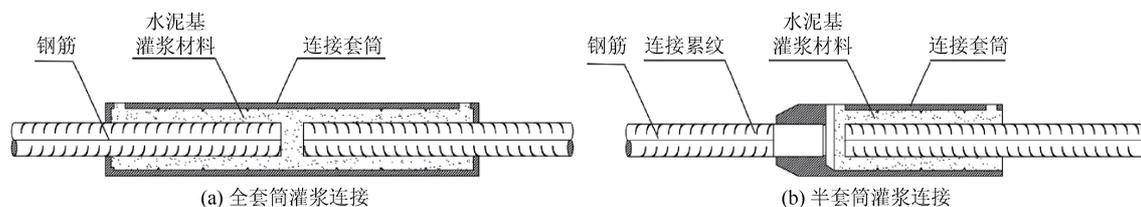


图4 套筒灌浆连接方式

Fig.4 Connection method of sleeve grouting

4.3.3 钢结构柱脚安装用灌浆材料

随着我国高层建筑不断发展,为优化和改善结构抗震性能,型钢混凝土结构在设计中的应用更为普遍。通常采用灌浆材料进行柱脚安装,施工质量的好坏以及灌浆材料的性能直接关系到型钢柱的安装质量以及结构的整体稳定性,柱脚安装示意图见图5。除灌浆材料本身特性外,柱脚注浆施工工艺也是一大关注热点。李建普等^[55]以保证浆体浇筑密实,以及保确钢柱基础牢固可靠为出发点,对柱脚注浆施工工艺进行了优化,包括基层凿毛清理→型钢柱安装→基层清理湿润→模板支设→注浆、

振捣→养护→拆模整个过程,经验证,该施工工艺在保证施工质量的同时还提高了经济效益。

4.4 海洋工程

海洋工程用灌浆材料主要用于海洋平台和升压站钢管桩嵌岩。由于国内外很多海域存在土壤覆盖层薄、基岩埋藏浅的地质特点,为满足单桩基础稳定性要求,需要进行嵌岩桩的设计^[56]。根据基岩的单轴抗压强度不同,嵌岩桩大致可分为如图6所示的3类^[57]。对于II、III型嵌岩桩,通常使用高强灌浆料将桩与岩体连接起来,灌浆材料的性能则会直接影响桩的安装效果。通常要求应

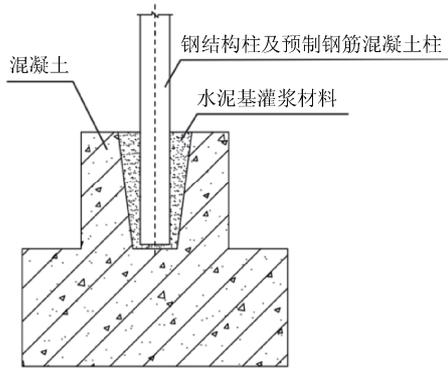


图5 预制钢筋混凝土柱或插入式钢结构柱柱脚灌浆
Fig.5 Grouting the foot of Precast reinforced concrete column or plug-in steel structure column

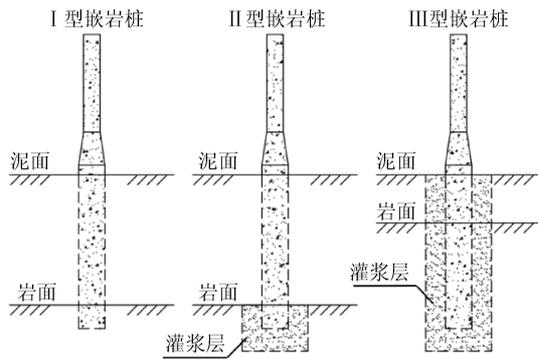


图6 海洋工程嵌岩桩分类
Fig.6 Classification of rock-socketed piles in marine engineering

用于该类工程的灌浆材料具有很好的水下抗分散性能。中国石油集团工程技术研究院早在 20 世纪 90 年代开始研发海洋工程水下不散混凝土用絮凝剂/抗分散剂, 并不断精进。其研发的 UWB-II 型絮凝剂, 掺量为水泥质量的 2.0%~3.0%, 同掺法掺入, 能够赋予普通混凝土超强的抗分散性、适宜的流动性和满意的施工性能, 从根

本上平衡好水下混凝土的抗分散性能、施工性能和力学性能三者之间的矛盾, 成功实现了水下混凝土的自灰平和自密实^[58], 在国内有较高的行业影响力。为适应国内海洋工程市场, 北京纽维逊建筑工程技术有限公司于 2018 年研制出一种具有强度高、耐久性好、微膨胀、可自密实等优点的应用于海洋工程的灌浆材料^[59]。中交港湾(上海)科技有限公司于 2019 年进一步研制一种用于植入型嵌岩单桩的缓凝型抗水分散灌浆材料, 具有抗水分散性好、抗离析性强、流动性大、流动度经时损失小、可施工时间长、后期强度高优点^[60], 并已应用于多项海上风电工程。

4.5 风电工程

4.5.1 陆地风电塔筒基础连接用灌浆材料

在全球气候变暖、我国提出碳达峰、碳中和“3060”目标的大背景下, 清洁环保的风力发电成为能源行业越来越推崇的可再生能源。当前, 通常采用高流态的高强灌浆材料将风力发电机组的钢塔筒与风机基础连接起来, 其 28 d 抗压强度通常大于 80 MPa^[61]。陆上风电工程典型预应力锚栓基础示意图如图 7 所示。邹伟等在江苏金湖风电场灌浆工程中, 采用满足 Q/WYJ 027—2019《超高强灌浆料》中 II 型指标要求的 28 d 抗压强度不小于 120 MPa 的超高性能灌浆材料, 取得良好施工效果, 并发现风电基座灌浆材料浇筑完毕后, 在浆体的不同水化阶段及时采取相应保温保湿养护措施, 能够有效降低硬化浆体的开裂风险^[62]。

4.5.2 海上风电塔筒基础连接用灌浆材料

陆地风能开发历史已久, 技术体系相对成熟, 风资源利用已逐渐趋于饱和; 而面积广阔、优质风能资源储量更为丰富的海洋, 逐渐成为风电开发的新主战场。海上风机塔筒与下部桩基之间, 可采用导管架或单桩灌浆连接, 一方面便于调平风机, 另一方面可以减少焊接带来的应力集中^[63]。海上风电工程基础灌浆连接结构示意图见图 8。海上风电灌浆材料性能要求较高, 通常须具有超高强度、

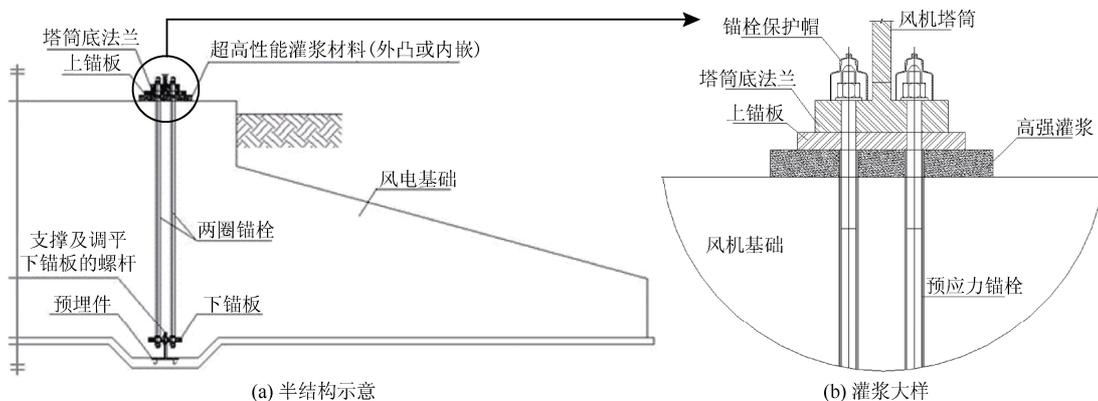


图7 陆上风电工程预应力锚栓式基础典型示意
Fig.7 Typical diagrammatic drawing of pre-stressed anchor bolt foundation for onshore wind power project

可控的微膨胀以及水下施工抗分散等性能。通常要求在不加钢纤维的条件下, 28 d 抗压强度能达到120 MPa 以上。长期以来, 我国海上风电工程灌浆材料主要依靠进口。近五年来, 国内开始不断提升和完善高性能灌浆材料的研发和生产技术。中交三航局汪冬冬团队通过添加纳米矿物掺和料、聚合物改性、补偿收缩等技术, 成功研制出超高性能灌浆材料, 其 UHPG、SKG 系列产品28 d 抗压强度最高可分别超过120 MPa、100 MPa, 率先在此领域打破了国外垄断并拥有自主知识产权^[64], 其相关产品先后成功应用于珠海桂山海上风电示范项目一期工程以及中广核广东阳江南鹏岛400 MW 海上风电项目等大型工程中。

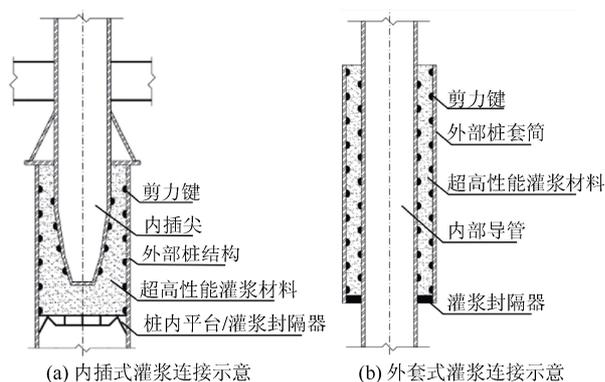


图8 海上风电工程基础灌浆连接典型结构示意图

Fig.8 Typical structure diagram of grouting connection of foundation for offshore wind power project

4.6 特种工程灌浆材料

4.6.1 耐高温工程用耐热灌浆材料

对于热荷设备基础垫层、二次浇注层、热辐射环境建筑结构、各种高温场所的设备灌浆、地面修补、钢厂轨道灌浆等高温工程, 通常需要使用具有耐高温性能的灌浆材料。王国锋等^[65]研制出一种耐 900℃ 高温 C80 水泥基微膨胀灌浆料, 具有流动性好、塑性微膨胀无收缩、高强、低成本等特点, 且具有优良的耐高温性能, 高温时不易开裂、碎撒和粉化。中国路桥工程公司通过在灌浆材料中使用多种耐火材料, 以铸造用耐火材料作为骨料, 以铸造用耐火材料微粉作为改性剂, 研制出一种耐高温的灌浆材料, 其技术要点是利用耐火材料中的硅铝酸盐、铝氧化物、碳化硅、氮化硼等耐高温物质, 有效减少水泥基灌浆料的高温性能损失^[66]。

4.6.2 严寒极地工程用低负温灌浆材料

极地严寒环境使硅酸盐水泥凝结硬化过程发生停滞, 混凝土浇筑后因长时间无法凝固而极易遭受冻害, 因而丧失结构承载特性。此类环境中工程建设宜优先采用可在低、负温环境(可低至-20℃至-40℃)进行施工的灌浆料等水泥基构筑材料。在南极中山站建设过程中,

工程技术人员按照 3:1 的比例对特种水泥和灌浆料进行复配, 顺利解决了极地混凝土难以凝固的问题。目前, 极地工程低负温施工灌浆材料主要有磷酸盐水泥体系和快硬早强硫铝酸盐水泥体系两种, 且一般优先选择极地的相对高温季节窗口期进行施工, 以综合保证工程施工效率和质量安全。

4.6.3 防护工程用高性能水泥基灌浆材料

军用防护工程通常须抵抗高速度、大动能冲击作用, 还须具备严格的气密防毒特性, 要求防护材料具有超高强度、高抗冲击韧性、高耗能特性以及高抗裂性。超高强灌浆材料及其纤维增强复合材料, 即能较好地满足此类防护需求。20 世纪, 在我国高性能混凝土及其高性能外加剂技术还不是很先进的情况下, 较多的防护工程均使用了大量的高强灌浆材料来进行建设, 包括工程要地的洞口、上覆盖层或掩蔽层、重型设备安装以及防护工程结构加固改造、性能提升等。中交第一航务工程局有限公司等^[67]采用复合胶凝材料、不同级配砂及混掺外加剂, 并用纤维材料进行增韧, 制备出一种具有高流动性、超高强、高早强、高韧性、高抗爆、高抗冲击、无收缩性能的灌浆材料, 使灌浆结构表现出高耐久性和高安全性。其 1, 3, 28, 56 d 抗压强度分别达到 75, 100, 140, 150 MPa 以上, 韧性指数 $I_{-10} \geq 7$, 破坏冲击耗能不小于 25 000 J。

4.6.4 地下工程用围岩或衬砌加固注浆材料

进入 21 世纪, 我国地下空间开发与工程建设发展迅速。近 15 年来, 我国城市地铁隧道、高铁隧道、深埋重载隧道、大中型城市地下空间综合体以及各类采矿、防护工程, 总体建设规模巨大。地下工程常须要进行围岩加固、衬砌壁后充填隔水注浆以及渗漏治理或回填注浆, 这将用到大量的各级各类具有可灌性优、黏结强度高、收缩小等特性的地下工程注浆材料。对于隧道衬砌壁后注浆, 主要关注注浆材料的密封防水性、抗渗性和耐久性, 也可就地取材, 消纳风化岩层或隧洞掘进产生的矿冶固废/渣土材料制备低水泥固化注浆料, 抗压强度多在 0.5~2.0 MPa^[68]。对于砾石、粗砂、破碎围岩、破碎煤层等地层的注浆加固, 一般可用普硅水泥注浆材料, 可灌注孔隙在 80 μm 以上; 对于细砂和粉岩层注浆加固, 则须要采用超细水泥特制的注浆材料, 其灌注孔隙直径可低至 20 μm 以下; 对于有应急堵漏抢修需求、渗水量较大较急的地下工程注浆, 多采用初凝快(多在 10 min 以内)、1 h 强度高的双液水泥基注浆料; 对一般地下工程注浆加固, 则可以采用成本更低的单液水泥基注浆料。

5 标准化历程

5.1 国外标准化

国外涉及到水泥基灌浆材料的主要标准如表 5 所示, 但其中针对灌浆连接材料的各项性能指标, 大多未

表 5 国外水泥基灌浆材料相关主要标准
Table 5 Main foreign standards related to CGM

灌浆材料设计、施工、 原材料相关标准	指标	材料测试标准 (ASTM、CEN)
挪威船级社 DNV-OS-J101 <i>Design of Offshore Wind Turbine Structures</i> ^[69]	流动度	ASTM C1437-20 <i>Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar</i> ^[74] ASTM C939/939M: 2022 <i>Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method)</i> ^[75]
美国石油协会 API(2014) <i>Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design</i> ^[70]	抗压强度	EN 13395-2: 2002 <i>Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures - Test Methods; Determination of Workability - Part 2: Test for Flow of Grout or Mortar</i> ^[76] ASTM C109/C109M: 2021 <i>Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)</i> ^[77]
美国材料与试验协会 ASTM C938-2019 <i>Standard Practice for Proportioning Grout Mixtures for Preplaced-Aggregate Concrete</i> ^[71]	膨胀率	ASTM C942/942M: 2021 <i>Test Method for Compressive Strength of Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory</i> ^[78] ASTM C827/C827M: 2023 <i>Standard Test Method for Change in Height at Early Ages of Cylindrical Specimens of Cementitious Mixtures</i> ^[79]
欧洲标准 EN 934-6-2009 <i>Admixtures for Concrete, Mortar and Grout - Part 6: Sampling, Conformity Control and Evaluation of Conformity</i> ^[72]	泌水率	prEN 480-3: 1991 <i>Admixtures for Concrete, Mortar and Grout; Test Methods; Part 3: Determination of Shrinkage and Expansion</i> ^[80] ASTM C940: 2022 <i>Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory</i> ^[81]
英国健康与安全执行局 HSE(2002) <i>Pile/Sleeve Connections</i> ^[73]	氯离子含量	EN 480-4: 2006 <i>Admixtures for Concrete, Mortar And Grout - Test Methods - Part 4: Determination of Bleeding of Concrete</i> ^[82] EN 480-10: 2009 <i>Admixtures for Concrete, Mortar and Grout - Test Methods - Part 10: Determination of Water Soluble Chloride Content</i> ^[83]

做出明确要求。对于水泥基灌浆材料基本性能的测试, 通常采用 ASTM (美国材料与试验协会)、EN (欧洲标准) 等机构所推荐的方法。

目前, 国外一些水泥基灌浆材料公司的产品抗压强度已达到超高强水平。如相关产品介绍中, 德国 BASF 公司生产的 Materflow9410、Materflow9360 型灌浆料, 28 d 抗压强度分别不小于 130 MPa、不小于 120 MPa; 瑞士 Sika 公司生产的 SikaGrout®-3310 型灌浆料, 28 d 抗压强度不小于 125 MPa; 丹麦 Densit 公司生产的 DUCORIT S8、DUCORIT S5R 型灌浆料, 28 d 抗压强度分别不小于 110 MPa、不小于 140.7 MPa; 新加坡 NAUTEC 公司生产

的 NaXTMQ130 型灌浆料, 28 d 抗压强度不小于 130 MPa。

5.2 国内标准化历程

国内水泥基灌浆材料标准可以划分为材料产品标准和工程建设标准两类。前者主要用于规范产品性能指标和生产包装质量, 后者主要用于指导产品的工程应用过程。随着水泥基灌浆料产品在我国生产与应用需求的快速增长, 水泥基灌浆材料应用行业不断增多, 与此同步对应的产品标准中, 材料性能要求也在不断提升, 工程建设标准也在不断拓宽应用场景。材料产品标准与工程建设标准主要性能指标 (流动度、强度、竖向膨胀率) 如表 6、7 所示。

表 6 国内水泥基灌浆材料产品标准以及材料主要性能
Table 6 Domestic product standards and main properties of CGM

标准名称	应用范围	主要性能指标 (流动度、强度、膨胀率)
《水泥基灌浆材料》 ^[84]	设备基础二次灌浆、地脚螺栓锚固、混凝土加固、修补等使用的水泥基灌浆材料	流动度。初始值不小于 260 mm; 30 min 保留值不小于 230 mm 抗压强度。1 d 不小于 22.0 MPa; 3 d 不小于 40.0 MPa; 28 d 不小于 70.0 MPa 竖向膨胀率。1 d 不小于 0.020%
《水泥基灌浆材料》 ^[85]	设备基础二次灌浆、地脚螺栓锚固、混凝土加固、修补等使用的水泥基灌浆材料	流动度。I 类初始值不大于 35 s (流锥流动度)、II 类初始值不小于 340 mm (截锥流动度)、III 类初始值不小于 290 mm (截锥流动度)、IV 类初始值不小于 650 mm (坍落扩展度); 30 min 保留值: I 类初始值不大于 50 s (流锥流动度)、II 类不小于 310 mm (截锥流动度)、III 类不小于 260 mm (截锥流动度)、IV 类不小于 550 mm (坍落扩展度) 抗压强度。1 d: A50 不小于 15 MPa、A60 不小于 20 MPa、A70 不小于 25 MPa、A85 不小于 35 MPa; 3 d: A50 不小于 30 MPa、A60 不小于 40 MPa、A70 不小于 45 MPa、A85 不小于 60 MPa; 28 d: A50 不小于 50 MPa、A60 不小于 60 MPa、A70 不小于 70 MPa、A85 不小于 85 MPa 竖向膨胀率。3 h 为 0.1%~3.5%; 24 h 与 3 h 之差为 0.02%~0.5%
《钢筋连接用套筒灌浆料》 ^[86]	带肋钢筋套筒灌浆连接所使用的水泥基灌浆材料	流动度。初始值不小于 300 mm; 30 min 保留值不小于 260 mm 抗压强度。1 不小于 35 MPa; 3 d 不小于 60 MPa; 28 d 不小于 85 MPa 竖向膨胀率。3 h 不小于 0.02%; 24 h 与 3 h 之差为 0.02%~0.5%

续表 6

标准名称	应用范围	主要性能指标 (流动性、强度、膨胀率)
《钢筋连接用套筒灌浆料》 ^[87]	带肋钢筋套筒灌浆连接所使用的水泥基灌浆材料	<p>常温型套筒灌浆料:</p> <p>流动性。初始值不小于 300 mm; 30 min 保留值不小于 260 mm</p> <p>抗压强度。1 d 不小于 35 MPa; 3 d 不小于 60 MPa; 28 d 不小于 85 MPa</p> <p>竖向膨胀率。3 h 为 0.02%~2%; 24 h 与 3 h 之差为 0.02%~0.4%</p> <p>低温型套筒灌浆料:</p> <p>流动性。初始值不小于 300 mm; 30 min 保留值不小于 260 mm</p> <p>抗压强度。负温养护 1 d 不小于 35 MPa; 负温养护 3 d 不小于 60 MPa; 负温养护 7 d 转标养 21 d 不小于 85 MPa</p> <p>竖向膨胀率。3 h 为 0.02%~2%; 24 h 与 3 h 之差为 0.02%~0.4%</p>
《铁路后张法预应力混凝土梁管道压浆技术条件》 ^[88]	铁路后张法预应力混凝土梁管道压浆	<p>流动性。初始值为 18±4 s; 30 min 保留值不大于 30 s</p> <p>强度。7 d 抗压强度不小于 35 MPa、抗折强度不小于 6.5 MPa; 28 d 抗压强度不小于 50 MPa、抗折强度不小于 10 MPa</p> <p>自由膨胀率。24 h 为 0%~3%</p>
《预应力孔道灌浆剂》 ^[89]	预应力孔道灌浆剂	<p>水泥浆稠度。初始值为 (18±4) s; 30 min 保留值不小于 28 s;</p> <p>强度。7 d 抗压强度不小于 28 MPa、抗折强度不小于 6.0 MPa; 28 d 抗压强度不小于 40 MPa、抗折强度不小于 8.0 MPa</p> <p>自由膨胀率。24 h 为 0%~1%</p> <p>限制膨胀率。7 d 为 0%~0.1%</p>
《公路工程预应力孔道灌浆料(剂)》 ^[90]	公路工程灌注预应力构件孔道、预应力锚索空隙等使用的灌浆料及灌浆剂	<p>流动性。初始值不大于 17 s; 30 min 保留值不大于 20 s; 60 min 流动性保留值不大于 25 s;</p> <p>强度。7 d 抗压强度不小于 40 MPa、抗折强度不小于 6.0 MPa; 28 d: 抗压强度不小于 50 MPa、抗折强度不小于 10.0 MPa</p> <p>自由膨胀率。3 h 为 0%~1%; 24 h 为 0%~2%</p> <p>限制膨胀率。水中 7 d 为 0.03%~0.1%</p>
《公路工程预应力孔道灌浆料》 ^[91]	公路工程后张预应力结构孔道压力灌浆材料的生产、检验和使用	<p>流动性。初始值不大于 17.0 s; 30 min 保留值不大于 20.0 s; 60 min 保留值不大于 25.0 s;</p> <p>强度。7 d 抗压强度不小于 40.0 MPa、抗折强度不小于 6.0 MPa; 28 d: 抗压强度不小于 50.0 MPa, 且不低于预应力结构混凝土设计强度; 抗折强度不小于 10.0 MPa</p> <p>自由膨胀率。3 h 为 0%~1%; 24 h 为 0%~2%; 3 h 与 24 h 自由膨胀率比值不大于 1.0;</p> <p>限制膨胀率。水中 7 d 为 0.03%~0.10%</p>
《桥梁支座灌浆材料》 ^[92]	桥梁支座的底板稳固灌浆材料的生产检验和使用	<p>流动性。初始值: 早强 I 型不小于 320 mm、早强 II 型不小于 320 mm、普通型不小于 320 mm; 30 min 保留值: 早强 I 型不小于 280 mm、早强 II 型不小于 280 mm、普通型不小于 290 mm</p> <p>抗压强度。2 h: 早强 I 型不小于 20 MPa; 8 h: 早强 II 型不小于 20 MPa; 24 h: 早强 I 型不小于 50 MPa、早强 II 型不小于 40 MPa、普通型不小于 20 MPa; 3 d: 普通型不小于 40 MPa; 28 d: 早强 I 型不小于 60 MPa、早强 II 型不小于 60 MPa、普通型不小于 60 MPa; 56 d 与 28 d 抗压强度比值均不小于 1.0</p> <p>抗折强度。2 h: 早强 I 型不小于 4 MPa; 8 h: 早强 II 型不小于 4 MPa; 24 h: 早强 I 型不小于 10 MPa、早强 II 型不小于 6 MPa、普通型不小于 4 MPa; 3 d: 普通型不小于 6 MPa; 28 d: 早强 I 型不小于 10 MPa、早强 II 型不小于 10 MPa、普通型不小于 10 MPa; 56 d 与 28 d 抗折强度比值均不小于 1.0</p> <p>竖向膨胀率。3 h 为 0.1%~2%; 24 h 与 3 h 之差为 0.02%~0.5%</p>
《海上风电导管架灌浆材料》 ^[93]	海上风电三桩、四桩及多桩导管架腿柱与钢管桩之间灌浆连接所使用的灌浆材料	<p>UHPG-80:</p> <p>流动性。初始值不小于 290 mm; 30 min 保留值不小于 260 mm; 60 min 保留值不小于 230 mm</p> <p>强度。1 d: 抗压强度不小于 30 MPa; 3 d: 抗压强度不小于 60 MPa; 28 d: 抗压强度不小于 80 MPa、抗折强度不小于 10.0 MPa</p> <p>竖向膨胀率。3 h 为 0.1%~3.5%; 24 h 与 3 h 之差为 0.02%~0.5%</p> <p>UHPG-100:</p> <p>流动性。初始值不小于 290 mm; 30 min 保留值不小于 260 mm; 60 min 保留值不小于 230 mm</p> <p>强度。1 d: 抗压强度不小于 35 MPa; 3 d: 抗压强度不小于 65 MPa; 28 d: 抗压强度不小于 100 MPa、抗折强度不小于 11.0 MPa</p> <p>竖向膨胀率。3 h 为 0.1%~3.5%; 24 h 与 3 h 之差为 0.02%~0.5%</p> <p>UHPG-120:</p> <p>流动性。初始值不小于 290 mm; 30 min 保留值不小于 260 mm; 60 min 保留值不小于 230 mm</p> <p>强度。1 d: 抗压强度不小于 40 MPa; 3 d: 抗压强度不小于 70 MPa; 28 d: 抗压强度不小于 110 MPa、抗折强度不小于 12 MPa; 56 d: 抗压强度不小于 120 MPa、抗折强度不小于 12.0 MPa</p> <p>竖向膨胀率。3 h 为 0.1%~3.5%; 24 h 与 3 h 之差为 0.02%~0.5%</p>

标准名称	应用范围	主要性能指标 (流动性、强度、膨胀率)
《JGM [®] -SP 系 列风机基础灌 浆料》 ^[94]	陆地、海上风电 场风机和海上 升压站等结构基 础灌浆用的水泥 基灌浆材料	JGM [®] -SP101 型: 流动性。初始值不小于 290 mm; 30 min 保留值不小于 260 mm; 60 min 保留值不小于 260 mm 强度。1 d: 抗压强度不小于 20 MPa、抗折强度不小于 5 MPa; 3 d: 抗压强度不小于 40 MPa、抗折强度不 小于 6 MPa; 28 d: 抗压强度不小于 80 MPa、抗折强度不小于 10 MPa 竖向膨胀率。3 h 为 0.1%~3.5%; 24 h 与 3 h 之差为 0.02%~0.5% JGM [®] -SP201 型: 流动性。初始值不小于 290 mm; 30 min 保留值不小于 260 mm; 60 min 保留值不小于 260 mm 强度。1 d: 抗压强度不小于 50 MPa、抗折强度不小于 10 MPa; 3 d: 抗压强度不小于 80 MPa、抗折强度 不小于 15 MPa; 28 d: 抗压强度不小于 120 MPa 抗折强度不小于 20 MPa 竖向膨胀率。3 h 为 0.1%~3.5%; 24 h 与 3 h 之差为 0.02%~0.5%

表 7 国内水泥基灌浆材料工程建设标准以及材料主要性能
Table 7 Domestic construction standards and main properties of CGM

标准名称	应用范围	主要性能指标 (流动性、强度、膨胀率)
《水泥基灌浆 材料施工技术 规程》 ^[95]	各种水泥基灌浆 材料的施工	流动性。初始值 I 级品不小于 270 mm、II 级品不小于 240 mm 抗压强度。1 d: I 级品不小于 30 MPa、II 级品不小于 22 MPa; 3 d: I 级品不小于 40 MPa、II 级 品不小于 38 MPa; 28 d: I 级品不小于 65 MPa、II 级品不小于 55 MPa 竖向膨胀率。1 d: I 级品不小于 0.02%、II 级品不小于 0.02%
《水泥基灌浆 材料应用技术 规程》 ^[6]	水泥基灌浆材料 的检验, 灌浆工 程的设计施工及 验收	流动性。初始值: I 类不小于 380 mm、II 类不小于 340 mm、III 类不小于 290 mm、IV 类不小于 650 mm (坍落扩展度); 30 min 保留值: I 类不小于 340 mm、II 类不小于 310 mm、III 类不小于 260 mm、 IV 类不小于 550 mm (坍落扩展度) 抗压强度。1 d 不小于 20.0 MPa; 3 d 不小于 40.0 MPa; 28 d 不小于 60.0 MPa 竖向膨胀率。3 h 为 0.1%~3.5%; 24 h 与 3 h 之差为 0.02%~0.5%
《水泥基灌浆 材料应用技术 规范》 ^[96]		流动性。同文献[76] 抗压强度。1 d: I 类不小于 15 MPa, II 类、III 类、IV 类不小于 20 MPa; 3 d: I 类不小于 30 MPa, II 类、III 类、IV 类不小于 40 MPa; 28 d: I 类不小于 50 MPa, II 类、III 类、IV 类不小于 60 MPa 竖向膨胀率。3 h 为 0.1%~3.5%; 24 h 与 3 h 之差为 0.02%~0.5%
《工程结构加固材 料安全性鉴定技 术规范》 ^[97]	结构加固工程中 应用的材料及制 品的安全性检验 与鉴定	结构加固用水泥基灌浆材料: 流动性。初始值不小于 320 mm; 30 min 保留率不小于 90% 强度。1 d: 抗压强度不小于 20.0 MPa; 3 d: 抗压强度不小于 40.0 MPa ; 7 d: 劈裂抗拉不小于 2.5 MPa、 抗折强度不小于 6.0 MPa; 28 d: 抗压强度不小于 60.0 MPa、劈裂抗拉不小于 3.5 MPa、抗折强度 不小于 9.0 MPa、与钢筋握裹强度不小于 5.0 MPa 竖向膨胀率。3 h 不小于 0.10%; 24 h 与 3 h 之差为 0.02%~0.30% 改性水泥基裂缝注浆料: 流动性。初始值不小于 380 mm; 30 min 保留率不小于 90% 强度。3 d: 抗压强度不小于 25.0 MPa; 7 d: 抗压强度不小于 35.0 MPa、劈裂抗拉不小于 3.0 MPa、 抗折强度不小于 5.0 MPa; 28 d: 抗压强度不小于 55.0 MPa、劈裂抗拉不小于 4.0 MPa、抗折强度 不小于 8.0 MPa、与混凝土正拉黏结强度不小于 1.5 MPa 竖向膨胀率。3 h 不小于 0.1%; 24 h 与 3 h 之差不小于 0.02%
《石油化工灌浆材 料应用技术 规程》 ^[98]	以石油、天然气、 煤为原料生产油 品及化工产品的 工程中, 采用水泥 基灌浆材料进行 基础灌浆、螺栓或 钢筋锚固及预应力 孔道灌浆的选用、 施工和质量验收	流动性。初始值 I 型不大于 35 s (流锥流动性)、II 型不小于 340 mm、III 型不小于 290 mm, G 型 不小于 290 mm, K 型不小于 290 mm (堵水时, 可适当降低); 30 min 保留值 I 型不大于 50 s (流 锥流动性)、II 型不小于 310 mm、III 型不小于 260 mm, G 型不小于 260 mm, K 型不小于 240 mm (堵水时, 可适当降低) 抗压强度。3 h: K 型不小于 30 MPa; 1 d: K 型不小于 40 MPa; 3 d: I 型、II 型、III 型不小于 40 MPa, G 型不小于 50 MPa; 28 d: I 型、II 型、III 型不小于 60 MPa, G 型不小于 90 MPa, K 型不小于 60 MPa 竖向膨胀率。3 h: I、II、III、G 型为 0.1%~3.5%; 24 h 与 3 h 之差: I、II、III、G 型为 0.02%~0.5%; 1 d: K 型不小于 0.02%

综合以上分析可以看出, 水泥基灌浆材料的应用领域越来越广泛, 且在能建领域企业标准中呈现出性能指标不

断提高的趋势, 但考虑到不同行业以及不同的应用环境, 国家标准的规定通常较行业标准和企业标准规定的要求

更低,且十多年来未明显提升。各标准所规定的不同类型

灌浆材料 28 d 最低抗压强度总体对比如图 9 所示。

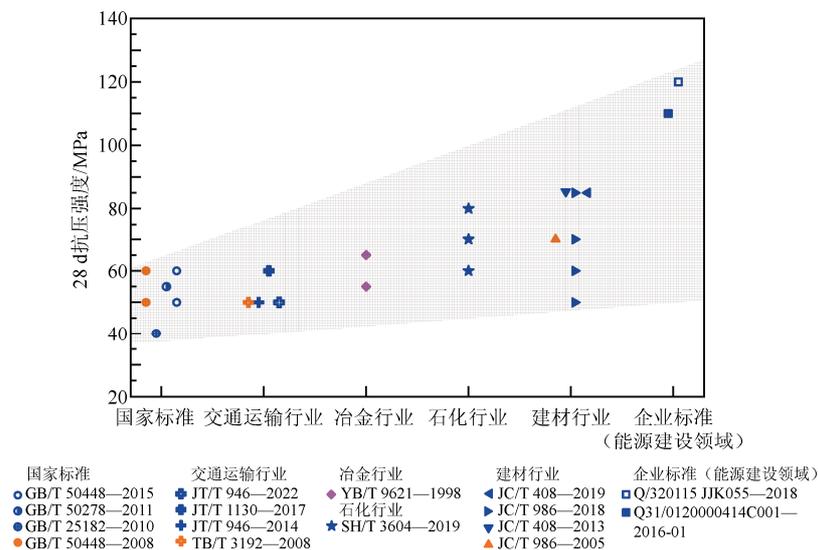


图9 各标准中规定的不同类灌浆材料 28 d 抗压强度最小值的对比
Fig.9 Comparison of the minimum 28 d compressive strength of different types of CGM specified in each standard

6 总结与展望

水泥基灌浆材料发展至今日趋成熟,在材料制备、理论研究和工程应用等方面都取得了长足的进展;其应用领域在不断拓宽,性能在不断提升,产品在持续细分,标准化也逐渐完善,但仍具有广泛的发展前景。结合全文的分析和讨论,对当前水泥基灌浆材料的应用现状和未来发展,提出如下几点建议。

1) 在产品按性能特征分类及其对应的工程应用方面,水泥基灌浆材料最早应用于冶金、矿山、石化、能源行业的设备、仪器基础安装或基建领域的结构加固修复,而后逐渐拓展应用于预应力孔道灌浆、装配式结构钢筋灌浆套筒连接、风电结构基础灌浆连接、新型组合结构、防护工程、地下工程、海洋工程等重要领域。为适应日趋复杂的应用环境、更加严苛的荷载条件,水泥基灌浆材料的特殊性能和环境适应性不断提升,已分化出超高强度、高温施工及服役、低负温施工、超高流态、超细缝隙高可注性、高抗分散可水下施工、抗震耐疲劳、精准可控微膨胀高抗裂等特殊优异性能,有力支撑着诸多行业领域对灌浆材料的特殊性能需求。

2) 在产业化技术方面,应依据不同地域的地材特点,提高灌浆材料的地材适应性和产品质量稳定性;在超高性能水泥基灌浆材料方面,应努力提高全行业灌浆料生产搅拌设备的技术水平,以提高纤维和超细功能材料的分散均质性;在偏低强度等级、以充填功能为主的应用场景下,应针对性开发可适量应用各类矿冶、城市固废,具有节材节能、绿色低碳特征的生态型水泥基灌浆材料。

3) 基于我国灌浆材料量大面广的应用实践,未来一段时间内水泥基灌浆材料性能还将持续分化,应用领域还会持续拓展。今后应注重不断提升其产品和工程应用的标准化水平,加强原有标准的维护更新和新标准的颁布实施,推进标准工作的国际化进程,以保障行业规范健康、高质量、可持续绿色低碳发展。

参考文献

- [1] 王红霞, 王星, 何廷树, 等. 灌浆材料的发展历程及研究进展[J]. 混凝土, 2008(10): 30-33.
- [2] 陈富银, 游宝坤. 无收缩超早强灌浆剂的性能及其应用[J]. 中国建筑材料科学研究院学报, 1991(02): 90-92.
- [3] 李春宜. 宝钢研制成功一种新型灌浆料[J]. 砖瓦世界, 1992(20): 13.
- [4] 仲晓林, 张耀凯, 孙跃生. CGM 设备灌浆料的性能和应用[J]. 工业建筑, 1993(01): 32-35+44.
- [5] 仲晓林, 孙跃生, 宫武伦. CGM 高强无收缩灌浆料系列产品的性能与研究[J]. 工业建筑, 1998, 28(09): 60-62.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水泥基灌浆材料应用技术规范: GB/T 50448—2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- [7] 张亚楠, 管友海, 马奎鑫, 等. 碳纤维高强灌浆材料力学性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2020, 46(01): 71-76.
- [8] KHAYAT K H. Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials: an overview[J]. Cement and Concrete Composites, 1998, 20(2/3): 171-188.
- [9] SAHMARAN M, ÖZKAN N, KESKIN S B, et al. Evaluation of natural zeolite as a viscosity-modifying agent for cement-based grouts[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38: 930-937.
- [10] 鲁进亮, 张羿, 任敏. 海上风电重力式基础结构灌浆工艺[J]. 电力建设, 2012, 33(07): 95-98.

- [11] 胡超凡. 水泥基灌浆料膨胀性能研究[D]. 江苏: 浙江大学, 2020.
- [12] 付建伟. 贵州地区磷石膏基灌浆材料的试验开发研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [13] 陈嘉康. 磷石膏填充灌浆料研究与工程应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [14] 赵佟庆. 废弃粘土砖在灌浆料中的应用研究[D]. 辽宁: 沈阳建筑大学, 2019.
- [15] FU X, YANG C, LIU Z, et al. Studies on effects of activators on properties and mechanism of hydration of sulphoaluminate cement[J]. *Cement and concrete research*, 2003, 33(3): 317-324.
- [16] 袁进科, 陈礼仪. 普通硅酸盐水泥与硫铝酸盐水泥复配改性灌浆材料性能研究[J]. *混凝土*, 2011(01): 128-130.
- [17] 李峤玲. 超早强水泥基灌浆料的性能研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [18] WANG Q, LI M, JIANG G. The difference among the effects of high-temperature curing on the early hydration properties of different cementitious systems[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2014, 118(1): 51-58.
- [19] 张岩, 高青宇, 王晓亮, 等. 低收缩早强型灌浆料的制备与微观机理[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(08): 922-930.
- [20] BONDAR D, COAKLEY E. Use of gypsum and CKD to enhance early age strength of High Volume Fly Ash(HVFA) pastes[J]. *Construction and Building Materials*. 2014, 71: 93-108.
- [21] 庞超明, 唐志远, 杨志远, 等. 水泥基材料中的早强剂及其作用机理综述[J]. *材料导报*, 2023, 37(09): 80-90.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑工程冬期施工规程 JGJ/T 104—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [23] 李晓明, 苏忠纯, 陈韬. 养护温度对低温灌浆料强度发展的影响[J]. *中国港湾建设*, 2014(07): 47-49.
- [24] 罗晓峰, 邢国徽, 何余良. 高强套筒灌浆料的制备及性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2020, 47(05): 50-52+100.
- [25] 胡星, 陈东平, 余林文, 等. 环保型套筒灌浆料的配合比设计及性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(02): 557-564.
- [26] 丁成. 超高性能海上风电灌浆料试验研究[J]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [27] RASHAD A M. A synopsis about the effect of nano-Al₂O₃, nano-Fe₂O₃, nano-Fe₃O₄ and nano-clay on some properties of cementitious materials: a short guide for Civil Engineer[J]. *Materials and Design*, 2013, 52: 143-157.
- [28] 冷达, 张雄, 沈中林, 等. 水泥基灌浆材料主要成分对其新拌及硬化性能的影响[J]. *混凝土与水泥制品*, 2008(5): 12-16.
- [29] 黄维蓉, 郭桂香. 粉煤灰掺量对 C30 自密实混凝土的影响[J]. *混凝土*, 2015(04): 119-122.
- [30] 寇佳亮, 于丹红, 张浩博. 高强度水泥基灌浆料基本力学性能正交试验研究[J]. *建筑结构*, 2019, 49(02): 64-69.
- [31] 袁杰, 黄馨, 张子鹏, 等. 一种适用于严寒环境的早强磷酸镁水泥砂浆及其制备方法[P]. CN202210903031.2. 2022-09-23.
- [32] 赵海洋. 防冻型水泥基无收缩灌浆材料的实验研究[J]. *新型建筑材料*, 2013, 40(12): 5-7+25.
- [33] 马正先, 周传贵, 杭鑫坤, 等. 水泥对负温套筒灌浆料性能的影响[J]. *混凝土*, 2018(11): 152-156.
- [34] 李本友, 孙华强, 周传贵. 负温套筒灌浆料的性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2018, 45(02): 107-111.
- [35] 吴兴杰, 肖豪, 刘广英, 等. 低负温钢筋套筒灌浆料发展研究综述[J]. *黑龙江工程学院学报*, 2021, 35(04): 29-32+38.
- [36] 马正先, 宋沛霖, 杭鑫坤. 外加剂对负温套筒灌浆料性能的影响[J]. *混凝土*, 2019(05): 142-146+150.
- [37] 孙小巍, 刘星靖, 杨海明, 等. 低温条件下硅酸盐水泥基钢筋连接用套筒灌浆料试验研究[J]. *混凝土*, 2021(02): 146-150.
- [38] 叶显, 吴文选, 殷璐. 矿物掺合料对灌浆料耐高温性能的影响[J]. *粉煤灰综合利用*, 2019(02): 16-20.
- [39] 叶显, 吴文选, 周壮, 等. 玄武岩纤维对高强灌浆料耐高温性能的影响[J]. *粉煤灰综合利用*, 2020, 34(01): 71-73+84.
- [40] 赖洋羿, 张琦彬, 唐军务. 超早强水泥基水下灌浆料的研制[J]. *新型建筑材料*, 2018, 45(03): 114-117+129.
- [41] 高鑫, 黄剑熊, 建波. 聚合物改性水下修补灌浆料的性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2017, 44(06): 90-94.
- [42] 吕阔, 廖华平. 掺入豆石的灌浆料在加固工程中的应用[J]. *江苏建材*, 2009(03): 36-38.
- [43] 吴元, 李延和, 李树林. 豆石型灌浆料的工作及力学性能试验研究[J]. *工业建筑*, 2008, 38(06): 82-85+91.
- [44] 汪秀石, 李树林, 吴元. 豆石型灌浆料的力学及变形性能试验研究[J]. *工业建筑*, 2008, 38(09): 82-84.
- [45] 褚志昭. CGM 灌浆料用于地脚螺栓锚固工程[J]. *建筑技术*. 1997(02): 99.
- [46] 陈富银, 游宝坤. 无收缩超早强灌浆剂的性能及其应用[J]. *中国建筑材料科学研究院学报*, 1991(02): 90-92.
- [47] 仲朝明, 孙跃生, 仲晓林. CGM 抢修料的研究及应用[J]. *混凝土*, 2004(11): 67-68+77.
- [48] 薄祥照. HGM 高强无收缩灌浆材料的研制与应用[J]. *国防交通工程与技术*, 2006(03): 58-60.
- [49] 史艳娜. 孔道压浆材料的性能优化及工程应用[J]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [50] 李祖辉, 田石柱, 丁双双. 水泥基灌浆料加固梁试验研究与开裂模型分析[J]. *建筑结构*, 2017, 47(15): 80-84.
- [51] 孙小巍, 胡曼曼, 黄帅, 等. 钢筋连接用套筒灌浆料组成因素对其性能影响的研究[J]. *混凝土*, 2021(07): 142-146+150.
- [52] 卓旬, 刘庆辉, 徐艳红, 等. 装配式混凝土结构连接节点研究综述[J]. *混凝土*, 2022(12): 155-162+167.
- [53] 杜永潇, 孙晓立, 杨军等. 基于压电原理的装配式结构套筒灌浆饱满度检测方法研究[J/OL]. *铁道科学与工程学报*: 1-12 [2024-01-12]. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20230533>.
- [54] 胡志刚, 王长军, 王宪章, 等. 一种容积检测装置及检测方法[P]. CN202110098753.0. 2021-06-04.
- [55] 李建普, 李中原, 郭维成, 等. 型钢柱柱脚人工注浆施工方法[J]. *住宅与房地产*, 2018(27): 170-172.
- [56] 徐元芹. 中国近海典型区域粘性土工程地质特征的差异性及其成因研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [57] 王恒丰, 朱嵘华, 张融圣, 等. 灌浆料对海上风电大直径III型嵌岩单桩承载性能的影响[J]. *船舶工程*, 2021, 43(10): 10-16+30.
- [58] 林鲜, 陈凌华, 周伟, 等. UWB II 型水下不分散混凝土絮凝剂的性能研究[J]. *混凝土*, 2006(04): 52-53+73.
- [59] 宋涛文, 张剑, 韩宇栋, 等. 一种海洋工程用水泥基灌浆材料及其制备方法[P]. CN201811488111.6. 2021-12-07.
- [60] 张悦然, 汪冬冬, 高健岳, 等. 一种用于植入型嵌岩单桩的缓

- 凝型抗水分散灌浆材料[P]. CN201910127590.7. 2021-09-10.
- [61] 杨允晰. 浅谈风电场工程 C80 灌浆施工技术[J]. 技术与市场, 2019, 26(05): 165.
- [62] 邹伟, 梁世高, 吴文选, 等. 超高强灌浆料在风电基础二次灌浆中的应用及裂缝控制[J]. 四川建材, 2022, 48(09): 86-87.
- [63] 刘晋超, 元国凯, 陈涛. 海上风电灌浆连接段静力受力机理研究综述[J]. 南方能源建设, 2016, 3(S1): 61-67.
- [64] 汪冬冬, 陈克伟, 王成启, 等. 海上风电导管架灌浆原型试验研究[J]. 海洋开发与管理, 2018(A01): 140-145.
- [65] 王国锋, 张华, 郑宝春, 等. 一种耐 900℃ 高温 C80 水泥基微膨胀灌浆料及其制备方法、应用[P]. CN202110758718.7. 2021-08-17.
- [66] 胡钊光, 宋普涛, 蒋勇, 等. 一种耐高温大流态低损失水泥基灌浆料及其制备方法[P]. CN202111671964.5. 2023-02-03.
- [67] 曹忠露, 侯晋芳, 苏忠纯, 等. 一种抗爆抗冲击灌浆料及其制备方法[P]. CN202110872235.X. 2021-12-07.
- [68] 王义盛, 赵小鹏, 袁锐, 等. 风化岩层岩渣配制的盾构同步注浆浆液性能及微观形貌分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(04): 65-71.
- [69] Det Norske Veritas. Design of offshore wind turbine structures: DNV-OS-J101[S]. Høvik, Norway, 2010.
- [70] American Petroleum Institute. Planning, designing, and constructing fixed offshore platforms-working stress design[R]. American Petroleum Institute, 2014.
- [71] ASTM. International. standard practice for proportioning grout mixtures for preplaced-aggregate concrete: ASTM C938-2019[S]. ASTM, 2019.
- [72] European Committee for Standardization (CEN). Admixtures for concrete, mortar and grout-Part 6: Sampling, conformity control and evaluation of conformity: EN 934-6: 2001 + A1: 2005[S]. CEN, 2005.
- [73] Health & Safety Executive. Pile/Sleeve connections[R]. United Kingdom, 2002.
- [74] ASTM International. Standard test method for flow of hydraulic cement mortar: ASTM C1437-20[S]. ASTM, 2020.
- [75] ASTM International. Standard test method for flow of grout for preplaced-aggregate concrete (flow cone method): ASTM C939/939M-22[S]. ASTM, 2022.
- [76] European Committee for Standardization (CEN). Products and systems for the protection and repair of concrete structures-test methods; determination of workability-part 2: test for flow of grout or mortar: EN 13395-2: 2002[S]. CEN, 2002.
- [77] ASTM International. Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50 mm] cube specimens): ASTM C109/C109M-21[S]. ASTM, 2021.
- [78] ASTM International. Test method for compressive strength of grouts for preplaced-aggregate concrete in the laboratory: ASTM C942/942M-21[S]. ASTM, 2021.
- [79] ASTM International. Standard test method for change in height at early ages of cylindrical specimens of cementitious mixtures: ASTM C827/C827M-23[S]. ASTM, 2023.
- [80] European Committee for Standardization (CEN). Admixtures for concrete, mortar and grout; test methods; part 3: determination of shrinkage and expansion: prEN 480-3: 1991[S]. CEN, 1991.
- [81] ASTM International. Standard test method for expansion and bleeding of freshly mixed grouts for preplaced-aggregate concrete in the laboratory: ASTM C940-22[S]. ASTM, 2022.
- [82] European Committee for Standardization (CEN). Admixtures for concrete, mortar and grout-test methods-part 4: determination of bleeding of concrete: EN 480-4: 2005[S]. CEN, 2005.
- [83] European Committee for Standardization (CEN). Admixtures for concrete, mortar and grout-test methods-part 10: determination of water soluble chloride content: EN 480-10: 2009[S]. CEN, 2009.
- [84] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水泥基灌浆材料: JC/T 986—2005[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [85] 中华人民共和国工业和信息化部. 水泥基灌浆材料: JC/T 986—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [86] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢筋连接用套筒灌浆料: JG/T 408—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [87] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢筋连接用套筒灌浆料: JG/T 408—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- [88] 中华人民共和国铁道部. 铁路后张法预应力混凝土梁管道灌浆技术条件: TB/T 3192—2008[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
- [89] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 预应力孔道灌浆剂: GB/T 25182—2010[S]. 北京: 中国质检出版社, 2010.
- [90] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程 预应力孔道灌浆料(剂): JT/T 946—2014[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [91] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程预应力孔道灌浆料: JT/T 946—2022[S]. 北京: 人民交通出版社, 2022.
- [92] 中华人民共和国交通运输部. 桥梁支座灌浆材料: JT/T 1130—2017[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [93] 中交港湾(上海)科技有限公司. 海上风电导管架灌浆材料: Q31/0120000414C001—2016[S]. 2016.
- [94] 江苏苏博特新材料股份有限公司. JGM[®]-SP 系列风机基础灌浆料: Q/320115 JJK 055—2018[S]. 2018.
- [95] 中华人民共和国冶金工业部. 水泥基灌浆材料施工技术规程: YB/T 9261—98[S]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.
- [96] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水泥基灌浆材料应用技术规范: GB /T 50448—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [97] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程结构加固材料安全性鉴定技术规范: GB 50728—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [98] 中华人民共和国工业和信息化部. 石油化工灌浆材料应用技术规程: SH/T 3604—2019[S]. 北京: 中国石化出版社, 2019.