

超高性能混凝土喷射施工技术规范

编制说明

(征求意见稿)

编制组

2024年11月

一、工作概况

（一）任务来源

根据中国建筑材料联合会《关于下达 2023 年第三批协会标准制定计划的通知》（中建材联标发〔2023〕44 号）和中国混凝土与水泥制品协会《关于下达 2023 年中国混凝土与水泥制品协会标准制修订计划（第三批）的通知》（中制协字〔2023〕19 号）的要求，《超高性能混凝土喷射施工技术规程》为协会标准制定项目（计划号 2023-42-xbjh）。

本规程由中国建筑材料联合会和中国混凝土与水泥制品协会共同负责管理，由中交第二航务工程局有限公司负责起草并牵头组织相关单位共同完成。

（二）制订本标准的背景和意义

随着基础建设重心向西南地区转移，线路中隧道占比逐年攀升，如何提高隧道支护结构体系的稳定性，保证隧道工程建设质量愈发引起关注。目前，工程中常用的复合式衬砌结构主要基于围岩变形控制理论和长期自承载理念，要求初支承担施工阶段全部荷载和运营阶段主要荷载，而将二衬作为安全储备，这便要求隧道初支必须具有长期承载能力和良好的耐久性能，以确保隧道衬砌结构的安全性和整体稳定性。隧道初支由钢筋网片、锚杆、喷射混凝土和钢拱架组成，其中喷射混凝土是在高压压缩空气作用下，将经过管道运输的混凝土均匀喷射在受喷面上，自动压实并快速产生强度的一种特殊混凝土。长期以来喷射混凝土的耐久性劣化问题未引起工程技术人员的足够重视，由于常规喷射混凝土后期强度倒缩、抗渗性、耐腐蚀性不足所导致的隧道病害问题时有发生。

同时随着社会快速发展，很多既有工程由于设计年限已到、承载能力无法满足使用需求等原因，亟需进行结构加固，传统加固方法往往需要大规模拆除重建，不仅影响使用，而且时间长、费用高。超高性能混凝土喷射施工提供了一种快速高效的新型加固方法，其粘结力强，与基体结合牢固，可有效提升构件承载力，除此外它还具有高强度、高耐久、快固硬等特点，可直接喷射到需加固部位，迅速形成高强度加固层，大幅缩短施工周期。因此，超高性能混凝土喷射施工在工程加固领域具有巨大应用前景和价值，是解决既有结构加固问题的重要技术手段。

为解决常规喷射混凝土长期力学性能、耐久性能不足以及传统加固的修复费时费力等问题，近年来中交二航局、中国海洋大学、武汉大学、武汉理工大学、湖南大学、铁

科院、苏博特等众多国内高校、科研院所以及企业开展了超高性能混凝土喷射施工的科研攻关，依托省部级科研课题取得了大量科研成果，基本上从理论方面和室内试验方面证明了实现超高性能混凝土喷射的技术可行性。

目前关于国内外还没有针对超高性能混凝土喷射施工的技术标准和规范，本标准主要参考对比喷射混凝土和超高性能混凝土的相关标准和规范。国外标准中 ACI 506.1R-08《Guide to Fiber-Reinforced Shotcrete》主要针对纤维喷射混凝土，强度等级一般小于 C60，且对喷射混凝土的耐久性能和回弹率关键技术并未提出要求。ACI 506.5R-09《Guide for Specifying Underground Shotcrete》主要针对地下工程规定喷射混凝土抗压强度和粘结强度要求，同样未对耐久性能和回弹率等做出规范。BSEN 14487-1《Sprayed concrete-Definitions-specifications and conformity》提出了喷射混凝土的抗冻性能，但未对喷射混凝土的施工工艺作出规定。国内标准中 T/CBMF 96/T/CCPA 20《超高性能混凝土预混料》、T/CBMF 128/T/CCPA 23《超高性能混凝土现场浇筑施工技术规范》主要针对超高性能混凝土的原材料、现场浇筑用超高性能混凝土的施工性能和力学性能作出了规定，未涉及喷射工艺；GB 50086《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》和 JCJ/T 372《喷射混凝土应用技术规程》中主要针对普通喷射混凝土的力学性能指标，并未考虑高性能或超高性能喷射混凝土；DB 50/T 1391《公路隧道湿喷混凝土施工技术规范》中虽对喷射混凝土的制备、运输、喷射作业和养护方面作出了规定，但相关参数的提出主要依据普通喷射混凝土（含高强和纤维喷射混凝土）在隧道中的应用经验提出，在超高性能喷射混凝土的施工机具、喷射工艺参数、实体质量检验和评价方法等方面较为欠缺。考虑到目前超高性能混凝土喷射的市场应用前景广、市场大，但国内还没有相关的规范和标准，因此为确保超高性能混凝土喷射技术能够切实落地，特此制定《超高性能混凝土喷射施工技术规范》。

本规程制定的意义在于：本标准将在超高性能混凝土喷射工艺的总则、术语与符号、基本规定、材料、试配和试喷、施工、安全环保措施以及质量检验方面作出明确规定，重点提出适用于喷射超高性能混凝土的材料参数、施工工艺参数和验收指标，提高超高性能混凝土喷射施工的规范化和标准化水平。

（三）主要工作过程

为完成规程制订，中国混凝土与水泥制品协会（CCPA）组织成立了《超高性能混凝土喷射施工技术规范》编制组。

编制组由多家单位构成，涵盖了国内主要的喷射超高性能混凝土科研单位、生产厂家和工程应用单位，具有代表性，具体单位及分工见表1。

中交第二航务工程局有限公司为本规程的主编单位，其余单位为参编单位。

本标准从2023年6月开始起草，2023年11月形成《超高性能混凝土喷射施工技术规程》标准草案（初稿1）。

2023年11月2日在北京召开第一次全体编制组会议，就“初稿1”进行讨论，根据提出的意见建议，修改形成“初稿2”。

2024年4月18日在湖北武汉召开第二次全体编制组会议，进行讨论和修改完善，形成“初稿3”，并在编制组内部征求意见。

2024年11月，经编制组内容意见汇总并经修改形成征求意见稿

2024年11月，经编制组内容意见汇总并经修改形成征求意见稿，报标准管理单位申请公开征集意见。

表1 编制组成员单位及分工

序号	单位名称	分工
1	中国混凝土与水泥制品协会	负责组织全面工作
2	中交第二航务工程局有限公司	负责起草编制工作
3	中国海洋大学	提供相关行业数据、施工实践经验及建议
4	武汉理工大学	
5	武汉大学	
6	湖南大学	
7	中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所	
8	中交第一航务工程勘察设计院有限公司	
9	中交一公局土木工程建筑研究院有限公司	
10	中交天津港湾工程研究院有限公司	
11	山东省交通科学研究院	
12	山东高速股份有限公司	
13	江西省建材科研设计院有限公司	
14	湖南固力工程新材料有限责任公司	
15	山西省交通科技研发有限公司	
16	北京驻地新材料科技有限公司	
17	上海复培新材料科技有限公司	
18	中铁桥研科技有限公司	
19	武汉源锦建材科技有限公司	
20	致砦（河南）构件有限公司	
21	中德新亚建筑材料有限公司	
22	深圳尚博特科技有限公司	
23	山东省公路桥梁建设集团有限公司	
24	四川公路桥梁建设集团有限公司	
25	山东高速畅通路桥工程有限公司	
26	山东砦林建筑科技有限公司	

二、标准编制原则和主要内容

（一）本标准与国内相关标准间的关系

本文件是中国建材联合会和中国混凝土与水泥制品协会 UHPC 系列标准规范的组成部分，其中现行团体标准《超高性能混凝土基本性能与试验方法》T/CBMF 37—2018/T/CCPA 7—2018、《超高性能混凝土预混料》T/CBMF 96—2020/T/CCPA 20—2020、《超高性能混凝土结构设计规程》T/CBMF185/T/CCPA 35—2022 和《超高性能混凝土现场浇筑施工技术规程》T/CBMF 128/T/CCPA 23—2021 已经发布，本规程旨在对 UHPC 喷射施工的基本规定、材料、试配和试喷、施工、安全环保措施及质量检验进行规定，规范和指导我国 UHPC 的喷射施工，提高 UHPC 喷射施工的规范化和标准化水平。

（二）制定标准的原则

本文件按照《工程建设标准编写规定》（建标〔2008〕182号）的规定起草编写。编制的基本原则为简洁实用、国际先进和不限创新。

（三）标准主要内容与条文说明

本规程共分 8 章和 3 个附录，主要内容为：1 总则；2 术语与符号；3 基本规定；4 材料；5 试配和试喷；6 施工；7 安全环保措施；8 质量检验；附录 A~附录 C。

下面将本规程中无法展开说明的，有关编制理念、目的和依据等内容，进一步解释与说明（按规程的 8 个部分和条文顺序说明）。

1 总则

1.0.1 喷射超高性能混凝土技术在我国混凝土结构加固、支护和防护体系以及构件预制等方面得到了广泛应用，在技术上有许多新的发展，也取得了良好的技术经济效果。

但目前喷射混凝土相关标准中，少有涉及强度超过 100MPa 的超高性能混凝土，且没有专门的喷射超高性能混凝土施工技术的行业标准或国家标准指导其生产与应用，限制了超高性能混凝土在喷射施工中的应用。本规程为喷射超高性能混凝土技术的应用在材料、施工与验收规定等方面提供成套技术成果，为规范、引导喷射超高性能混凝土技术在建筑应用的良性发展奠定基础，推动了我国新材料、新工艺、新技术、新设备的发

展，具有广阔的工程应用前景及重要的工程意义。

1.0.2 喷射超高性能混凝土适用面很广，适用于新建、改扩建与加固的房屋建筑、市政、公路、桥梁隧道、水利水电、港口航道、井巷、采矿、地下工程、防爆工程、边坡基坑以及预制构件等工程，但不限于此。喷射超高性能混凝土具有加快施工进度、强度增长快、施工不受场地条件限制等特点，在结构加固、支护和防护体系以及构件预制等方面具有广泛的应用前景。支护体系主要包含了边坡、基坑以及隧道与地下工程支护，防护体系主要包含了混凝土防水、防腐以及防锈蚀处理，构件预制主要包含了薄壳构件和异型构件的预制。

1.0.3 本条规定了本规程与其他标准、规程的关系。喷射超高性能混凝土的应用涉及不同的工程类别以及相关的国家标准或行业标准。在工程应用中，本规程作出规定的，按本规程执行；未作出规定的，按国家现行相关标准执行。

2 术语

2.0.1 本条主要根据 EFNARC 标准《European Specification for Sprayed Concrete》、行业标准《喷射混凝土应用技术规程》JGJ / T 372-2016、团体标准《超高性能混凝土预混料》T/CBMF 96—2020/T/CCPA 20—2020 和超高性能混凝土以及喷射混凝土工艺特点对喷射超高性能混凝土进行定义。超高性能不只局限于强度性能指标，但本规程只包括强度 100MPa 以上的喷射超高性能混凝土。

2.0.2 根据触变剂的功能和使用特点对触变剂进行定义。

2.06~2.07 根据喷射超高性能混凝土的功能形式定义了结构作用型和非结构作用型两种作用方式。

2.0.8 根据行业标准《喷射混凝土应用技术规程》JGJ / T 372-2016 抗弯强度测试中的残余抗弯强度与极限抗弯强度的比值定义了抗弯强度残余率，用来表征喷射超高性能混凝土破坏后的残余抗弯性能。

3 基本规定

3.0.1 超高性能混凝土的原材料种类虽与传统水泥基材料大体相同，但在原材料选用、配制技术、原材料性能和质量控制方面都有很高要求，在此基础上才可能稳定地获得预期的“超高性能”。生产中，需要严格控制原材料质量、性能的稳定性的稳定性，包括所有颗粒原材料粒径分布稳定性以及组成稳定性或配料准确性，保证颗粒堆积体密实度的稳定性。这是实现超高性能混凝土质量和性能稳定的关键。因此，工程喷射施工宜使用预混料产品生产制备超高性能混凝土，可大幅度降低现场质量控制难度。对于用量较大的

工程，在现场建立完备的生产与质量控制系统经济性可行，且原材料供应和质量稳定，可不采用预混料，现场直接使用原材料配制生产喷射超高性能混凝土。

3.0.2 喷射超高性能混凝土工程施工前需要做充足的准备工作和预演工作，特别是在没有超高性能混凝土喷射施工经验时，进行试拌和试喷是必不可少的施工准备工作，检验所使用喷射超高性能混凝土拌合物的施工性能、施工装备和施工工艺的适用性以及检验现场喷射结构的质量。

3.0.3~3.0.4 施工管理的基本要求与现行行业标准《喷射混凝土施工技术规范》JGJ/T 372-2016 相同。需注意的是，与普通喷射混凝土相比，喷射超高性能混凝土粘度大、泵压和风压高，操作难度更大，施工前应做好人员培训、技术复核和安全交底工作，现场的安全防护措施需更加完善。

4 材料

4.1 原材料

4.1.3 钢纤维具有较好的抗拉和抗弯能力，适合用于对弯拉强度和结构受力有要求的结构作用型，掺量过高易造成纤维结团堵管；非金属纤维具有较好的防腐蚀性能，适合用于对防腐有要求的非结构作用型，掺量过高易造成纤维结团堵管。

4.1.5~4.1.6 由于喷射超高性能混凝土自身黏聚性好，粘度大，可依靠混凝土自身的屈服应力实现挂壁，在工艺上有加触变剂和促凝剂两种方式可进行喷射施工。触变剂是在超高性能混凝土拌合时加入，通过增大超高性能混凝土喷射后挂壁的屈服应力实现不掉落，在使用时，触变剂掺量一般不超过 10%，超掺会引起孔隙率增大，抗压强度降低；促凝剂是在喷枪口加入，通过使超高性能混凝土快速凝结硬化实现不掉落，在超高性能混凝土的低水胶比中掺量不超过 6%，超掺会造成混凝土粉化。

4.2 拌合物性能

4.2.1 掺触变剂和掺促凝剂的喷射超高性能混凝土在拌合物性能上要求不一样，掺触变剂的喷射超高性能混凝土拌合物要求小坍落度来防止喷射完成后浆体流淌，但坍落度过小影响泵送性能，建议不小于 80mm；掺促凝剂的喷射超高性能混凝土拌合物要求大坍落扩展度便于泵送施工，但坍落扩展度过大易导致枪口淌浆，建议不大于 650mm。

4.3 力学性能

4.3.2 为保证喷射超高性能混凝土试件的性能与实际工程中喷射超高性能混凝土性能接近，制备混凝土力学性能的试件需在施工现场进行大板喷射，并在喷射大板上切割或钻芯获得，严禁直接装模。由于喷射超高性能混凝土中含有大量纤维，原喷射大板为

一面开口的长方体结构，在喷射过程中靠近四个侧面的位置易形成空腔，降低成型质量，外开的倒 T 型设计可以有效避免空腔形成。

4.3.3 喷射超高性能混凝土抗压强度除应进行 28d 强度测试，有早期强度要求时，喷射超高性能混凝土应进行早期强度测试。1d 早期强度试件可直接通过切割或钻芯取得，但特殊及重大工程对早期强度的要求更为严格，欧美和日本等国规定喷射混凝土的早期强度除 1d 强度外，尚应测试 3h 和 8h 强度，此时喷射混凝土无法进行切割或钻芯，需采用贯入法检测，试验方法应按照现行团体标准《喷射混凝土抗压强度测定方法 贯入法》T/CBMF 273-2024/T/CCPA 50-2024 执行。

4.3.4 抗压强度等级，按照立方体抗压强度标准值，每 20MPa 为一个等级。沿用现行团体标准《超高性能混凝土基本性能与试验方法》T/CBMF 37-2018/T/CCPA 7-2018 的相关规定，采用边长为 100 mm 的立方体试块作为 SUHPC 立方体抗压强度的标准试件。强度等级的保证率与普通混凝土一致，取为 95%。当立方体抗压强度标准值处于两个强度等级之间时，抗压强度等级取低于其立方体抗压强度标准值对应的等级，且按该强度等级对应的立方体抗压强度标准值进行其他抗压特征值的计算。

4.3.5 参考现行团体标准《超高性能混凝土基本性能与试验方法》T/CBMF 37—2018/T/CCPA 7—2018 的相关规定，结合 SUHPC 的抗拉强度试验数据，三个抗拉强度等级分别命名为 UT4.0、UT6.0、UT8.0，对应的抗拉强度标准值为 4.0 MPa、6.0MPa 和 8.0MPa。

4.3.6 粘结强度是保证喷射超高性能混凝土与受喷面共同承担和传递受力的基础。本条主要依据《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》GB50086-2015 来进行粘结强度的设置。

德国规定用于隧道、洞室等地下工程喷射混凝土粘结强度 6 个试件的平均值在 1.5MPa 以上，日本要求最小值不得低于 1.0MPa。本规程根据现行行业标准《喷射混凝土应用技术规程》JGJ/T 372-2016 的相关规定，对喷射超高性能混凝土与岩石和混凝土基底的粘结强度进行了规定。

4.3.7 抗弯强度对于喷射超高性能混凝土而言十分重要，同时也是检测是否为喷射超高性能混凝土的一个重要依据。抗弯强度决定了喷射超高性能混凝土横截面的首次发生断裂的负荷，韧性决定负荷重新分布的特性。在较大的含黏土的剪切带、松动岩石区和易产生高应力的岩石区等特殊情况下，喷射超高性能混凝土的韧性和抗弯强度极为重要。

目前，欧美国家对喷射混凝土的弯曲韧性测试方法可分为梁试件弯折试验和板试件弯曲试验。梁试件弯折试验常用来测定混凝土的极限强度、极限应变以及残余抗弯强度等级等。本规程根据现行行业标准《喷射混凝土应用技术规程》JGJ/T 372-2016 的相关规定，在此基础上对抗弯强度残余率进行了定义，用来表征喷射超高性能混凝土首次破坏后的残余抗弯性能。

4.4 长期性能和耐久性能

4.4.2 喷射成型试件需要切割加工成规定尺寸，无法按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082 中规定的方法进行测试头预埋，采取同配比喷射超高性能混凝土浇筑完成，试验方法按现行国家标准《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082 执行。

4.4.3 毛细吸水速率不单可以用来测试分析实验室标养试件及钻芯试件，也可以用来评价决定钢筋混凝土构件保护层的真实保护性能，进而可以广泛用来评价混凝土材料、钢筋混凝土构件抵抗环境作用的能力。以 ISO 标准 ISO 15148:2002/Amd2016、美国材料与试验协会标准 ASTM C1585-20 为典型代表的多个国际标准，均已建立了毛细吸水速率的标准测试方法。本规程参考国内外标准的规定，制定了喷射超高性能混凝土毛细吸水速率的试验方法以及等级划分方式。

5 试配和试喷

5.1 一般规定

5.1.1 根据项目设计要求、参考现行团体标准《超高性能混凝土预混料》T/CBMF 96-2020/T/CCPA 20-2020 中表 5 和本规程第 4 章中的规定，确定性能检验项目和试验方法。其中，喷射超高性能混凝土拌合物适宜的工作性等级应由施工方确定。需要结合现场喷射施工的结构、施工方法与装备、施工经验以及喷射超高性能混凝土所含纤维种类与规格等因素，选择确定适宜的工作性等级，既要易于泵送，同时又要易于喷射施工。

5.2 试验室试配

5.2.1 常见普通混凝土试验室单卧轴搅拌机，转速低、搅拌桨叶直径较小，故搅拌桨叶的剪切线速率较低，用于搅拌超高性能混凝土可能需要较长的搅拌时间。搅拌不均匀或不能使微细颗粒组分充分分散，是试验室搅拌超高性能混凝土常出现的问题，需要避免。为保证超高性能混凝土拌合物的匀质性，每盘的搅拌量不宜小于 30L。

5.2.2 环境温度变化会导致工作性经时损失和凝结时间变化，故需要在相应条件下进行测试，从而确定是否满足施工需求。

5.3 试验性喷射

5.3.1~5.3.2 与普通喷射混凝土拌合物相比，超高性能混凝土喷射拌合物黏聚性好、黏度较大且因含有纤维更为黏滞，并且喷射施工要考虑对纤维留存率和取向性的影响，所以控制施工质量的难度有所增加。试验性喷射是正式施工前的准备和演练，既检验所配制的喷射超高性能混凝土拌合物工作性是否符合泵送和喷射要求，也需要通过喷射成型大板来检验混凝土喷射成型硬化后的性能，同时也可检验各施工工序方法、装备、工具和施工节奏是否合理，预先发现问题，完善和优化施工方案。

6 施工

6.1 一般规定

6.1.1 喷射超高性能混凝土施工操作应该按工程要求编制专项施工方案，并且由专业人士与仪器设备进行施工。施工前编制喷射超高性能混凝土专项施工方案，包括：施工前的准备工作、设备进场和安置、混凝土制备和运输、配置相应的专业人员、现场的喷射作业安排和混凝土养护等。

6.1.2 喷射超高性能混凝土的质量受喷射手的影响很大，喷射施工操作应选择具有丰富经验的喷射手。在喷射超高性能混凝土施工前，应对施工人员进行培训，且喷射手进行试喷混凝土性能合格后方可进行喷射超高性能混凝土施工。

6.1.3 在运输及喷射过程中加水会直接影响喷射超高性能混凝土的水胶比，将无法控制喷射超高性能混凝土的施工及后期性能。

6.1.4 为保证喷射超高性能混凝土的质量，应保证其前一道工序已完成及验收合格后，方可进行喷射超高性能混凝土施工。

6.2 施工机具

6.2.1 为了保证喷射超高性能混凝土质量，减少施工中的回弹率和粉尘浓度，提高作业效率，喷射设备的选择应参考工程尺寸和结构、基底条件、混凝土配合比和喷射数量等施工条件，选择可获得良好施工性和经济性的喷射设备。

6.2.2 本条文对喷射设备的性能进行了规定。为保证喷射超高性能混凝土的质量，减少施工中的回弹率和粉尘，提高作业效率，对喷射设备的生产能力、水平输料距离和竖向输料距离进行规定。

6.2.3 喷射超高性能混凝土施工应当配置专用的空气压缩机，压缩机的排风量决定了喷射设备的输送能力，因而稳定的风压和足够的风量，是喷射作业顺利进行和混凝土密实的保证。

6.2.4 喷射超高性能混凝土施工中，输送混合料的塑料管管壁经受骨料的反复磨损和压力，为了保证施工的安全并满足正常的施工要求，需要对输料管的承压能力进行规定，其管径应满足输送设计最大粒径骨料的要求。

6.3 施工准备

6.3.1 清除加固工程表面污物和其他装饰层，指的是对已有旧建筑物表面的处理，这些建筑物，在长期使用中，表面会粘有灰尘等污物，如不加清除，会严重影响新旧混凝土的粘结，降低新旧混凝土的整体受力性能；当建筑物表面有抹灰层时，在加固之前也必须彻底铲除，对混凝土表面尚应进行凿毛处理，增加喷射混凝土与原结构面的粘结强度；

参照标准 EFNARC 《European Specification for Sprayed Concrete》，混凝土发生碳化、氯离子超标和钢筋发生松脱情况下，对混凝土表面进行清除，减小已受侵蚀和污染的混凝土对新喷射混凝土以及两者之间黏结性的影响；被加固的结构物表面有渗漏水，会影响喷射质量。渗漏严重时，混凝土会被冲刷掉。因此，凡有渗漏水的结构，在喷射混凝土施工之前均要做好防水处理。严重渗漏部位可埋设导水管或截水槽等将水引出。渗漏轻微的用掺有促凝剂的混凝土喷射可取得较好的效果。

6.3.2 将喷射超高性能混凝土施工作业区的障碍物进行清除，无法清除时应采取措施对障碍物进行遮挡，以保证正常的施工。作业面若有浮石等杂物，在喷射混凝土时会造成局部缺陷，影响整体强度，墙角的杂石可能导致喷层失脚的情况，产生严重不良后果；对易潮解的岩层，不应用水清洗。

采用人工喷射时，当喷射面与喷射手具有一定的距离时，为保证喷嘴与喷射面的距离在 0.5m~1.5m 之间，应搭设工作台架。工作台架应搭设牢固，并配有安全栏杆，其宽度宜为 2.0m 左右，距作业面的距离宜为 0.5m~1.5m，以保证喷射作业方便灵活和安全。喷层厚度是评价喷射超高性能混凝土工程质量的主要项目之一。实际工程中，易发生因喷层过薄而引起混凝土开裂、离鼓和剥落现象或是过喷造成材料浪费。因此，施工中必须控制好喷层厚度。一般可利用外露于喷射面的锚杆尾端，或埋设标桩等方法来控制喷射超高性能混凝土厚度，也可在施工中随时检查喷层厚度，以防止距离参照物太远而出现区域厚度差距，造成平整度起伏。

当喷射司机和喷射手不能直接联系，为保证两人之间正常的沟通操作，需配备联络设备；喷射作业前检查，可防止作业中途发生意外。

6.3.3 对于异形结构工程，喷射超高性能混凝土需直接喷射至模板上，模板需具有

足够的强度和刚度，能可靠地承受喷射超高性能混凝土的重量及施工过程中所产生的荷载，且模板的形状和尺寸需与异形结构相同。

6.4 拌制与运输

6.4.1 超高性能混凝土可以由不同的材料组成达到相同的强度指标，各种原材料掺会影响各自的材料组成配合比，造成质量隐患；超高性能混凝土中的预混料或直接拌制用的粉体原材料等都会与水发生反应，若被雨水淋湿或者受潮，可能发生预水化，影响混凝土的速凝效果与后期强度；外加剂应单独存放，防潮、防晒、防冻，使用前应搅拌均匀。

6.4.2 喷射超高性能混凝土比普通混凝土的材料组成更为多样，材料之间互相影响的配比更为细致，故在普通混凝土的计量偏差上减半。

6.4.3 预拌混凝土使用的强制式生产型搅拌机通常具备较好的搅拌分散效率，适用于超高性能混凝土生产。不同类型、构造和功率的生产型搅拌机的搅拌效率有一定差异，适宜的搅拌时间也会不同。当纤维掺量较高、拌合物稠度较大时，搅拌机需较大的功率。为避免超载，条文规定一次搅拌量不宜大于搅拌机额定搅拌量（对普通混凝土）的70%。

对于使用高长径比纤维的喷射超高性能混凝土，若纤维没有散开投入搅拌机，依靠搅拌散开纤维团或者耗费时间，或者无法完全解散，可能会存在纤维结团的现象。因此，在投料前宜设置散开纤维团的下料装置。

日本《超高性能混凝土结构设计与施工指南》中提到，在搅拌超高性能混凝土时，搅拌机有时承受高负荷，因此应减少每次的搅拌量。根据以往的试验数据表明，每次搅拌体积常为搅拌机公称容量的50%~70%范围内。每次搅拌的最大体积应根据现场实际使用搅拌机的搅拌容量来确定。瑞士《超高性能混凝土材料、设计和应用》中提到，超高性能混凝土干组分的总体积大约是新拌超高性能混凝土的2倍。总的来说，拌合量宜为搅拌机容量的一半，最大应不超过其标称容量的2/3。残留附着在搅拌机、料斗上的超高性能混凝土，粘结较牢固，须在凝结前及时清理干净，硬化后清除难度很大。

6.4.4 混凝土搅拌运输车罐内积水或者积浆会导致超高性能混凝土的配合比失真。充足的生产运输能力保证喷射的连续性，有利于避免超高性能混凝土因长时间静止而堵管和因喷射间断结构产生薄弱区。

6.5 喷射作业

6.5.1 按区域喷射利于控制喷层厚度，由下至上喷射可以使下部混凝土对新喷混凝

土进行支撑，且上部混凝土的小幅度回流能填充喷射盲区，先平凹陷处是为了防止此处喷浆厚度过大造成离层。终凝后进行喷射是为了获得具有一定强度的受喷面，喷射间隔时间过长，在混凝土表面可能粘有回弹料等污染物影响两层混凝土之间的粘结力，所以宜用风水清洗为减少第二层喷射混凝土对第一层喷射混凝土产生影响，第二次喷射应在第一次终凝后再进行。且为增加两层混凝土之间的粘聚性，间隔时间超过 1h 后，应对表面进行湿润或用压缩空气清扫待喷面。

过大的一次喷射厚度由于重力与粘结力的关系会造成密实度不足的情况。当喷射混凝土厚度过大，为保证混凝土的稳定性，防止混凝土掉落，应采用分层喷射。一次喷射的厚度受到喷射工艺、喷射方向、流变剂或促凝剂掺量等因素的影响，应根据实际情况确定一次喷射厚度。

喷射距离以混凝土最小回弹率和最高强度确定，一般以能看清楚喷射情况，束料集中回弹最小为宜，0.5m~2m 之间，喷射冲击力适宜，表现为一次喷射厚度大，回弹率低和粉尘浓度小。

喷射超高性能混凝土工作时温度低于 5℃，夜间混凝土内水易结冰，高于 35℃会造成水分蒸发速率过快，失水严重，影响后期强度。

6.5.2 建筑物用喷射超高性能混凝土加固的厚度通常较薄，一般在 30 mm~100 mm 范围内，为了能较准确地控制喷射超高性能混凝土的厚度，一般可采用外露于构件表面的模板宽度作为控制混凝土厚度的标志；加固结构新旧界面的粘结强度是喷射超高性能混凝土与旧结构物共同受力的基础，从提高加固构件新旧部分共同工作的角度，对新旧材料结合面上采取的措施作出了规定，以保证修复加固的效果；第 4 款要求模板支设应牢固可靠，以避免在喷射超高性能混凝土施工中，由于模板支设不牢，在喷射混凝土的冲击下晃动，影响喷射作业的顺利进行和加固质量。

6.5.3 施工顺序与开挖顺序相适应，利于施工效率，并且可以减少围岩暴露时间，保持稳定；喷射超高性能混凝土支护能承受岩石爆破荷载而不破坏的时间，经多次现场试验为终凝后 3h；厚度较大部位的支护向厚度较小部位延伸一段长度，以保证不同稳定性的围岩交接处压力的传递。

6.5.4 根据薄壳结构的不同形状，规定其不同的施工作业顺序是为了保证施工荷载的均匀性，不使模板发生异常变形。但无论哪种形状的壳体，均应自下而上，即从壳体底部向顶部推进，采用这种喷射作业顺序可以避免由于施工作业人员对已绑扎好的钢筋网的损坏。同时，在施工中应特别注意做好回弹物的清理工作。

薄壳结构的厚度一般都是变化的，在喷射作业中控制好壳体不同部位的厚度十分重要，本条款规定控制喷射超高性能混凝土厚度的方法，为能较准确地控制好喷射超高性能混凝土的厚度，用针探法随时检查喷射超高性能混凝土的厚度更方便。

6.5.6 本条文对加固工程等对表面有要求的喷射超高性能混凝土修整进行了规定。因为表面存在纤维，无法直接修面，采取同配合比的 UHPC 基体喷涂找平；基体找平后还需要修面的，修面应在喷射超高性能混凝土初凝后进行，若在喷射后马上进行修整会破坏混凝土的内部结构及其与原结构的粘结，而当时间过长，混凝土达到终凝后再进行修整，则会给修整工作造成困难，又会破坏混凝土的强度。

6.6 养护

6.6.1 喷射超高性能混凝土中由于胶凝材料用量较大以及掺有触变剂和促凝剂，其收缩变形要比现浇混凝土大。因此，喷射超高性能混凝土施工后，应对其保持较长时间的喷水养护。养护的目的是保证喷射超高性能混凝土强度的正常增长和减小收缩开裂。因为喷射超高性能混凝土厚度较小，水分更易丧失，当所需水化水不能得到及时补充时，将使混凝土强度不能正常增长，收缩变形大为增加。因此，喷射超高性能混凝土施工后必须加强养护。一般情况下湿养护的时间不能少于 7d，重要工程不能少于 14d。

6.6.2 喷射超高性能混凝土喷射上去释放能量以及水化热等放热会让冰化水渗入混凝土中，影响强度；气温低于 5 度时，混凝土水化反应缓慢，强度上升很慢，若继续喷水养护，混凝土温度更低，不利于强度发展，且冬季气温低于五度，那么夜间气温可能低至零下；防止结冰，影响泵送堵管。

7 安全与环保

7.1 安全技术

7.1.1 喷射超高性能混凝土施工前应根据具体工程情况，进行设计安排，能有效减少工程事故发生。

7.1.2 经验表明，由于危石清除不彻底而发生工伤事故的情况时有发生，因此，在施工前认真检查和处理作业区（顶板、两边和工作面）的危石特别重要。由于危石未能全面清除，设备工具被砸坏，工伤事故屡见不鲜，故本条文作了明确规定。

7.1.3 喷射设备、水箱、风管和注浆罐等都属于承受压力的设备，使用前需做承压试验，防止发生崩裂事故。此条文保证喷射超高性能混凝土具有稳定足够的压力喷射，且防止设备压力异常发生爆炸。

7.1.4 因喷射超高性能混凝土输料管长度较长，在施工过程中应及时注意输料管状

态，以防止局部堵塞，造成压力过大软管断裂，喷料四处乱泄危害周边人员安全的情况。出料弯头和输料管磨穿及管路连接处的松脱现象也时有发生，如不及时检查更换，十分危险。在喷射过程中，输料软管拖拉或折弯易出现堵管或是脉冲；为保证不影响喷射质量，喷射作业面转移时，供风和供水系统需要同步的转移。

7.1.5~7.1.6 喷射超高性能混凝土在喷射时具有一定的压力，且原料中的砂石及纤维在压力喷射下若不慎，对人会造成伤害。超高性能混凝土喷射施工过程中所用的钢纤维是直径为 0.15mm~0.3mm 的金属丝，其两端为针状较锋利，容易扎伤人。因此，在搅拌操作、上料喷射及处理回弹物时，应采取措施防止钢纤维扎伤操作人员。

7.2 环保要求

7.2.1 对未污染的喷射超高性能混凝土的回弹料应回收利用，但其对喷射超高性能混凝土的施工性能有较大影响，因而严禁将回弹物掺入喷射超高性能混凝土拌合料中。

7.2.2~7.2.3 作业区粉尘会对施工视野产生影响，且吸入粉尘会危害作业人员健康，喷射作业区应具有良好的通风和有效地降低粉尘量的措施。依据国内外容许的最高粉尘浓度限制，此条文对作业区粉尘浓度做出一定规定，并提出了相关降尘措施。施工区域位于居民区时，需采取降噪措施，如：使用低噪声的施工工具，搅拌站、空压机、焊接棚等噪声较大处设置隔声屏，并加大施工现场管理制度，合理安排施工时间，严格控制夜间施工等，使得施工噪声不超过所在地区的环境噪声标准，降低施工噪声对周围环境的影响。

8 质量检验

8.0.3 本条文对不同工程中喷射超高性能混凝土的质量检验项目要求进行规定。不同工程对喷射混凝土的性能要求不同，目前国内大多标准对喷射混凝土的性能要求仅为强度，为保证喷射混凝土的质量，本规程参考日本土木学会编制的《喷射试验方法标准》JSCE-F565-2005 的基础上制定表 7.1.3 的性能要求，其中必检项目为相应工程用喷射混凝土必须检验项目，可检项目根据不同工程的设计要求进行选择。

8.0.4~8.0.6 对喷射超高性能混凝土拌合物检验项目和检验地点、超高性能喷射混凝土厚度及强度检验频次、不同工程喷射超高性能混凝土厚度的检测方法和质量评定要求、混凝土抗压强度质量评定方法进行了规定。

三、主要试验（或验证）情况分析

在编制本规程的过程中，通过系列试验和验证工作以确保规程的科学性、实用性和安全性。以下是对这些试验和验证情况的综合分析。

（一）试验目的与设计

本规程的试验旨在评估超高性能混凝土在喷射施工中的应用效果，包括其工作性能、力学性能以及耐久性能等。

（二）试验材料与配比

试验所用的 SUHPC 材料包括细骨料、硅酸盐水泥、矿物掺合料、高效减水剂、无碱促凝剂、触变剂等。配比设计考虑了材料的流动性、强度发展和耐久性，通过多次试验优化得到了最佳配比方案。在配比设计中，也参考了相关领域的配合比设计原则，以实现材料性能的最优化。

（三）工作性能

工作性能试验主要包括坍落度、扩展度、经时流动度损失测试。试验结果表明，在使用触变剂时，坍落度不宜小于 80 mm，在使用无碱促凝剂时，扩展度不宜大于 650mm，经时坍落度损失可根据设计要求和实际需求使用高性能减水剂进行调节。图 3-1 显示了坍落度 100mm 以及扩展度 500mm 的超高性能混凝土。



图 3-1 超高性能混凝土工作性能测试

（四）力学性能试验

力学性能试验主要包括抗压强度、抗拉强度、抗弯强度和粘结强度的测试。图 3-2 至 3-4 显示了力学性能测试试样的喷射切割以及测试的过程。其中，抗压强度测试使用三思纵横 YAW-3000 压力试验机进行测试，加载速率为 1.2MPa/s；抗拉强度和抗弯强度测试使用三思纵横 UTM5305SYXL 万能试验机进行测试，加载速率都为 0.2mm/min；粘

结强度测试使用华龙 WAW-1000 万能试验机进行测试，加载速率为 0.03KN/s。试验结果表明，SUHPC 具有优异的力学性能，其抗压强度远高于传统喷射混凝土，也高于同配比的现浇 UHPC，抗弯性能由于纤维的分布变化也得到了一定提升。尤为重要的是，SUHPC 与岩层或既有混凝土的粘结强度由于喷射压力和 UHPC 自身粘性得到了显著提升，远高于现有标准的要求，确保了加固与支护结构的整体性和安全性。



图 3-2 超高性能混凝土大板喷射



图 3-3 抗压强度、抗弯强度、抗拉强度和粘结强度测试试验切割成型

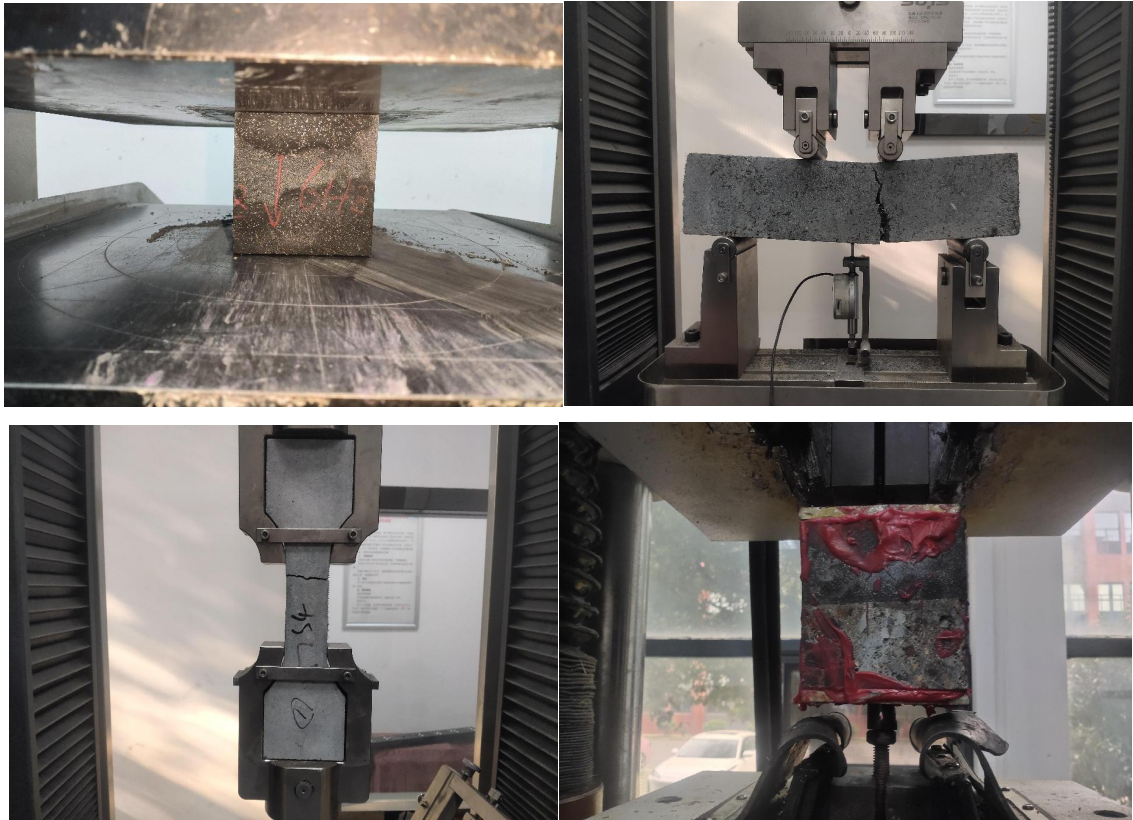


图 3-4 抗压强度、抗弯强度、抗拉强度和粘结强度测试过程

（四）耐久性试验

耐久性试验主要考察 SUHPC 在不同环境条件下的性能表现，包括收缩、抗冲磨、抗渗性和耐化学侵蚀性。试验结果证实了 SUHPC 具有卓越的耐久性，能够适应各种恶劣环境，延长结构的使用寿命。在耐久性试验中，借鉴了混凝土的耐久性评价方法，进一步验证了 SUHPC 的耐久性能。图 3-5 为根据《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》GB/T 50082-2009 中 RCM 法进行 SUHPC 的抗氯离子渗透性能测试。

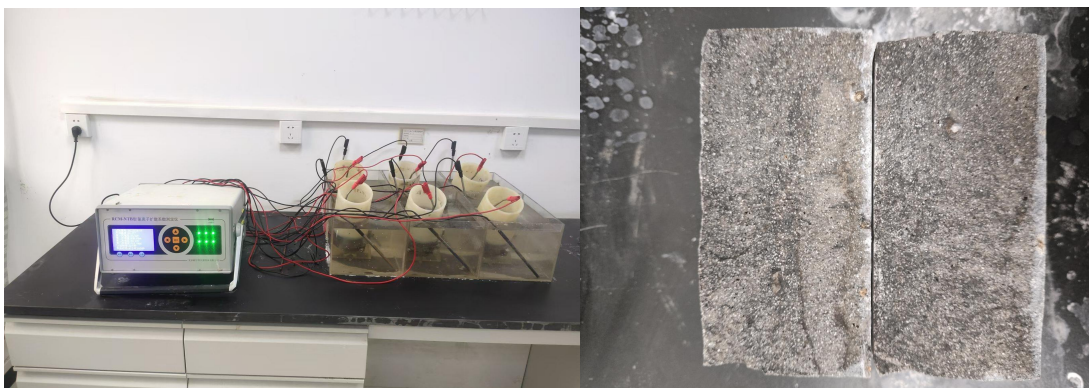


图 3-5 采用 RCM 法进行抗氯离子渗透性能测试

（五）现场验证

除了实验室内的试验外，我们还对 SUHPC 技术进行了现场验证。通过在基坑支护

和海工混凝土表面防护等工程上应用 SUHPC 技术，收集现场使用中反馈的各项数据，验证了规程的可行性和有效性。图 3-6 为 SUHPC 在杭州湾跨海大桥湿接头防护和青岛栈桥景区建筑物修复现场应用。



图 3-6 (a) 杭州湾跨海大桥湿接头防护 (b) 青岛栈桥景区建筑物修复

(六) 试验结论

综合分析试验结果，我们可以得出以下结论：SUHPC 作为一种 UHPC 新型施工工艺，在加固既有混凝土结构和隧道支护等方面具有明显优势。其优异的力学性能和耐久性能，以及与既有界面的良好粘结性，为 SUHPC 应用于加固、防护和支护工程中提供了巨大的优势。本规程的制定将为 SUHPC 技术推广和使用起到重要的作用，为其满足安全可靠、经济合理提供科学依据和操作指南。

通过上述试验和验证，本规程编制组将确保《超高性能混凝土喷射施工技术规范》的科学性和实用性，为 SUHPC 在加固、防护和支护工程领域的应用及推广提供坚实的技术支撑。

四、标准中所涉及的专利

本规程中未涉及专利与相关的知识产权。

五、产业化、推广应用论证和预期达到的经济效果等情况

UHPC 从发明至今，经过四十多年的研究与发展已进入到实用化阶段，它也使得水泥基复合材料向着高强、高韧、高耐久方向不断发展。在过去二十多年，我国一些高校、科研机构、生产和施工单位在 UHPC 的制备、性能表征与工程应用方面做了大量工作。

UHPC 如今是中国水泥基材料研究、应用、创新、发展最具活力的领域，伴随着工程应用的增长，UHPC 业已成为工业化生产和商业化供应的工程材料，产品类型和应用领域在不断扩展，是一个初具规模的新兴产业，将促进一些水泥制品、工程结构升级换代，向更高质量发展。喷射 UHPC 是一种区别于浇筑 UHPC 的施工工艺，既有 UHPC 材料的高强高耐久性，又有无模板施工的便利性，在既有结构物加固、防护以及支护工程的衬砌等工程中具有很好的应用前景，本规程的参编单位都在致力于该技术的发展、进步与壮大。

— **既有结构物加固与防护：**相比目前传统加固方法（增大截面法、贴碳纤维布法、外包钢板法等），虽然 SUHPC 材料成本大约 6000-8000 元/m³ 水平（含 2.2 吨干混料和 1.5% 体积钢纤维），但综合考虑工期、人工、模板、材料等，工程总造价节约 10% 以上，且免后期维护（SUHPC 具有多重功效，包括提高结构强度刚度、抗渗防水、耐磨、为混凝土结构提供耐久保护等），生命周期使用成本最低；相比现浇 UHPC 加固，喷射施工省去了支模工序，缩短了施工周期，同时对 UHPC 凝结时间和早期强度发展的调控更为便利，更适合支模困难或对加固有时效要求的应用场景。

— **隧道衬砌：**目前国内隧道设计仍以新奥法为主，在软弱围岩三车道四车道等大跨度隧道施工时，仍以 CD 法、CRD 法、双侧壁导坑法等分部开挖法为主，导致施工工效低，人员投入大，无法进行机械化、装配化施工，临时支撑多资源损耗大。

通过采用 SUPHC 新型高性能材料进行隧道结构设计及工法创新，可通过加强超前支护及初期支护刚度，增加初期支护荷载分担比例，优化临时支撑并减少二次衬砌厚度，二次衬砌可采用预制装配化施工，减少二衬施工安全隐患及质量通病，整体达到提高施工工效、减少人员投入、减少隧道开挖断面大小和资源浪费的目的，形成具有中国特色的新材料、新设计理念和新施工工法。采用以上理念进行软弱围岩大跨度隧道设计及施工，可实现高度机械化作业，减少人员投入，提高工效一倍以上，节约总造价 10%~20%，社会效益显著应用前景广阔。

六、采用国际标准和国外同类先进标准情况，与国际、国外同类标准水平的对比情况，国内外关键指标对比分析与测试的国外样品、样机的相关数据对比情况。

本规程学习、参考和借鉴的标准规范或技术指南包括：国外标准 ACI 506.1R 《Guide

to Fiber-Reinforced Shotcrete》、ACI 506.R-05《Guide for Specifying Underground Shotcrete》、BSEN 14487-1《Sprayed concrete-Definitions-specifications and conformity》等，国内标准 GB 50086《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》、JCJ/T 372《喷射混凝土应用技术规程》、DB 50/T 1391《公路隧道湿喷混凝土施工技术规范》、T/CBMF 96/T/CCPA 20《超高性能混凝土预混料》、T/CBMF 128/T/CCPA 23《超高性能混凝土现场浇筑施工技术规程》等。

本规程制定过程，在原材料和 UHPC 质量控制方面分析借鉴了国内标准 GB/T 50082《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》、T/CBMF 96/T/CCPA 20《超高性能混凝土预混料》、T/CBMF 128/T/CCPA 23《超高性能混凝土现场浇筑施工技术规程》对 UHPC 的质量控制要求进行明确的规定，同时在本标准中首次提出了喷射混凝土中触变剂的定义和使用方式、喷射 UHPC 收缩率指标和对应的检测方法、极限抗弯强度和抗弯强度残余率等级分级方式、喷射大板成型方式、喷射超高性能混凝土回弹率测试方法（模拟测试法）等。

在喷射施工方面，国内外均无针对喷射 UHPC 相关标准，分析借鉴了美国喷射纤维增强混凝土指南 ACI 506.1R《Guide to Fiber-Reinforced Shotcrete》、英国及欧盟通用标准 BSEN 14487-1《Sprayed concrete-Definitions-specifications and conformity》和国内 JCJ/T 372《喷射混凝土应用技术规程》对现场 UHPC 喷射施工质量控制提出的一些具体要求，在施工质量控制方面向先进水平看齐。结合我们所取得的工程施工经验、研究成果，以及我国的标准规范体系，针对喷射 UHPC 工程施工特点，在现场制备、运输、喷射及养护过程中容易发生的问题，本规程提出了细化或具体要求，避免使用错误的方法和错误操作，确保施工质量。首次提出了适应于喷射超高性能混凝土的设备要求、表面修整方法以及养护方法等。

因此，本标准保持了与国际、国外同类先进标准规程基本一致，是至今国际国内 UHPC 喷射施工技术和质量控制经验的总结。与国际、国外同类标准水平的对比情况和国内外关键指标对比分析见表 2，在考虑具体国情的同时，也体现了本标准的先进性；未进行国外样品、样机的测试和对比。

表 2 本标准与国内外相关标准的主要技术指标对比

名称	项目	ACI 506.1R	BSEN 14487-1	JCJ/T 372	本标准 T/CBMF XX—202X/T/CCPA XX—202X
原材料	触变剂	无	无	无	提出触变剂定义与使用掺量，见 2.0.2 和 4.1.5
性能	喷射大板	无	无	350mm*450mm*120 mm	提出喷射大板为 450mm*450mmT 型板，可防止边角出现明显孔隙，见附录 A
	抗压强度	根据设计要求	根据设计要求	≤50MPa	提出喷射 UHPC 大于 100MPa 后抗压强度分级方式，见 4.3.3
	抗拉强度	无	无	无	提出喷射 UHPC 抗拉强度分级方式，见 4.3.4
	收缩率	无	无	无	提出喷射 UHPC 总收缩率检测方法、1d 和 28d 总收缩率指标，见 4.4.2
	极限抗弯强度	无	无	无	提出喷射 UHPC 极限抗弯强度等级分级方式，见 4.3.6
	抗弯强度残余率	无	无	无	提出抗弯强度残余率定义以及等级分级方式，见 2.0.7 和 4.3.6
	回弹率测试	直接称重法	直接称重法	直接称重法	提出了模拟测试法，适用于试验检测，见附录 C
试配与试喷	试验性喷射	无	无	要求有试喷过程	提出了试喷的具体检验验证项目及要求，见 5.3.2

施工	施工机具	无	无	规定了满足普通喷射混凝土的机具要求	提出了适应于超高性能混凝土的机具要求，见 6.2
	表面修整	无	无	无	提出了喷射超高性能混凝土的表面修整方式，见 6.5.6
	养护	洒水养护	洒水养护	喷水养护	喷雾覆膜保湿养护，保湿养护时间应不少于 14d，见 6.5.1

七、本标准与现行的相关法律、法规、规章及相关标准（包括强制性标准）是否具有一致性

经广泛调研和多方面征求意见，本规程符合现行的相关法律、法规、规章及相关标准的要求。

八、重大分歧意见的处理经过和依据

无。

九、标准性质的建议说明

建议本规程为推荐性团体标准。

十、贯彻标准的要求和措施建议

尽快做好规程发布实施工作，规程颁布实施后，相关部门应做好规程宣贯培训工作，制定相应的实施方法，使本规程得以认真执行，在超高性能混凝土喷射施工应用中真正起到指导生产、保证质量、促进工艺技术水平提高的作用。

十一、废止现行相关标准的建议

无。

十二、其他予以说明的事项

无。