

钢管高性能混凝土界面黏结性能试验

应华山¹, 苏华², 黄文金¹, 张荣清¹, 尹秋雨¹

(1. 福建农林大学 交通与土木工程学院, 福建 福州 350108;
2. 福建省交通规划设计院, 福建 福州 350004)

摘要: 为研究钢管高性能混凝土界面黏结性能,进行了包括钢管壁厚、截面形式、钢材类型和钢管内表面状态 4 个参数的推出试验研究,分析了试件的试验现象、荷载-滑移曲线和界面黏结强度。结果表明,仅当试件壁厚较薄时,钢管中下部会出现 45°剪切滑移线;不同钢管壁厚试件的荷载-滑移曲线共有 3 种增长模式,均包括胶结滑移段、滑移段和摩阻段 3 个阶段;增大钢管壁厚、使钢管内表面锈蚀可以提高界面黏结强度;采用方形钢管代替圆形钢管、不锈钢管代替普通钢管对界面黏结强度有不利影响。

关键词: 界面作用;钢管壁厚;截面形式;表面粗糙度;推出试验

中图分类号: TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-4348(2022)04-0340-06

Interfacial bonding property test of high performance concrete-filled steel tube

YING Huashan¹, SU Hua², HUANG Wenjin¹, ZHANG Rongqing¹, YIN Qiuyu¹

(1. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350108, China;
2. Fujian Communications Planning & Design Institute, Fuzhou 350004, China)

Abstract: In order to study the interfacial bonding property of high performance concrete-filled steel tube, a series of push-out tests were carried out. Wall thickness, section shape, type of steel and internal surface state of steel tube were chosen for contrast parameters. By investigating the test phenomena, mode of load-slip curves and interfacial bonding strength, it was found that shear yield line with an angle of 45° will appear in the middle and lower parts of the steel tube only when tube wall thickness of specimens was small. The load-slip curves of specimens with different wall thicknesses have three growth modes, but all include cementation slip stage, slip stage and friction stage. By increasing the wall thickness and rusting the inner surface of steel tube, the interfacial bonding strength can be increased. Replacing circular steel tube with square steel tube and replacing ordinary steel tube with stainless steel tube have adverse effects on the interfacial bonding strength.

Keywords: interfacial interaction; steel tube wall thickness; section of steel tube; surface roughness; push-out tests

在钢管中填充高性能混凝土(high performance concrete,简称 HPC)的钢管高性能混凝土(high performance concrete-filled steel tube,简称 HPCFST)有钢管 RPC、钢管钢纤维混凝土等多种应用形

式。与普通钢管混凝土相比,HPCFST 具有更高的强度、延性、韧性,是一种应用前景广泛的组合结构形式^[1-2]。对于 HPCFST,温差和混凝土收缩等引起的材料变形,将在钢管-HPC 界面上产生

收稿日期: 2022-05-17
基金项目: 福建省交通运输科技项目(201905)
第一作者简介: 应华山(1997—),男,福建沙县人,硕士研究生,研究方向:组合结构。
通信作者: 黄文金(1975—),男,福建莆田人,副教授,博士,研究方向:组合结构桥梁。

复杂的界面作用力,当这种作用力超过两者的黏结强度时,会出现界面脱黏现象,导致钢管与 HPC 难以协调工作。因此,钢管-HPC 界面黏结性能是 HPCFST 发挥组合结构作用的重要条件之一。

目前,已有大量学者对普通钢管混凝土的界面黏结性能做了研究,但较少涉及 HPCFST。影响 HPCFST 界面黏结性能的主要参数有钢管内表面物理化学状态、混凝土力学性能、应力分布模式等。2009 年以来,闫志刚^[3]、黄文金和张正宾^[4-5]、魏丰科^[6]、王秋维^[7]等分析了钢管壁厚、钢纤维掺量及养护条件对钢管-HPC 界面黏结性能的影响,取得了一定的研究成果,但由于界面黏结性能影响因素较多,所得试验结果离散性大,因此,本文在文献[4-5]的基础上,继续通过试验研究 HPCFST 的界面黏结性能。

1 试验概况

1.1 设计参数

制作了 6 组共 12 根的 HPCFST 试件,见表 1,每组由两根相同参数的试件组成,试验参数包括钢管壁厚、截面形式、钢材类型和钢管内表面状态。表 1 中,试件编号的 S 指圆形普通钢钢管,RS 指方形普通钢钢管,SS 指圆形不锈钢钢管;T6、T7、T8 钢管壁厚分别为 4.31、6.28、8.24 mm;V2 指 HPC 中钢纤维体积掺量为 2%;C2 指采用 90 ℃ 高温蒸养;r 指钢管内表面出现明显锈蚀现象。试件长度均为 300 mm。圆形和方形普通钢管均采用 20#无缝管,不锈钢管采用 S304 无缝管。套箍系数的表达式为 $\theta = A_s f_y / A_c f_c$ ^[8],其中 A_s 和 A_c 分别为钢管和 HPC 的截面面积, f_y 、 f_c 为实测钢材屈服强度和 HPC 抗压强度。

表 1 试件设计参数
Tab.1 Specimen design parameters

试件编号	钢管类型	截面形状	截面尺寸 $D(B) \times t/\text{mm}^2$	管内表面	套箍系数 θ
ST6V2C2-1 ST6V2C2-2	普通钢	圆形	133×4.31	—	0.38
ST7V2C2-1 ST7V2C2-2	普通钢	圆形	133×6.28	—	0.57
ST8V2C2-1 ST8V2C2-2	普通钢	圆形	133×8.24	—	0.78
RST7V2C2-1 RST7V2C2-2	普通钢	方形	100×4.73	—	0.57
SST7V2C2-1 SST7V2C2-2	不锈钢	圆形	133×6.28	—	0.63
ST7V2C2r-1 ST7V2C2r-2	普通钢	圆形	133×6.28	锈蚀	0.57

1.2 试件制作

制作 HPC 的原材料包括水泥、硅灰、石英砂、石英粉、减水剂、水和钢纤维,HPC 配合比见表 2。HPC 采用 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥;硅灰粒径为 0.1~0.15 μm,比表面积为 15~27 m²/g,松散容重

为 150~200 kg/m³,SiO₂ 含量为 98%;粗砂粒径为 10~20 目,中砂粒径为 20~40 目,细砂粒径为 40~70 目;石英粉粒径为 400 目,SiO₂ 含量为 99%;钢纤维表面镀铜,抗拉强度为 200 MPa,弹性模量为 200 GPa;采用的聚羧酸酯高效减水剂减水率为 30%。

表 2 HPC 配合比
Tab.2 HPC mix ratio

材料	水泥	硅灰	粗砂	中砂	细砂	石英粉	减水剂	水	钢纤维
含量/(kg·m ⁻³)	859.5	258.0	120.5	352.0	452.5	80.5	21.5	201.0	156.0

试件制作时,先准备保鲜膜与亚克力板将钢管底端封好,再灌注 HPC。HPCFST 制备及养护方法为:将水泥、硅灰、石英砂混合后干拌 3 min;分两次掺入钢纤维,并各干拌 1.5 min;加入水和减水剂搅拌成浆体;将浆体拌合物一次性浇筑到钢管中;将试件固定在振动台上振动直至表面不再出现气泡后静置 24 h;拆除亚克力板后置试件于养护箱内,采用 90 ℃ 蒸汽养护 7 d。

1.3 材料力学性能

依据《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温拉伸试验方法》^[9],测得不同壁厚 t 试件钢材的屈服强度 f_y 、极限强度 f_u 和弹性模量 E_s 见表 3。

表 3 钢材材性试验结果

Tab.3 Steel material property test results

类型	t/mm	f_y/MPa	f_u/MPa	E_s/MPa
普通钢圆管	4.31	341.3	547.9	2.10×10^5
	6.28	338.7	506.1	2.10×10^5
	8.24	332.5	501.3	2.10×10^5
普通钢方管	4.73	339.2	524.7	2.00×10^5
不锈钢圆管	6.28	374.3	567.2	2.00×10^5

依据《活性粉末混凝土》^[10],测得 HPC 立方体抗压强度 f_{cu} 为 129.5 MPa,棱柱体抗压弹性模量 E_c 为 48.5 MPa。

1.4 试验加载及测量

试件采用 200 t 电液伺服万能试验机进行加载,采用 UT7160 静态数据采集箱记录试验数据,加载和测量装置见图 1。

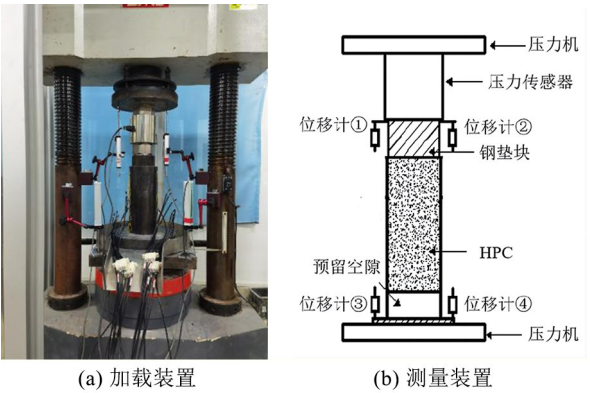


图 1 加载及测量装置

Fig.1 Loading and measuring device

在安装试件时,先将试件预留空隙端朝下放置,利用下加载板刻度线进行几何对中。在试件加载端的 HPC 顶面放置钢垫块,钢垫块直径略小于钢管内径,采用水平仪整平,并在钢垫块上放置压力传感器。在正式加载前,对试件进行预加载物理对中以及仪器设备检查,即加载至 10 kN 后稳住荷载,调整上下加载板、钢垫块、试件使三者之间挤压密实,并确保仪器设备及应变片正常工作。正式加载采用位移增量法,加载速率为 0.2 mm/min,采样频率为 4 Hz,钢垫块推进至 40 mm 后停止加载。试验全程监测压力机荷载、钢垫块推进量和钢管表面应变。其中,压力机荷载通过压力传感器进行量测,钢垫块推进量通过对称放置于试件上、下、左、右的 4 个位移计进行量测,钢管应变由粘贴于钢管外表面的双轴应变片进行量测,钢管应变片布置见图 2。

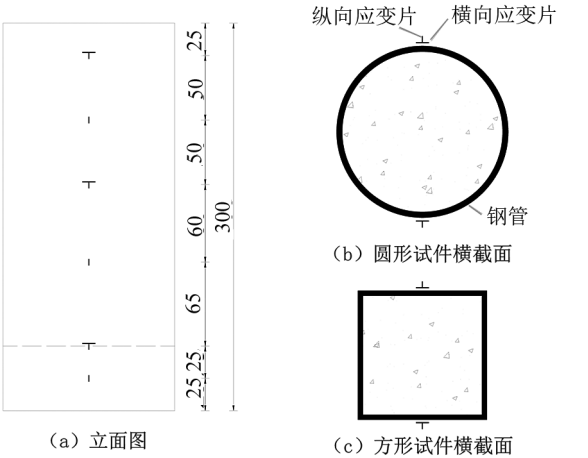


图 2 钢管应变片布置示意图 (单位:mm)

Fig.2 Diagram of strain gauge arrangement for steel tube (unit: mm)

1.5 试验过程

试验加载初期,荷载上升较快;当钢垫块顶进约 2 mm 后,荷载增长速率逐渐减小;随着荷载增加,壁厚为 4.31 mm 试件的中下部出现与钢管长度方向呈 45° 的剪切滑移线,而壁厚为 6.28 和 8.24 mm 的试件未出现剪切滑移线。

在推出全过程中,能听到钢纤维与钢管内壁相互刮蹭及 HPC 压碎、脱落的声音。其中,方形普通钢试件 HPC 碎屑脱落的声音较小,而不锈钢管试件的这两种声音最小。

试验结束后,在加载面边缘部分发现有 HPC 碎屑脱落,圆形试件的 HPC 碎屑比方形试件的更

多、更大,其中 ST8V2C2 系列试件甚至出现 HPC 成块脱落现象;挖除 HPC 后,可以看到钢纤维在钢管内表面留下的划痕,圆形试件的划痕均匀分布在钢管内表面,而方形试件的划痕主要分布在 4 个拐角附近区域;不锈钢试件的划痕比较轻微且加载面的碎屑明显更少,而且锈蚀后试件的划痕比未锈蚀的更明显。由此可见,截面形式、钢材类型和钢管内表面状态均对钢-HPC 界面滑移产生显著的影响。

2 试验结果及分析

2.1 荷载-滑移曲线

以压力传感器测得的推出力为纵坐标,位移计测得的钢垫块顶进量为横坐标,不同钢管壁厚试件的 $N-S$ 曲线见图 3。

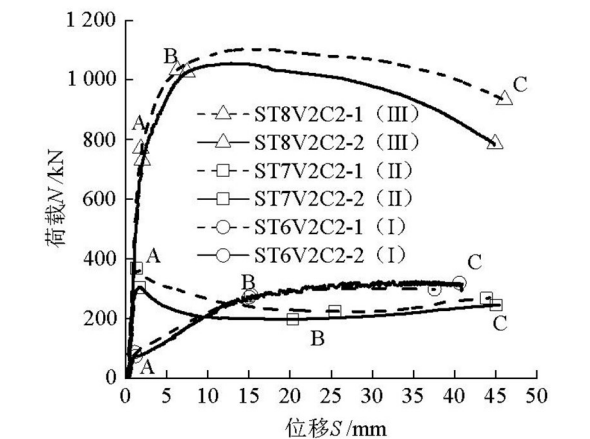


图 3 不同壁厚试件 $N-S$ 曲线

Fig.3 $N-S$ curves of specimens with different wall thicknesses

如图 3 所示,4.31、6.28 和 8.24 mm 3 种壁厚试件的 $N-S$ 曲线分别为 I、II、III 3 种类型。I 类曲线虽峰值点不明显,但在峰值点出现之前存在明显的转折点;II 类曲线存在明显的峰值点,在峰值点之后曲线显著下降;III 类曲线峰值点不明显,但在滑移量达 2 mm 左右时,出现斜率变小的转折点。

结合普通钢管混凝土界面作用发展过程,HPCFST 界面作用发展过程分为胶结滑移段(OA)、滑移段(AB)及摩阻段(BC) 3 个阶段。

在胶结滑移段(OA)初期,化学胶结力发挥主要作用。随着荷载增大,HPC 压缩膨胀,加载端钢管与 HPC 之间出现微小滑移,靠近加载端的界面胶结力逐渐被破坏,机械咬合力和摩擦力开始发挥作用。随着钢管与 HPC 之间的相对滑移

逐渐增加,化学胶结力作用面逐渐下移,直至自由端。当化学胶结力作用面都被破坏时,化学胶结力完全丧失,曲线达到第一个峰值点或转折点,界面作用力由摩擦力和机械咬合力组成。

在滑移段(AB),界面滑移增长速率明显增加,HPC 发生整体滑移。一方面,在滑移过程中钢管-HPC 界面的 HPC 磨损使机械咬合力逐渐减小;另一方面,在轴向力作用下 HPC 持续径向膨胀,界面法向力随之提高,导致界面摩擦力增大。界面法向力大小取决于钢管对 HPC 约束作用的强弱,根据钢管对 HPC 约束程度的不同, $N-S$ 曲线呈现出两种增长模式。当钢管对 HPC 约束作用较弱时,摩擦力增加量小于机械咬合力减小量,曲线将出现下降段,如 II 类(ST7V2C2 系列)曲线;当钢管对 HPC 约束作用较强时,摩擦力增加量大于机械咬合力减小量,曲线将出现上升段,如 I (ST6V2C2 系列) 和 III 类(ST8V2C2 系列) 曲线。ST6V2C2 系列试件壁厚较薄,在加载过程中 HPC 的泊松效应引起的钢管径向变形较大,“楔入效应”^[11]较明显(见图 4),HPC 整体滑移受到下端较窄钢管的阻碍,使得钢管对 HPC 约束作用增强,表现为 AB 段初期呈现曲率回升现象。

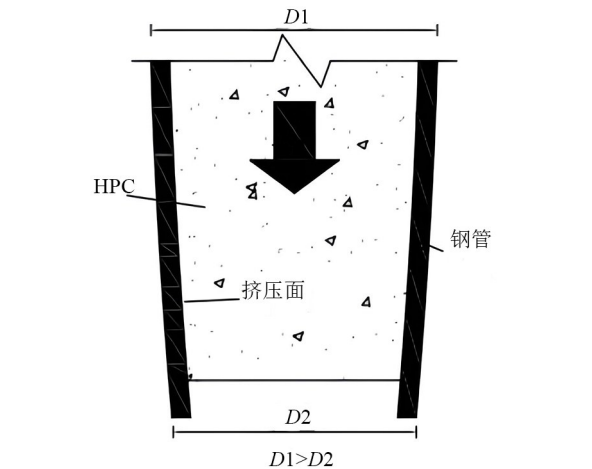


图 4 楔入效应

Fig.4 Wedging effect

在摩阻段(BC),由于钢管-HPC 界面在滑移段发生磨损,机械咬合力逐渐消耗,界面作用力主要由摩擦力承担。由界面磨损产生的 HPC 碎屑逐渐填充钢管不均匀部分,使得界面摩擦系数减小,界面摩擦力增长速率降低, $N-S$ 曲线呈缓慢上升趋势,如 I 类曲线。而 III 类试件加载端荷载

大于 1 000 kN,加载面平均压应力超过 100 MPa,接近 HPC 破坏强度,加载面出现 HPC 成块脱落现象(见图 5),加速了界面黏结破坏,表现为曲线在短暂上升后持续下降。Ⅱ类曲线介于Ⅰ类和Ⅲ类曲线之间,因此在达到峰值点之后经历了很长的平滑过渡段。



图 5 加载面 HPC 成块脱落

Fig.5 HPC on the loading surface falling off in blocks

2.2 黏结强度

在实际工程中,通常不允许出现过大的界面滑移^[7]。如图 3 中的 A 点,一般将出现 2 mm 左右的滑移,因此将该点的荷载定义为黏结破坏荷载 N_A ^[11]。此外,钢管混凝土界面状态受钢管初始缺陷、浇筑质量等因素影响较大,常规试验条件较难准确监测不同位置处黏结强度变化情况,因此可假设钢管混凝土黏结强度在整个界面是均匀分布的。对于钢管混凝土,圆形与方形截面试件的界面黏结强度 τ 计算方法见式(1)(2)^[4]:

$$\tau = \frac{N_A}{\pi d_i l}$$

(1)

$$\tau = \frac{N_A}{4dl}$$

(2)

式中: N_A 为界面黏结破坏荷载, kN; d_i 为圆形钢管内径, mm; d 为方形钢管内边长, mm; l 为界面沿轴线方向的黏结长度, mm。

采用式(1)(2)计算 HPCFST 试件的界面黏结强度 τ 见表 4,表中 τ_a 为每组试件的界面黏结强度平均值。

与 CFST 类似,HPCFST 界面作用力由化学胶结力、机械咬合力和摩擦力组成。化学胶结力大小与 HPC 胶凝材料组成成分有关;机械咬合力大小与钢管内表面粗糙程度及 HPC 的抗剪强度有

关;摩擦力与接触面上的摩擦系数和法向力大小成正比,而摩擦系数、法向力大小分别由钢管内表面粗糙程度、钢管对 HPC 的套箍作用决定^[4]。因此,在 HPC 配合比不变的情况下,钢管内表面粗糙程度、钢管对 HPC 的套箍作用是影响界面黏结性能的主要因素。

表 4 界面黏结强度
Tab.4 Interface bond strength

试件编号	N_A /kN	τ /MPa	τ_a /MPa
ST6V2C2-1	97.4	1.00	0.88
ST6V2C2-2	74.2	0.76	
ST7V2C2-1	367.6	3.89	3.56
ST7V2C2-2	305.2	3.23	
ST8V2C2-1	770.1	8.42	8.10
ST8V2C2-2	727.1	7.95	
RST7V2C2-1	167.8	1.85	1.54
RST7V2C2-2	116.7	1.23	
SST7V2C2-1	147.5	1.56	1.23
SST7V2C2-2	84.1	0.89	
ST7V2C2r-1	424.8	4.49	4.40
ST7V2C2r-2	407.4	4.31	

以 ST7V2C2 系列试件为参照组,采用每组试件的界面黏结强度平均值,分析不同参数对界面黏结强度的影响。

(1) 钢管壁厚的影响

如表 4 所示,对比 ST6V2C2、ST7V2C2 及 ST8V2C2 系列试件的界面黏结强度可知,界面黏结强度随着钢管壁厚的增大而增大。这是因为在界面黏结破坏之前,HPC 在轴向压力作用下发生径向膨胀,钢管对其产生套箍作用,钢管-HPC 界面存在摩擦力,而且钢管壁厚越大其套箍作用越强,界面摩擦力越大。三者的钢管壁厚之比为 0.686 : 1 : 1.312,界面黏结强度之比 0.247 : 1 : 2.275,界面黏结强度变化幅度显然大于钢管壁厚变化幅度,说明钢管壁厚是影响界面黏结强度的最主要因素之一。

(2) 截面形式的影响

对比 ST7V2C2、RST7V2C2 系列试件可知,虽然圆形截面试件和方形截面试件套箍系数相同,但是方形截面试件的界面黏结强度是圆形截面试

件的0.57倍。其原因为方形截面试件的钢管壁在侧向压力的作用下会发生侧向外鼓,方形钢管对HPC的套箍力主要集中在4个拐角区域,方形钢管对HPC的套箍作用弱于圆形钢管,导致方形截面试件的界面摩擦力小于圆形截面试件。

(3) 钢材类型的影响

不锈钢试件(ST7V2C2)的界面黏结强度平均值为1.23 MPa,普通钢试件(ST7V2C2)的界面黏结强度平均值为3.56 MPa,前者是后者的0.346倍,即不锈钢试件的界面黏结强度比普通钢试件的小66%。Tao^[13]对24根钢管混凝土试验研究,结果表明,与普通钢试件相比,不锈钢试件的黏结强度降低32%~69%。不锈钢表面的粗糙程度约为普通钢的1/2左右,当试件发生界面黏结破坏时,不锈钢试件界面的机械咬合力和摩擦力均要低于普通钢试件。

(4) 钢管内表面状态的影响

试验试件的钢管内表面状态分为锈蚀和未锈蚀两种。如表4所示,钢管内表面锈蚀试件(ST7V2C2r)的界面黏结强度平均值为4.40 MPa,而钢管内表面未锈蚀试件(ST7V2C2)的界面黏

结强度平均值为3.56 MPa,前者是后者的1.24倍。这说明钢管内表面锈蚀试件的界面更加粗糙,界面摩擦系数更大,有助于提高其界面的机械咬合力及摩擦力。

3 结论

1)根据钢管壁厚的不同,钢管HPC的推出荷载-滑移曲线呈现3种增长模式,均包括胶结滑移段、滑移段及摩擦段;在滑移段,荷载-滑移曲线增长模式由钢管对HPC的约束强弱决定。

2)HPC强度等级相同时,钢管对HPC的套箍作用和钢管内表面粗糙程度是影响界面黏结性能的两个最主要因素。钢管壁厚越大,钢管对HPC的套箍作用越强,界面黏结强度随着钢管壁厚的增大而显著增大;套箍系数相同时,方形钢管对HPC的套箍作用弱于圆形钢管,其界面黏结强度也弱;未锈蚀普通钢试件的界面黏结强度小于锈蚀试件,增大钢管内表面粗糙程度可以提高界面黏结强度;不锈钢的内表面粗糙程度小于普通钢的内表面粗糙程度,故不锈钢试件的界面黏结强度要小于普通钢试件的界面黏结强度。

参考文献:

- [1] HUANG W J, ZHANG Z B, HUANG Q W, et al. Experimental study on mechanical properties of RPC-FST under direct tension load[C]// Shi C, Wang D. 1st International Conference on UHPC Materials and Structure. Changsha, China: RILEM Publications SARL, 2016: 236-246.
- [2] LAI Z C, YAO P Y, HUANG W J, et al. Reactive Powder concrete-filled steel tube (RPCFT) members subjected to axial tension: experimental study and design[J]. Structures, 2020, 28: 933-942.
- [3] 闫志刚, 安明喆, 吴捧捧, 等. 钢管活性粉末混凝土界面粘结强度试验研究[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(6): 7-11.
- [4] 张正宾. 钢管RPC界面作用试验研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
- [5] 黄文金, 盛叶, 张正宾, 等. 钢管-钢纤维活性粉末混凝土界面黏结强度试验研究[J]. 建筑结构学报. 2017, 38(S1): 502-507.
- [6] 魏科丰, 贾善坡, 高源. 钢管RPC界面粘结强度试验研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(22): 101-107.
- [7] 王秋维, 史庆轩, 徐赵东, 等. 圆钢管活性粉末混凝土界面黏结性能[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(12): 210-218.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢管混凝土结构技术规范: GB 50936—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [9] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 活性粉末混凝土: GB/T 31387—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [11] LYU W Q, HAN L H. Investigation on bond strength between recycled aggregate concrete (RAC) and steel tube in RAC-filled steel tubes[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 155: 438-459.
- [12] TAO Z, SONG T Y, UY B, et al. Bond behavior in concrete-filled steel tubes[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 120: 81-93.