

文章编号:1004-5309(2022)-0095-10
DOI:10.3969/j.issn.1004-5309.2022.02.05

不同冷却方式下高温后圆钢管再生 混凝土界面黏结性能对比分析

王 新¹,黄磊群²,刘丁媛³,莫琳琳³,陈宗平^{3*}

(1. 广西交通职业技术学院, 南宁, 530004; 2. 广西路桥集团建筑工程有限公司, 南宁, 530004; 3. 广西大学土木建筑工程学院, 南宁, 530004)

摘要:为研究自然冷却(自冷)和喷水冷却(水冷)两种方式对高温后圆钢管再生混凝土界面黏结性能的影响差异,以冷却方式、历经最高温度(T)和再生粗骨料取代率(r)为变化参数,设计并完成了21个试件的静力推出试验,观察了试件的破坏过程及形态,获得了荷载-滑移曲线,对比分析了不同冷却方式对高温后圆钢管再生混凝土短柱物理特征、界面破坏过程及黏结性能指标的影响。结果表明:与自冷试件相比,水冷试件的质量烧失率明显减小、初始滑移发生更晚,且在荷载-滑移曲线下降段中,水冷试件表现得更平缓。在自冷方式下,随着历经最高温度的增大,试件的界面黏结强度先减小后增大,但在水冷方式下,界面黏结强度先增大后减小;与自冷试件相比, T 超过400℃后水冷试件的界面黏结刚度开始退化,在600℃时界面黏结刚度退化较大;无论是自冷还是水冷,随着历经最高温度的增大,界面黏结耗能系数不断减小。

关键词:冷却方式;高温后;圆钢管再生混凝土;黏结性能;对比分析

中图分类号: TU398;X932 **文献标识码:** A

0 引言

随着我国城市建设的大力发展,建筑结构的更替和新建结构的日益增多,建筑材料大量消耗,随之产生的建筑垃圾问题日益突出^[1]。为实现建筑资源循环利用,贯彻经济社会可持续发展的政策,再生混凝土技术应运而生^[2]。钢管再生混凝土结构是再生混凝土应用的重要组成部分,既能通过外部钢管对核心混凝土的约束来有效改善再生混凝土的力学性能和变形性能,又能实现废弃混凝土的回收再利用,具有节能环保和可持续发展的优点,应用前景宽广^[3,4]。随着钢管再生混凝土结构在实际工程中的

推广应用,其抗火及防火设计问题亟需解决,研究钢管再生混凝土结构在高温后的力学性能具有重要意义。钢管与再生混凝土界面间的黏结滑移性能是两者协同工作的重要基础,可以直接影响到结构的安全性。

近年来,国内外部分学者针对常温或高温后钢管再生混凝土界面黏结滑移性能进行了相关研究,并取得了相应成果^[5-8]。陈宗平等^[9]对25根钢管再生混凝土短柱进行了推出试验,得到了其界面黏结应变和黏结力的分布规律。结果表明,提高混凝土强度能够增强钢管混凝土界面极限黏结强度,黏结强度随钢管长径比的增加而降低。陈俊等^[10]对23

收稿日期:2022-01-10;修改日期:2022-03-28

基金项目:国家自然科学基金(51578163);广西科技基地和人才专项(桂科AD21075031);八桂学者专项研究经费项目([2019]79号)

作者简介:王新(1982—),女,辽宁朝阳人,广西交通职业技术学院副教授,研究方向为再生混凝土结构等。

通讯作者:陈宗平,男,教授,博士生导师,E-mail: zpcchen@gxu.edu.cn

根圆钢管混凝土短柱在恒高温下的界面黏结性能进行研究,结果表明,平均黏结强度随钢管长径比的增大而减小,降低幅度最高达 50%。李卫宁等^[11]以黏结长度、粗骨料取代率与混凝土强度为变化参数,对 10 根方钢管再生混凝土试件进行推出试验,结果表明,粗骨料取代率对黏结强度影响不大,黏结强度主要受混凝土强度和黏结长度的影响。赵强等^[12]通过 8 根钢管再生混凝土柱,研究了再生粗骨料取代率和混凝土强度对界面黏结性能的影响,结果表明,界面黏结强度随混凝土强度的增大而增大,但随再生粗骨料取代率的增大而减小。

目前,关于钢管再生混凝土界面黏结性能的研究多集中于常温下或高温后自然冷却,部分文献也考虑到模拟火灾后消防喷水的情况,但两种冷却方式对高温后钢管再生混凝土的界面黏结性能影响差异尚未有文献报道。本文通过 21 根不同冷却方式下高温后圆钢管再生混凝土试件的推出试验,观察了试件的外观变化及破坏过程,对比分析了试件的物理及界面黏结性能,以期对圆钢管再生混凝土构件的设计及灾后性能评估提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

试验以冷却方式(自冷、水冷)、历经最高温度 $T(20\text{ }^{\circ}\text{C}、200\text{ }^{\circ}\text{C}、400\text{ }^{\circ}\text{C}、600\text{ }^{\circ}\text{C})$ 和再生粗骨料取代率 $r(0\%、50\%、100\%)$ 为变化参数设计制作了 21 根圆钢管再生混凝土试件,试件的详细设计参数见表 1。钢管的外径为 165 mm,壁厚为 4 mm,在钢管的一端沿长度方向预留一个宽 10 mm,长 50 mm 的竖缝,用以在自由端混凝土中预埋一根与混凝土浇筑面平行的外伸钢片,以便后续对试件自由端滑移量的测量。试件设计总长度 H 为 425 mm,界面黏结长度 L_a 为 400 mm,试件尺寸及构造见图 1。

1.2 试验材料及其性能

试验所用再生粗骨料采用原设计强度为 C30 的废弃混凝土试块,经过机器破碎后筛分、清洗,粒径为 5 mm~31.5 mm 的连续级配。试验所用天然粗骨料为天然碎石,经同条件筛分清洗为 5 mm~31.5 mm 的连续级配。试验所用细骨料采用天然河砂,人工筛分成粒径为 4.75 mm 以下,根据筛分

结果计算可知,天然砂的细度模数为 2.71,属于中砂,级配良好。参照《建设用卵石、碎石》^[13](GB/T 14685-2011)与《建设用砂》^[14](GB/T 14684-2011)的测试方法,测得粗细骨料的物理性能见表 2。试验所用水泥采用 P·O 32.5 普通硅酸盐水泥,拌养用水采用城市自来水。试验所用钢管采用低碳钢 Q235 圆钢管,焊缝为直焊缝。混凝土设计强度等级为 C30,配合比见表 3,所有试件都进行同环境条件下的自然养护 28 天。

表 1 试件设计参数

Table 1 Design parameters of specimens

试件 编号	冷却 方式	$T/^{\circ}\text{C}$	$r/\%$	t/min	H/mm	L_a/mm
RCST-1	自冷	20	0	—		
RCST-2	自冷	200	0	60		
RCST-3	自冷	400	0	60		
RCST-4	自冷	600	0	60		
RCST-5	喷水	200	0	60		
RCST-6	喷水	400	0	60		
RCST-7	喷水	600	0	60		
RCST-8	自冷	20	50	—		
RCST-9	自冷	200	50	60		
RCST-10	自冷	400	50	60		
RCST-11	自冷	600	50	60	425	400
RCST-12	喷水	200	50	60		
RCST-13	喷水	400	50	60		
RCST-14	喷水	600	50	60		
RCST-15	自冷	20	100	—		
RCST-16	自冷	200	100	60		
RCST-17	自冷	400	100	60		
RCST-18	自冷	600	100	60		
RCST-19	喷水	200	100	60		
RCST-20	喷水	400	100	60		
RCST-21	喷水	600	100	60		

注: T 表示历经最高温度; r 表示再生粗骨料取代率; t 表示历经最高温度的恒温时长; H 表示试件总长度; L_a 表示钢管与混凝土界面黏结长度。

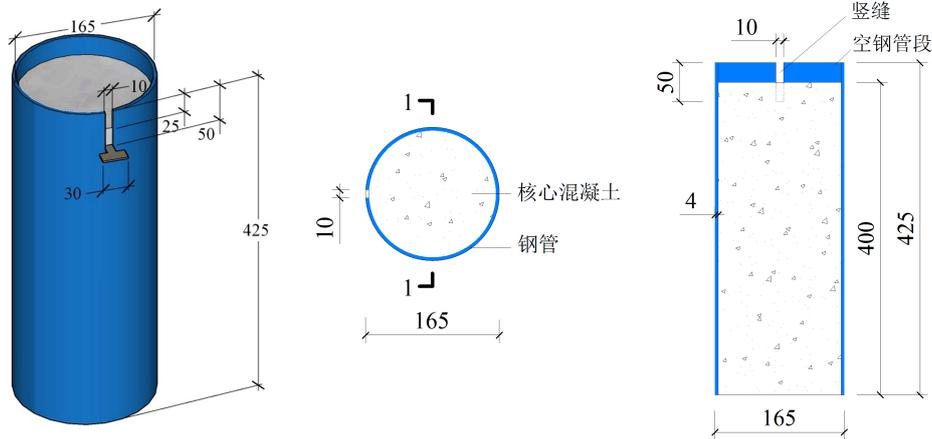


图 1 试件尺寸及构造(单位:mm)

Fig. 1 Shape and size of specimens (Unit:mm)

表 2 骨料物理性能

Table 2 The physical properties of aggregates

骨料类型	表观密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	堆积密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	吸水率/%	压碎指标/%	孔隙率/%
再生粗骨料	2 633	1 426	2.78	14.1	45.6
天然粗骨料	2 264	1 625	0.22	11.9	28.2
细骨料	2 532	1 791	1.89	—	29.4

表 3 混凝土配合比

Table 3 Mix proportions of concrete

$r/\%$	材料用量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)				
	水	水泥	砂	天然粗骨料	再生粗骨料
0	185	463	561	1 191	0
50	185	463	561	595.5	595.5
100	185	463	561	0	1 191

1.3 升温装置及冷却方式

试验采用RX₃-45-9箱型工业电阻炉对试件进行高温处理,升温炉内自带加热温控系统和温度传感器,试件在炉中按10℃/min升至目标温度,升温过程试件四面受火,当达到目标温度后恒温60 min,使钢管外表面温度达到最高温度。在达到恒温时间后,立即打开炉门将需进行喷水冷却处理的试件拉出试验炉外进行喷水处理,环绕试件四面循环喷水,喷水流量取值3.8 L/s,喷水时间控制在25 min,喷水总量保持不变。剩余对比试件留在炉中自然冷却至室温。试验升温曲线和升温设备如图2所示,喷水冷却过程如图3所示。

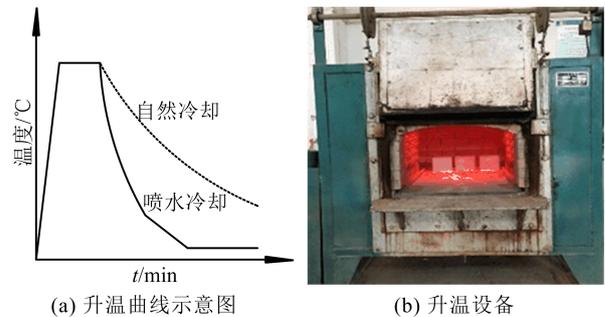


图 2 升温曲线与升温设备

Fig. 2 Heating curves and equipments



图 3 喷水冷却过程

Fig. 3 Process of water spray cooling

1.4 加载装置及制度

试验加载装置采用万龙微机控制的电液伺服万能试验机(型号 WAW600),加载制度采用速率为 0.2 mm/min 的位移控制加载,当试件的荷载-滑移曲线出现明显水平段时停止加载。试件下端为加载端,钢管内的混凝土通过比钢管截面略小的钢板垫块从下往上推出。试件自由端和加载端的混凝土滑移量分别通过 1 号位移计、2 号位移计测量得到。试验加载装置如图 4 所示。

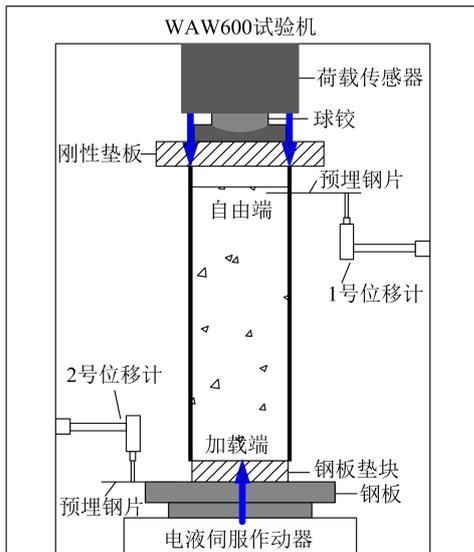


图 4 加载示意图

Fig. 4 Loading diagram for specimens

2 试验结果分析

2.1 物理特征

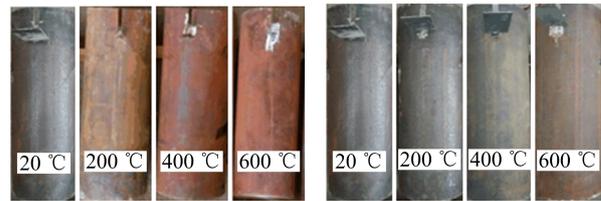
升温完成后,钢管试件表面颜色随历经最高温

度的升高由浅褐色向深红褐色转变,颜色由浅变深,在 400 °C 时,试件两端混凝土表面开始出现裂缝,温度越高,裂缝越宽。自冷试件在静置至常温后,表层状态无明显变化,而经过喷水处理的试件,钢管表面产生氧化层(≥200 °C),当温度达到 600 °C 时,钢管表面完全覆盖氧化层,且钢管表面出现不规则的横向纹路,这是由于高温下喷水处理导致钢纤维发生褶皱产生的。表 4 为试件表面物理特征,试件的表面变化如图 5 所示。

表 4 试件表面物理特征

Table 4 Physical characteristics of specimen surface

T/°C	自然冷却后		喷水冷却后	
	表面颜色	表层现象	表面颜色	表层现象
20	浅褐色	无明显变化	浅褐色	无明显变化
200	深褐色	无明显变化	黄褐色	少量氧化层
400	红褐色	无明显变化	黄棕色	大面积生成氧化层
600	深红褐色	无明显变化	红棕色	表面覆盖氧化层,钢管表面出现横向纹路



(a) 自然冷却试件

(b) 喷水冷却试件

图 5 不同冷却方式下试件的表现变化

Fig. 5 Apparent changes of specimens under different cooling modes

2.2 质量烧失率

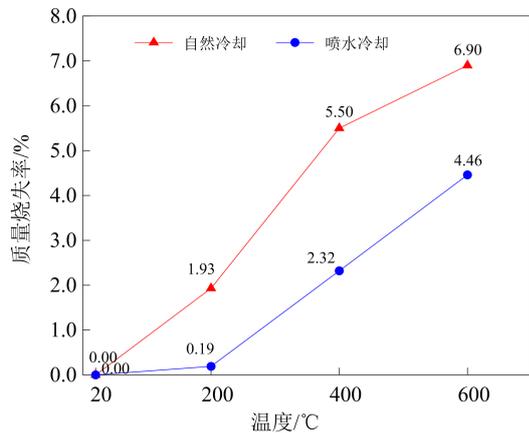
图 6(a)为不同冷却方式下高温后圆钢管再生混凝土柱质量烧失率(I)随历经最高温度(T)的变化规律。其中对历经最高温度相同但取代率不同的试件取平均值^[15,16]。其计算公式如下:

$$I = (M - M_f) / M \quad (1)$$

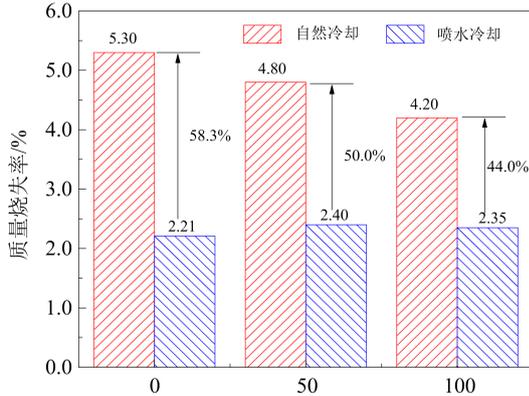
式中:I 为试件质量烧失率;M 为高温前试件的质量;M_f 为高温后试件的质量。

由图 6(a)可知,试件的烧失率随历经最高温度的增加而增加,在温度达到 200 °C~600 °C 之间时,自冷试件烧失率幅度在 1.93%~6.90%之间,而水

冷试件在 0.19%~4.46% 之间。水冷试件的质量烧失率明显低于自冷试件,但随着历经温度的升高,二者之间差距先增大后减小。究其原因,可能是圆钢管再生混凝土试件在高温作用后,混凝土内部部分自由水和结合水会被蒸发,从而造成质量损失。但在喷水冷却作用下,混凝土内部的高温裂缝发展迅速、宽度增大,高压水枪喷射出来的水更易与混凝土发生水化作用,从而导致试件质量增加,400℃ 时水化作用最为明显。



(a) 历经最高温度



(b) 取代率

图 6 不同冷却方式对烧失率的影响

Fig. 6 Ignition loss rate under different cooling modes of specimens

图 6(b) 为不同冷却方式下高温后圆钢管再生混凝土柱质量烧失率 (I) 随取代率 (r) 的变化规律。其中对取代率相同但历经最高温度不同的试件取平均值。由图 6(b) 可知,随着取代率的增加,水冷试件与自冷试件相比,其质量烧失率的降低幅度不断减小。对于喷水冷却来说,取代率对高温后试件的

质量烧失率影响不大,主要是相较于天然粗骨料,再生粗骨料混凝土高温后自然冷却的烧失率更低。究其原因,可能是由于再生粗骨料吸水率远大于天然粗骨料,故而配置混凝土后其内部留存的结合水增多,高温作用下其内部水分损失就更为明显。

3 黏结性能对比分析

3.1 推出试验现象

在推出试验过程中,自冷与水冷试件的加载端均先于自由端发生滑移,荷载-滑移曲线大致可分为上升段、下降段和水平段^[17,18]。自冷试件加载端的初始滑移在 $0.003P_u \sim 0.017P_u$ (P_u 为峰值荷载) 阶段,而水冷试件加载端的初始滑移在 $0.014P_u \sim 0.04P_u$ 阶段,可见水冷试件的初始滑移晚于自冷试件。当推出荷载达到 $0.4P_u \sim 0.5P_u$ 时,两类试件的自由端和加载端都开始发生较大相对位移,加载端有混凝土碎片脱落。另外,对于水冷试件,当荷载达到极限荷载时,可以听到一声清脆的响声,进入荷载平缓下降段后有伴随钢管与混凝土的摩擦声,且可以明显观察到,随着试件历经最高温度的增大,摩擦声越大。自冷试件在加载过程中并无明显响声。加载结束后,两类试件加载端的混凝土界面均有一定程度凹陷,钢管微外鼓,中部核心混凝土与外包钢管间有明显的滑移缝。

3.2 荷载-滑移曲线

各试件加载端和自由端的荷载-滑移曲线 (P - S 曲线) 如图 7 所示。对比两类试件的荷载-滑移曲线,可以发现水冷试件的荷载下降段比自冷试件更平缓。试件的各项黏结性能特征值见表 5,界面黏结耗能系数的定义与取值参照文献^[19]中计算方法,计算公式如下:

$$\tau_u = \frac{P_u}{CL_a} \quad (2)$$

$$\tau_r = \frac{P_r}{CL_a} \quad (3)$$

式中: τ /MPa 为黏结强度; P /kN 为推出荷载; C /mm 为钢管与核心混凝土接触界面的周长; L_a /mm 为界面黏结长度。

$$K_e = \frac{0.5P_u}{S_{0.5P_u}} \quad (4)$$

式中: P_u /kN 为加载端推出极限荷载; $S_{0.5P_u}$ /mm 为加载端 $0.5P_u$ 时对应的滑移量。

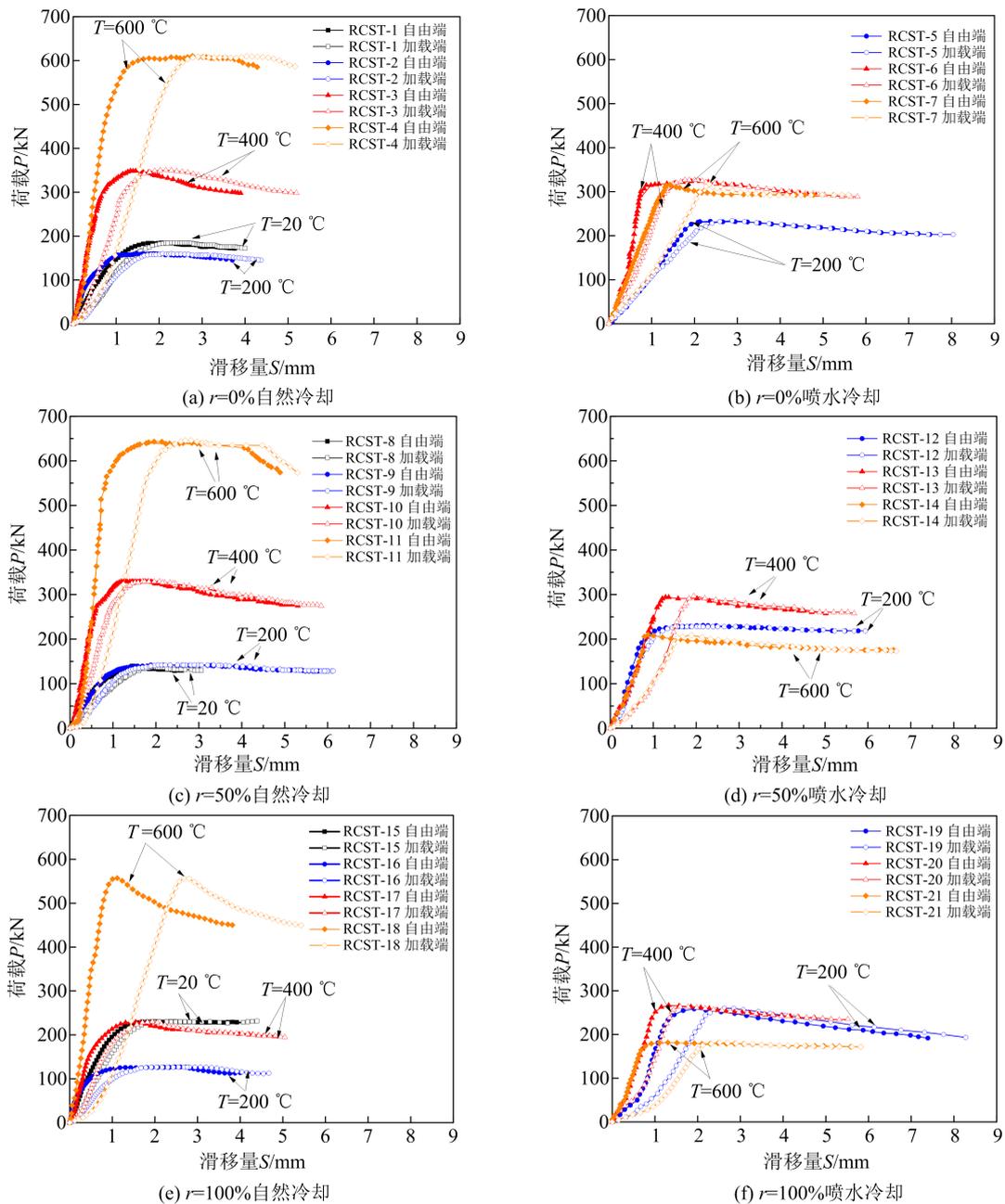


图 7 荷载-滑移曲线

Fig. 7 Load-slip curves of specimens

3.3 界面黏结强度

图 8(a) 为不同冷却方式下高温后圆钢管再生混凝土柱黏结强度 (τ) 随历经最高温度 (T) 的变化规律。其中对历经最高温度相同但取代率不同的试件取平均值。由图 8(a) 可知, 在自冷方式下, 随着历经最高温度的增大, 高温后圆钢管再生混凝土的界面黏结强度先减小后增大, 但在水冷方式下, 界面黏结强度先增大后减小。对比自冷和水冷两种方式的黏结强度变化曲线可知, 当 $T \leq 400^\circ\text{C}$ 时, 水冷试

件的黏结强度大于自冷试件, 当 $T > 400^\circ\text{C}$ 时, 自冷试件的黏结强度要明显高于水冷试件。原因可能是由于 $T \leq 400^\circ\text{C}$ 时, 钢管与混凝土的热膨胀系数相差较大, 喷水冷却导致两者接触界面间出现许多凹凸横纹, 因此界面间的机械咬合力和摩擦力增大, 此时机械咬合力和摩擦力起主导作用。当 $T > 400^\circ\text{C}$ 时, 喷水冷却导致混凝土性能劣化严重, 混凝土内部裂缝明显, 化学胶结力产生巨大损失, 此时化学胶结力对界面黏结强度起主导作用。

表 5 试件的黏结性能特征值
Table 5 Characteristic values of bonding performance of specimens

试件编号	τ_u/MPa	τ_r/MPa	$K_e/\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1}$	η
RCST-1	0.93	0.87	114.81	0.79
RCST-2	0.81	0.75	106.86	0.80
RCST-3	1.77	1.52	250.82	0.81
RCST-4	3.11	2.99	267.60	0.72
RCST-5	1.18	1.05	92.49	0.79
RCST-6	1.65	1.47	216.59	0.78
RCST-7	1.58	1.46	119.16	0.71
RCST-8	1.08	0.71	137.86	0.88
RCST-9	0.72	0.65	105.98	0.85
RCST-10	1.68	1.39	292.32	0.80
RCST-11	3.26	3.10	309.10	0.75
RCST-12	1.17	1.12	117.55	0.86
RCST-13	1.49	1.33	175.71	0.72
RCST-14	1.06	0.89	121.14	0.72
RCST-15	1.17	1.14	128.94	0.82
RCST-16	0.65	0.57	98.03	0.82
RCST-17	1.17	1.01	183.70	0.81
RCST-18	2.87	2.69	210.19	0.65
RCST-19	1.32	0.98	117.54	0.70
RCST-20	1.35	1.19	196.81	0.77
RCST-21	0.93	0.88	95.42	0.60

注: τ_u 表示极限黏结强度; τ_r 表示残余黏结强度; K_e 表示抗剪黏结刚度; η 表示界面耗能系数。

两种冷却方式在 400 °C 时黏结强度基本一致,原因可能是喷水冷却一方面会使钢管与混凝土之间引起变形收缩差,从而形成紧箍作用,另一方面喷水冷却又会使高温后的再生混凝土劣化严重,两种作用在 400 °C 时达到了平衡,故黏结强度基本不变。

图 8(b)为不同冷却方式下高温后圆钢管再生混凝土柱黏结强度(τ)随取代率(r)的变化规律。其中对取代率相同但历经最高温度不同的试件取平均值。由 8(b)图可知,无论是自冷还是水冷,随着取代率的增加,界面黏结强度整体上呈降低趋势,且二者降低幅度相近。另外,相比自冷试件,水冷试件的界面极限黏结强度整体降低幅度在 18.6%~

28.8%之间,残余黏结强度整体降低幅度在 20.9%~30.8%之间。

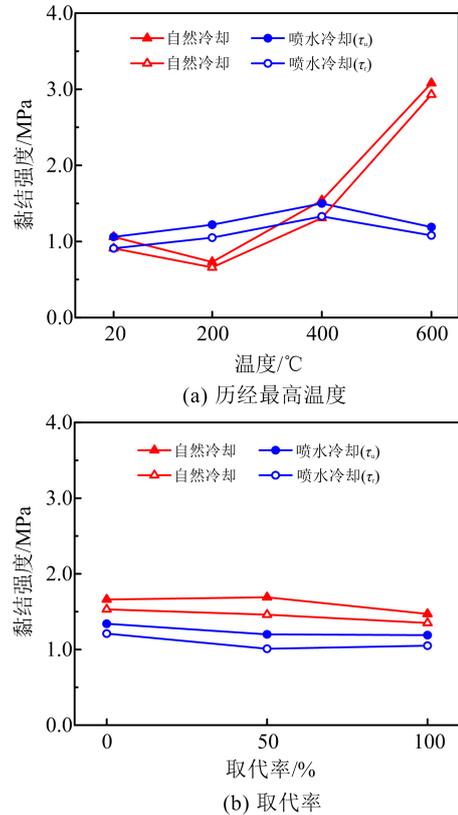


图 8 不同冷却方式对界面黏结强度的影响
Fig. 8 Interfacial bonding strength under different cooling modes of specimens

3.4 界面黏结抗剪刚度

图 9(a)为不同冷却方式下高温后圆钢管再生混凝土柱界面黏结抗剪刚度(K_e)随历经最高温度(T)的变化规律。其中对历经最高温度相同但取代率不同的试件取平均值。由图 9(a)可知,在自冷方式下,随着历经最高温度的增大,高温后圆钢管再生混凝土的界面黏结抗剪刚度先减小后增大,整体幅度在-18.6%~106.2%,但在水冷方式下,界面黏结抗剪刚度先减小后增大再减小,整体幅度在-14.2%~54.4%。 $T \geq 400$ °C 时,与自冷相比水冷试件的界面黏结抗剪刚度开始退化,600 °C 时界面黏结抗剪刚度退化较大,这也是由于喷水冷却导致混凝土性能劣化严重。

图 9(b)为不同冷却方式下高温后圆钢管再生混凝土柱界面黏结抗剪刚度(K_e)随取代率(r)的变化规律。其中对取代率相同但历经最高温度不同的

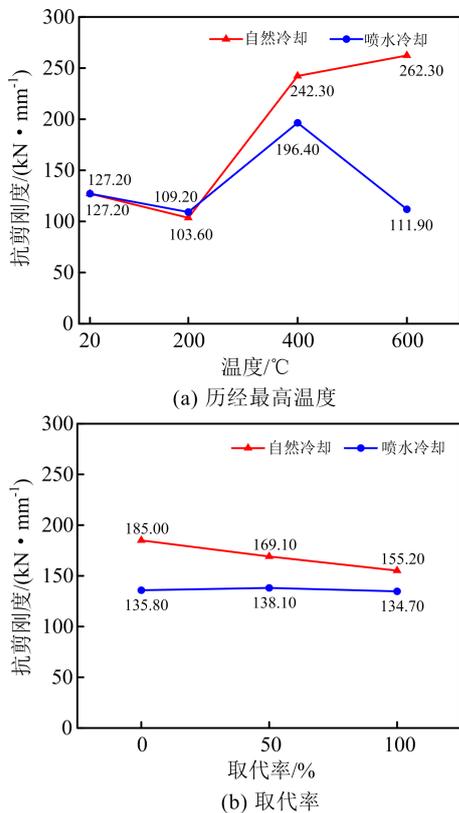


图 9 不同冷却方式对界面黏结抗剪刚度的影响

Fig. 9 Bond shear stiffness under different cooling modes of specimens

试件取平均值。由图 9(b)可知,自冷试件的界面黏结抗剪刚度随取代率的增大而减小,但取代率对水冷试件的界面黏结抗剪刚度影响不大,在后续变化中水冷试件的界面抗剪刚度与自冷试件相比差距越来越小。原因可能是再生粗骨料相比天然骨料更易使混凝土在高温下出现裂缝从而对黏结界面造成削弱,但喷水冷却又导致核心混凝土吸水膨胀,从而与外部钢管接触相对紧密,故在一定程度上又使界面黏结抗剪刚度有所补偿。

3.5 界面黏结耗能系数

图 10(a)为不同冷却方式下高温后圆钢管再生混凝土柱界面黏结耗能系数(η)随历经最高温度(T)的变化规律。其中对历经最高温度相同但取代率不同的试件取平均值。由图 10(a)可知,无论是自冷还是水冷,随着历经最高温度的增大,界面黏结耗能系数不断减小,但与自冷相比水冷试件的界面黏结耗能系数更低。

图 10(b)为不同冷却方式下高温后圆钢管再生混凝土柱界面黏结耗能系数(η)随取代率(r)的变

化规律。其中对取代率相同但历经最高温度不同的试件取平均值。由图 10(b)可知,水冷试件的界面黏结耗能系数随取代率的增大有所提升,但取代率对自冷试件的界面黏结耗能系数影响不大。原因可能是含取代率的试件,喷水冷却会使其黏结强度降低,黏结强度降低就会使变形更加容易,从而导致界面黏结耗能系数提高。

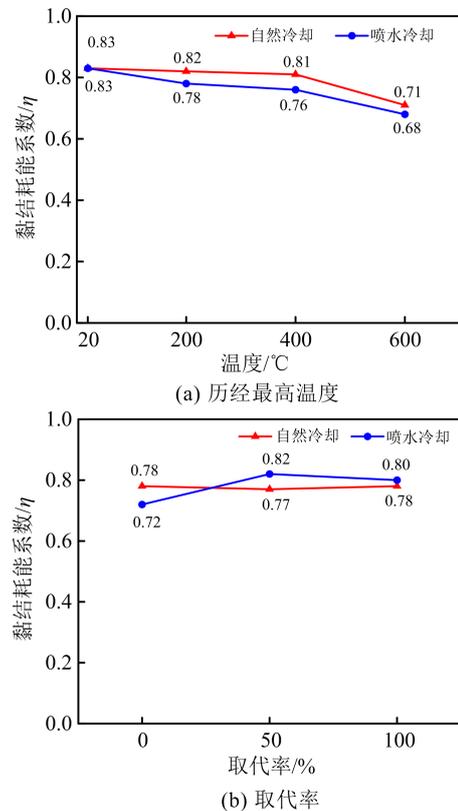


图 10 不同冷却方式对界面耗能系数的影响

Fig. 10 Energy dissipation coefficient under different cooling modes of specimens

4 结论

(1) 喷水冷却试件的质量烧失率明显低于自然冷却试件,但随着历经最高温度的升高,二者之间差距先增大后减小;喷水冷却试件的初始滑移晚于自然冷却试件,且喷水冷却试件峰值后钢管与混凝土有摩擦声。

(2) 喷水冷却试件的荷载下降段比自然冷却试件更平缓;当 $T \leq 400$ °C 时,喷水冷却试件的黏结强度大于自然冷却,当 $T > 400$ °C 时,自然冷却试件的黏结强度要明显高于喷水冷却;无论是喷水冷却还

是自然冷却,随着取代率的增加,界面黏结强度整体上呈降低趋势,且二者降低幅度相近。

(3) $T \geq 400$ °C时,与自冷试件相比,水冷试件的界面黏结抗剪刚度开始退化,600 °C时界面黏结抗剪刚度退化较大;自冷试件的界面黏结抗剪刚度随取代率的增大而减小,但取代率对水冷试件的界

面黏结抗剪刚度影响不大。

(4)无论是自冷还是水冷,随着历经最高温度的增大,界面黏结耗能系数不断减小,但水冷试件的界面黏结耗能系数更低;水冷试件的界面黏结耗能系数随取代率的增大有所提升,但取代率对自冷试件的界面黏结耗能系数影响不大。

参考文献

- [1] 王兴国,姜茂林,张向冈,王永贵,牛海成. 钢管再生混凝土柱力学性能研究进展[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(5): 1256-1266.
- [2] 苏炜炜. 纤维增强全再生粗骨料混凝土物理及力学性能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021.
- [3] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [4] Tam V W Y, Wang Z B, Tao Z. Behaviour of recycled aggregate concrete filled stainless steel stub columns [J]. Materials and Structures, 2014, 47(1-2): 293-310.
- [5] 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.
- [6] 宋天谥,刘夏璐,项凯. 火灾后椭圆钢管混凝土界面黏结性能研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(6): 41-52.
- [7] Li W G, Luo Z Y, Tao Z, Duan W H, Shah S P. Mechanical behavior of recycled aggregate concrete-filled steel tube stub columns after exposure to elevated temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2017, 146: 571-581.
- [8] 谢旺军,陈宗平,周济. 喷水冷却火灾后钢管混凝土界面黏结性能研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(6): 739-742.
- [9] 陈宗平,徐金俊,薛建阳,苏益声. 钢管再生混凝土黏结滑移推出试验及黏结强度计算[J]. 土木工程学报, 2013, 46(3): 49-58.
- [10] 陈俊,薛媛媛,谭清华,吴金梁. 恒高温下钢管混凝土界面黏结性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(3): 11-18.
- [11] 李卫宁,徐金俊,陈宗平,苏益声. 方钢管再生混凝土粘结滑移性能试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2012, 37(1): 68-74.
- [12] 赵强. 方钢管再生混凝土界面粘结性能试验[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2016, 37(1): 115-119.
- [13] GB/T 14685-2011, 建设用卵石、碎石[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [14] GB/T 14684-2011, 建设用砂[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [15] 陈宗平,周济. 高温喷水冷却后方与圆钢管高强混凝土界面黏结性能对比分析[J]. 工业建筑, 2020, 50(11): 145-152.
- [16] 陈宗平,梁厚燃. 高温喷水冷却后钢筋再生混凝土梁受力性能试验及承载力计算[J]. 土木工程学报, 2019, 52(12): 22-35.
- [17] 陈俊睿. 高温后钢与再生混凝土界面黏结滑移性能试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- [18] 薛晓楠,衷政杰. 再生钢管混凝土柱黏结滑移性能试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(4): 39-46.
- [19] 徐金俊,陈宗平,薛建阳,苏益声. 圆钢管再生混凝土界面黏结失效的推出试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(7): 148-157.

Comparative analysis of interfacial bond behavior of recycled aggregate concrete filled circular steel tube after exposure to high temperature under different cooling modes

WANG Xin¹, HUANG Leiqun², LIU Dingyuan³, MO Linlin³, CHEN Zongping³

(1. Guangxi Vocational and Technical College of Communications, Nanning 530004, China;

2. Guangxi Road and Bridge Engineering Group Company Limited, Nanning 530004, China;

3. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: To study the effects of natural cooling and water spray cooling on the interfacial bond behavior of recycled aggregate concrete filled circular steel tube after exposure to high temperature (T), the static push-out tests of 21 specimens with varying parameters of cooling modes, experienced maximum temperature, the replacement rate of recycled coarse aggregate were designed and conducted. The failure process and modes of specimens were observed, and the load-slip curves of specimens were obtained. The effects of different cooling modes on the physical characteristics, interface failure process, and bonding performance index of recycled aggregate concrete filled circular steel tube after exposure to high temperature were compared and analyzed. The test result shows that the ignition loss rate of specimens on water spray cooling was significantly lower than that of natural cooling, and the initial slip of specimens on water spray cooling was later than that of natural cooling. And the load drop at post-peak of specimens on water spray cooling was more gentle than that of natural cooling. In the natural cooling mode, with the increase of the experienced maximum temperature, the interfacial bonding strength first decreased and then increased, but in the water spray cooling mode, the interfacial bonding strength first increased and then decreased. In addition, when $T \geq 400$ °C, compared with natural cooling, the interfacial bonding stiffness of specimens on water spray cooling began to decline, and decreased significantly at 600 °C. Besides, whether natural cooling or water spray cooling, with the increase of experienced maximum temperature, the energy dissipation coefficient of interfacial bonding decreased.

Keywords: Cooling modes; After exposure to high temperature; Recycled aggregate concrete filled circular steel tube; Bond behavior; Comparative analysis