

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.094

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



高温后不同冷却方式下的混凝土-钢筋粘结性能

杨海峰^{1a,1b}, 杨焱茜^{1a}, 王玉梅², 张天宝^{1a}, 黄莹^{1a,1b}

(1. 广西大学 a. 土木建筑工程学院; b. 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 南宁 530004,

2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要:为研究高温后不同冷却方式下混凝土-钢筋的粘结滑移性能,对39个高温后混凝土试件进行中心拉拔试验,并完成自然冷却方式下试件的劈裂抗拉强度试验,分析温度和冷却方式对试件峰值粘结应力和峰值滑移的影响,建立了不同冷却方式下峰值粘结应力、峰值滑移与温度的关系式,提出考虑初始温度损伤的粘结-滑移全曲线方程,并基于粘结强度理论模型计算了自然冷却方式下的粘结强度理论值。结果表明:随着温度的升高,峰值粘结应力线性下降,500℃时粘结强度损失达80.5%,峰值滑移随温度升高呈先减小后增大的趋势,不同冷却方式对峰值粘结应力和峰值滑移的影响不明显;考虑损伤的理论粘结-滑移全曲线与试验曲线拟合度较好;采用理论模型计算的粘结强度与试验值较吻合。

关键词:高温;冷却方式;钢筋混凝土;粘结-滑移;粘结强度

中图分类号:TU312 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2021)05-0094-07

Bond performance of concrete-steel rebar under different cooling ways after high temperature

YANG Haifeng^{1a,1b}, YANG Yanxi^{1a}, WANG Yumei², ZHANG Tianbao^{1a}, HUANG Ying^{1a,1b}

(1a. College of Civil and Architecture Engineering; 1b. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety, Guangxi University, Nanning 530004, P. R. China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: In order to study the concrete-rebar bond-slip performance under different cooling ways after high temperature, a central pull-out test had been carried out on 39 reinforced concrete specimens after high temperature, and the splitting tensile strength test of the specimens under natural cooling had been completed. The effect of high temperature and different cooling ways on peak bond stress and peak slip of the specimens are discussed in this paper. The calculation equations between peak bond stress, peak slip and temperature have been established, and the full curve equation of bond-slip considering initial temperature damage has been proposed. Based on the theoretical model of bond strength, the theoretical value of bond strength under natural cooling has been calculated. The results show that as the temperature increases, the peak bond stress decreases linearly. At 500 °C, the bond strength loss reached 80.5%, and

收稿日期:2020-04-24

基金项目:国家自然科学基金(51768004)

作者简介:杨海峰(1984-),男,副教授,博士,主要从事混凝土材料及结构性能研究,E-mail:haifengyang@gxu.edu.cn。
黄莹(通信作者),女,博士,E-mail:xiangwangyinghuo@sohu.com。

Received:2020-04-24

Foundation item:National Natural Science Foundation of China (No. 51768004)

Author brief:YANG Haifeng (1984-), associate professor, PhD, main research interests: behavior of the concrete material and structure, E-mail: haifengyang@gxu.edu.cn.
HUANG Ying (corresponding author), PhD, E-mail: xiangwangyinghuo@sohu.com.

the peak slip showed a trend of first decreasing and then increasing with growth of temperature. The effect of different cooling ways on peak bond stress and peak slip is not obvious. The theoretical bond-slip full curves considering damage has a good fit with the test curves; The bond strength calculated by the theoretical model is in good agreement with the test value.

Keywords: high temperature; cooling ways; reinforced concrete; bond-slip; bond strength

随着中国经济的迅速发展,城市高层建筑密度大、易发生重大火灾。钢筋混凝土结构在火灾后会出现不同程度的损伤,从而导致建筑物倒塌,造成经济损失,给社会安全带来巨大威胁。粘结是钢筋混凝土间一种复杂的相互作用,足够的粘结强度是钢筋混凝土发挥良好工作性能的基础,因此,研究钢筋混凝土在火灾后的粘结性能退化十分必要。已有许多学者研究温度对混凝土力学性能^[1]和钢筋混凝土粘结性能的影响,Bi等^[2]和Karolina等^[3]研究发现,温度越高,混凝土的抗压强度越低;杨婷等^[4]研究发现,混杂纤维超高性能混凝土在1000℃后保持67%的残余强度;周子健等^[5]和Ergün等^[6]通过中心拉拔试验发现,高温后钢筋与混凝土的粘结强度随着温度升高呈下降趋势;杨鸥等^[7]则发现粘结强度在200℃时稍有回升,大于200℃后急剧下降。火灾发生后,根据受灾程度不同存在消防射水或消防安全系统自动喷水等不同的冷却方式,目前学者们集中研究冷却方式对混凝土力学性能的影响,贾福萍等^[8]、曲海坤等^[9]研究发现,250℃高温后混凝土自然冷却的强度比喷水冷却的强度大,但当温度升到450℃后则相反。考虑到不同冷却方式可能对钢筋混凝土粘结性能存在一定影响,笔者通过中心拉拔试验,研究不同冷却方式对高温后钢筋混凝土粘结-滑移性能的影响,为不同冷却方式下高温试件的深入研究提供参考。

1 试验概况

1.1 原材料与配合比

粗骨料购于南宁市武鸣区某石场,其基本物理性能如表1所示;细骨料购于南宁市云桥建材市场,骨料粒径为0.16~4.75mm,细度模数为2.98,粗细骨料均为连续级配;水泥为海螺牌P.O.42.5普通硅酸盐水泥;拌合水来自实验室自来水;钢筋为精轧螺纹钢PSB575,直径20mm。根据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)中的相关规定,试验配合比及常温下实测混凝土的立方体抗压强度 f_{cu} 、劈裂抗拉强度 f_t 见表2,表中W为拌合水,C为水泥,S为天然河沙,NA为天然粗骨料。

表1 粗骨料的基本物理性能

粒径/mm	表观密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	堆积密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
5~31.5	2 702.9	1 480
吸水率/%	压碎指标/%	
0.28	11.41	

表2 混凝土配合比

W/C	材料用量/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)				f_{cu}/MPa	f_t/MPa
	C	S	NA	W		
0.45	433	659	1 172	195	50.6	3.26

1.2 试件设计与试验方法

试验考虑不同温度(20、200、300、400、500℃)、冷却方式(自然冷却(ZL)、喷水冷却10min(PL1)、喷水冷却30min(PL2)),设计13组立方体抗压试件、13组中心拉拔试件(试件尺寸如图1所示)和5组劈裂抗拉试件(自然冷却方式),每组3个,共93个试件。钢筋粘结段为100mm,非锚固区利用PVC管控制。高温试验采用RX3-45-9工业电阻炉进行,将不同组别的试件分别升温至恒定温度,升温曲线如图2所示,达到目标温度后,恒温6h,使试件内外温度保持一致^[10]。6h后切断电阻炉电源,打开炉门,将需要喷水冷却的试块取出,其余试块留在炉内,自然冷却至20℃再取出。喷水冷却采用消防灭火喷头在5m范围内对试件进行喷水处理,通过水表控制喷枪的出水量在15L/s左右,考虑不充分冷却10min和充分冷却30min^[11],喷水处理完成后,将试件放置于实验室环境晾干至20℃。

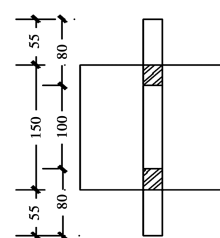


图1 试件尺寸图(mm)

Fig. 1 Specimens size (mm)

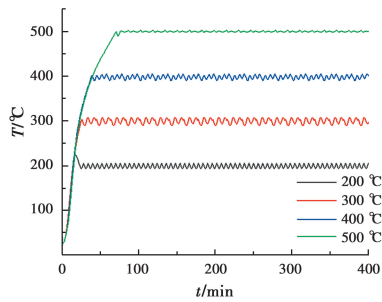


图 2 升温曲线

Fig. 2 Heating curves

试验加载采用电液伺服岩石多功能试验机 (TJW-1000), 位移控制加载速度为 0.2 mm/min, 试验机自动采集加载端的荷载和位移, 自由端位移由前后两个对称放置的位移计连接 DH3821 静态采集仪系统采集, 加载设备及装置如图 3 所示。



图 3 加载设备

Fig. 3 Loading device

2 试验结果及特征值分析

2.1 试验结果

在试验温度工况下, 高温前后拉拔试件最终破坏形式均发生劈裂破坏, 高温变化未引起试件破坏形态的明显差异。高温前, 由于试件没有箍筋约束, 拉拔过程中钢筋肋对肋前混凝土产生径向挤压, 试件被劈裂成 2~3 块, 发生劈裂破坏; 高温后, 试件仍出现劈裂破坏, 但随着温度的增加, 裂缝宽度逐渐减小, 当温度达到 500 °C 时, 试件表面仅出现微小裂缝, 不同温度下试件的破坏形态如图 4 所示。图 5 为高温后不同冷却方式下混凝土立方体抗压强度试验结果, 从图中可以看出, 随着温度的升高, 混凝土立方体抗压强度逐渐降低, 不同冷却方式对立方体抗压强度的影响不明显。

不同冷却方式下试件的粘结-滑移曲线如图 6 所示。假设钢筋与混凝土间的粘结强度沿着锚固长度均匀分布, 平均粘结应力由公式 $\tau = \frac{p}{\pi dl}$ 求得^[12]。

式中: τ 为平均粘结力, MPa; p 为荷载, kN; d 为钢筋直径, mm; l 为锚固长度, mm。试件命名规则: (A/B/C) 温度-序号, 其中, A 为自然冷却方式系列; B 为喷水冷却 10 min; C 为喷水冷却 30 min。以试件 A200-1 为例, 表示经历 200 °C 高温后自然冷却的 1 号试块。从图 6 可知, 不同冷却方式试件的粘结-滑移曲线与常温下的十分相似, 3 种冷却方式下的粘结-滑移曲线均表现出同一特征: 峰值粘结应力随温度升高而降低, 温度越高, 粘结-滑移曲线下降得越平缓, 这是因为高温作用使试件产生初始损伤, 降低了试件的峰值粘结应力。

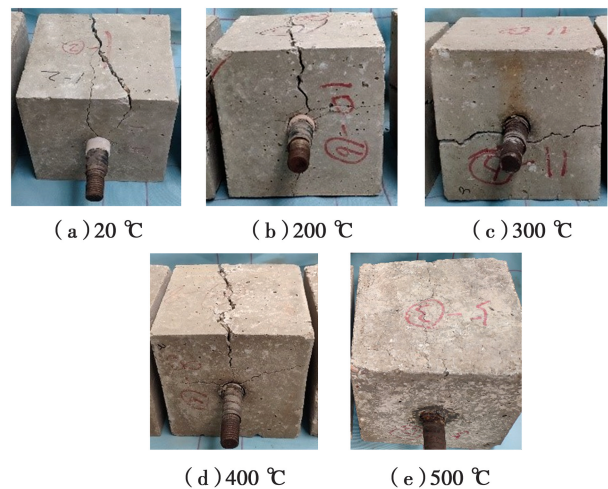


图 4 试件破坏形式

Fig. 4 Failure patterns of pull-out specimens

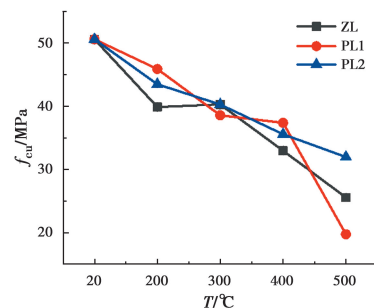


图 5 立方体抗压强度与温度的关系

Fig. 5 Relationship between temperatures and cubic compressive strength

2.2 峰值粘结应力与峰值滑移分析

不同冷却方式下温度与峰值粘结应力的关系, 如图 7 所示。由图 7 可知, 同一温度下, 不同冷却方式的峰值粘结应力值都很接近, 说明不同冷却方式对试件的峰值粘结应力影响不大。随着温度的升高, 不同冷却方式试件的峰值粘结应力均呈现明显线性降低的趋势, 由图 5 可知, 随着温度的升高, 混凝土立方体抗压强度逐渐降低, 且下降趋势大致随

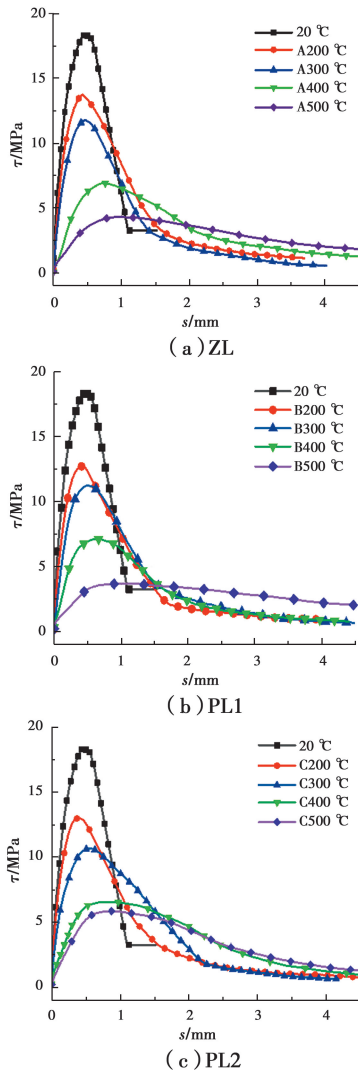


图 6 粘结-滑移曲线
Fig. 6 Bond-slip curves

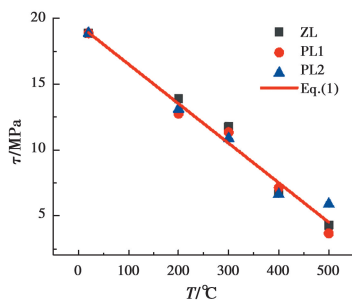


图 7 峰值粘结应力与温度的关系
Fig. 7 Relationship between peak bond stress and temperatures

温度的升高而加剧,而粘结强度随着抗压强度的减小而减小,因此,峰值粘结应力随着温度的升高呈明显降低的趋势,可知高温作用对试件的粘结性能劣化影响显著。以上分析表明,试件的峰值粘结应力与温度关系密切,采用式(1)来描述高温后的峰值粘结应力,其中 $R^2=0.979$ 。

$$\tau = -0.02999 \cdot T + 19.50548 \quad (20^\circ\text{C} \leq T \leq 500^\circ\text{C}) \quad (1)$$

不同冷却方式下温度与峰值滑移的关系如图 8 所示。从图 8 可以看出,不同冷却方式对峰值滑移的影响规律不明显,随着温度的升高,试件的峰值滑移大致呈先减小后增大的趋势,在 200 °C 时,3 种冷却方式的峰值滑移都达到最小值,总体呈抛物线关系。建议采用式(2)来描述经历高温后试件的峰值滑移,其中 $R^2=0.90184$ 。

$$s = (4.62499 \times 10^{-6}) \cdot T^2 - 0.00141 \cdot T + 0.53191 \quad (20^\circ\text{C} \leq T \leq 500^\circ\text{C}) \quad (2)$$

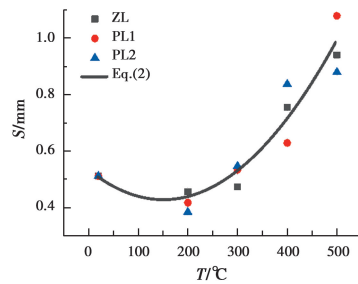


图 8 峰值滑移与温度的关系

Fig. 8 Relationship between peak slip and temperatures

3 高温后损伤本构关系

3.1 粘结-滑移损伤本构方程

钢筋与混凝土之间的粘结性能通过粘结-滑移曲线表达,采用图 9 曲线上某点的割线模量来表征试件的粘结损伤程度,曲线上任一点的割线模量都可以用损伤变量 $\beta = \tau/s$ 来描述。假设常温下界面没有损伤时粘结性能参数为 β_0 ,高温后界面出现损伤,粘结性能参数为 β_T ,则高温作用后损伤变量 D_T 定义为 $D_T = (\beta_0 - \beta_T) / \beta_0 \Leftrightarrow \beta_T = (1 - D_T)\beta_0$ 。

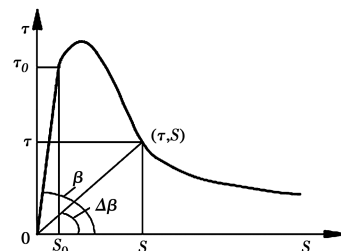


图 9 典型粘结-滑移曲线
Fig. 9 Typical bond-slip curve

由 Lemaitre 应变等价性假说^[13-14]可知:应力作用在损伤材料上产生的应变与有效应力作用在无损伤材料上引起的应变等价。因此,高温后混凝土的损

伤全曲线关系可用式(3)表示。

$$\tau_T = \beta_T s = (1 - D_T)\beta_0 s \quad (3)$$

高温后混凝土试件在中心拉拔的加载过程中产生二次损伤,其损伤全曲线关系为: $\tau_\tau = (1 - D_\tau) \cdot \beta_T s$,式中: D_τ 为中心拉拔作用引起的损伤变量。则高温后混凝土在中心拉拔作用下的损伤全曲线关系为: $\tau_\tau = (1 - D)\beta_0 s$,式中: D 为混凝土高温后受中心拉拔作用的总损伤变量, $D = D_T + D_\tau - D_T D_\tau$ 。

分段构建损伤模型,受力状态峰值粘结应力前采用 Weibull 统计分布,峰值后则在过镇海等^[15-16]损伤模型的基础上引入曲线形状控制参数 a 和 b 来描述峰后曲线的收敛段。总损伤变量 D 表达式如(4)所示。式中,两个材料强度参数计算式为 $m = 1/\ln(\beta_T s_u/\tau_\tau)$, $\rho = \tau_\tau/(\beta_T s_u)$; a 和 b 可通过拟合得到。高温后混凝土在中心拉拔作用下的粘结-滑移损伤全曲线模型如式(5)所示。

利用式(5)对实测曲线进行拟合,不同冷却方式任取一个温度得到如图 10 所示粘结-滑移全曲线,从图 10 可以看出,计算结果与实测结果的吻合程度较高,拟合度较好,相关参数见表 3。

$$D = D_\tau + D_T - D_\tau D_T = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\frac{1}{m}\left(\frac{s}{s_u}\right)^m\right] \frac{\beta_T}{\beta_0} & \frac{s}{s_u} \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho}{a\left[\left(\frac{s}{s_u} - 1\right)^b\right] + \frac{s}{s_u}} \frac{\beta_T}{\beta_0} & \frac{s}{s_u} > 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$\tau_\tau = \begin{cases} s\beta_T \exp\left[-\frac{1}{m}\left(\frac{s}{s_u}\right)^m\right] & \frac{s}{s_u} \leq 1 \\ \frac{s\beta_T \rho}{a\left[\left(\frac{s}{s_u} - 1\right)^b\right] + \frac{s}{s_u}} & \frac{s}{s_u} > 1 \end{cases} \quad (5)$$

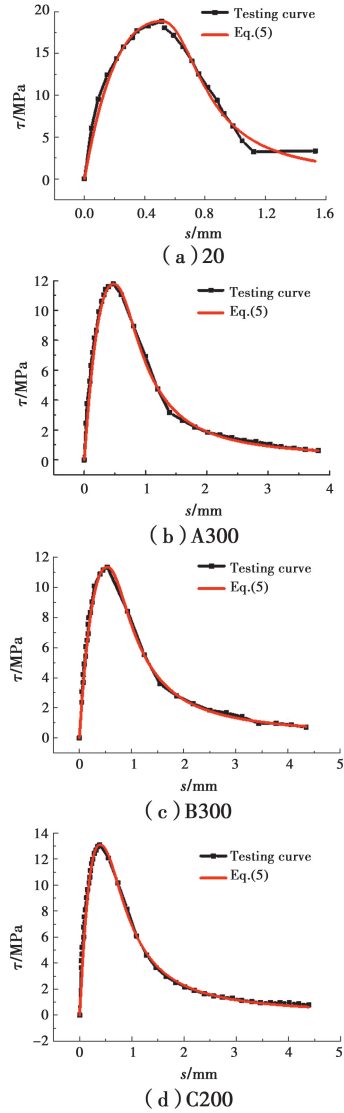


图 10 粘结-滑移全曲线
Fig. 10 Bond-slip curves

表 3 拟合参数

Table 3 Fitting parameters

试件类型	ZL				PL1				PL2			
	m	a	b	R^2	m	a	b	R^2	m	a	b	R^2
20 °C	0.953	4.499	2.408	0.98								
200 °C	0.843	1.121	2.361	0.99	1.448	0.917	2.421	0.99	1.168	0.735	2.442	0.99
300 °C	1.184	1.308	2.412	0.99	1.073	1.299	2.271	0.99	0.868	0.523	2.981	0.99
400 °C	1.536	0.761	2.273	0.99	1.454	0.917	2.421	0.99	1.127	0.414	2.948	0.99
500 °C	1.134	0.611	2.032	0.99	0.975	0.254	2.093	0.99	1.545	0.428	2.665	0.99

3.2 界面 D-s 损伤曲线分析

根据式(3)得到中心拉拔试件的损伤-滑移曲线(D-s 曲线),如图 11 所示。可以看出,试件的损伤发展过程大致可以分为 3 个阶段:初始损伤阶段、损伤快速发展阶段、损伤缓慢积累阶段。粘结破坏过

程中任意时刻界面损伤发展速度可由曲线上相应点的斜率来反映,斜率越大,损伤发展速度越大。

由图 11 可以看出,随着高温温度增加,初始损伤逐渐增大,在 300 °C 前,3 种冷却方式间的差异较大,可能是由于高温后混凝土经喷水冷却,温差加剧

了混凝土的劣化,进而增大了损伤,而 400、500 °C 时,混凝土基本丧失变形能力,3 种冷却方式下的损伤差异较小,且温度越高,拉拔过程中前期损伤发展更缓慢。

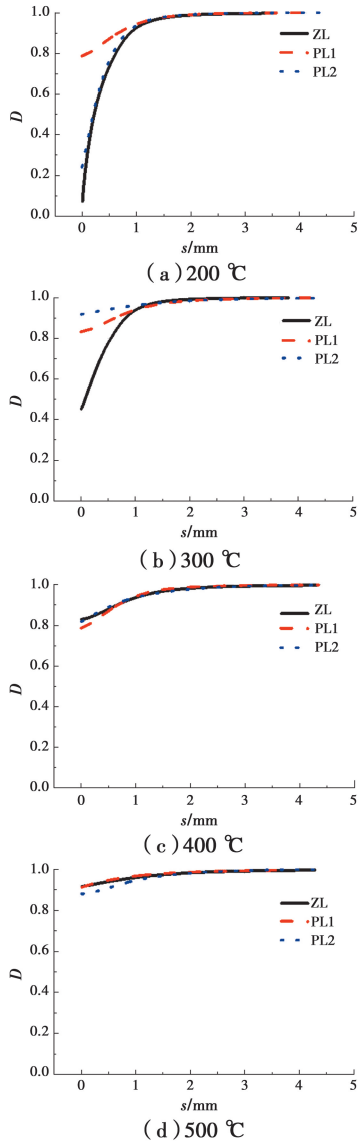


图 11 D-s 曲线
Fig. 11 D-s curves

4 粘结强度理论计算

根据试验结果,不同冷却方式对粘结强度影响较小,因此,选取自然冷却方式下的试验结果进行高温后混凝土与钢筋间的粘结强度理论计算。在 Van Der Veen 的厚壁筒理论^[17-18]基础上,增加考虑高温影响的开裂内层混凝土软化效应,采用式(6)来计算粘结强度理论值,与试验数据进行比较,比较结果见表 4。模型如图 12 所示。

$$\tau_{u,d} \tan \alpha = \frac{f_t 2e}{d} \frac{\left(c + \frac{d}{2}\right)^2 - e^2}{\left(c + \frac{d}{2}\right)^2 + e^2} + \frac{2f_t}{d} \left(e - \frac{d}{2}\right) \cdot \left[1 - \left\{\left(\frac{2\pi\epsilon_{cr}}{n\delta_0}\right)\left(e - \frac{d}{2}\right)\right\}^k \frac{1}{k+1}\right] \quad (6)$$

表 4 试验与理论计算结果

Table 4 Experimental and theoretical results

试件类型	f_t /MPa	τ_u /MPa	$\tau_{u,d}$ /MPa	$\tau_{u,d}/\tau_u$
20	3.266 8	18.853 5	17.081 4	0.91
A200	2.849 0	13.894 1	14.897 7	1.07
A300	2.249 6	11.767 6	11.763 3	0.99
A400	1.482 3	6.920 1	6.920 0	0.98
A500	0.898 5	4.291 2	4.191 8	0.97

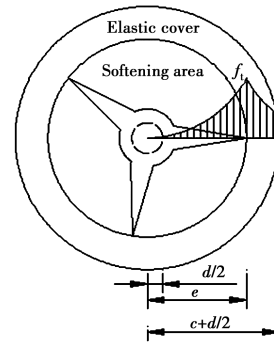


图 12 考虑软化效应的开裂内层混凝土力学模型
Fig. 12 Mechanical model of cracking inner layer concrete considering softening effect

5 结论

通过混凝土-钢筋的中心拉拔试验,研究了高温后不同冷却方式下混凝土-钢筋的粘结-滑移性能。主要结论有:

- 1)随着高温温度的增加,峰值粘结应力线性下降,峰值滑移呈先下降后大幅上升的趋势,而不同冷却方式对峰值粘结应力、峰值滑移的影响不明显。
- 2)对高温后试件进行界面损伤分析,结合损伤本构曲线,建立了高温后的粘结-滑移损伤本构关系,拟合效果较好。
- 3)对试件的整体损伤演化过程分析发现,随着温度的升高,初始损伤变量呈增大的趋势,而损伤的发展速度随着温度的增大而减缓。
- 4)在 Veen 理论模型基础上,增加考虑高温对开裂内层混凝土软化效应影响,计算了高温后混凝土-钢筋粘结强度,理论计算值与试验结果吻合较好,能较好地预测高温后混凝土-钢筋粘结强度。

参考文献:

- [1] MA Q M, GUO R X, ZHAO Z M, et al. Mechanical properties of concrete at high temperature: A review [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 93: 371-383.
- [2] BI J, LIU P F, GAN F. Effects of the cooling treatment on the dynamic behavior of ordinary concrete exposed to high temperatures [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 248: 118688.
- [3] KAROLINA R, YULIA CORSIKA M S. Analysis of mechanical and physical behaviour of post-burn concrete [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 725: 012034.
- [4] 杨婷, 刘中宪, 杨焯凯, 等. 超高性能混凝土高温后性能试验研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(3): 115-126.
YANG T, LIU Z X, YANG Y K, et al. Experimental investigation on behavior of ultra-high performance concrete after high temperature [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(3): 115-126. (in Chinese)
- [5] 周子健, 霍静思, 李智. 高温下钢筋与混凝土粘结性能试验与分析[J]. *建筑结构*, 2019, 49(10): 76-80.
ZHOU Z J, HUO J S, LI Z. Experimental study and analysis on bond behaviour between steel bar and concrete [J]. *Building Structure*, 2019, 49(10): 76-80. (in Chinese)
- [6] ERGÜN A, KÜRKLÜ G, BAŞPINAR M S. The effects of material properties on bond strength between reinforcing bar and concrete exposed to high temperature [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 112: 691-698.
- [7] 杨鸥, 王朝阳, 霍静思. 高温下钢筋与混凝土的粘结性能试验与分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(9): 10-19.
YANG O, WANG Z Y, HUO J S. Experimental study and analysis on bond performance between reinforcing bar and concrete under high temperature [J]. *Journal of Hunan University (Natural Science)*, 2018, 45(9): 10-19. (in Chinese)
- [8] 贾福萍, 王永春, 渠艳艳, 等. 冷却方式和静置时间对高温后混凝土残余强度影响[J]. *建筑材料学报*, 2011, 14(3): 400-405.
JIA F P, WANG Y C, QU Y Y, et al. Influences of various cooling methods and standing time on residual strength of concrete after elevated temperature exposure [J]. *Journal of Building Materials*, 2011, 14(3): 400-405. (in Chinese)
- [9] 曲海坤, 周林聪, 王丽, 等. 不同冷却方式下高温混凝土性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2017, 44(8): 119-122.
- QU H K, ZHOU L C, WANG L, et al. Study on properties of high temperature concrete under different cooling methods [J]. *New Building Materials*, 2017, 44(8): 119-122. (in Chinese)
- [10] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土的高温性能及其计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
GUO Z H, SHI X D. Behaviour of reinforced concrete at elevated temperature and its calculation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)
- [11] 自动喷水灭火系统设计规范: GB 50084—2017 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
Code for design of sprinkler systems: GB 50084-2017 [S]. Beijing: China Planning Press, 2017. (in Chinese)
- [12] 李鹏程, 彭有开, 李峰, 等. 再生粗骨料对钢筋混凝土之间粘结性能的影响[J]. *土木建筑与环境工程*, 2016, 38(Sup1): 6-12.
LI P C, PENG Y K, LI F, et al. Effects of coarse recycled aggregate on the bond behavior between concrete and rebars [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2016, 38(Sup1): 6-12. (in Chinese)
- [13] JEAN L. How to use damage mechanics [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1984, 80(2): 233-245.
- [14] 李兆霞. 损伤力学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
LI Z X. Damage mechanics and its application [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [15] 过镇海, 张秀琴. 混凝土在反复荷载作用下的应力-应变全曲线[J]. *冶金建筑*, 1981, 11(9): 14-17.
GUO Z H, ZHANG X Q. Full stress-strain curve of concrete under repeated load [J]. *Industrial Construction*, 1981, 11(9): 14-17. (in Chinese)
- [16] 过镇海, 张秀琴, 张达成, 等. 混凝土应力-应变全曲线的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 1982, 3(1): 1-12.
GUO Z H, ZHANG X Q, ZHANG D C. Experimental investigation of the complete stress-strain curve of concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 1982, 3(1): 1-12. (in Chinese)
- [17] VAN DER VEEN C. Cryogenic bond stress-slip relationship [D]. Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 1990.
- [18] TEPFERS R. Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars [J]. *Magazine of Concrete Research*, 1979, 31(106): 3-12.