

高温后钢筋混凝土黏结性能试验研究

袁广林^{1,2} 郭 操³ 吕志涛⁴

(1. 东南大学博士后科研流动站, 江苏 南京 210096; 2. 中国矿业大学建筑工程学院, 江苏 徐州 221008;
3. 上海华东房产设计院有限公司, 上海 200120; 4. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要 对在不同受热温度、冷却方式和加载制度下钢筋混凝土黏结性能进行试验研究, 分析了不同条件下钢筋混凝土的黏结-滑移曲线和极限黏结应力、极限滑移. 钢筋混凝土试件的受热温度分别为 250℃、450℃和 650℃, 冷却方式分为自然冷却和喷水冷却 2 种, 加载方式考虑单向拉拔试验和循环往复加载. 结果表明, 受热温度、冷却方式和加载制度对高温后钢筋混凝土的黏结性能有很大影响.

关键词 钢筋混凝土; 高温; 黏结性能; 冷却方式; 加载制度

中图分类号: TU528.34 文献标识码: A 文章编号: 1000-198X(2006)03-0290-05

钢筋和混凝土 2 种性质完全不同的材料之所以能够共同工作, 主要是依靠钢筋和混凝土之间的黏结应力, 钢筋混凝土构件就是通过钢筋与混凝土之间的黏结来传递应力、协调变形的. 由于钢筋混凝土结构可能经常或偶然地受高温作用, 因此, 高温后钢筋和混凝土的黏结问题越来越受到重视. 国内外已开展了高温对钢筋混凝土黏结性能损伤的研究^[1-5], 但由于影响黏结的因素很多, 破坏机理复杂, 以及高温下试验条件的限制, 目前对于高温后钢筋与混凝土的黏结性能缺乏全面、深入的研究. 本文通过对经历不同受热温度、不同冷却方式、不同加载制度下钢筋和混凝土之间的黏结性能的试验研究, 探讨了影响钢筋混凝土黏结性能的因素及高温后黏结性能退化的规律.

1 试验概况

1.1 试件制作

混凝土材料采用强度等级为 32.5 的普通硅酸盐水泥, 石灰岩质骨料, 骨料粒径为 5~25 mm. 混凝土水灰比为 0.42, 水泥:砂:石的配合比为 1:2.03:3.78. 混凝土 28 d 实测抗压强度为 $f_{cu} = 35$ MPa. 试件拉拔钢筋为 $\Phi 16$ 的变形钢筋, 屈服强度 372 MPa, 极限强度 574 MPa, 试件箍筋为 1 $\phi 6$, 其屈服强度为 314 MPa, 极限强度为 464 MPa.

试件采用 160 mm × 150 mm × 150 mm 的长方体试件, 拉拔钢筋位于试件的中轴线上, 黏结段长度为 100 mm. 在埋入钢筋的两端各 30 mm 用 PVC 管套住, 使该段钢筋与混凝土之间无黏结. 试件在黏结段中部设 $\phi 6$ 箍筋一道.

1.2 试验装置

试验在中国矿业大学建筑工程学院结构实验室进行. 加载装置利用 PWS-500 型电液伺服试验机, 并在此基础上设计制作了试件拉压夹具^[6-7](图 1). 在试验过程中, 试验力和滑移值均可以由试验机的控制系统进行控制. 试验力的大小可通过试验机的拉压传感器获得, 钢筋自由端滑移值则可通过位移计获得.

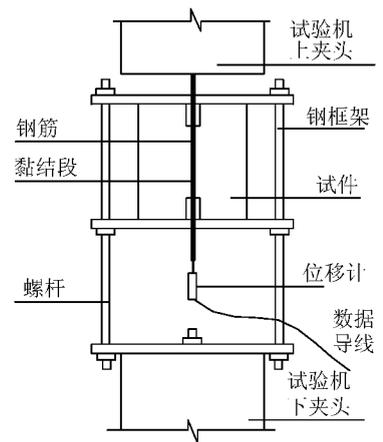


图 1 黏结试件加载装置示意图

Fig. 1 Test equipment for specimen loading

1.3 加载方式

试验中采用 2 种加载方式。

加载方式 I :单向拉拔直至破坏.为更好地研究试件的全过程破坏状况,黏结拔出试验采用“荷载-位移混合控制”的加载制度.试验开始时先以 2.5 kN 为增量逐级给试件施加荷载,当数据采集系统中的读数(荷载值)不能按预定数值增长而开始反方向变化时,说明试件已经进入破坏阶段,可转为位移控制.从转变为控制位移加载起,以 0.5 mm/min 的速度控制试验机上夹头的位移,直至试件破坏.

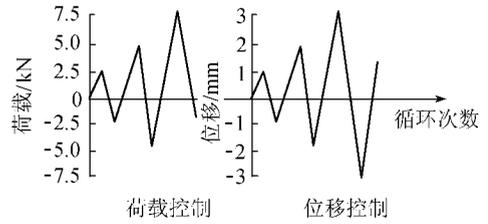


图 2 往复加载的加载方式
Fig.2 Law of cyclic loading

加载方式 II :往复循环加载直至破坏.试验采用“荷载-位移混合控制”的加载制度(图 2),即先由单向拉拔试验结果估算出往复加载试件破坏的最大荷载,再配合电液伺服机的控制系统进行控制.试验在荷载控制时的增量为 2.5 kN.当试验拉或压荷载不能按预定数值增长而是反方向变化时,说明试件已经进入破坏阶段,可转为位移控制,此时的位移作为标准位移 Δ .从转变为位移控制加载起,即按标准位移 Δ 值的倍数控制,直到试件破坏.

1.4 试件加热

试件采用“黏结面直接受热”的加热方式.试件在“GWD—003 型试验电炉”中加热,由于钢筋直接暴露在炉膛中,故认为黏结面温度与炉膛温度相同,可由炉膛温度进行控制.炉膛内部的升温速度为 10 °C/min,在达到预定温度后再恒温 45 min,然后打开炉盖,迅速从炉内取出试件分别用“自然冷却”和“喷水冷却”2 种冷却方式进行冷却.7 d 后进行试验.

1.5 黏结试验分组

根据加热温度、冷却方式和加载方式等因素,本试验的试件分组见表 1.

表 1 黏结试件试验分组

Table 1 Group of bond test

试件编号	最高受热温度/°C	冷却方式	加载方式	试件编号	最高受热温度/°C	冷却方式	加载方式
C ₀	常温			D ₀	常温		
C ₁	250	自然冷却	I	D ₁	250	自然冷却	II
C ₃	450	自然冷却		D ₃	450	自然冷却	
C ₅	650	自然冷却		D ₅	650	自然冷却	
C ₂	250	喷水冷却		D ₂	250	喷水冷却	
C ₄	450	喷水冷却		D ₄	450	喷水冷却	
C ₆	650	喷水冷却		D ₆	650	喷水冷却	

2 试验现象

试件在受热后自然冷却时混凝土的表面特征见表 2.在受热 250 °C 后,试件有极少的微小裂缝.随着受热温度的升高,试件表面产生了更多的裂缝,而且还有相互贯通的趋势.

在自然冷却条件下,250 °C,450 °C,650 °C 试件在 7 d 后的裂缝与开始冷却时比

较变化均不明显.在喷水冷却条件下,受热 250 °C 试件受喷水冷却的影响较小,颜色和裂缝与自然冷却试件接近;与自然冷却试件相比,受热 450 °C 和 650 °C 试件经过 7 d 的喷水冷却后,由于受喷水骤冷与 Ca(OH)₂ 的水化愈合的影响,裂缝由“细而密”变为“宽而疏”.在试件的加载过程中,即将进入位移控制时,在 5 m 内能听到清晰的钢筋与混凝土摩擦而发出的“磁磁”声,往复加载试件达到破坏所需时间比单向拉拔试件更长且摩擦声也更大.与加载前相比,加载后各组试件的裂缝均没有明显变化,在混凝土表面产生新的裂缝前试件已

表 2 试件在受热后自然冷却时混凝土的表面特征

Table 2 Surface characteristics of specimens cooled in air after being heated

温度/°C	颜色	裂缝	掉皮	缺角	疏松状况	有无爆裂
250	同常温	极少	无	无	不疏松	无
450	淡红	细微、少量	无	无	轻度疏松	无
650	略白	明显、较多	少量	个别角	较明显疏松	无

发生黏结破坏。

3 试验结果与分析

3.1 加载方式 I 的 $\tau \sim s$ 曲线

高温后自然冷却和喷水冷却的钢筋和混凝土间的平均黏结应力 τ 和钢筋自由端相对滑移 s 的关系见图 3. 不同冷却方式下极限黏结应力和相应位移的变化曲线见图 4.

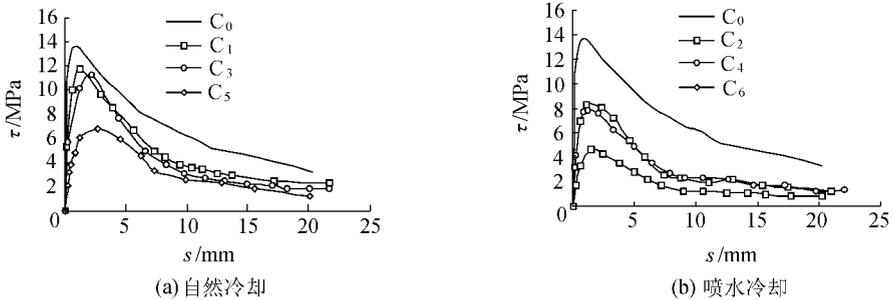


图 3 高温后拔出试验的 $\tau \sim s$ 曲线

Fig.3 $\tau \sim s$ curves from pull-out test after being heated at high temperature

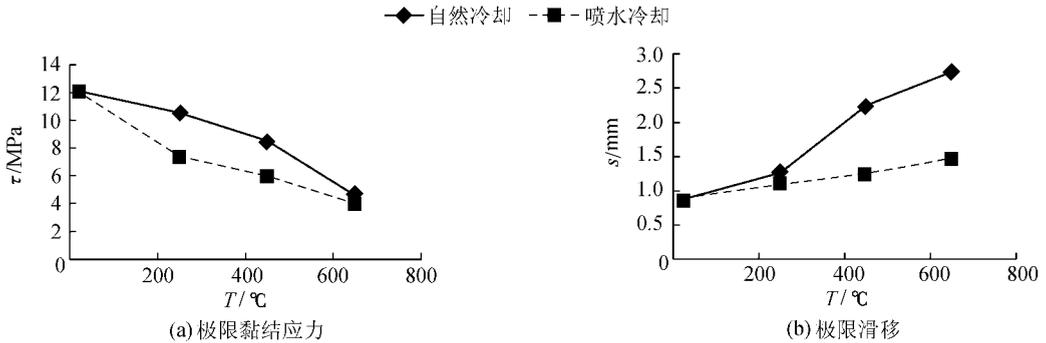


图 4 不同冷却方式下的极限黏结应力和滑移

Fig.4 Ultimate slips and ultimate bond stresses for different cooling ways

从图 3 可以看出,无论是高温后自然冷却还是喷水冷却,随温度的升高,曲线的峰值下降,即极限黏结力下降,但前者达极限黏结力时的滑移量明显增加,而后者达极限黏结力时的滑移量变化不大.这主要是由于混凝土受到高温作用后骤然冷却,内外温度极不均匀导致混凝土结构损伤及裂缝的充分发展,从而造成高温后喷水冷却条件下极限黏结强度下降较大,而达极限黏结力时的滑移量变化不大.

从图 4(a)可以看出,高温后喷水冷却试件的极限黏结力下降较快.对于自冷的黏结试件,当温度不超过 450°C 时,试件的极限黏结应力和常温下的黏结应力相比,降低程度较小(不大于常温下黏结应力的 20%);当温度达到 650°C 时,极限黏结应力已不到常温下的 50%.对于水冷的黏结试件,在 250°C 时,极限黏结应力与常温下相比已经下降近 40%;当温度达到 650°C 时,极限黏结应力与常温下相比已经下降了 65% 以上.

从图 4(b)可以看出,随着温度的升高,水冷试件的极限滑移的增长速度要远远小于自冷试件极限滑移的增长速度.当温度为 250°C 、 450°C 、 650°C 时,水冷试件的极限滑移分别是自冷试件极限滑移的 88.1%、56.3%、53.6%.

3.2 加载方式 II 的 $\tau \sim s$ 曲线

滞回曲线可以全面描述试件的弹塑性性质及抗震性能.典型试件弹塑性阶段的滞回曲线见图 5. 往复循环加载下各试件的黏结应力-滑移包络线见图 6. 由图 5 可知,在相同温度下,水冷试件滞回曲线所围面积逐渐减小.由图 6 可知,在同一冷却方式下,随着温度的升高,试件的包络线在加载和卸载阶段的斜率均减小,且曲线的丰满度也逐渐减小.这说明随着温度的升高,试件在往复荷载作用下的恢复力特性和耗能能力均逐渐变差,同时也说明水冷能加剧试件的黏结破坏.

图 7(a)示出了不同冷却方式下极限黏结应力随温度变化的曲线.图 7(b)示出了不同冷却方式下极限滑移随温度变化的曲线.

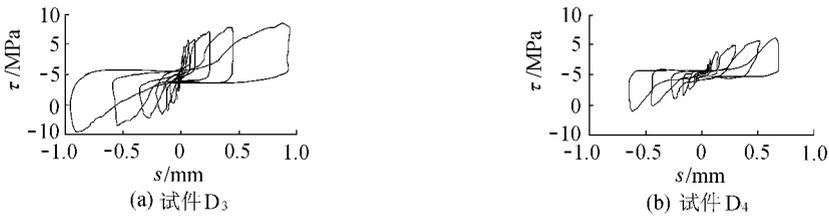


图 5 典型试件弹塑性阶段黏结应力-滑移曲线

Fig.5 Bond stress-slip curves of typical specimen in elastic-plastic phase

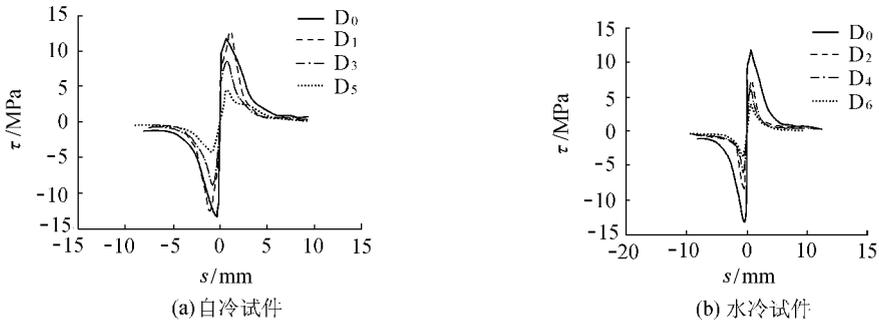


图 6 循环往复加载下试件黏结应力-滑移包络线

Fig.6 Bond stress-slip envelope under cyclic loading

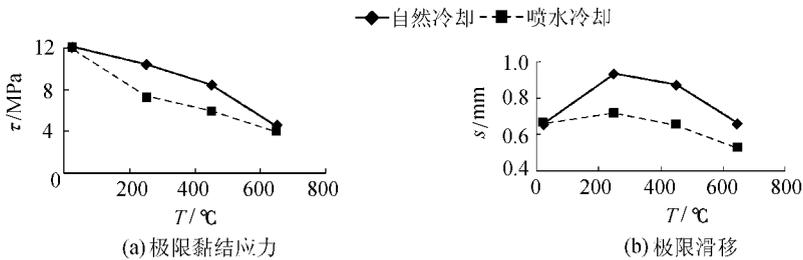


图 7 D 组试件不同冷却方式下的极限黏结应力和滑移

Fig.7 Ultimate bond stresses and ultimate slips for different cooling ways of group D

由图 7(a)可知:在自冷方式下,250℃、450℃、650℃试件的极限黏结应力分别为常温试件的 86.8%、70.2%、37.9%。在水冷方式下,250℃、450℃、650℃试件的极限黏结应力分别为常温试件的 60.7%、49.6%、32.9%。当温度为 250℃、450℃、650℃时,水冷试件极限黏结应力分别为自冷试件极限黏结应力的 70%、70.7%、86.9%,表明水冷能加剧试件的黏结破坏。

由图 7(b)可知:在自冷方式下,250℃、450℃、650℃试件的极限滑移分别为常温试件的 1.41 倍、1.32 倍、1.0 倍。在水冷方式下,250℃、450℃、650℃试件的极限滑移分别为常温试件的 1.09 倍、0.98 倍、0.79 倍。当温度为 250℃、450℃、650℃时,水冷试件极限滑移分别为自冷试件极限滑移的 77.4%、74.7%、78.8%。

3.3 不同加载制度对黏结性能的影响

图 8 示出了典型的往复加载试件的包络线和单向拉拔黏结应力-滑移曲线的试验结果。由图 8 可知,单向拉拔试件的曲线明显比往复加载试件更为丰满,说明与单向拉拔相比,往复加载的加载方式能加剧试件的黏结破坏。

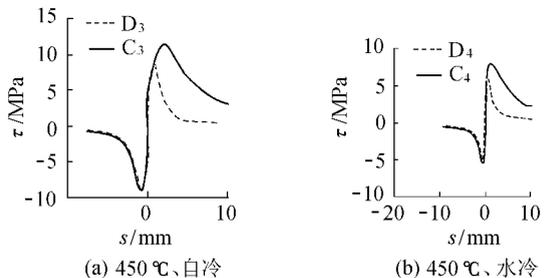


图 8 不同加载制度对试件黏结性能的影响

Fig.8 Bond properties of specimens under different ways of loading

4 结 论

a. 随温度的升高,试件的极限黏结应力逐渐减小,当温度达到 650℃时,黏结性能会遭到明显破坏。

b. 冷却方式对高温后钢筋混凝土的黏结性能有很

大影响,与自然冷却相比,水冷能加剧试件的黏结破坏。

c. 与单向拉拔相比,往复加载的加载方式能加剧试件的黏结破坏。往复荷载使试件的极限黏结应力减小,试件在往复荷载作用下的恢复力和耗能能力都会逐渐变差。

参考文献:

- [1] DIEDERICHS U, SCHNEIDER U. Bond strength at high temperatures[J]. Magazine of Concrete Research, 1981, 33: 75-84.
- [2] MORLEY P D, ROYLES R. Response of the bond in reinforced concrete to high temperatures[J]. Magazine of Concrete Research, 1985, 37: 67-74.
- [3] ROYLES R, MORLEY P D. Further response of the bond in reinforced concrete to high temperatures[J]. Magazine of Concrete Research, 1985, 37: 157-163.
- [4] 周新刚, 吴江龙. 高温后混凝土与钢筋黏结性能的试验研究[J]. 工业建筑, 1995, 25(5): 37-40.
- [5] 袁广林, 郭操, 李庆涛, 等. 高温后冷却环境对钢筋混凝土黏结性能的损伤[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(5): 605-608.
- [6] 戴靠山, 袁迎曙, 杨广. 人工气候加速腐蚀后钢筋混凝土黏结性能试验研究[J]. 混凝土, 2004(11): 45-48.
- [7] 郭操. 高温对钢筋混凝土黏结性能和梁受力性能影响的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2004.

Experimental study on bond performance of reinforced concrete after being heated at high temperature

YUAN Guang-lin^{1, 2}, GUO Cao³, LÜ Zhi-tao⁴

(1. Mobile Postdoctoral Center, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. School of Architecture & Civil Engineering, CUMT, Xuzhou 221008, China;

3. Shanghai East-China Real Estate Design Limited Company, Shanghai 200120, China;

4. College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The bond of rebar and concrete under different temperatures and different ways of cooling and loading was studied. The bond-slip curve, the ultimate bond stress, and the ultimate slip of reinforced concrete under different conditions were analyzed. During the experiments, the reinforced concrete specimens were heated at 250°C, 450°C, and 650°C, respectively, cooled in air and by water spraying, and subjected to monotonic pull-out loading and cyclic loading. The results show that the heating temperature and the ways of cooling and loading are of great influences on the bond performance of reinforced concrete.

Key words: reinforced concrete; high temperature; bond performance; cooling way; loading system