

高温后植筋黏结滑移力学性能试验

袁广林,刘 林,闫玉红

(中国矿业大学建筑工程学院,江苏 徐州 221008)

摘要 对在不同受热温度和不同加载制度下混凝土构件中 2 种锚固长度植筋的黏结滑移力学性能进行了试验.植筋的锚固长度分别为 7 倍和 15 倍植筋直径,受热温度分别为 50℃,80℃,150℃和 200℃.加载制度考虑单向拉拔和反复加载.分析了加载制度、锚固长度和加热温度对植筋试件的极限黏结应力和极限滑移的影响.结果表明,不同条件对植筋试件的黏结滑移力学性能有显著影响.根据试验结果给出了高温后植筋试件黏结应力的计算方法.

关键词 植筋 黏结滑移 锚固长度 高温

中图分类号 :TU317+.3 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2008)03-0358-05

植筋是建筑工程中常用的加固方法,其锚固性能国内外都有不少试验和理论研究^[1-4],但在结构加固和改造过程中,焊接成为不可或缺的钢筋连接方式,这样会导致植筋部位受到高温的影响;另外,当植筋结构遭遇火灾或高温影响时,也同样会导致植筋力学性能的退化.目前国内外对于植筋的高温性能的研究还很少涉及,相关研究偏重混凝土和钢筋材料高温性能,而对于环氧类结构植筋胶,这种在较低温度下即发生力学性能退化的材料则不够重视,对于植筋在经历不同高温后力学性能的退化规律也未有较成熟的理论,国内外也没有相应的抗高温(火)设计规范可循^[5-6],这将会导致加固工程中存在严重的安全隐患,因此,植筋高温后的力学性能研究具有重要的现实意义.本文通过对不同锚固长度、不同受热温度和不同加载制度的植筋试件的试验,来研究高温对植筋的黏结-滑移性能的影响规律和锚固长度对高温影响下植筋黏结性能退化的影响.

1 试验概况

1.1 试件制作

混凝土试件设计强度为 C30,尺寸为 200 mm×200 mm×300 mm,采用配合比为 1:0.43:1.42:3.02(水泥、水、砂、石之比),28 d 实测抗压强度为 $f_{cu}=36.5$ MPa,弹性模量为 32.2 GPa.28 d 后,在试件上钻孔,孔径为 18 mm,植筋为 12 钢筋,屈服强度 401 MPa,极限强度 574.7 MPa,试件内设置 2~6 箍筋,屈服强度 314 MPa,极限强度 464 MPa.植筋胶采用大连产智鑫牌 JGN 型结构胶.

试件锚固长度为 7D 和 15D(D 为植筋直径),共计 16 组(见表 1),在混凝土试件的植筋受力端设置了长度为 30 mm 的无黏结区,见图 1.

1.2 试验装置

利用中国矿业大学结构实验室 PWS-500 电液伺服试验机加载系统,采用高温后试件拉压夹具.本试验设计的试件和试验装置如图 1 所示.

1.3 加载制度

试验中采用 2 种加载制度.

a. 加载制度 I.单向拉拔直至破坏.单向拉拔试验采用荷载-位移混合控制的加载制度(图 2).试验开始

表 1 试件条件参数

Table 1 Parameters of specimens

试件 编号	设计 锚长	受热 温度/℃	试件 编号	设计 锚长	受热 温度/℃
A1	7D	常温	B1	7D	常温
A2	7D	80	B2	7D	80
A3	7D	150	B3	7D	150
C1	15D	常温	D1	15D	常温
C2	15D	50	D2	15D	50
C3	15D	80	D3	15D	80
C4	15D	150	D4	15D	150
C5	15D	200	D5	15D	200

注: A 组和 C 组试件采用加载制度 I, B 组和 D 组试件采用加载制度 II.

时先以 5 kN 为增量(图 2 中以虚线表示)给试件施加荷载,当数据采集系统中的荷载值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.从转变为位移控制加载起,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.

b. 加载制度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 3),在荷载控制时的增量为 5 kN,达到极限荷载时的位移作为标准位移 Δ .从转变为位移控制加载起,即以标准位移值 Δ 的倍数进行控制,直至试件破坏.

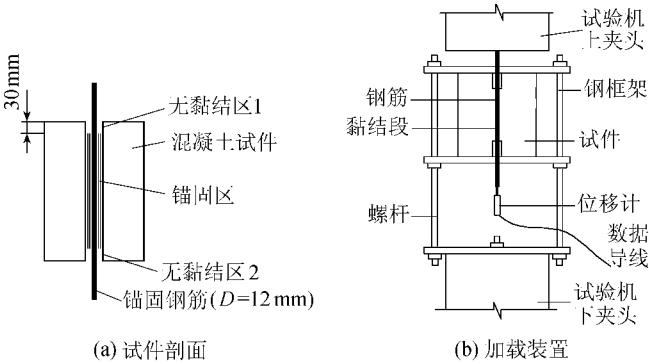


图 1 加载装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental set-up

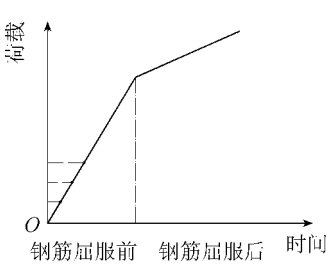


图 2 加载制度 I

Fig.2 Loading system I

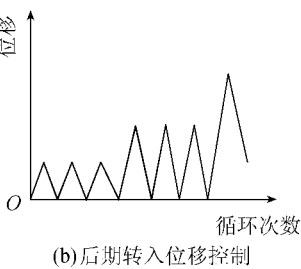
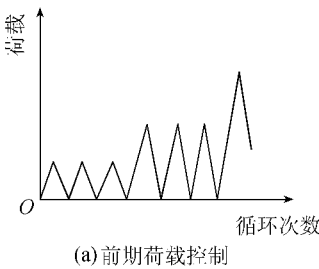


图 3 加载制度Ⅱ

Fig.3 Loading system II

1.4 试件加热

植筋与受力钢筋焊接时,热传导会使植筋的结构胶黏结区部位温度升高.试验^[7]表明,在距施焊点 50 mm 处,植筋的最高温度将达到 215℃,因此,本试验将试件的受热温度定为常温(试验时室内温度),50℃,80℃,150℃和 200℃.

受高温影响的试件采用黏结面直接受热^[8-9]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℃/min,在达到预定温度后再恒温 60 min,然后取出试件冷却,5 d 后进行试验.试件分组加热温度等级和其他各项条件参数等级列于表 1 中.

2 试验结果与分析

2.1 加载制度 I 的荷载-滑移曲线

锚固长度为 7D 和 15D 的植筋试件,在不同受热温度下的荷载-滑移曲线见图 4.

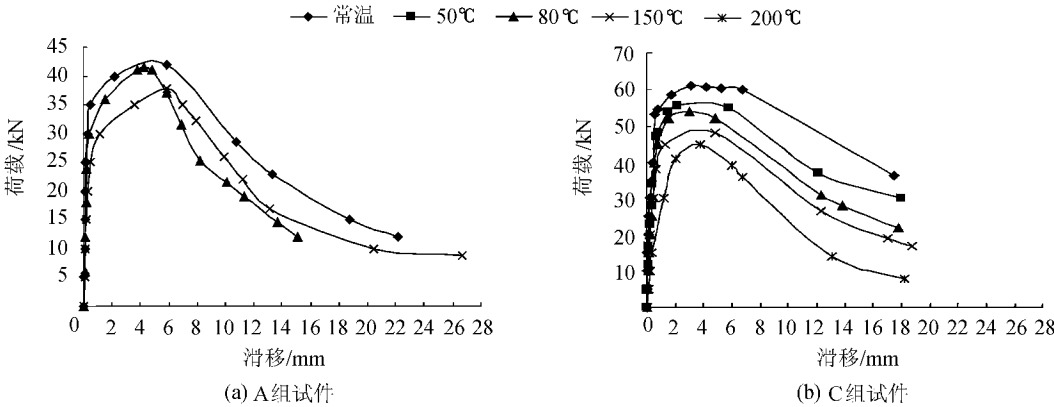


图 4 加载制度 I 不同受热温度的荷载-滑移曲线

Fig.4 Load-slip curves at different temperatures under loading system I

由图4可以看出:(a)常温和80℃温度时,随着植筋试件锚固长度的增加,黏结刚度没有明显的变化;但是当受热温度逐渐升高时,黏结刚度随着植筋试件受热温度的升高明显减小,锚固长度为15D的植筋试件在受热温度达到200℃时,黏结刚度明显减小。(b)大部分常温植筋试件极限值对应的滑移值为5mm左右。随着锚固长度的增加,荷载的滑移曲线趋于平缓。80℃的植筋试件其极限荷载值对应的滑移量为4mm左右,随着锚固长度的增加,荷载的滑移曲线也呈平缓趋势,说明由于植筋受到温度的影响,延性减少,脆性增加。(c)在50℃,80℃,150℃和200℃受热温度下,植筋试件的极限承载力分别是常温时的91.6%,90.1%,78.7%和78.3%。可以认为相同锚固长度的植筋试件随着受热温度的升高,极限承载力呈现明显的下降趋势;受热温度在80℃以下时,植筋试件的极限承载力没有明显退化。(d)在加载初期,植筋试件的滑移和荷载基本呈线性关系。随着植筋试件锚固长度的增加,弹性阶段对应的荷载值增大,极限承载力增加,极限承载力对应的滑移量减少,而且相应的屈服滑移和极限滑移都有所增加,有利于植筋延性的发挥。

2.2 加载制度Ⅱ的荷载-滑移曲线

反复加载滞回曲线的包络线基本形式和单向加载的一致,因此在下文分析中,反复荷载作用下的荷载-滑移曲线取反复荷载-滑移曲线的包络线进行分析。

不同锚固长度的植筋试件在不同受热温度下的荷载-滑移曲线如图5所示。从图5可以看出,在加载初期,植筋试件的荷载-滑移基本保持线性关系,各植筋试件在受热温度较低时处于弹性阶段,温度升高,弹性阶段对应的荷载值减小。

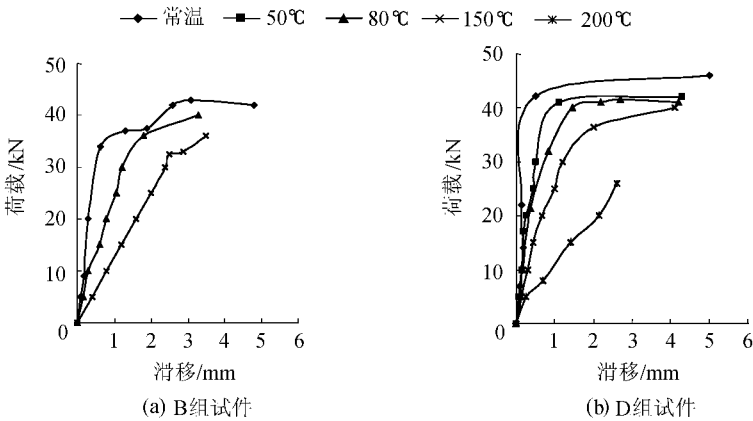


图5 加载制度Ⅱ不同受热温度的荷载-滑移曲线

Fig.5 Load-slip curves at different temperatures under loading system II

随着受热温度的升高,植筋试件荷载-滑移曲线的斜率减小,即黏结刚度减小。在锚固长度相同时,随着温度的升高,极限承载力明显降低,从图5(b)可知,锚固长度为15D的植筋试件在温度为50℃,80℃,150℃和200℃时分别为常温时极限承载力的94%,92%,86%和55%,可以认为受热温度在80℃以下时,植筋试件在反复加载下的极限承载力并没有明显退化。

从图5可以看出,在相同受热温度下,锚固长度对植筋试件的黏结滑移性能有明显的影响。

2.3 不同加载制度对黏结滑移性能的影响

图6是部分试件在常温和受热温度为80℃时,单向拉拔和反复加载作用下植筋试件的荷载-滑移曲线。

从图6可以看出,锚固长度相同时,加载初期,2种加载制度的荷载-滑移曲线有相似的斜率,这说明加载制度对植筋试件的黏结刚度基本没有影响。在锚固长度较小(7D)的情况下,反复加载作用下植筋试件的极限承载力和单向拉拔作用下的极限承载力相差不大,而对于锚固长度较长(15D)的C,D组试件,反复加载作用下植筋试件的极限承载力要比单向拉拔作用下的极限承载力小很多,这说明反复加载对植筋试件的黏结滑移性能有更明显的破坏作用。

3 高温后植筋的黏结滑移 τ - s 本构关系

从图4可以看出,在拉拔荷载作用下植筋试件也都经历了弹性滑移、弹塑性滑移、强化到极限荷载、下降段4个阶段。锚固长度15D的植筋试件在受热温度分别为50℃,80℃,150℃,200℃和常温时的植筋试件的荷

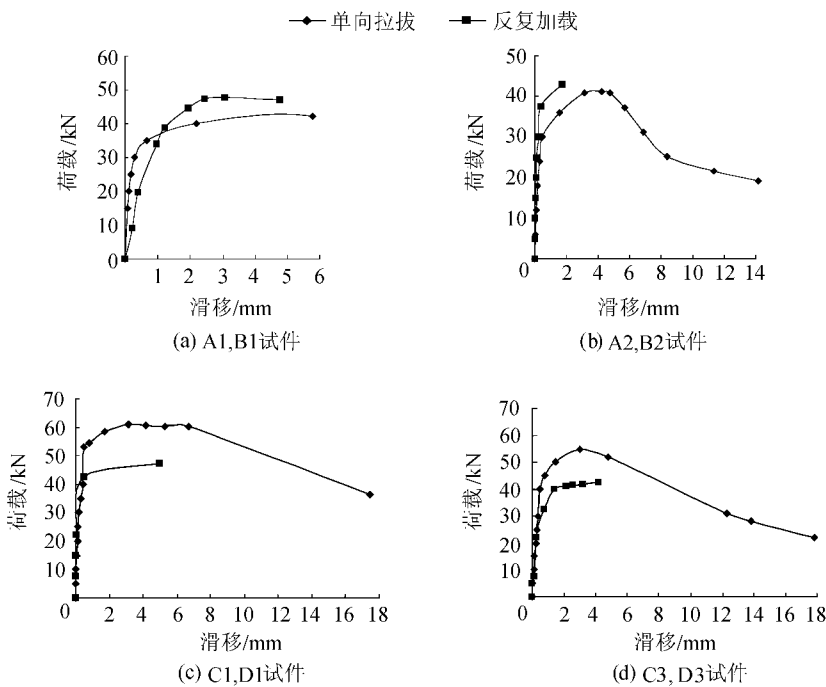


图 6 单向拉拔和反复加载的荷载-滑移曲线

Fig.6 Comparison of load-slip curves under pull-out loading and repeated loading

载-滑移折线如图 7 所示. 由于温度的影响,植筋试件相对于常温拉拔荷载作用下的曲线滑移量减少,每个阶段的转折点变得不明显. 要确定温度对植筋的黏结滑移 $\tau-s$ 本构关系,应该有“基本本构关系”和“锚长分布函数”2 个条件^[10],参考常温条件下植筋黏结应力沿锚固长度变化的位置函数^[11],确定“基本本构关系”,可得出高温后植筋混凝土的 $\tau-s$ 本构关系

$$\tau = Cf_{1-T}(s)f_2(x) \tag{1}$$

其中 $C = C_1C_2C_3\cdots C_n$ ——考虑钢筋的直径、钢筋种类、结构胶的品种、加载制度以及施工条件的影响系数,其取值大小应由具体试验确定; τ ——植筋部位结构胶的名义剪应力,即植筋荷载与名义黏结面(由钢筋直径和锚固长度计算而得的面积 $A = L_a\pi D^2/4$)的比值; $f_{1-T}(s)$ ——根据不同受热温度 T 而确定的荷载-滑移基本本构关系,即由典型荷载-滑移折线确定的分段函数.具体参数可根据特征点的试验数值计算得出,由本试验得出的典型荷载-滑移折线图(图 7)可以得出在经历不同温度后分段函数的本构关系.以受热温度为 150°C 为例,在 150°C 情况下有

$$f_{1-150}(s) = \begin{cases} 3.506s & 0 \leq s < 1.54 \text{ mm} \\ 0.076s + 5.282 & 1.54 \text{ mm} \leq s < 5.5 \text{ mm} \\ 7.217 - 0.276s & 5.5 \text{ mm} \leq s < 18.65 \text{ mm} \\ 2.1 & 18.65 \text{ mm} \leq s \end{cases} \tag{2}$$

$f_2(x)$ ——考虑黏结滑移刚度沿锚固长度变化的位置函数,由于在 200°C 以下的高温后,钢筋和混凝土的力学性能未有明显改变,仅植筋胶的力学性能有变化,而这种变化已在函数 $f_{1-T}(s)$ 中表达,因此,文献^[11]中的位置函数仍具有普遍性,此处按式(3)采用.

$$f_2(x) = \begin{cases} 1.35\sqrt{1 - \left(\frac{10x}{3L_a} - 1\right)^2} & 0 \leq x < \frac{3}{10}L_a \\ 1.625 - 0.917\frac{x}{L_a} & \frac{3}{10}L_a \leq x < \frac{9}{10}L_a \\ 0.8\sqrt{1 - \left(\frac{10x}{L_a} - 9\right)^2} & \frac{9}{10}L_a \leq x < L_a \end{cases} \tag{3}$$

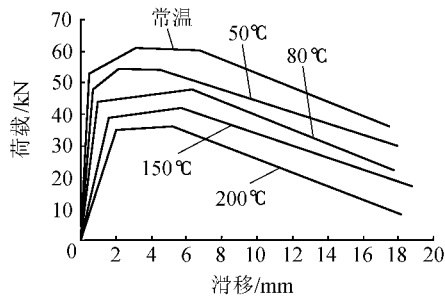


图 7 典型的荷载-滑移折线

Fig.7 Typical load-slip curves

其中 L_a 为钢筋的锚固长度, mm.

4 结 论

- a. 相同锚固长度的植筋试件, 随着温度的升高, 在单向拉拔和反复加载制度下, 极限承载力和对应的滑移量都逐渐减小.
- b. 反复加载对于较长锚固长度植筋的黏结破坏作用相对较大, 使得植筋试件的极限承载力降低较多.
- c. 受热温度相同时, 随着锚固长度的增加, 植筋试件的极限承载力增大, 黏结刚度变大.
- d. 受热温度在 80°C 以下的高温后, 植筋在单向拉拔和反复加载的情况下, 其极限承载力的退化对结构安全性不构成显著影响.

参考文献:

- [1] 倪修国. 化学植筋节点在低周反复荷载作用下的抗震性能试验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2005.
- [2] 李辉. 结构胶植筋锚固及抗震性能的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [3] 周新刚, 司伟建, 李春祥. 钢筋混凝土植筋锚固构件受低周反复荷载作用的回复力特性[J]. 建筑结构, 2002, 32(8): 34-40.
- [4] 闫锋, 张惠英, 王稚, 等. 结构胶植筋混凝土板受往复荷载作用的试验研究[J]. 建筑结构, 2003, 33(10): 37-38.
- [5] CECS25 90, 混凝土结构加固技术规范[S].
- [6] 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.
- [7] 闫玉红. 高温对钢筋混凝土结构植筋锚固性能影响的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2006.
- [8] EL-HAWARY M M, HAMOUSH S A. Bond shear modulus of reinforced concrete at high temperatures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1996, 55(6): 991-999.
- [9] CHIANG C H, TSAI C I. Time-temperature analysis of bond strength of a rebar after fire exposure [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(10): 1651-1654.
- [10] 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.
- [11] 欧阳坚. 混凝土高层框架节点抗震及建筑结构胶植筋的试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2001.

Experimental study on bond-slip behavior of embedded bar at high temperature

YUAN Guang-lin, LIU Lin, YAN Yu-hong

(School of Architecture & Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: Under two different loading systems, pull-out loading and repeated loading, the bond-slip behavior of bars embedded in concrete with anchorage lengths of 7 and 15 times the bar diameter at 50°C , 80°C , 150°C and 200°C was studied. The influence of the loading system, anchorage length and temperature on the extreme bond stress and extreme slide of concrete specimens were analyzed and proved to be significant. Based on the results of the experiment, a calculation method was developed for the bond stress of specimens after being heated.

Key words: embedded bar; bond-slip; anchorage length; high temperature