

高温下植筋黏结—滑移性能试验研究

刘长青^{1,2,3}, 余江滔³, 陆洲导³, 王孔藩²

(1. 同济大学 力学博士后流动站, 上海 200092; 2. 上海市建筑科学研究院(集团)有限公司, 上海 200032;
3. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092)

摘要: 为了研究高温下植筋的黏结—滑移性能, 进行了高温下 3 d 植筋试件的拉拔试验. 试验采用电炉加热升温, 温度范围为 25~350 ℃. 当植筋试件加热到达设定温度后, 立即进行拉拔试验, 每个温度下进行 5 组试验. 试验中量测了植筋试件的温度、拉拔力和滑移. 根据试验结果拟合出了极限黏结力, 峰值滑移随温度变化的公式. 建立了高温下植筋黏结—滑移模型和高温下植筋本构关系模型. 试验结果表明, 当温度高于 350 ℃ 后, 植筋胶黏结力约为常温下 4%, 基本丧失承载力.

关键词: 植筋; 高温; 黏结—滑移; 极限强度

中图分类号: TU 317.3; TU 58

文献标识码: A

Experimental Study on Bond-Slip Behavior of Post-installed Rebar at High Temperature

LIU Changqing^{1,2,3}, YU Jiangtao³, LU Zhoudao³, WANG Kongfan¹

(1. Post-Doctorate Research Station Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Research Institute of Building Sciences, Shanghai 200032, China; 3. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Specimens with 3d embedment depth were tested under different temperatures to study the bond-slip behavior of post-installed rebar. The specimens were heated by the electric furnace, and the test temperature ranged from 25 ℃ to 350 ℃. Records had been made on specimen temperatures, rebar slips and loads. When the specimen temperature reached to the design temperature, the specimen was tested and 5 specimens were tested at each design temperature. Based on the test results, the fitting model about ultimate strength and temperature and the fitting model about peak slip and temperature were obtained. While the fitting model about bond

stress, temperature and slip was achieved, anchorage adhesive constitutive relationship at high temperature was obtained. The test results show that the ultimate strength decreases with the temperature increase, especially the ultimate strength is 4% of that of ambient temperature when the temperature is above 350 ℃.

Key words: post-installed rebar; high temperature; bond-slip; ultimate strength

化学植筋技术以其特有的优势在混凝土结构加固改造工程中占据重要的地位, 其锚固性能国内外都有不少试验和理论研究^[1-7]. 然而在实际应用中, 会由于火灾等原因使植筋构件处于高温下工作. 因此进行高温下植筋性能研究很有必要. 国外一些植筋胶生产企业已经进行了这方面的试验研究, 并得到一些有用的结论. 德国慧鱼集团的研究结果表明, 当温度高于 120 ℃ 后, 植筋胶的黏结性能降低显著^[8]. 喜利得集团分别给出了在不同温度下的黏结力折减系数^[9]. 国外学者 Jakob Kunz 已经给出了黏结强度受温度影响的关系曲线^[10]. 我国对高温下和高温后的研究都有涉及, 但不深入. 同济大学进行了火灾(高温)中植筋试件的拉拔实验^[9]和耐火极限试验^[11]. 中国矿业大学进行了高温后的植筋试验和植筋黏结—滑移性能的研究^[12-14]. 两者均没有涉及高温中的植筋黏结—滑移关系研究. 东南大学虽然进行了较为系统的植筋黏结—滑移研究^[15], 但其研究是在常温下进行的, 没有涉及高温. 本文在前人研究的基础上进行了高温下 3d 钢套筒植筋试件拉拔试验, 研究了高温下植筋的黏结—滑移性能.

收稿日期: 2009-07-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50778134)

作者简介: 刘长青(1979—), 男, 博士后, 主要研究方向为混凝土结构抗火. E-mail: 0610020109@tongji.edu.cn

陆洲导(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为混凝土结构抗火. E-mail: lzd@163.com

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

根据《混凝土结构加固设计规范》(GB 500367—2006)附录J 富填料黏结材料拉伸抗剪强度测定方法(钢套筒法)的制作要求,进行了套筒试件设计,如图1所示.套筒材料采用45号碳钢,一端内径为16 mm,用于植入直径12 mm的螺纹钢;另一端内径为24 mm,用于旋入螺杆,便于与分配梁相连.套筒内壁有螺距为4 mm、深度为0.4 mm的梯形螺纹.金属套筒加工精确到0.05 mm;钢筋植入套筒内深度为36 mm.植筋胶采用德国慧鱼集团提供的FISV360S植筋胶.

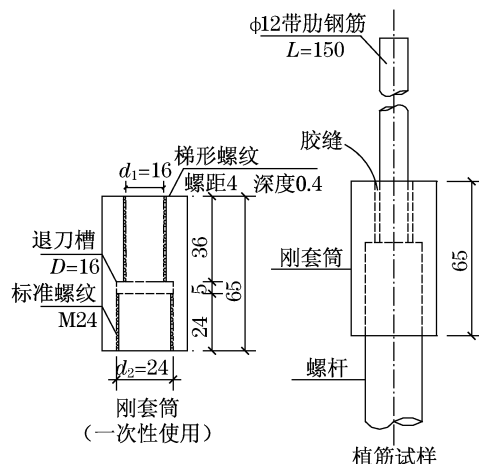


图1 试件详图(单位:mm)

Fig.1 Specimen details(unit:mm)

1.2 试验装置

本次试验采用两种升温设备:①当温度高于70℃时,采用上海科茂热处理成套设备有限公司生产的SKM-STU-100型箱式试验炉.电炉升温速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$.②当温度低于70℃时,因为炉温难以控制,所以采用电热带加热.采用电热带加热时,到达设定温度后需恒温约15 min,以便使植筋胶的温度达到设定温度.由于钢材导热系数大,且所植钢筋与钢套筒间植筋胶厚度仅为2 mm,因此可以认为植筋胶的温度与钢套筒的温度相同.因此可以通过使用热电偶测量钢套筒的温度来获得植筋胶的温度.

本次试验在同济大学土木工程防灾国家实验室结构抗火试验室进行.根据试验目的,试验量测的主要指标有:轴向拉力、钢套筒温度、炉温、钢套筒位

移、钢筋位移等.试验时,采用连续加载,每根植筋加载至破坏的时间控制在1~5 min.加载装置见图2.测量位移的装置见图3.

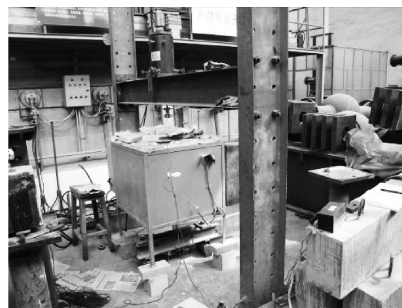


图2 试验装置

Fig.2 Test equipment



图3 位移测量装置

Fig.3 Apparatus of measuring displacement

2 试验过程与试验现象

2.1 试验过程

本次试验温度范围为25~350℃.除250℃做3组试验和300,350℃每个温度做2组试验外,其余的每个温度做5组试验.试验具体过程如下:①将钢筋夹具套入钢筋上;②将试件从穿心千斤顶下部穿出(钢套筒端在下端);③固定钢筋夹具和钢套筒夹具,并分别绑扎好钼丝;④将试件送入炉内,并旋入螺杆连接好位移计和安装热电偶;⑤设定温度并升温,到达设定温度前关闭电源;⑥到达设定温度,预加载0.6~0.8 kN;⑦加载至试件破坏,控制在1~5 min.

2.2 试验现象

所有试件均为钢筋拔出破坏,没有发生钢筋的屈服断裂,这与试验设计是相符的.加载初期,拉力增长速度较快,滑移变化缓慢,2个位移计的读数均较小.在植筋胶滑移达到一定值后,设定温度小于120℃的试样均会发生轻微的噼啪声,表明植筋胶

与钢套筒或钢筋间的界面黏结开始发生破坏,达到极限承载力.随后拉力很快下降,滑移急剧增加并延伸较长一段距离,直至钢筋被完全拔出.设定温度高于 120 ℃ 的试样没有噼啪声出现,在荷载加载到某一值时,滑移显著增加,荷载降低,直至钢筋完全拔出.

对拔出后的试件进行观察分析,发现其破坏模

式基本上都是内聚破坏,胶体主要黏附在套筒内侧,拔出钢筋的表面黏附有少量胶末,容易滑落.如图 4a 所示.对于植筋严重偏心的构件,拔出钢筋上则会带出较多的胶体,同时发现极限承载力较低,如图 4b 所示.当温度高于 200 ℃ 后,在钢筋拔出后,倾倒钢套筒,钢套筒内壁上的胶体呈粉末状滑落下来,见图 4c,此时胶体的承载力已降低很多.

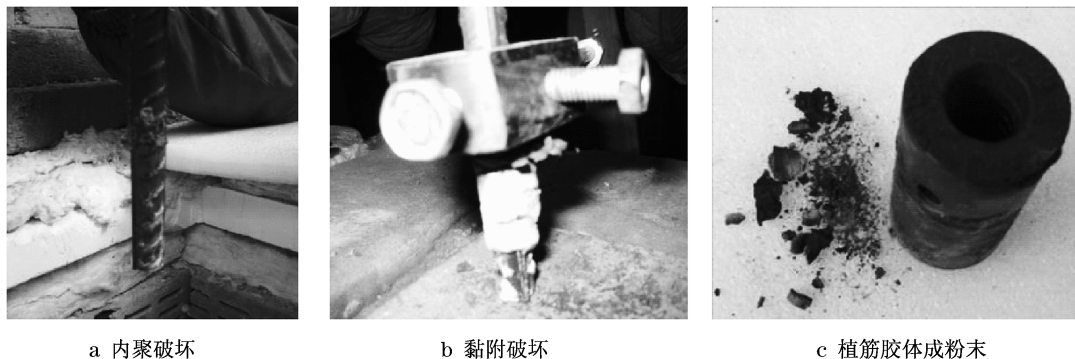


图 4 破坏模式
Fig.4 Failure modes

3 试验结果与分析

3.1 荷载—滑移曲线分析

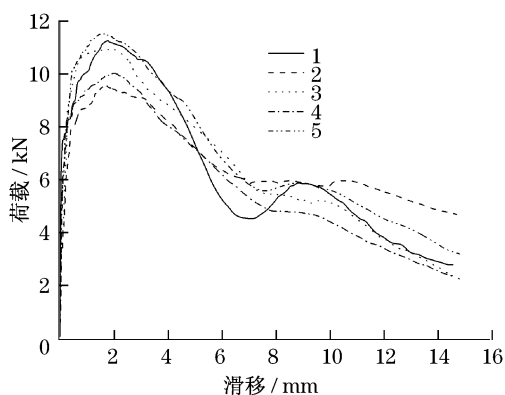
植筋试件在不同温度下的典型荷载—滑移曲线见图 5a. 图 5a 中分别给出了温度为 100 ℃ 时的 5 组试验荷载—滑移曲线. 从图 5a 可以看出, 荷载—滑移曲线呈明显非线性. 荷载—滑移曲线由以下几段构成, 刚开始的线性上升段, 这段很短. 每个不同的温度下存在不同的比例极限及其相应的滑移量. 非线性上升段, 这段是从比例极限开始一直到极限荷载. 在这个过程中, 荷载增加变缓, 滑移增加较快, 且温度不同时极限荷载和峰值滑移(极限荷载对应的滑移)也各不相同. 第三段是非线性下降段, 这部分是从极限荷载开始一直到加载结束. 刚开始时, 荷载下降较快. 随着滑移的增大, 荷载的下降开始变缓, 并基本维持在某一个定值. 这是因为植筋构成的植筋系统所提供的锚固力是由两部分构成的: 一部分是由植筋胶本身的黏结性能提供的化学黏结力; 另一部分是由骨料与钢筋之间的咬合力和摩擦力提供的. 在未达到极限荷载之前, 化学黏结力起控制作用, 所以在达到极限荷载前, 荷载增加较大, 而滑移增加较小. 当达到极限荷载后, 化学黏结作用已经开始丧失, 但仍然占大部分, 机械咬合力和摩擦力占小

部分, 所以荷载下降较慢. 到加载的后期, 由于滑移较大, 化学黏结力基本已经丧失, 主要靠机械咬合力和摩擦力, 所以此时荷载—滑移曲线呈现荷载下降减缓的现象, 并基本维持在一个定值.

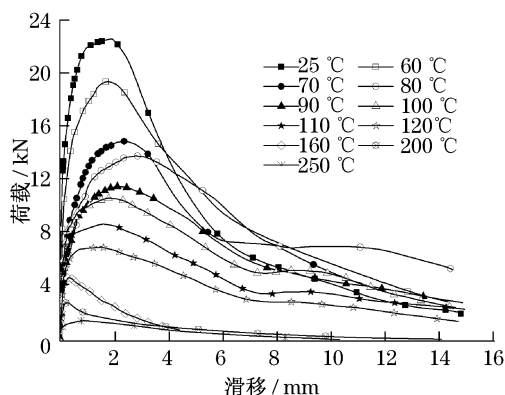
从图 5a 的荷载—滑移曲线上可以看出, 在加载的后期会出现一个向上的突起, 这是由于带肋钢筋上的肋又重新滑入胶体上的肋槽中, 导致了咬合力和摩擦力加大.

对每个温度下的 5 条荷载—滑移曲线, 去掉极限荷载最大和极限荷载最小的 2 条, 剩余取平均. 分别作出各个温度下的平均荷载—滑移曲线, 见图 5b. 由于 300 ℃ 和 350 ℃ 的峰值滑移(极限荷载对应的滑移)的离散性较大, 故在计算平均荷载滑移曲线时没有计算 300 ℃ 和 350 ℃ 的平均荷载滑移曲线. 从图 5b 中可以看出, 随着温度的升高, 荷载—滑移曲线的峰值在下降. 常温下, 植筋试件的极限荷载最大, 250 ℃ 时植筋试件的极限荷载最小, 当温度超过 300 ℃ 以后, 植筋试件的极限荷载相差不大, 但是其绝对值已经很小, 约为常温下的 5%, 可以认为已经丧失了承载力. 随着温度的升高, 荷载—滑移曲线在不断地降低. 但是在下降段, 当温度不超过 100 ℃ 时, 在加载的末期会出现随着温度的升高, 高温下的锚固力大于常温的锚固力, 并在 80 ℃ 时下降段的锚固力达到最大值, 而 60, 70 ℃ 和 90, 100 ℃ 的相差不

大.当温度高于 100 ℃ 后,下降段的锚固力小于常温的锚固力.这是由于温度的升高,会使植筋胶变硬,从而使其后期的咬合力和摩擦力加大.当温度较高后,由于温度过高会使植筋胶变得酥松,从而使其后期的咬合力和摩擦力变小.这与试验现象是吻合的.当温度较低时,植筋胶基本上粘贴在钢套筒内壁上,当温度较高时,植筋胶变得酥松,试验后倾倒钢套筒可见到植筋胶呈粉末状流出.



a 100 ℃ 时5组试验



b 不同温度下的平均曲线

图5 荷载—滑移曲线

Fig.5 Load-slip curves

从图 5b 中可以看出,250 ℃ 平均荷载—滑移曲线与其他温度的荷载—滑移曲线相比出现一个类似屈服的阶段.这是因为 250 ℃ 后植筋性能严重劣化,已基本没有承载力,主要靠咬合力和摩擦力提供锚固力,所以基本上维持在一个恒定值,随着钢筋逐渐拔出,其开始慢慢降低.

3.2 黏结力随温度变化分析

如前面平均荷载—滑移曲线的整理方法,可得到各温度下植筋试件的平均极限荷载,如表 1 所示.从表中可以看出,随着温度的升高,植筋试件的极限荷载不断下降.当温度高于 350 ℃ 后,试件的承载力

已经很低,只有常温下的 4% 左右,可以认为基本丧失承载力,故本次试验只做到了 350 ℃.

在假定黏结力沿植筋深度方向是均匀分布的基础上,按《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2006)建议公式计算黏结力

$$\tau_{vu} = P / 0.8\pi DL \quad (1)$$

式中: τ_{vu} 为黏结力,MPa; P 为极限拉力,kN; D 为金属套筒的内径,mm; L 为黏结面长度,mm.

各个温度下的黏结力,见表 1.在表 1 中列出了各个温度下的折减系数,即不同温度下的黏结力与常温下黏结力的比值.本次试验结果与喜利得公司、慧鱼集团的试验结果基本一致.喜利得公司给出当温度为 60,70,80 ℃ 时,则分别乘以 0.85,0.62,0.50 的折减系数^[9];慧鱼集团提供的资料,该结构胶到 120 ℃ 时,承载力比常温下丧失约 70%^[8].本次试验结果为 60,70,80,120 ℃ 时,其折减系数分别为 0.85,0.65,0.60,0.31,这表明本次试验结果是可信的.

表1 不同温度下极限承载力、黏结力和峰值滑移

Tab.1 Ultimate pullout strength,bonded stress & peak slip at different temperatures

温度/℃	极限荷载/kN	黏结力/MPa	折减系数	峰值滑移/mm
25	22.98	15.882	1.00	1.602
60	19.47	13.456	0.85	1.730
70	14.98	10.353	0.65	2.405
80	13.89	9.600	0.60	2.808
90	11.62	8.031	0.51	2.088
100	10.74	7.423	0.47	1.913
110	8.82	6.096	0.38	1.571
120	7.04	4.866	0.31	1.413
160	4.81	3.324	0.21	0.341
200	3.04	2.101	0.13	0.258
250	1.55	1.071	0.07	—
300	1.31	0.905	0.06	—
350	1.02	0.705	0.04	—

注:250 ℃ 以后所测峰值滑移的离散性较大,故没有整理 250 ℃ 后的平均峰值滑移.

根据表 1 计算的黏结力值,绘出黏结力随温度变化的曲线,如图 6 所示.对该曲线拟合,得到如下公式:

$$\tau_{vu,\theta} = \begin{cases} 15.88, & 25^\circ\text{C} \leq \theta \leq 40^\circ\text{C} \\ 22.10 - 0.155\theta, & 40^\circ\text{C} < \theta \leq 60^\circ\text{C} \\ 30.49e^{-0.0145\theta}, & 60^\circ\text{C} < \theta \leq 250^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ 为温度, $^{\circ}\text{C}$; $\tau_{vu,\theta}$ 为温度 θ 时的黏结力, MPa .

从图 6 中可以看出,在温度不高于 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,能够较好吻合;当温度高于 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,误差较大,但是计算结果小于试验值,偏于保守.因此,式(2)可用于工程实践中.

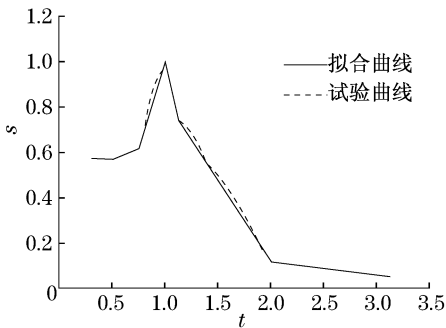


图 6 黏结力—温度曲线

Fig.6 Bond stress – temperature curve

3.3 峰值滑移随温度变化分析

峰值滑移为极限荷载对应的滑移,如前面数据的处理方法,可得到每个温度下的平均峰值滑移,见表 1.从表 1 中可以看出,在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 前峰值滑移随着温度升高而增大,在 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 达到峰值.当温度超过 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,其呈现下降趋势.这是由于 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 前,虽然温度使其剪切刚度和极限荷载都在降低,但是剪切刚度降低的幅度要大于极限荷载降低的幅度. $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,温度使其刚度变得更小,但是其极限荷载降低的幅度更大,从而使其达到剪切破坏时的滑移变得更小.

将表 1 中不同温度下的峰值滑移除以峰值滑移最大值作为纵轴,将温度除以最大峰值滑移对应的温度作为横轴,绘制量纲一化温度—峰值滑移关系图,见图 7.根据图 7 中的试验曲线,可以拟合出如下不同温度下峰值滑移随温度变化的公式:

$$s = \begin{cases} 0.571, & 0.3125 \leq t \leq 0.5 \\ 0.481 + 0.18t, & 0.5 < t \leq 0.75 \\ -0.51 + 1.51t, & 0.75 < t \leq 1 \\ 3.05 - 2.05t, & 1 < t \leq 1.125 \\ 1.54 - 0.71t, & 1.125 < t \leq 2 \\ 0.24 - 0.06x, & 2 < x \leq 3.125 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $s = s_{0,\theta}/2.808$; $t = \theta/80$; θ 为温度, $^{\circ}\text{C}$; $s_{0,\theta}$ 为温度 θ 时的峰值滑移, mm .

将拟合曲线也在图 7 中绘出,从图中可以看出,拟合曲线和试验曲线间误差较小.

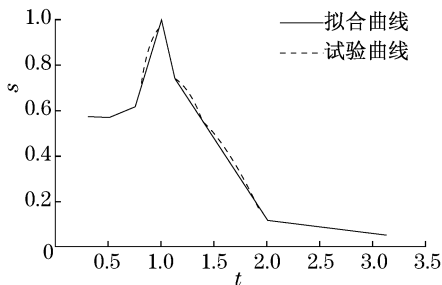


图 7 峰值滑移—温度量纲一化曲线

Fig.7 Peak slip – temperature curve

3.4 高温下植筋黏结—滑移模型

将图 5b 中每个温度下的平均荷载—滑移曲线的纵坐标按式(1)转化为黏结力,横坐标不变,从而可得不同温度下的平均黏结力—滑移曲线.分别对纵坐标和横坐标量纲一化,即以每个温度下的黏结力除以该温度下的最大黏结力(极限黏结力)作为纵轴,滑移除以该温度下峰值滑移作为横轴.根据其曲线形状,并参考《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)附录 C 中混凝土单轴受拉的应力—应变关系曲线,进行曲线拟合.拟合公式如下:

$$y = \begin{cases} Ax, & 0 \leq x \leq 0.15 \\ B(x - 1) + C(x - 1)^5 + 1, & 0.15 < x \leq 1 \\ \frac{Dx}{E(x - 1)^F + Dx}, & 1 < x \leq 8 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $y = \tau_{\theta}/\tau_{vu,\theta}$; $x = s_{\theta}/s_{0,\theta}$; θ 为温度, $^{\circ}\text{C}$; s_{θ} 为温度 θ 时的滑移, mm ; τ_{θ} 为温度为 θ 、滑移为 s_{θ} 时的黏结力, MPa ; $\tau_{vu,\theta}$ 为温度 θ 时的最大黏结力, MPa ; $s_{0,\theta}$ 为温度 θ 时的峰值滑移, mm ; A, B, C, D, E, F 等参数见表 2.

表 2 不同温度下拟合公式的参数

Tab.2 Fitting model parameters at different temperatures

$\theta/^{\circ}\text{C}$	参 数					
	A	B	C	D	E	F
25	4.79	0.05	0.54	2.08	2.45	2.12
60	4.20	0.18	0.49	3.93	2.25	2.16
70	3.72	0.16	0.69	1.89	2.02	1.74
80	3.39	0.14	0.84	4.52	3.05	1.75
90	3.86	0.16	0.64	3.40	1.56	2.13
100	5.06	0.11	0.33	4.20	1.58	2.01
110	5.02	0.05	0.46	0.76	0.32	1.98
120	5.19	0.02	0.46	0.68	0.26	2.02
160	2.32	0.13	1.22	7.33	1.28	2.16
200	2.74	0.05	1.23	2.95	1.21	1.52
250	3.99	0.08	0.75	3.28	0.55	2.46

式(4)所表示的量纲一化拟合曲线,在(0,1)区间上相差不大,可以用一个公式表示.当超过1后,量纲一化曲线离散性较大.可将量纲一化曲线分为3类:常温下、中温下和高温下的量纲一化曲线.这里常温是指 25~40 °C,中温指 60~120 °C,高温指 160~250 °C.

分别作出上升段的平均曲线和下降段在不同温度段的平均曲线,并分别对其进行公式拟合.上升段和下降段量纲一化的拟合公式分别为

上升段:

$$y = 0.07(x-1) + 0.93(x-1)^5 + 1, \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (5)$$

下降段:

$$y = \begin{cases} \frac{2.08x}{2.45(x-1)^{2.12} + 2.08x}, & 1 < x \leq 8, 25^\circ\text{C} \leq \theta \leq 40^\circ\text{C} \\ \frac{2.57x}{1.39(x-1)^{1.94} + 2.57x}, & 1 < x \leq 8, 40^\circ\text{C} < \theta \leq 140^\circ\text{C} \\ \frac{2.84x}{0.68(x-1)^{2.02} + 2.84x}, & 1 < x \leq 8, 140^\circ\text{C} < \theta \leq 250^\circ\text{C} \end{cases} \quad (6)$$

根据式(5)和式(6)可以做出黏结力与温度、滑移的3维关系曲面,如图8所示.

从图8中可以看出,随着温度的升高,除中温段

在滑移大于5 mm时黏结力较大外,黏结力基本呈下降的趋势.各个温度下的极限黏结力也随着温度的升高在不断下降.在上升段,黏结力随着滑移的增加而增加,并很快达到最大值.超过最大极限黏结力后,黏结力随着滑移的增加开始减小.其中常温段和高温段下降较快,中温段下降缓慢.

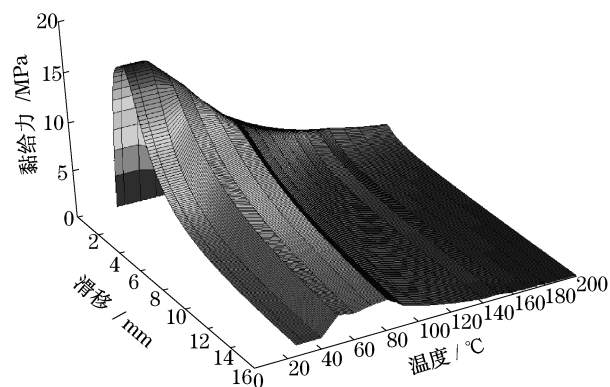


图8 黏结力与滑移、温度关系曲面

Fig.8 Curved face of bond stress, slip and temperatures

不同温度段的计算黏结—滑移曲线与试验实测的黏结—滑移曲线对比如图9所示.从图9中可以看出,在上升段按式(5)计算的黏结—滑移曲线和实验测得的黏结—滑移曲线能较好吻合,两者基本一致.下降段在 25 °C 时,计算曲线的形状和试验曲线形状一致,计算值略小于试验值,但计算曲线与实验曲线相差不大.

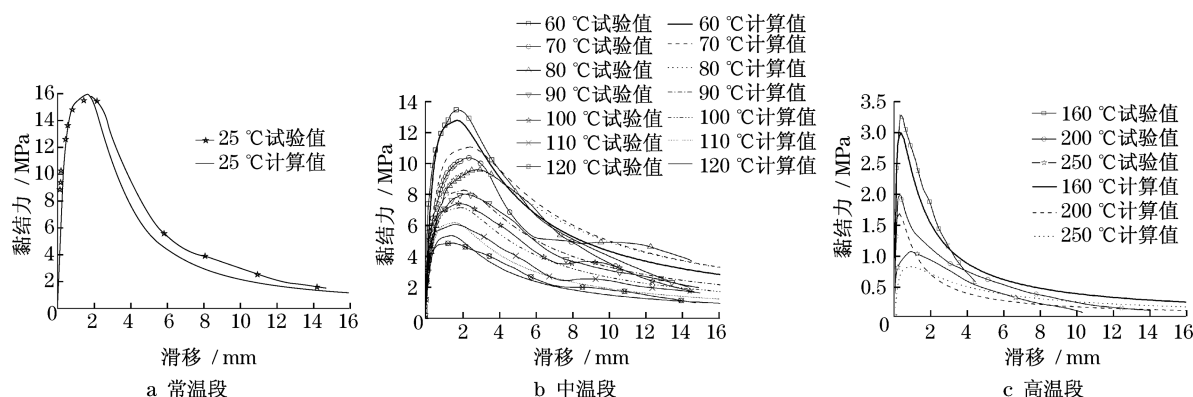


图9 计算黏结—滑移曲线和试验曲线对比

Fig.9 Comparison of fitting bond stress-slip curves and test curves

下降段在 60~120 °C, 计算曲线和实验曲线基本能较好地吻合.除了 60 和 120 °C 相差较大外,其余温度的计算曲线和实验曲线相差很小.虽然 70 °C 计算曲线和试验曲线形式有一定的差异,但是基本反映了峰值后黏结力和滑移的关系.

下降段在 160 °C 以上时,除 200 °C 误差较大外,计算曲线基本和试验曲线吻合.

3.5 高温下植筋本构关系模型

设量纲一化黏结—滑移关系为 $f(s_\theta, \theta)$, 最大黏结力随温度变化的函数为 $F(\theta)$, 位置函数为

$W(L_x)$. 则可得高温下植筋本构关系为

$$\tau = CW(L_x)f(s_\theta, \theta)F(\theta) \quad (7)$$

式中: $C = C_1 C_2 C_3 \cdots C_n$ 为考虑植筋胶种类、钢筋直径、加载方式、施工条件等因素对黏结力的影响系数,具体取值可根据试验确定; L_x 为沿植筋深度方向距加载端的距离, mm; τ 为沿植筋深度方向距加载端为 L_x 、滑移为 s_θ 、温度为 θ 时的黏结力, MPa; $f(s_\theta, \theta)$ 参见式(5)和式(6); $F(\theta)$ 参见式(2). 其余参数的意义同前.

当温度不高于 250 °C 时,钢筋的性能没有较大改变,只是植筋胶性能的改变,这种变化已经在 $f(s_\theta, \theta)$ 和 $F(\theta)$ 中有所反应,因此文献[16]中的位置函数仍可使用. 本文的位置函数仍按文献[16]采用

$$W(L_x) = \begin{cases} 1.35\sqrt{1 - \left(\frac{10L_x}{3L_a} - 1\right)^2}, & 0 \leq L_x < \frac{3}{10}L_a \\ 1.625 - 0.917\frac{L_x}{L_a}, & \frac{3}{10}L_a \leq L_x < \frac{9}{10}L_a \\ 0.8\sqrt{1 - \left(\frac{10L_x}{L_a} - 9\right)^2}, & \frac{9}{10}L_a \leq L_x < L_a \end{cases} \quad (8)$$

式中: L_a 为钢筋的锚固长度, mm.

4 结论

(1) 荷载—滑移曲线呈现明显非线性,由线性段、非线性上升段和非线性下降段组成. 且随着温度的升高,荷载—滑移曲线的峰值显著降低.

(2) 随着温度的升高,植筋胶的黏结力在下降,当温度高于 350 °C 时,约为常温下的 4%,此时植筋试件基本丧失了承载力.

(3) 随着温度的升高,滑移峰值逐渐增加,并在 80 °C 时达到最大值,随后随着温度的升高,峰值滑移开始减小.

(4) 根据试验结果,建立了高温下植筋黏结—滑移模型,并结合黏结力沿植筋深度变化的位置函数,得出了高温下植筋的本构关系模型.

参考文献:

- [1] 耿建勋,杨斌,杨跃,等. 植筋施工中应注意的技术问题[J]. 施工技术,2008,37(4):33.
GENG Jianxun, YANG Bin, YANG Yue. Technology problems in planting bars construction[J]. Construction Technology, 2008, 37(4):33.
- [2] 袁廷朋,陆洲导,邴涛. 后锚固化学植筋受拉承载力计算及设计[J]. 结构工程师,2007,23(2):97.

- YUAN Tingpeng, LU Zhoudao, BING Tao. Bearing capacity calculation and design of post-installed bonded rebar under tension[J]. Structural Engineers, 2007, 23(2):97.
- [3] 舒睿彬,张建荣,张春. 自由拉拔植筋系统的黏结滑移受力机理分析[J]. 结构工程师,2008,24(5):64.
SHU Ruibin, ZHANG Jianrong, ZHANG Chun. Analysis on bond-slip performance and load transfer mechanism of bonded rebars[J]. Structural Engineers, 2008, 24(5):64.
- [4] Cook R A. Behavior of chemically bonded anchors[J]. Journal of Structure Engineering, 1993, 119(9):2274.
- [5] ACI. ACI 355. 2 - 01 Evaluation the performance of post-installed mechanical anchors in concrete [S]. Michigan: ACI, 2001.
- [6] EOTA. Guideline for European technical approval of metal anchors for use in concrete[S]. Brussels: EOTA, 2001.
- [7] Zavliaris K D, Kollias S, Speare P S S. An experimental study of adhesively bonded anchorages in concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1996, 48(6):79.
- [8] Fisher Group of Companies. Technical handbook—Asia[M]. Waldachatal: Fisher Group of Companies, 2008.
- [9] 李占鸿. 高温(火灾)下植筋锚固试件拉拔试验研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2007.
LI Zhanhong. Experimental study on the tensile capacity of post-installed rebar specimens under high temperature[D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2007.
- [10] Jakob Kunz. Fire design: state of the art [R]. Schaan: Hilti Corporation, 2006.
- [11] 凌岚. 混凝土化学植筋试件耐火性能试验研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2008.
LING Lan. Experimental research on the fire endurance of chemical adhesive rebar in concrete [D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2008.
- [12] 袁广林,刘涛,闫玉红. 高温后 RC 植筋边节点反复荷载的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(1):19.
YUAN Guanglin, LIU Tao, YAN Yuhong. Experimental study of behaviors of RC structure's exterior joints with post-embedded bars under cyclic loading after treatment at high temperature [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(1):19.
- [13] 袁广林,刘林,闫玉红. 高温后植筋黏结滑移力学性能试验[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2008, 36(3):358.
YUAN Guanglin, LIU Lin, YAN Yuhong. Experimental study on bond-slip behavior of embedded bar at high temperature [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2008, 36(3):358.
- [14] 龙帮云,成林燕,闫玉红. 焊接温度对植筋黏结滑移性能影响的试验研究[J]. 徐州建筑职业技术学院学报, 2007, 7(4):6.
LONG Bangyun, CHENG Linyan, YAN Yuhong. Experimental research on effects of welding temperatures on bond-slip behavior of embedded reinforcement [J]. Journal of Xuzhou Institute of Architectural Technology, 2007, 7(4):6.
- [15] 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: 东南大学土木工程学院, 2001.
OUYANG Jian. Experimental study on the seismic behaviors of concrete frame joint for adding story and anchor adhesive [D]. Nanjing: Southeast University. College of Civil Engineering, 2001.