

# 高温后植筋胶黏结力学性能试验研究

张宇<sup>1,2,3</sup>, 楼国标<sup>1,4</sup>, 李国强<sup>3,4</sup>, 孙友谊<sup>5</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 武警后勤学院 建筑工程系, 天津 300309;

3. 西安交通大学 机械结构强度与振动国家重点实验室, 陕西 西安 710000;

4. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 5. 中北大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030000)

**摘要:** 为了测试工程中植筋胶在高温后的安全性能, 对3种常用植筋胶分别在25, 60, 100, 160和260℃恒温加载自然冷却后的黏结力学性能开展试验研究。首先, 测试了这3种植筋胶的玻璃转化温度。其次, 通过拉伸试验, 得出了恒温加载、自然冷却后试件受力与滑移曲线关系, 极限黏结承载力和其随温度的损失规律。对试验数据拟合, 得出受力与滑移三阶段和四阶段数学模型。研究表明, 温度会造成植筋试件力学性能的退化, 热塑性植筋胶比热固性植筋胶刚性和耐热性均较差。玻璃转化温度是植筋胶高温后承载力的突变点, 是植筋胶正常使用的温度上限并影响着它的高温后使用性能。

**关键词:** 植筋胶; 高温后; 黏结强度; 残余承载力

**中图分类号:** TU317

**文献标志码:** A

commonly used anchorage adhesives were adopted. The force-slip relationships of the adhesives after heating, the ultimate strengths and their change regulation with the temperature were obtained. A three-stage or four-stage model for the force-slip relationship was obtained by curve-fitting. The results show that the bond strength of anchorage adhesive is strongly dependent on temperature, and the rigid and heat tolerance of thermoplastic adhesive is weak than thermosetting adhesive. The results also show that glass transition temperature is the turning point for behaviors of adhesive after heating, which can be used to determine the upper limit temperature for continuous application.

**Key words:** anchorage adhesive; after heating; bond strength; residual bearing capacity

## Experimental Study of Bond Strength of Anchorage Adhesive After Heating

ZHANG Yu<sup>1,2,3</sup>, LOU Guobiao<sup>1,4</sup>, LI Guoqiang<sup>3,4</sup>, SUN Youyi<sup>5</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Building Engineering, Logistics University of PAPF, Tianjin 300309, China; 3. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710000, China; 4. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 5. College of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030000, China)

**Abstract:** To satisfy the safety properties of the organic anchorage adhesive used in engineering field after heating from elevated temperatures, a series of pull-out tests for three anchorage adhesives were conducted after heating at temperatures of 25, 60, 100, 160 and 260 °C. The glass transition temperatures of three adhesives were tested. The heating process was found to follow a fixed curve. Three

植筋胶(anchorage adhesive)是由合成树脂、填充材料及化学助剂组成的建筑结构黏结加固材料, 主要分为热固性和热塑性两类。具有锚固力强、施工简捷、材料成本低、耐腐蚀性等特点, 适用于新老建筑物连接、建筑物抗震加固、设备基础锚固以及砖混建筑结构的补强。通常, 植筋胶在常温下发挥其力学性能, 但在结构加固和改造过程中, 焊接成为不可或缺的钢筋连结方式, 这样会导致植筋部位受到高温的影响; 另外, 植筋胶遭遇火灾或高温影响时, 同样会导致其力学性能的退化<sup>[1]</sup>。目前, 国内外对植筋胶在常温<sup>[2-3]</sup>和高温<sup>[4-8]</sup>时力学性能开展了研究, 对高温后<sup>[9]</sup>植筋胶性能研究, 处于起步阶段。研究中存在材料选取单一, 机理分析不透彻的问题, 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。同时, 玻璃转化温度和固化条件等都会影响高分子材料的力学性能, 但现有研究没有考虑这些因素。

收稿日期: 2015-12-31

基金项目: 国家自然科学基金(51508412); 中国博士后科学基金(2014M551451); 机械结构强度与振动国家重点实验室开放基金(SV2014-KF-17)

第一作者: 张宇(1983—), 女, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为防灾减灾与防护工程。E-mail: zhangyu1983xinxin@163.com

为了合理使用植筋胶,国内外制定了相关技术手册.在美国,美国认证协会编制了规范 ACI355.2-01<sup>[10]</sup>.美国材料与试验协会 ASTM(American Society for Testing and Materials)编制了规范 C881<sup>[11]</sup>,这些规范均给出了植筋胶连结在混凝土中应用的性能评估方法,近期又探索其在碳纤维增强复合材料 CFRP(carbon fiber reinforced polymer/plastic)和纤维增强复合材料 FRP(fiber reinforced polymer/plastic)中的应用.在欧洲,规范 EN 1992-1-1 给出植筋胶在混凝土中常温设计方法.规范 EN 1992-1-2 给出了植筋胶在混凝土中高温性能和设计方法.规范 ETAG2001 给出了欧洲金属锚栓技术指南.在中国,混凝土结构加固设计规范 GB50367—2006<sup>[12]</sup>给出了植筋胶在混凝土中常温设计方法.可见,常温和高温下植筋胶均有规范可依,但其高温后使用性能,国内外尚没有相应设计规范可循.

针对现有研究和规范的不足,本文分别选取热塑性和热固性两类植筋胶为研究对象,首先依据规范 GB/T 19466.2—2004<sup>[13]</sup>中的示差扫描量热法 DSC(Differential Scanning Calorimeter)方法测定玻璃转化温度.其次依据规范 GB50367—2006<sup>[12]</sup>测试其黏结滑移性能.高温试验采用恒温加载自然冷却的方式.根据试验结果得到了植筋胶高温后性能和随温度退化规律,并拟合生成了可应用于工程实际的经验公式.

## 1 试验

### 1.1 材料的制备

试样取自市场占有率较高且较易获取的 3 个品牌的植筋胶,分别是:慧鱼 FISV360S(植筋胶 A),悍马 HM-500(植筋胶 B)和喜利得 HIT-RE 500(植筋胶 C).FISV360S 为混合型高强乙烯基甲基丙烯酸酯树脂,双塑料管包装,其中组分 A 为乙烯树脂和高强水泥砂浆混合物,不含苯乙烯,无异味;组分 B 为固化剂加水,固化剂为过氧及双苯甲酰.基材 A 和固化剂 B 的体积比为 5:1.在 21~30 °C 时,其固化时间为 45 min,固化后的胶体为灰色类混凝土状材料.HM-500 为双塑料管包装的改性环氧式注射植筋胶,基材和固化剂的体积比为 2:1.通过改性使其保持了环氧树脂的优越性能,大大提高了胶体的固化时间和低温下的固化性能,固化后的胶体均为暗红色类似玻璃状材料.胶体的劈裂抗拉强度为 12.8

MPa,抗弯强度为 70.4 MPa,抗压强度为 87.5 MPa.HIT-RE 500 为双酚 A 改性环氧树脂.双塑料管包装的改性环氧式注射植筋胶,不含苯乙烯及乙二胺,无异味.在 20~30 °C 时其固化时间为 30 min,完全固化时间为 6 h,固化后的胶体为鲜红色类玻璃状材料.胶体的劈裂抗拉强度为 14.6 MPa,抗弯强度为 75.7 MPa,抗压强度为 108.3 MPa.

### 1.2 结构和性能表征

采用日本日立公司的 S-4800 扫描电子显微镜对样品进行微观结构分析,加速电压 15 V.使用 Mettler Toledo SDTA861e 动态热机械分析仪对样品进行动态热机械分析,采用小夹具拉伸模式,待测样品长、宽、高分别为 8,4 和 2 mm,以 5 °C·min<sup>-1</sup> 的升温速率从室温升至 250 °C,固定频率为 1 Hz,振幅为 50 μm.

### 1.3 高温后植筋胶黏结力学性能试验

#### 1.3.1 试件制作

试验依据混凝土结构加固设计规范 GB50367—2006 附录 J 中富填料黏结材料拉伸抗剪强度测定方法(钢套筒法)制作试件.试件由植筋胶、直径为 12 mm 的 II 级 HRB335 带肋钢筋和专用钢套筒组成,如图 1 所示.钢套筒采用 45 号碳钢,一端内径 16 mm,用于植入钢筋,钢筋植入深度 36 mm;另一端内径 24 mm,用于旋入螺杆将试件固定在试验机上.套筒内壁有螺距为 0.4 mm、深度为 4 mm 的梯形螺纹.

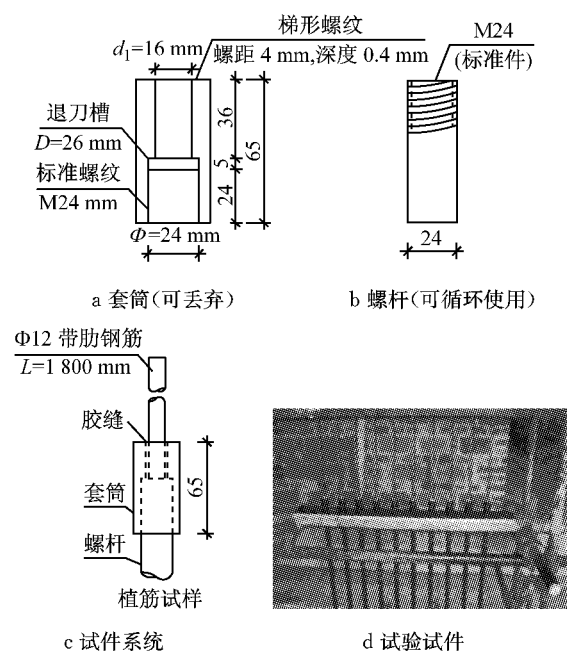


图 1 试验试件的形状和尺寸(单位:mm)

Fig.1 Dimension and shape of test specimens(unit: mm)

### 1.3.2 加载装置

试验加载装置采用同济大学结构抗火实验室的微机控制电液伺服万能试验机以及电阻炉(图 2)。其中升温设备采用上海意丰电炉有限公司生产的箱式电阻炉,额定电压 220 V,额定功率 6.3 kW,额定温度 1 200 °C,最大工作电流为 30 A。电炉温度-时间曲线如图 3 所示。

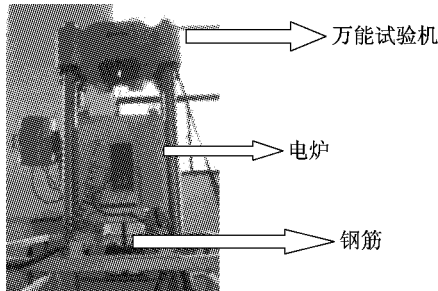


图 2 加载装置

Fig.2 Test equipment

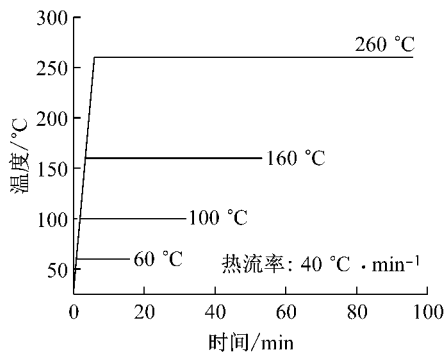


图 3 电炉温度-时间曲线

Fig.3 Temperature-time curves of furnace

### 1.3.3 试验过程

3 种试件选用 25,60,100,160 和 260 °C 共 5 种温度,每种温度做 5 个试件。试验过程中,保持环境温度为 25 °C。为确定植筋锚固试件内部升温时间,前期进行了植筋试件恒温加载试验,在试件内部插入热点偶,每隔 10 s 记录下试件内部温度,确定升温曲线及特定温度点的恒温时间。当到达恒温时间时,打开电炉,让试件自然冷却。进行拉拔试验,加载制度为 200 N · s<sup>-1</sup>,万能试验机自动记录试件承受的拉拔力及滑移量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 结构表征

图 4 为 3 种试样固化后在 X 射线扫描电子显微镜(SEM)下观测到的微细观结构图。从图 4 中可以看出,3 种植筋胶的表面粗糙度从 FISV360S, HM-500 到 HIT-RE 500 依次递减,宏观分析其韧性和力学性能将依次增加。

玻璃转化温度( $t_g$ )是玻璃态物质在玻璃态和高弹态之间相互转化的温度,从工程应用角度而言,玻璃化温度是工程塑料使用温度的上限,是橡胶或弹性体的使用下限。本文用动态热机械分析 DMA (dynamic mechanical analysis)测试方法表征玻璃转化温度,得到的损耗角( $\delta$ )正切-温度曲线。图 5 为 3 种植筋胶的 DMA 测试曲线。由图 5 可以看出,慧鱼 FISV360S(植筋胶 A),悍马 HM-500(植筋胶 B)和

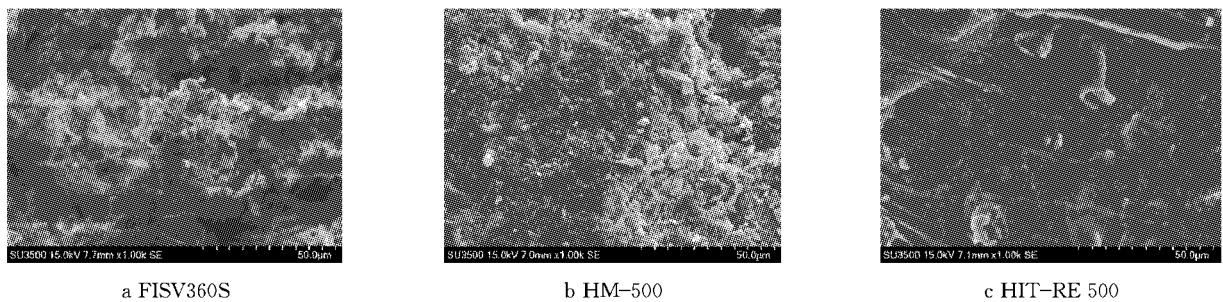


图 4 试样典型微细观结构图

Fig.4 Typical micro-structure of samples

喜利得 HIT-RE 500(植筋胶 C)的玻璃转化温度分别为:180.43,137.54 和 69.34 °C。

### 2.2 高温力学性能

#### 2.2.1 残余承载力

残余承载力 RBC(residual bearing capacity)被定义为高温后与常温状态植筋胶的强度差与常温状态植筋胶的强度比值,可以表达为

$$P_{RBC} = \frac{\tau_{after} - \tau_{ambient}}{\tau_{ambient}} \quad (1)$$

式中: $\tau_{after}$ 为高温后植筋胶的强度,MPa; $\tau_{ambient}$ 为常温状态植筋胶的强度,MPa。假设黏聚力在植筋方向为均匀分布的,根据规范[12],植筋胶的黏聚强度可以表达为

$$\tau_t = \frac{P}{0.8\pi DL} \quad (2)$$

式中： $\tau_t$  为胶体黏聚强度，MPa； $P$  为最大承载力，N； $\pi$  为圆周系数； $D$  为钢套筒的内径，mm； $L$  为植筋长度，mm；0.8 为均匀化系数。根据规范[12]，参数  $D$  取 16 mm， $L$  取 36 mm。根据公式(2)，黏聚强度仅仅由最大承载力  $P$  决定。

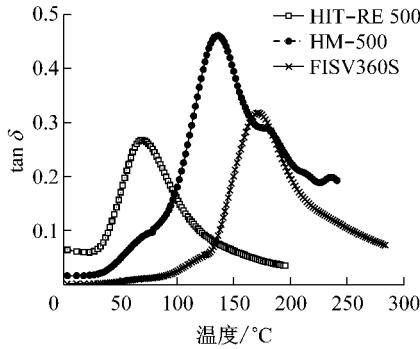


图 5 植筋胶 DMA 曲线

Fig.5 DMA curves of three anchorage adhesives

去掉每个试验温度下 5 条荷载-滑移曲线中极限荷载最大和最小的两条，对剩余的 3 条取平均，可作出各试验温度下的平均荷载-滑移曲线。高温对植筋胶产生不同程度的损伤，等冷却至自然温度后再受外力。由于材料的高温损伤，材料受外力黏结承载能力降低。表 1~3 为 3 种植筋胶在升温冷却后的残余承载力。由于植筋胶在温度达到玻璃转化温度时会产生突变，因此选取的观察点应尽量远离该温度。观察表 1 和表 3，由于植筋胶 A 和 B 的玻璃转化温度分别为 180.43 °C 和 137.54 °C，为了保证分析的准确性，选取 100 °C 时两植筋胶的残余承载力进行对比，可知在耐温性方面植筋胶 B>A。同理，选取 260 °C 时植筋胶 B 和 C 的残余承载力进行对比，可知在耐温性方面，植筋胶 C>B。因此，3 种胶的耐温性从高到低分别为 C>B>A。

表 1 植筋胶 A 在升温冷却后的残余承载力

Tab. 1 Residual bearing capacity of adhesive A specimens after heating

温度/ °C	承载力/kN			平均承载 力/kN	平均黏聚 力/MPa	残余承 载力/%
	试件 1	试件 2	试件 3			
25	29.65	30.76	31.54	30.65	21.18	100
60	22.96	24.45	23.89	23.77	16.43	78
100	17.35	16.91	16.76	17.00	11.75	55
160	8.67	8.91	8.73	8.77	6.06	29
260	15.43	15.38	15.21	15.34	10.60	50

2.2.2 力-滑移的关系

去掉每个试验温度下 5 条荷载-滑移曲线中极限荷载最大和最小的 2 条，对剩余的 3 条取平均，可作出各试验温度下的平均荷载-滑移曲线(图 6)。

表 2 植筋胶 B 在升温冷却后的残余承载力

Tab.2 Residual bearing capacity of adhesive B specimens after heating

温度/ °C	承载力/kN			平均承载 力/kN	平均黏聚 力/MPa	残余承 载力/%
	试件 1	试件 2	试件 3			
25	39.55	40.22	39.82	39.86	27.55	100
60	36.65	37.21	37.11	36.99	25.56	93
100	29.82	29.73	29.58	29.71	20.53	75
160	28.06	27.67	27.73	27.82	19.23	70
260	16.08	15.86	16.12	16.02	11.07	40

表 3 植筋胶 C 在升温冷却后的残余承载力

Tab.3 Residual bearing capacity of adhesive C specimens after heating

温度/ °C	承载力/kN			平均承载 力/kN	平均黏聚 力/MPa	残余承 载力/%
	试件 1	试件 2	试件 3			
25	44.86	46.21	45.28	45.45	31.41	100
60	45.62	43.29	45.49	44.80	30.96	99
100	48.57	51.02	49.84	49.81	34.43	110
160	50.46	50.54	50.77	50.59	34.96	111
260	45.87	45.31	45.11	45.43	31.40	99

图 6 中的实线是试验曲线，虚线为拟合模型。试验观测到，植筋胶 A 和植筋胶 B 均为内聚破坏，在拉伸的过程中钢筋并未屈服或者破坏。在拉伸的初始阶段，力随着滑移的增大而增大。当力到达最大承载力后，如果继续拉伸试件，力很快减小。但可以观察到，植筋胶 C 在达到最大承载力约 40 kN 后有一段强化曲线，分析原因是由钢筋的屈服造成的：该试验选取的钢筋为 HRB335，屈服强度为 335 MPa。钢筋的直径为 12 mm，因此其最大承载力为 38 kN。因此，曲线中约 40 kN 附近的强化段是由钢筋的屈服颈缩造成的。

2.2.3 温度效应

慧鱼 FISV360S(植筋胶 A)的固化温度范围是 5~40 °C，使用环境温度范围是-40~120 °C；悍马 HM-500(植筋胶 B)的固化温度范围是-5~30 °C，使用环境温度范围是-5~120 °C；喜利得 HIT-RE 500(植筋胶 C)的固化温度范围是 5~40 °C，使用环境温度范围是-40~70 °C。3 种植筋胶的固化温度范围和使用环境温度范围均在其玻璃转化温度(180.43, 137.54 和 69.34 °C)范围内。但是为了考察植筋胶在玻化点的力学特性，考察工况可高于玻璃转化温度。从不同植筋胶在不同高温冷却后的力-滑移曲线(图 6)中可以看出不同温度下植筋胶的最大承载力(曲线峰值)和对温度的敏感程度(曲线切线)。对于植筋胶 A，当加载温度低于玻璃转化温度(180.43 °C)时，强度随着温度的升高降低，即 25，

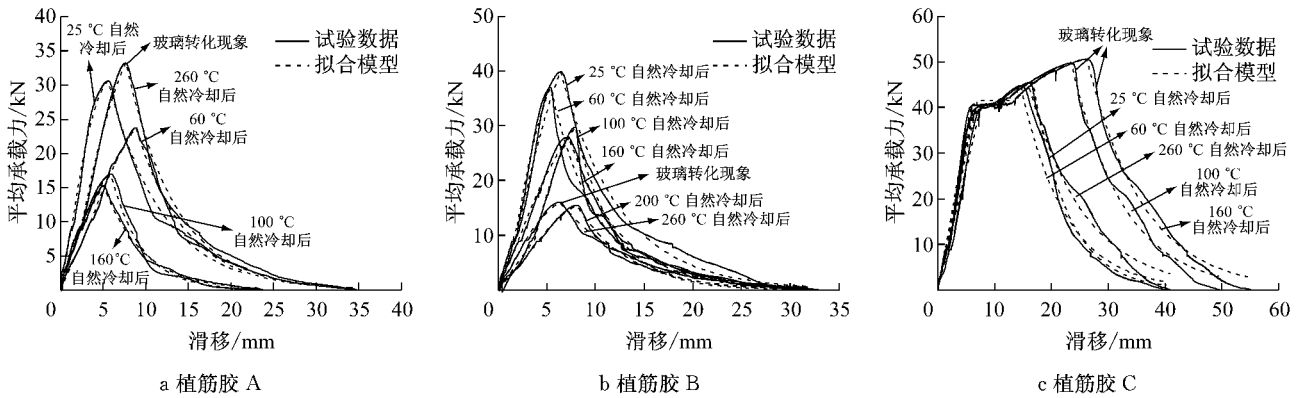


图 6 力-滑移曲线

Fig.6 Force-slip curves

60,100 和 160 °C 高温后,其平均黏聚力分别为 21.18,16.43,11.75 和 6.06 kN;而当加载温度超过玻璃转化温度(180.43 °C)为 260 °C 时,其平均黏聚力为 10.60 kN(表 1).可见,在玻璃转化温度附近,胶体的强度略有回升.对于植筋胶 B 和 C,仍然存在该现象.而在玻璃转化温度后继续升高温度,胶体的强度仍然继续下降.因此可以得出,高温后胶体的黏结强度呈现非线性变化,随着温度的升高强度首先降低,后在玻璃转化温度点稍有升高(称为转化点),随后又继续降低.该转化点是由于当材料被置于高于玻璃转化温度的环境中时,热量加剧了分子流动,改变了高分子聚合物的链接方式.可见,玻璃转化温度是高分子材料许多性能的突变点,它可以作为植筋胶的上限使用温度和橡胶材料的下限使用温度.

2.2.4 热塑性和热固性植筋胶的异同

图 7 为 3 种试样最大承载力随温度的变化.从图 7 可以看出,植筋胶 A 的初始黏聚强度比植筋胶 B 和 C 小得多,但对温度的耐热性和敏感性植筋胶 A 比植筋胶 B 和 C 差.分析原因,慧鱼 FISV360S(植筋胶 A)为热塑性植筋胶,其热加工过程只是一个物理变化的过程.在加热冷却后,其性能并没有发生变化且可以重复多次.悍马 HM-500(植筋胶 B)和喜利得 HIT-RE 500(植筋胶 C)为热固性植筋胶,加热过程发生了化学变化,分子间形成了共价键成为体型分子.在冷却之后继续加热,在进一步升温的过程中导致共价键破坏,从而使原材料的化学结构也随之改变.这类塑料的优点在于耐热性和刚性较好,硬度高,尺寸稳定,但加工较难,且不可回收利用.可见,热塑性比热固性植筋胶刚性和耐热性均较差,该结论与 2.2.1 的结论吻合,也符合该类材料的通性<sup>[14]</sup>.

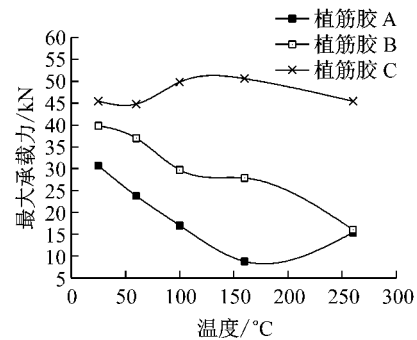


图 7 最大承载力随温度的变化

Fig.7 Maximum force at different temperatures

2.2.5 力-滑移模型

根据图 8 强度-滑移( $\tau-S$ )模型曲线可以看出,高温后植筋胶的力学性能可以归结为三段式或者四段式模型.图 8 中, $\tau_b$  为屈服应力, $\tau_s$  为材料强度, $\tau_d$  为残余强度.当植筋胶的最大黏结力  $P_{adhesive}$  小于钢筋的最大黏结力  $P_{rebar}$  时,力-滑移曲线拟合为三阶段模型:黏结,屈服和失效.三阶段模型可以表达为

$$\tau = \frac{P}{0.8\pi DL} = \begin{cases} A_1 S & \text{黏结段} \\ A_2 + B_2 S + C_2 S^2 & \text{滑移段} \\ A_3 B_3^S & \text{破坏段} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $A_1, A_2, A_3, B_2, B_3$  和  $C_2$  为拟合参数.当  $P_{adhesive}$  大于钢筋的最大黏结力  $P_{rebar}$  时,力-滑移曲线拟合为四阶段模型:黏结,强化,屈服和失效.四阶段模型可以表达为

$$\tau = \frac{P}{0.8\pi DL} = \begin{cases} A_1 S & \text{黏结段} \\ \tau_b & \text{强化段} \\ A_2 + B_2 S + C_2 S^2 & \text{滑移段} \\ A_3 B_3^S & \text{破坏段} \end{cases} \quad (4)$$

非常明显,四阶段模型比三阶段模型多了一个屈服强化阶段,这是由钢筋的屈服强化造成的.

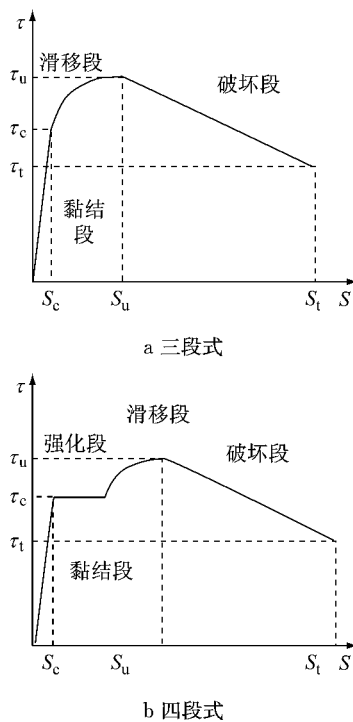


图8 强度-滑移模型

Fig.8 Shear strength-slip models

### 3 结论

(1)随着温度的升高,植筋胶高温自然冷却后极限承载力逐渐降低.热塑性植筋胶刚性和耐热性均比热固性植筋胶差.

(2)玻璃化转变温度可以作为植筋胶的上限使用温度,该温度可以促进植筋胶的完全固化.

(3)植筋胶在高温后的黏结滑移力学性能可以根据钢筋和胶体自身黏聚力大小分为三段和四段式数学模型.

### 参考文献:

- [1] Usman Sorathia, Richard Lyon, Richard G Gann, *et al.* Materials and fire threat[J]. *Fire Technology*, 1997, 33(3): 260.
- [2] Mehmet Gesoğlu, Esra Mete Güneysi, Erhan Güneysi, *et al.* Modeling and analysis of the shear capacity of adhesive anchors post-installed into uncracked concrete[J]. *Composites; Part B*, 2014, 60(4): 716.
- [3] Salih Yilmaz, Muhammet Ali Özen, Yavuz Yardim. Tensile behavior of post-installed chemical anchors embedded to low strength concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 47(10): 861.
- [4] Carlos J Hilado. An overview of the fire behavior of polymers [J]. *Fire Technology*, 1973, 9(3): 198.
- [5] 袁廷朋, 陆洲导, 邵涛. 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 刘长青, 陆洲导, 张秀球, 等. 火灾中植筋试件极限承载力试验研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(12): 1958.
- [10] LIU Changqing, LU Zhoudao, ZHANG Xiuqiu, *et al.* Experimental study on ultimate strength of post installed rebar subjected to fire [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, 42(12): 1958.
- [11] 刘长青, 余江滔, 陆洲导, 等. 高温下植筋黏结-滑移性能试验研究[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2010, 38(11): 1579.
- [12] LIU Changqing, YU Jiangtao, LU Zhoudao, *et al.* Experimental study on bond-slip behavior of post installed rebar at high temperature[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2010, 38(11): 1579.
- [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.
- [14] 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.
- [15] American Certification Institute. ACI355. 2-01 Evaluating the performance of post-installed mechanical anchors in concrete [S]. [S. l.]: American Certification Institute, 2001.
- [16] American Society for Testing and Materials. ASTM C881 Standard specification for epoxy-resin-base bonding systems for concrete [S]. [S. l.]: American Society for Testing and Materials, 2013.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. GB 50367—2006 混凝土结构加固设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [18] Housing, Urban and Rural Construction of the People's Republic of China, Inspection and Quarantine and Standardization Technology Committee of the People's Republic of China. GB50367—2006 Design code for strengthening concrete structure[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2006.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19466.2—2004 塑料差示扫描量热法(DSC)第2部分:玻璃化转变温度的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [20] General Administration of Quality Supervision of the People's Republic of China, Inspection and Quarantine and Standardization Technology Committee of the People's Republic of China. GB/T 19466.2—2004 Plastics-differential scanning calorimetry (DSC)—Part 2; Determination of glass transition temperature [S]. Beijing: China Standard Press, 2004.
- [21] 何曼君. 高分子物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1990.
- [22] HE Manjun. Polymer physics[M]. Shanghai: Fudan University Press, 1990.