

文章编号:1674-2974(2016)07-0120-06

# 结构胶黏剂在温度作用下的剪切性能试验研究<sup>\*</sup>

胡克旭<sup>1</sup>,董坤<sup>1†</sup>,杨耀武<sup>2</sup>

(1. 同济大学 结构工程与防灾研究所, 上海 200092; 2. 上海弘城国际建筑设计有限公司, 上海 200082)

**摘要:**设计并进行了2组采用不同条件固化的胶黏剂的拉伸剪切试验,研究了结构胶黏剂的剪切强度和剪切刚度随温度升高的变化规律,以及不同温度下胶黏剂剪切破坏模式. 试验发现,室温固化的胶黏剂再次经历高温后,其玻璃化温度 $T_g$ 有了30℃左右的提高;随着温度的升高,胶黏剂剪切强度和剪切刚度总体上呈下降趋势,且在其玻璃化温度 $T_g$ 前后20℃的区域内变化最为明显. 研究表明,胶黏剂玻璃化温度是影响胶黏剂温度作用下剪切性能的关键因素,同时高温固化方式可以提高胶黏剂玻璃化温度,延缓胶黏剂剪切强度和剪切刚度的下降. 在此基础上,引入玻璃化温度这一重要参数,给出了结构胶黏剂的剪切强度及剪切刚度与温度之间的关系模型,为实际工程应用提供了参考.

**关键词:**胶黏剂;温度作用;玻璃化温度;剪切性能;剪切试验

**中图分类号:**TU58

**文献标识码:**A

## Experimental Study on Shear Performances of Structural Adhesives at Different Temperatures

HU Ke-xu<sup>1</sup>, DONG Kun<sup>1†</sup>, YANG Yao-wu<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Structural Engineering and Disaster Reduction, Tongji Univ, Shanghai 200092, China;  
2. Shanghai Grandcity International Architecture Design Co Ltd, Shanghai 200082, China)

**Abstract:** The structural performances including shear-strength, stiffness, and failure mode of structural adhesives with two different curing schedules at room and high temperatures were investigated. The test results showed that the high temperature curing on the structural adhesive after room temperature curing can improve the value of glass transition temperature  $T_g$  by about 30℃. Moreover, the shear performances of the structural adhesives were deteriorated with the increase of the temperature, and the maximum degradation rate occurred within the temperature range of  $T_g \pm 20$ ℃. It is indicated that the glass transition temperature  $T_g$  was critical to the shear behavior of the structural adhesive at the high temperature. In a whole, the high temperature curing can improve the value of glass transition temperature, and it is helpful to delay the degradation of shear performance at the elevated temperature. Based on the test results, the normalized relationship between the shear performances and temperature were eventually proposed, in which glass transition temperature was considered.

**Key words:** adhesive; high temperature effects; glass transition temperature; shear behavior; shear tests

\* 收稿日期:2015-08-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478362), National Natural Science Foundation of China(51478362)

作者简介:胡克旭(1964-),男,山东莱西人,同济大学教授,博士生导师

† 通讯联系人, E-mail: dongkun2012@163.com

作为一种方便快捷的黏结材料,结构胶黏剂已经广泛应用于建筑结构加固领域<sup>[1]</sup>,其中包括黏钢加固,粘贴碳纤维(CFRP)加固以及化学植筋等.目前最广泛使用的结构胶黏剂多为有机类树脂材料,此类材料对于温度具有较高的敏感性,在温度超过其玻璃化温度时,胶黏剂分解或软化,逐步丧失传递剪力的作用,从而严重影响加固效果<sup>[2-3]</sup>.虽然现有规范对结构胶黏剂的使用给出了环境温度限值<sup>[4-5]</sup>,但是对环境温度改变时其力学性能的研究还不够深入,力学性能与玻璃化转变温度( $T_g$ )间的关系仍不明确.因此,研究结构胶黏剂在温度作用下黏结性能的影响因素及其变化规律,对于促进黏钢和粘贴碳纤维加固技术的推广,就显得十分必要.

针对结构胶黏剂在不同温度下的力学性能,部分学者进行了试验研究.吴波<sup>[6]</sup>等进行了7组碳纤维配套胶黏剂的拉伸剪切试验,研究分析了其黏结强度随温度的变化关系,指出当温度大于 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 时黏结强度开始明显下降,温度大于 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 时即可认为胶黏剂丧失黏结效果.刘凯、罗仁安<sup>[7]</sup>等对加固结构胶材料进行了 $25\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$ 温度作用下黏结剪切试验,试验发现温度升高至 $45\text{ }^\circ\text{C}$ 后,剪切强度与模量急剧下降.彭勃<sup>[8-9]</sup>等对加固用结构胶黏剂耐热性能进行了研究,并建议应重视环境温度升高对结构胶力学性能的影响.Klamer<sup>[10]</sup>等对结构胶黏剂在 $20\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ 温度作用下的弯曲强度和弹性模量进行了试验研究,试验中强度和弹性模量都随着温度的升高而降低.不同试验中,随着温度升高,胶黏剂的剪切强度存在2种不同的变化规律.一是先升后降,如文献<sup>[6]</sup>和<sup>[7]</sup>中分别在 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $45\text{ }^\circ\text{C}$ 时出现剪切强度上升的现象;二是直接下降,且在 $40\sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内降低幅度最大.但是,造成这种不同现象的原因并不十分明确.另外,本文作者前期进行采用胶黏剂作为基体材料的CFRP-混凝土界面双面剪切试验中,同样出现这2种不同的变化规律<sup>[11-12]</sup>,但并不能很好地解释2种规律的原因.

从上述研究中可以看出,不仅剪切强度随温度变化趋势存在不同,而且不同试验中性能下降点出现的温度也明显不同.为了进一步研究导致这些差异的原因,明确温度作用下胶黏剂性能变化机理,本文进行了温度作用下不同固化条件的胶黏剂力学性能试验,进一步探索温度及固化条件对胶黏剂高温剪切性能的影响,并结合胶黏剂玻璃化温度这一参数,研究了胶黏剂剪切强度、刚度与温度之间的变化关系.

## 1 试验设计

### 1.1 试件设计

试验参照《胶黏剂拉伸剪切强度的测试(刚性材料对刚性材料)》(GB/T 7124—2008)设计制备试件.拉伸剪切试件细部尺寸如图1所示.试件中钢片采用45号钢,单个钢片尺寸为 $100\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 2.5\text{ mm}$ ,黏接长度为 $12.5\text{ mm}$ ,夹持长度为 $37.5\text{ mm}$ ,胶层厚度为 $0.2\text{ mm}$ .制作过程中,为减少加载偏心,在两侧夹持区域各黏结一根 $37.5\text{ mm}\times 30\text{ mm}$ 钢垫片.胶黏剂采用新日本/辰日株式会社生产的TH系列结构胶,由环氧树脂主剂与固化剂按照2:1(质量比)的比例混合而成.

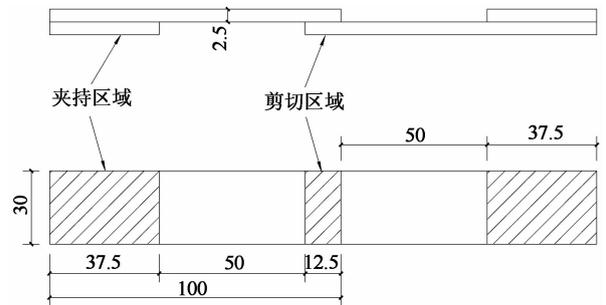


图1 试件尺寸设计示意(单位:mm)  
Fig.1 Specimen dimensions(unit: mm)

为了研究不同固化条件对胶黏剂在温度作用下性能的影响,试件分别采用2种不同的固化方式,其中A组试件在常温下固化7d后直接进行试验,B组试件则在常温固化7d后,置于 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 恒温箱中固化3h,待完全恢复常温后再进行试验.试验工况见表1,原则上每个温度下进行3个试件的试验,由于试件数量限制,部分温度下试验的试件个数根据数据的稳定性进行了酌减,2组总计29个试件.试件照片如图2所示.

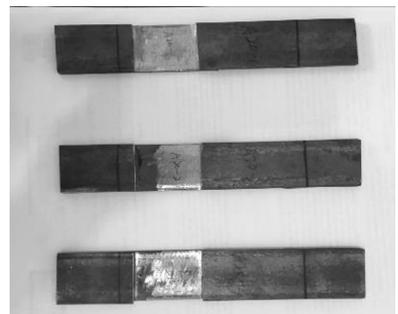


图2 试件照片  
Fig.2 Specimen samples

表1 试验工况  
Tab.1 Test conditions

组别	固化条件	试验温度/℃
A组	23℃(7 d)	25,35,45,55,65,80,100
B组	23℃(7 d)+100℃(3 h)	25,35,45,55,65,80,100

## 1.2 测试方法

试验加载设备采用德国 Zwick 公司的 Z020 型高低温电子万能材料试验机。Z020 型高低温电子万能材料试验机采用气动夹具夹持,最大加载拉力为 20 kN,两夹头间距 112.5 mm,下部夹头固定,上部夹头可上下移动。试验采用位移加载控制,加载速率为 0.3 mm/min,当荷载降至极限荷载的 50% 时停止加载。试验机采用自带荷载和变形传感器来捕捉测量试件所受拉力和夹头间相对位移,采用 testXpert II 材料试验智能测试软件进行处理,并于计算机界面实时显示。试验中,取当前温度下所达到的最大荷载作为破坏荷载。试验结束后,记录试件破坏形态。

配套环境箱的温度控制范围为  $-80\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,温度控制精度在  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  以内。进行不同温度作用试验时,先设定试验温度,当环境箱温度达到目标温度以下  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右时,打开环境箱,并放入试件夹紧,关闭环境箱,继续升温。待环境箱温度达到目标温度时开始计时,恒温 3 min 后进行加载。

表2 拉伸剪切试验结果

Tab.2 The results of tension shear tests

试件名称	极限荷载/kN	极限位移/mm	破坏形态	试件名称	极限荷载/kN	极限位移/mm	破坏形态
A-25-1	2.60	0.564 7	界面剥离破坏	B-25-1	1.74	0.453 7	界面剥离破坏
A-25-2	2.06	0.477 2	界面剥离破坏	B-25-2	2.39	0.543 6	界面剥离破坏
A-25-3	1.79	0.476 4	界面剥离破坏	B-25-3	1.49	0.316 1	界面剥离破坏
A-35-1	2.19	0.587 7	界面剥离破坏	B-35-1	2.01	0.519 1	胶层内聚破坏
A-35-2	2.12	0.592 2	胶层内聚破坏	B-35-2	1.94	0.565 2	界面剥离破坏
A-45-1	2.92	0.945 1	界面剥离破坏	B-45-1	2.44	0.717 0	界面剥离破坏
A-45-2	2.76	0.759 0	界面剥离破坏	B-45-2	1.85	0.548 7	界面剥离破坏
A-55-1	1.08	0.464 6	胶层内聚破坏	B-55-1	2.24	0.655 2	界面剥离破坏
A-55-2	0.88	0.470 6	胶层内聚破坏	B-55-2	2.27	0.598 3	胶层内聚破坏
A-65-1	0.95	0.548 5	胶层内聚破坏	B-65-1	2.24	0.650 8	界面剥离破坏
A-65-2	0.42	0.308 4	界面剥离破坏	B-65-2	2.03	0.569 9	界面剥离破坏
A-80-1	0.32	0.874 5	胶层内聚破坏	B-80-1	1.84	0.521 1	界面剥离破坏
A-80-2	0.31	0.664 9	胶层内聚破坏	B-80-2	0.61	0.264 4	胶层内聚破坏
A-100-1	0.31	0.231 8	胶层内聚破坏	B-80-3	0.96	0.425 0	胶层内聚破坏
				B-100-1	0.30	0.358 8	胶层内聚破坏

注:试件名称 A-25-1 中,A 代表组别,25 代表温度值,1 代表试件编号,其余试件依次类推。

从表 2 中各试件破坏形态可看出,胶黏剂在温度作用下有 2 种基本破坏形式:界面剥离破坏和胶层内聚破坏。在温度不高于  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,A 组试件破坏

## 2 试验结果及分析

本文在拉伸剪切试验前首先对该胶黏剂的玻璃化温度采用热流型 DSC 仪 TAQ20 进行测试,测得室温固化条件下其玻璃化温度值为  $44.36\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,经历  $-50\sim 300\sim -20\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度循环后再次测试,其最终玻璃化温度值为  $74.54\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。DSC 测试中胶黏剂产生的热流量随测试温度变化曲线如图 3 所示,发现经温度循环后胶黏剂玻璃化温度有  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右的提高,说明胶黏剂的实际玻璃化温度值并不是固定的,实际玻璃化温度值是受固化温度和后续使用温度影响的。

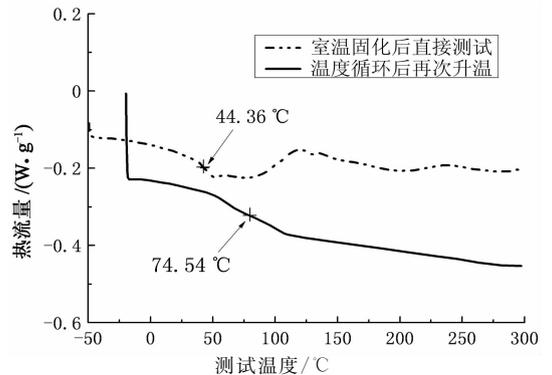


图3 DSC 试验测试结果

Fig.3 DSC test results

2 组试件在不同温度下的极限荷载、极限位移及破坏形态记录见表 2。图 4~图 10 给出了不同温度下各试件在拉伸剪切试验中的荷载-位移曲线,忽略钢片的变形,所测位移即为胶黏剂的剪切变形。

形式主要为界面剥离破坏,高于  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  后则以胶层内聚破坏为主;B 组试件同样在温度不高于  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  时以界面剥离破坏为主,之后转变为胶层内聚破坏。

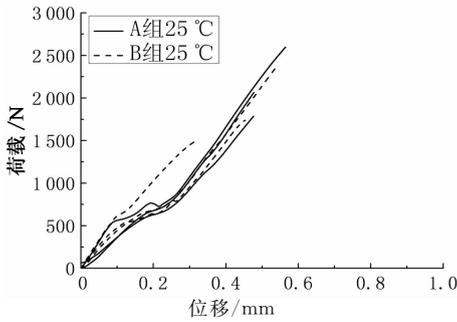


图 4 25 °C 试验曲线

Fig. 4 The test curve at 25 °C

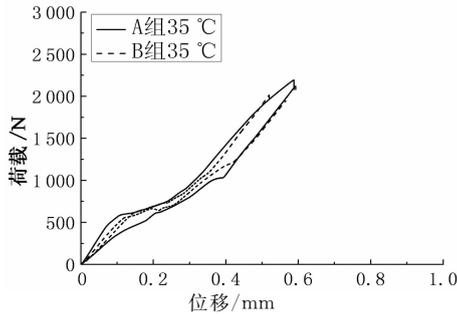


图 5 35 °C 试验曲线

Fig. 5 The test curve at 35 °C

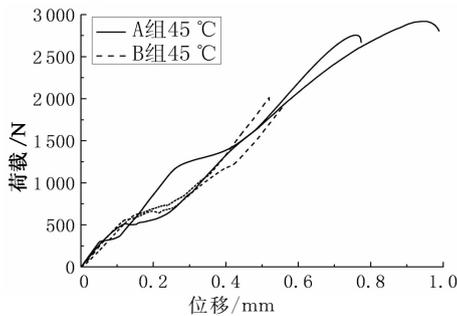


图 6 45 °C 试验曲线

Fig. 6 The test curve at 45 °C

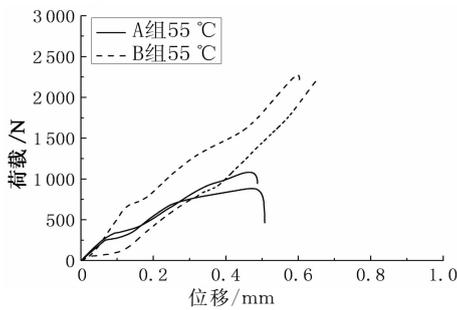


图 7 55 °C 试验曲线

Fig. 7 The test curve at 55 °C

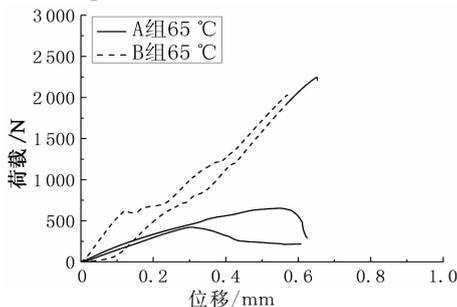


图 8 65 °C 试验曲线

Fig. 8 The test curve at 65 °C

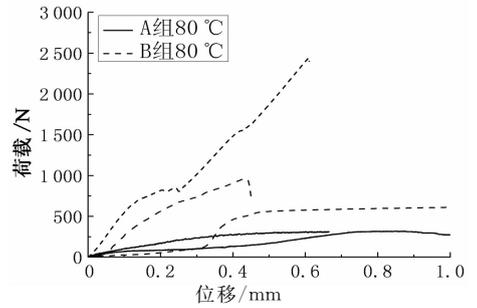


图 9 80 °C 试验曲线

Fig. 9 The test curve at 80 °C

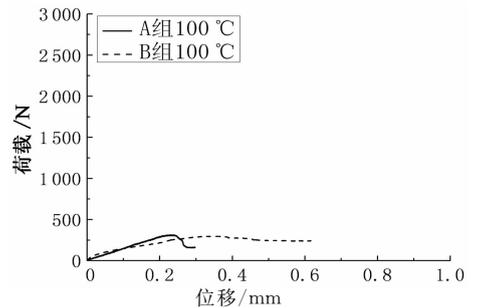


图 10 100 °C 试验曲线

Fig. 10 The test curve at 100 °C

结合表 2 和图 4~图 10 发现,胶黏剂的强度和刚度都随着温度的升高总体呈下降趋势.对比 2 组试件,25~35 °C 试验中 2 组曲线基本一致,A 组试件平均强度值略高于 B 组试件;45 °C 试验时 2 组试件的试验曲线斜率基本一致,A 组试件强度值明显高于 B 组试件;当试验温度高于 55 °C 时,B 组试件的试验曲线斜率明显高于 A 组试件,且极限荷载值也较高.这说明经高温固化过的 B 组胶黏剂要比常温固化的 A 组胶黏剂具有更好的耐热性.当试验温度达到 100 °C 时,2 组试件的强度和刚度再次趋近一致,但 B 组试件拥有更好的延性.

另外,从图 4~图 10 中荷载位移曲线可看出:随着试验温度升高,A 组和 B 组试验分别在 45 °C 和 80 °C 试验时曲线开始出现软化段,此后曲线中可看到明显的蠕变变形.软化温度与 DSC 测试结果中玻璃化温度数据基本一致(44.36 °C 和 74.54 °C).

将极限荷载值除以黏结面积可得到平均黏结强度,极限荷载值除以与其相对应的位移得到平均剪切刚度.图 11 和图 12 分别为胶黏剂的平均剪切强度和平均剪切刚度随温度的变化情况.

根据图 11 和图 12 可发现,2 组试件的黏结性能随温度变化趋势主要有以下区别:

1)随着温度升高,材料性能均有下降的趋势,但 B 组试件性能下降明显晚于 A 组试件.说明经过高温固化的 B 组试件胶黏剂的耐热性能得到了提高.

2)试验过程中,材料的剪切强度和刚度均在温

度达到各自玻璃化温度(图 11 和图 12 中的虚线位置对应的温度)后下降最为剧烈,这说明玻璃化温度是影响胶黏剂在温度作用下力学性能的一个关键因素. 相比于常温固化的 A 组试件,经过 3 h 的高温固化后 B 组试件的胶黏剂玻璃化温度有了明显的提高,因而延缓了材料性能的退化.

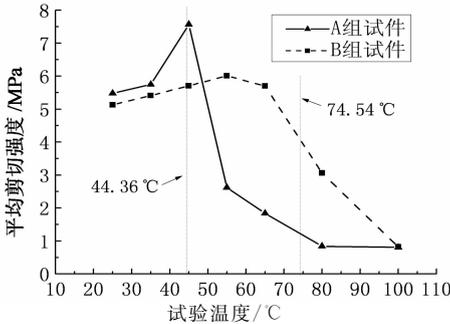


图 11 剪切强度-试验温度曲线

Fig. 11 Strength-temperature curve

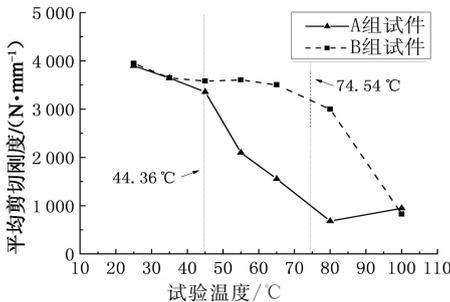


图 12 剪切刚度-试验温度曲线

Fig. 12 Stiffness-temperature curve

3) A 组试件在 45 °C 试验时剪切强度有明显上升的现象,文献[6-7]中存在同样的试验现象. 这是由于 A 组试件胶黏剂在常温下并未固化完全,固化程度不高,在低于玻璃化温度的试验升温 and 恒温过程中继续发生固化反应,这种后固化反应增强了胶黏剂内部交联度,从而提高了内聚强度;当温度继续升高时,胶黏剂形态转变成为决定强度变化的主导因素,从而导致强度的持续下降. 随温度升高,胶黏剂分子链段运动加剧,应力集中减少,渗透能力升高,也在一定程度上对黏结强度有提高效果.

目前,对环氧树脂胶黏剂耐热性能的提高主要从改进环氧基结构<sup>[13]</sup>、采用改性固化剂<sup>[14]</sup>等材料制备方面进行,而在施工方面,固化条件对胶黏剂的耐热性能也有显著影响<sup>[15]</sup>. 根据本文试验数据可看出,固化条件对后期温度作用下胶黏剂黏结性能同样有着重要影响. 实际工程中,大多数环氧树脂胶黏剂均采用室温固化,其固化反应并不完全,实际玻璃化温度仅有 50~60 °C<sup>[16]</sup>. 在后期经历高于其最初的固化环境温度时,会继续发生固化反应,内聚力增强,从而可局部提高界面的高温黏结性能. 因此,

本文建议在条件允许的情况下,可采用人工方式对常温固化的胶黏剂进行后期的高温固化,或在施工时直接采用高温固化,以提高耐热性能.

### 3 温度作用下胶黏剂黏结性能变化规律

影响胶黏剂温度作用下黏结性能的因素很多,其中玻璃化温度是一个关键因素. 为合理表达胶黏剂在高温下的性能变化,本文引入试验温度与玻璃化温度的差值( $T - T_g$ )作为变量,采用强度折减系数  $\eta_r$  和刚度折减系数  $\eta_k$  两个参数来具体研究.

对已有试验以及本文试验数据重新分析,各试验试件力学性能折减系数与试验温度和玻璃化温度差值( $T - T_g$ )的关系如图 13 和图 14 所示. 除文献[6-7]中无测试结果采用力学性能退化区段中心对应的 50 °C 为  $T_g$  值外,各胶黏剂的玻璃化温度均采用各试验测试值. 从图 13 和图 14 中可看出,大部分性能退化发生在玻璃化温度  $T_g \pm 20$  °C 的范围内.

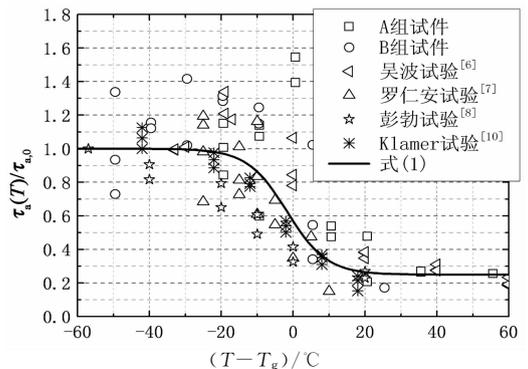


图 13 强度折减系数与温度差值( $T - T_g$ )的关系

Fig. 13 The relationship between  $\eta_r$  and  $T - T_g$

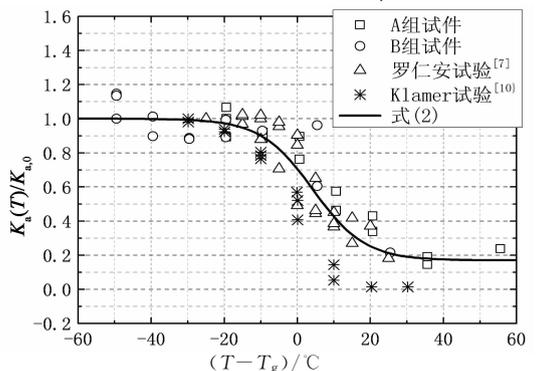


图 14 刚度折减系数与温度差值( $T - T_g$ )的关系

Fig. 14 The relationship between  $\eta_k$  and  $T - T_g$

因为完全固化情况下胶黏剂黏结强度上升不明显,可不考虑玻璃化温度前出现的增加情况. 在此基础上,可给出温度作用下胶黏剂剪切强度折减系数和剪切刚度折减系数与温度差值( $T - T_g$ )之间的关系模型:

$$\eta_{\tau} = \frac{\tau_a(T)}{\tau_{a,0}} = 0.375 \times \tanh[-0.09 \times (T - T_g) - 0.15] + 0.625, \quad (1)$$

$$\eta_k = \frac{K_a(T)}{K_{a,0}} = 0.415 \times \tanh[-0.07 \times (T - T_g) + 0.30] + 0.585. \quad (2)$$

式中:  $T$  为实际温度值,  $T_g$  为胶黏剂实际的玻璃化温度值,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\tau_a(T)$  和  $\tau_{a,0}$  分别为温度为  $T$  和常温 ( $20^{\circ}\text{C}$ ) 时的胶黏剂平均剪切强度,  $\text{MPa}$ ;  $K_a(T)$  和  $K_{a,0}$  分别为温度为  $T$  和常温 ( $20^{\circ}\text{C}$ ) 时胶黏剂的平均剪切刚度,  $\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$ .

回归拟合曲线与试验点之间的比较如图 13 和图 14 所示. 从图中可看出, 曲线与试验结果总体上吻合较好; 经计算, 试验数据与式(1)和式(2)的相关系数分别为 0.829 2 和 0.913 8, 说明拟合曲线具有较好的代表性. 因为现有试验数据只涉及常温至  $T_g + 60^{\circ}\text{C}$  的温度范围, 故回归公式的适用温度下限取为  $20^{\circ}\text{C}$ , 上限取  $T_g + 60^{\circ}\text{C}$ . 实际情况中, 胶黏剂在过高的温度下会发生降解反应而完全失去强度, 为安全起见, 可将温度超过  $T_g + 60^{\circ}\text{C}$  时的胶黏剂剪切强度和刚度近似取为 0.

## 4 结 论

通过胶黏剂力学性能试验研究, 以及对比分析前人的试验结果, 得出如下结论:

1) 随着温度升高, 胶黏剂的剪切强度和刚度整体上呈下降趋势, 在远离玻璃化温度的区域变化不大, 变化集中在玻璃化温度  $T_g \pm 20^{\circ}\text{C}$  的范围内.

2) 高温固化有助于提高胶黏剂的实际玻璃化温度. 相比常温固化, 高温固化通过提高胶黏剂的实际玻璃化温度可以改善其高温性能.

3) 本文建立的胶黏剂在不同温度作用下的剪切强度和剪切刚度关系模型与试验结果吻合较好, 可供实际工程应用参考.

4) 加固工程中, 常温下黏钢或粘贴 CFRP 所用的结构胶黏剂并不能完全固化, 在经历后续较高温度的时候会发生一定的后固化反应. 因此, 粘贴施工时, 若能采用人工方式对胶黏剂进行高温固化, 可以有效提高其使用过程中的耐热性能, 这对黏钢或粘贴 CFRP 加固结构的抗火性能是有利的.

## 参考文献

[1] 贺曼罗. 环氧树脂胶黏剂[M]. 北京: 中国石化出版社, 2004: 1-30. HE Man-luo. Epoxy resin adhesive[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2004: 1-30. (In Chinese)

[2] WILLIAMS B, BISBY L, KODUR V, et al. Fire insulation schemes

for FRP-strengthened concrete slabs[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006, 37(8): 1151-1160.

[3] 高皖扬, 胡克旭. 碳纤维加固混凝土结构耐火性能研究与展望[J]. 玻璃钢/复合材料, 2008(2): 47-52. GAO Wan-yang, HU Ke-xu. Fire resistance research of CFRP-strengthened concrete structures and prospect[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2008(2): 47-52. (In Chinese)

[4] CECS 146—2003 碳纤维片材加固混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007: 1-6. CECS 146—2003 Technical specification for strengthening concrete structures with carbon fiber reinforced polymer laminate[S]. Beijing: China Planning Press, 2007: 1-6. (In Chinese)

[5] GB 50367—2013 混凝土结构加固设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 61-75. GB 50367—2013 Design code for strengthening concrete structure[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013: 61-75. (In Chinese)

[6] 吴波, 王志军. 碳纤维布及胶黏剂的高温强度研究[C]//第三届全国钢结构防火及防腐技术研讨会暨第一届全国结构抗火学术交流会论文集. 北京: 中国建筑协会, 2005: 386-394. WU Bo, WAN Zhi-jun. Study on the strengths of CFRP and adhesive at elevated temperature[C]//Proceedings of the 3rd National Symposium on Fire-Resistance and Anti-corrosion of Steel Structures & 1st National Conference on Structural Fire-Resistance. Beijing: Architectural Society of China, 2005: 386-394. (In Chinese)

[7] 刘凯, 罗仁安, 陈有亮. 建筑结构胶高温黏结性能试验研究[J]. 建筑结构, 2010, 40(6): 106-109. LIU Kai, LUO Ren-an, CHEN You-liang. Experimental study on bonding behavior of structural adhesives under high temperature[J]. Building Structure, 2010, 40(6): 106-109. (In Chinese)

[8] 彭勃, 余益斌, 单远铭. 加固用环氧树脂胶耐热性能研究[J]. 建筑结构, 2012, 42(12): 108-111. PENG Bo, YU Yi-bin, SHAN Yuan-ming. Study on the heat resistance performance of structural epoxy adhesive[J]. Building Structure, 2012, 42(12): 108-111. (In Chinese)

[9] 潘东芳, 彭勃. 工艺参数对低黏度建筑结构胶黏接强度的影响[J]. 热固性树脂, 2004, 19(2): 24-26. PAN Dong-fang, PENG Bo. Study on the bonding strength of the adhesive with low viscosity for building[J]. Thermosetting Resin, 2004, 19(2): 24-26. (In Chinese)

[10] KLAMER E L. Influence of temperature on concrete beams strengthened in flexure with CFRP[D]. Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2009: 59-62.

[11] 胡克旭, 彭东平, 赵传鑫. 温度对 CFRP-混凝土界面黏结滑移行为的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(S): 45-49. HU Ke-xu, PENG Dong-ping, ZHAO Chuan-xin. Influence of temperature on the bond-slip behavior of CFRP-concrete interface[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(S): 45-49. (In Chinese)

[12] 胡克旭, 卢凡, 蔡正华. 高温下碳纤维-混凝土界面受剪性能试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(12): 1592-1597. HU Ke-xu, LU Fan, CAI Zheng-hua. Researches on mechanical property of CFRP-concrete interface at elevated temperatures[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(12): 1592-1597. (In Chinese)

[13] 武杨, 巫辉, 原晔. 耐高温环氧树脂胶黏剂的研究进展[J]. 中国胶黏剂, 2014, 23(10): 55-58. WU Yang, WU Hui, YUAN Ye. Research progress of epoxy resin adhesives with high temperature resistant[J]. China Adhesives, 2014, 23(10): 55-58. (In Chinese)

[14] 朱文峰, 宁荣昌, 赵为, 等. 室温固化耐温  $200^{\circ}\text{C}$  环氧树脂胶黏剂的研制[J]. 中国胶黏剂, 2014, 23(2): 19-22. ZHU Wen-feng, NING Rong-chang, ZHAO Wei, et al. Study on preparing room temperature curable EP adhesive with high temperature ( $200^{\circ}\text{C}$ ) resistance[J]. China Adhesives, 2014, 23(2): 19-22. (In Chinese)

[15] 彭勃, 余益斌, 单远铭, 等. 环氧建筑胶的耐热性能研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2013, 40(9): 25-29. PENG Bo, YU Yi-bin, SHAN Yuan-ming, et al. Study of the heat resistance performance of epoxy structural adhesive[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2013, 40(9): 25-29. (In Chinese)

[16] SILVA M A G, BISCAIA H. Degradation of bond between FRP and RC beams[J]. Composite Structures, 2008, 85(2): 164-174.