

文章编号:1007-9629(2024)06-0559-06

## 高低温下高性能环氧胶黏剂的制备

李传习<sup>1,2,\*</sup>, 高有为<sup>1</sup>, 王孝耀<sup>1</sup>, 李游<sup>3</sup>, 司曙英胡<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530005; 3. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:**基于团队已研发的胶黏剂配比,制备了一种适用于钢桥加固用的高性能结构胶黏剂,研究了纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量、缩胺 105 固化剂与聚醚胺 D230 固化剂的混掺比例及固化时间对胶黏剂室温性能的影响,并探讨了胶黏剂在不同工作温度下的力学性能.结果表明:当纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量为 0.75%,缩胺 105 固化剂与聚醚胺 D230 固化剂的质量比为 1:2,固化制度为 90 °C 下固化 2.5 h 时,胶黏剂的室温力学性能最佳,并且在低温(−20 °C)和高温(70 °C)下均能保持良好的力学性能.

**关键词:**纳米材料;高低温;固化时间;高性能环氧胶黏剂;力学性能

中图分类号:TU58<sup>+</sup>1

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.06.011

## Preparation of Epoxy Adhesives with High Performance at High-Low Temperature

LI Chuanxi<sup>1,2,\*</sup>, GAO Youwei<sup>1</sup>, WANG Xiaoyao<sup>1</sup>, LI You<sup>3</sup>, SIDU Yinghu<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;  
2. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530005, China;  
3. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

**Abstract:** Based on the adhesive formulation developed by the team, a high performance structural adhesive suitable for steel bridge reinforcement was prepared. The influence of nano-SiO<sub>2</sub> content, the blending ratio of amine curing agent 105 and polyetheramine D230, as well as the curing time on the ambient temperature performance of the adhesive, was investigated. Additionally, the mechanical properties of the adhesive at different working temperatures were explored. Results indicates that when the nano-SiO<sub>2</sub> content is 0.75%, and the mass ratio of amine curing agent 105 to polyetheramine D230 is 3:4, with a curing regimen of 90 °C for 2.5 hours, the adhesive exhibited optimal ambient temperature mechanical performance. Furthermore, it maintains good mechanical properties at both low (−20 °C) and high (70 °C) temperatures.

**Key words:** nanomaterial; high-low temperature; curing time; high performance epoxy adhesive; mechanical property

黏结界面为胶黏碳纤维增强复合材料(CFRP)加固钢结构的薄弱环节,而胶黏剂性能在很大程度上决定了CFRP-钢界面黏结性能<sup>[1-3]</sup>.环氧胶黏剂因其黏结强度高、工艺性能好和通用性强等优点被广泛应用于结构加固<sup>[4-6]</sup>.其最主要的2个组分为环氧树

脂和固化剂.未掺外加剂的环氧树脂固化产物普遍存在韧性差和疲劳性能差等弱点,而通过在环氧树脂中加入纳米增韧剂和选用合适的固化剂可有效改善固化产物的性能<sup>[7-12]</sup>.

环氧胶黏剂属于高分子聚合物,具有较高的温

收稿日期:2023-03-16; 修订日期:2023-04-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778069);湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ40173);湖南省教育厅优秀青年项目(22B0589);湖南省研究生科研创新重点项目(QL20210180)

第一作者(通讯作者):李传习(1963—),男,湖南衡阳人,长沙理工大学教授,博士生导师,博士.E-mail:lichuanxi2@163.com

度敏感性.研究表明,当环境温度接近或超过胶黏剂玻璃转化温度 $T_g$ 时,胶黏剂的强度和刚度都会显著降低<sup>[13-15]</sup>,CFRP-钢界面黏结性能也会随之下降<sup>[1,16-18]</sup>.调查显示,夏季钢桥内部温度超过60℃,而商品胶黏剂的 $T_g$ 均低于65℃<sup>[13,19-21]</sup>,无法满足加固需求.尽管航天航空特供胶黏剂的 $T_g$ 能超过200℃,但是其固化条件苛刻(需经200℃以上高温固化),尚无法广泛应用于钢桥加固<sup>[22-23]</sup>.因此,研发一种能应对高温天气下桥梁内部老化并能广泛应用于钢桥加固的高性能结构胶黏剂极为重要.

为此,本文基于团队已研发的胶黏剂配比<sup>[9,24-25]</sup>,通过改变环氧树脂中纳米 $\text{SiO}_2$ 掺量<sup>1)</sup>( $w_s$ )、缩胺105固化剂(S105)与聚醚胺固化剂

(D230)的混掺比例( $m(\text{S105}):m(\text{D230})$ )及固化时间来改善胶黏剂性能,得到了一种固化工序简单、 $T_g$ 超过85℃、在低温(-20℃)和高温(70℃)下均具备优异性能的结构胶黏剂,并将其与常用商品胶黏剂性能进行了对比.

## 1 试验

### 1.1 试验材料

环氧胶黏剂配方包括环氧树脂(E51)、固化剂(S105、D230)、增韧剂(纳米 $\text{SiO}_2$ )、偶联剂(KH-560)、促进剂(DMP-30)、触变剂(HB-139)和消泡剂(D240)等.各胶黏剂组成见表1,其中括号内数值为纳米 $\text{SiO}_2$ 掺量(以环氧树脂质量计).

表1 胶黏剂组成  
Table 1 Adhesive composition

Unit:g								
Adhesive type	S105	D230	Epoxy resin	Coupling agent	Nano- $\text{SiO}_2$	Thixotropic agent	Defoamer	Accelerator
GY34	11.67	23.33	120.00	3.00	0.60(0.50%)	0.70	0.50	3.00
G3	11.67	23.33	120.00	3.00	0.90(0.75%)	0.70	0.50	3.00
G2	11.67	23.33	120.00	3.00	1.20(1.00%)	0.70	0.50	3.00
G1	11.67	23.33	120.00	3.00	1.50(1.25%)	0.70	0.50	3.00
G4	15.00	20.00	120.00	3.00	0.90(0.75%)	0.70	0.50	3.00

### 1.2 试件设计与制备

首先将纯环氧树脂置于55℃、相对湿度为0%的高低温试验箱中30 min,以溶解树脂中可能的结晶及降低树脂黏度;接着,称取适量环氧树脂,并向树脂中按比例加入偶联剂、触变剂和纳米 $\text{SiO}_2$ ,人工搅拌10 min后即制得A组分;然后,按比例称取固化剂、促进剂和消泡剂,人工搅拌10 min后即制得B组分;最后,将A、B两组分混合,人工搅拌10 min后即制得环氧胶黏剂.

胶黏剂拉伸性能和弯曲性能测试试件参照GB/T 2567—2021《树脂浇铸体性能试验方法》制作,剪切性能测试试件参照GB/T 7124—2008《胶黏剂拉伸剪切强度的测定(刚性材料对刚性材料)》制作,动态力学分析(DMA)试件参照GB/T 40396—2021《聚合物基复合材料玻璃化转变温度试验方法 动态力学分析法(DMA)》制作.将上述制得的环氧胶黏剂倒入涂有脱模剂的模具中,常温(25℃)常湿静置1.0 h后,将模具放入高低温试验箱中在90℃下固化2.0 h(试验箱温度从25℃升温至90℃,升温速率10℃/min,温度达到90℃后开始固化计时).待自然冷却至室温后开始测试.

### 1.3 测试方法

准静态力学性能测试均在50 kN电子万能试验机上进行,所有试件均采用位移加载控制,拉伸试件和剪切试件的加载速率为2 mm/min,弯曲试件的加载速率为10 mm/min.上述每组有效试件不少于5个.

DMA采用美国TA公司的DMA850动态力学分析仪进行三点弯曲试验.试验采用多频应变模式,测试频率为1 Hz,温度范围为35~150℃,升温速率为3℃/min,每组有效试件不少于3个.

## 2 结果与分析

### 2.1 破坏形态

胶黏剂拉伸破坏形态可分为4种:中部区域破坏、三段式破坏、渐变区域破坏和局部碎裂式破坏.弯曲破坏形态可分为2种:二段式破坏、多段式破坏<sup>[26]</sup>.试验理想破坏模式为拉伸试件的中部区域破坏和弯曲试件的二段式破坏.本次胶黏剂拉伸试件共计100个,其中:中部区域破坏试件84个,占比84%;渐变区域破坏试件11个,占比11%;三段式破坏试件3个,占比3%;局部破裂式破坏试件2个,占比2%.

1)文中涉及的掺量和比值等均为质量分数或质量比.

弯曲试件共计30个,其中二段式破坏试件21个,占比70%;多段式破坏试件9个,占比30%。

## 2.2 纳米SiO<sub>2</sub>掺量及固化剂混掺比例对胶黏剂室温性能的影响

在固化制度为90℃固化2.0 h条件下,讨论纳米SiO<sub>2</sub>掺量及固化剂混掺比例对胶黏剂室温(25℃)下基本力学性能及玻璃转化温度的影响。

### 2.2.1 基本力学性能

胶黏剂的拉伸性能、弯曲性能和剪切性能汇总于表2。由表2可知:胶黏剂的拉伸强度、断裂伸长率、拉伸模量、弯曲强度、剪切强度均随纳米SiO<sub>2</sub>掺量的

增加呈先增大后减小的趋势;弯曲模量随着纳米SiO<sub>2</sub>掺量的增加而减小;当纳米SiO<sub>2</sub>掺量为0.75%、 $m(\text{S105}):m(\text{D230})=1:2$ 时,G3胶黏剂的拉伸强度、断裂伸长率、弯曲强度和剪切强度均达到最大值,分别为61.1 MPa、9.5%、108.1 MPa和14.4 MPa;当纳米SiO<sub>2</sub>掺量为0.75%、 $m(\text{S105}):m(\text{D230})=3:4$ 时,G4胶黏剂除了拉伸模量以外,其余力学性能与G3胶黏剂相比均出现大幅下降。由此可知,当纳米SiO<sub>2</sub>掺量为0.75%,固化剂S105与D230的混掺比例为1:2(即G3)时,胶黏剂在室温下综合力学性能最佳。

表2 胶黏剂的力学性能  
Table 2 Mechanical properties of adhesives(25℃)

Adhesive type	Tensile strength/ MPa	Elongation at break/%	Elastic modulus/ MPa	Bending strength/ MPa	Bending modulus/ MPa	Shear strength/ MPa
GY34	59.3	9.3	2 609.9	103.4	3 307.6	12.4
G3	61.1	9.5	2 791.0	108.1	2 717.6	14.4
G2	50.3	8.1	3 108.3	91.0	2 669.5	15.2
G1	49.0	6.8	2 824.1	85.3	2 205.7	15.3
G4	54.5	6.4	3 162.4	91.6	2 306.5	12.0

### 2.2.2 玻璃转化温度

环氧黏结剂是典型的黏弹性材料,兼有黏性流体和弹性固体的某些特性。由DMA获得5种胶黏剂在40~140℃下的动态热机械性能,即在特定频率(1 Hz)下材料储能模量 $E'$ 、损耗模量 $E''$ 和损耗因子 $\tan \delta$ 随温度的变化曲线,如图1所示。材料性质由玻璃态转变为

高弹态时的温度称为玻璃转化温度 $T_g$ ,其常用确定方法有3种:(1)切线法,将储能模量急剧下降时2条切线的交点所对应的温度定义为玻璃转化温度,记为 $T_{gs}$ ;(2)损耗模量法,将损耗模量的峰值作为玻璃转化温度,记为 $T_{gL}$ ;(3)损耗因子法,将损耗因子曲线的峰值定义为玻璃转化温度,记为 $T_{gT}$ 。3种方法所得 $T_g$ 见表3。

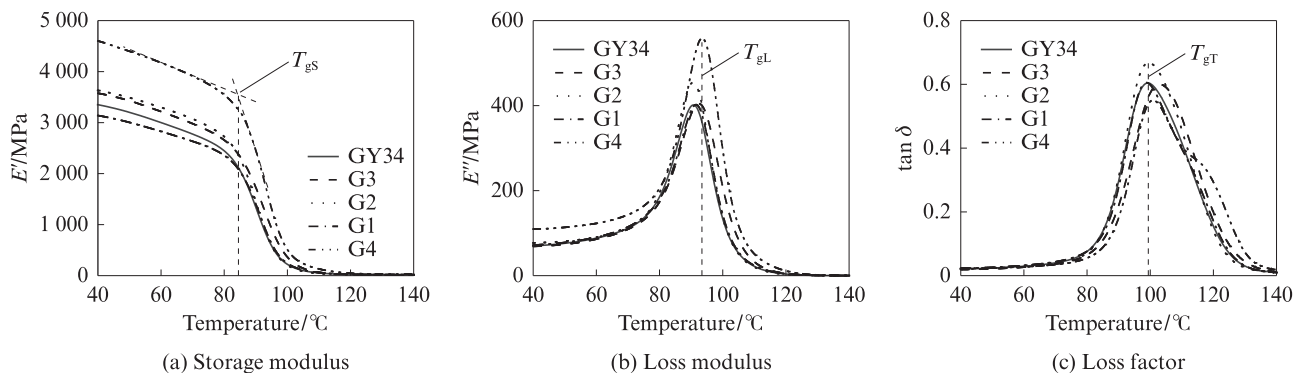


图1 动态热机械性能

Fig. 1 Dynamic thermomechanical analysis

由图1(a)可知:当温度为40~80℃时,环氧胶黏剂的储能模量随纳米SiO<sub>2</sub>掺量增加呈先上升后下降的趋势;当纳米SiO<sub>2</sub>掺量为1.25%时,储能模量下降明显;固化剂混掺比例对胶黏剂储能模量的影响较大, $m(\text{S105}):m(\text{D230})=3:4$ 时储能模量最大。由图1(b)可知,环氧胶黏剂的损耗模量与储能模量随纳米SiO<sub>2</sub>掺量和固化剂混掺比例的变化趋势相似。由图1

(c)可知,在80℃以下,文中5种胶黏剂的损耗因子均较低,说明在80℃以下5种胶黏剂均具有良好的弹性。

由表3可知:3种方法得出的 $T_g$ 存在一定差异,其中采用损耗因子法得出的 $T_{gT}$ 最大,其次是损耗模量法,切线法得出的 $T_{gs}$ 最小;纳米SiO<sub>2</sub>掺量对 $T_g$ 影响较小; $m(\text{S105}):m(\text{D230})=1:2$ 时与 $m(\text{S105}):m(\text{D230})=3:4$ 时的 $T_g$ 接近;文中5种胶黏剂的 $T_g$ 均

表 3 玻璃转化温度  
Table 3 Glass transition temperature

Adhesive type	$T_{gs}/^{\circ}\text{C}$	$T_{gl}/^{\circ}\text{C}$	$T_{gt}/^{\circ}\text{C}$
GY34	87.1	90.8	99.2
G3	89.2	92.6	103.2
G2	87.4	89.5	97.3
G1	87.3	91.2	98.3
G4	89.7	94.0	100.8

在 85℃以上,高于钢桥面夏季最高温度(60℃),满足加固需求.

2.3 固化时间对胶黏剂室温性能的影响

通过 2.2 的研究,在 90℃下固化 2.0 h 后,性能较佳的环氧胶黏剂中纳米 SiO<sub>2</sub> 掺量为 0.75%, $m(\text{S105}):m(\text{D230})=1:2$ .故本节选用该配方(G3)来讨论固化时间对胶黏剂室温(25℃)性能的影响.

G3 胶黏剂在不同固化时间下的力学性能(拉伸强度、断裂伸长率、弹性模量及剪切强度)如表 4 所示.由表 4 可知:在 90℃下固化时,G3 胶黏剂的拉伸强度和剪切强度随着固化时间的延长均呈先增大后减小的趋势;当固化时间为 2.5 h 时,其拉伸强度和剪切强度同时达到最大值,分别为 64.6、15.2 MPa;其断裂伸长率随着固化时间的延长整体上呈下降趋势;其弹性模量随固化时间的变化趋势与拉伸强度相反,呈先减小后增大的趋势.

表 4 G3 胶黏剂在不同固化时间下的力学性能  
Table 4 Mechanical performance of G3 adhesive under different curing times(25℃)

Curing time/h	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/MPa	Elongation at break/%	Shear strength/MPa
1.0	58.2	3 149.0	10.7	12.4
1.5	58.6	3 095.0	9.1	13.0
2.0	61.1	2 791.0	9.5	14.4
2.5	64.6	2 841.0	9.7	15.2
3.0	58.4	2 971.0	8.8	13.3
5.0	54.0	3 091.0	5.6	12.4

2.4 胶黏剂在不同工作温度下的力学性能

由前文可知,在 90℃下固化 2.5 h 的 G3 胶黏剂在室温下表现出良好的力学性能.因此本节在此固化制度基础上探讨 G3 胶黏剂在不同工作温度下的拉伸性能和剪切性能.

表 5 给出了 G3 胶黏剂在不同工作温度下的拉伸性能.由表 5 可知:G3 胶黏剂的拉伸强度在-20~70℃温度区间内随工作温度升高呈先增大后减小的趋势;当温度为-20℃时,其拉伸强度为 27.2 MPa,相较于室温(25℃)下的拉伸强度降低了 57.9%;当温度为 70℃时,其拉伸强度为 36.1 MPa,较室温下的拉伸强度降低了 44.1%;当温度在-20~70℃区间时,其断裂伸长率随工作温度升高而增大;其弹性模量则随工作温度升高而降低.

表 5 胶黏剂在不同工作温度下的拉伸性能  
Table 5 Tensile performance of adhesives at different operating temperatures

Adhesive type	Curing condition	Service temperature/℃	Tensile strength/MPa	Elongation at break/%	Elastic modulus/MPa	$T_{gs}/^{\circ}\text{C}$
G3	90℃, 2.5 h	-20	27.2	4.2	3 551.0	95.1
		-5	41.3	5.5	3 388.0	
		10	51.1	6.7	2 923.0	
		25	64.4	9.7	2 841.0	
		40	48.3	10.2	2 632.0	
		55	45.7	10.4	2 504.0	
		70	36.1	10.5	2 251.0	
Araldite2014	25℃, 7 d	25	25.0	1.0	4 140.0	56.3
		40	20.1	1.2	3 010.0	
		55	15.4	1.6	2 320.0	
		70	8.4	2.5	1 090.0	
Araldite420	25℃, 7 d	25	28.6	4.1	2 260.0	31.6
		40	14.2	19.5	855.0	
		55	5.2	23.3	171.0	
Sikadur30	25℃/7 d	25	33.2	0.2	11 130.0	62.0
		40	20.7	1.8	4 550.0	
		55	3.9	8.4	376.0	



图2为G3胶黏剂在不同工作温度下的剪切强度.由图2可知,剪切强度随工作温度升高而增大.

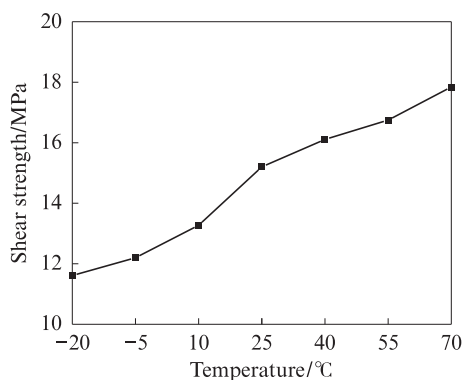


图2 G3胶黏剂在不同工作温度下的剪切强度  
Fig. 2 Shear strength of G3 adhesives at different test temperatures

图3为不同工作温度下G3胶黏剂拉伸应力-应变曲线.由图3可知:当工作温度低于25℃时,大部分分子链均处于“冻结”状态,G3胶黏剂的应力-应变曲线呈线性变化;随工作温度升高,分子链逐渐“解冻”,应力开始减小,应变增加,应力-应变曲线存在明显的屈服点.

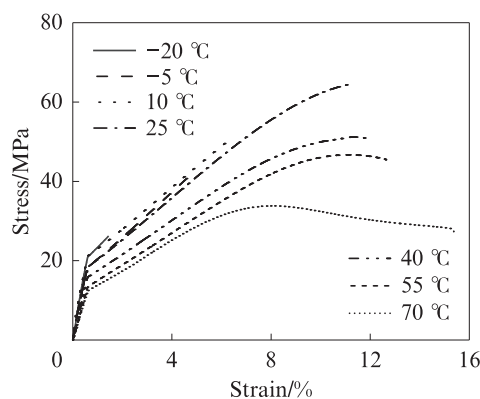


图3 不同工作温度下G3胶黏剂拉伸应力-应变曲线  
Fig. 3 Tensile stress-strain curves of G3 adhesives at different test temperatures

### 3 与商用胶黏剂的比较

将本文所开发的G3胶黏剂与商品胶黏剂(Araldite2014、Araldite420和Sikadur30)性能<sup>[13]</sup>进行对比,结果如表5所示.由表5可知:各胶黏剂在室温下均具有良好的拉伸强度,升温会导致其拉伸强度下降;在室温条件下,G3胶黏剂的拉伸强度为商品胶黏剂的1.9~2.6倍,断裂伸长率为商品胶黏剂的2.4~48.5倍;G3胶黏剂在低温(-20℃)和高温(70℃)下均能保持良好的力学性能,可较好地应对因温度变化带来的不利影响.

### 4 结论

(1)胶黏剂的拉伸强度、断裂伸长率、拉伸模量、弯曲强度、剪切强度均随着纳米SiO<sub>2</sub>掺量的增加而先增大后减小;当纳米SiO<sub>2</sub>掺量为0.75%时,其拉伸强度、断裂伸长率、弯曲强度和剪切强度达到最大值,分别为61.1 MPa、9.5%、108.1 MPa和14.4 MPa.

(2)当固化温度为90℃时,胶黏剂的拉伸强度和剪切强度均随着固化时间的延长呈先增大后减小的趋势;当固化时间为2.5 h时,其拉伸强度和剪切强度达到最大值,分别为64.4、15.2 MPa.

(3)在-20~70℃温度区间内,随温度升高,胶黏剂的拉伸强度先增大后减小,断裂伸长率和剪切强度增大,弹性模量减小.

(4)本文开发的G3胶黏剂在90℃下固化2.5 h后玻璃转化温度为95.1℃,高于常用商品胶黏剂.G3胶黏剂在低温(-20℃)和高温(70℃)下均能保持良好的力学性能,可较好地应对因温度变化带来的不利影响.

### 参考文献:

- [1] HE J, XIAN G J, ZHANG Y X. Effect of moderately elevated temperatures on bond behaviour of CFRP-to-steel bonded joints using different adhesives[J]. Construction and Building Materials, 2020, 241:150-160.
- [2] 柯璐,朱夫瑞,李传习,等. CFRP板-钢黏结界面的疲劳性能[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(3):266-274.  
KE Lu, ZHU Furui, LI Chuanxi, et al. Fatigue behavior of bonding interface between CFRP laminates and steel[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(3):266-274. (in Chinese)
- [3] LI C X, KE L, HE J, et al. Effects of mechanical properties of adhesive and CFRP on the bond behavior in CFRP-strengthened steel structures[J]. Composite Structures, 2019, 211:163-174.
- [4] 王信刚,周镇,赵华,等. 环氧树脂修复水泥基材料微裂缝的渗透机理[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6):1200-1207.  
WANG Xingang, ZHOU Zhen, ZHAO Hua, et al. Capillary transport mechanism of epoxy resin repairing micro-cracks in cement-based materials[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6):1200-1207. (in Chinese)
- [5] 陈涛, 杨斌. CFRP加固含混合型边裂纹钢板的疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(2):206-212.  
CHEN Tao, YAO Cheng. Experimental study on fatigue properties of CFRP-repaired steel plates with a mixed-mode edge crack[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(2):206-212. (in Chinese)
- [6] HOSSEINI A, GHAFOORI E, AL-MAHAIDI R, et al. Strengthening of a 19th-century roadway metallic bridge using nonprestressed bonded and prestressed unbonded CFRP plates [J]. Construction and Building Materials, 2019, 209:240-259.

- [7] BORRIE D, AL-SAAD S, ZHAO X L, et al. Effects of CNT modified adhesives and silane chemical pre-treatment on CFRP/steel bond behaviour and durability[J]. Construction and Building Materials, 2021, 273:121803.
- [8] LI Y, MA X W, LI H Y, et al. Effect of moisture-heat coupling on mechanical behavior of nano-SiO<sub>2</sub> adhesives and CFRP-steel lap joints[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 183:110391.
- [9] 李游, 李传习, 郑辉, 等. 固化剂混掺对高温下CFRP板-钢板界面黏结性能的影响[J]. 复合材料学报, 2021, 38(12):4073-4089. LI You, LI Chuanxi, ZHENG Hui, et al. Effect of curing agent mixing on interfacial bond behavior of glued CFRP plate-steel plate at elevated temperature [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(12):4073-4089. (in Chinese)
- [10] 谭家顶, 程珏, 郭晶, 等. 几种胺类固化剂对环氧树脂固化行为及固化物性能的影响[J]. 化工学报, 2011, 62(6):1723-1729. TAN Jiading, CHENG Jue, GUO Jing, et al. Effect of amine curing agents on curing behavior of epoxy resin and properties of cured compounds[J]. CIESC Journal, 2011, 62(6):1723-1729. (in Chinese)
- [11] 王翠翠, 王朔, 张双保, 等. 纳米增强竹浆纤维/环氧树脂复合材料的热解动力学[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(2):314-319, 334. WANG Cuicui, WANG Shuo, ZHANG Shuangbao, et al. Pyrolysis kinetics of bamboo pulp fiber reinforced epoxy resin composites treated by nano particles [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(2):314-319, 334. (in Chinese)
- [12] 李传习, 高有为, 李游, 等. 纳米材料胶黏剂胶体拉伸性能与微观结构[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(2):45-51. LI Chuanxi, GAO Youwei, LI You, et al. Tensile properties and the microstructure of a kind of nanomaterial adhesive[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(2):45-51. (in Chinese)
- [13] 李传习, 曹先慧, 柯璐, 等. 高温对结构加固用环氧黏结剂力学性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(3):642-649. LI Chuanxi, CAO Xianhui, KE Lu, et al. Effects of high temperatures on mechanical properties of epoxy adhesives for structural strengthening[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3):642-649. (in Chinese)
- [14] BANE M D, DE SOUSA F S M, DA SILVA L F M, et al. Effects of temperature and loading rate on the mechanical properties of a high temperature epoxy adhesive[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011, 25(18):2461-2474.
- [15] 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 Youliang. Experimental study on bonding behavior of structural adhesives under high temperature [J]. Building Structure, 2010, 40(6):106-109. (in Chinese)
- [16] 陈卓异, 彭彦泽, 李传习, 等. 高温下双搭接钢-CFRP板胶界面力学性能试验[J]. 复合材料学报, 2021, 38(2):449-460. CHEN Zhuoyi, PENG Yanze, LI Chuanxi, et al. Experimental study for the adhesive interface mechanical properties of double lapped steel-CFRP plate at high temperature[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(2):449-460. (in Chinese)
- [17] BISCAIA H C, RIBEIRO P. A temperature-dependent bond-slip model for CFRP-to-steel joints[J]. Composite Structures, 2019, 217:186-205.
- [18] KORAYEM A H, CHEN S J, ZHANG Q H, et al. Failure of CFRP-to-steel double strap joint bonded using carbon nanotubes modified epoxy adhesive at moderately elevated temperatures[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 94:95-101.
- [19] 李传习, 柯璐, 陈卓异, 等. CFRP-钢界面黏结性能试验与数值模拟[J]. 复合材料学报, 2018, 35(12):3534-3546. LI Chuanxi, KE Lu, CHEN Zhuoyi, et al. Experimental study and numerical simulation for bond behavior of interface between CFRP and steel[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(12):3534-3546. (in Chinese)
- [20] PANG Y Y, WU G, WANG H T, et al. Bond-slip model of the CFRP-steel interface with the CFRP delamination failure[J]. Composite Structures, 2021, 256:113015.
- [21] AL-SHAWAF A, ZHAO X L. Adhesive rheology impact on wet lay-up CFRP/steel joints' behaviour under infrastructural subzero exposures [J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 47:207-219.
- [22] 李栓, 张宝艳, 张思, 等. 酚醛环氧树脂改性环氧胶黏剂的耐热性能研究[J]. 化工新型材料, 2023, 51(1):272-275, 280. LI Shuan, ZHANG Baoyan, ZHANG Si, et al. Study on heat resistance of epoxy adhesive modified by phenolic epoxy resin[J]. New Chemical Materials, 2023, 51(1):272-275, 280. (in Chinese)
- [23] 李伟捷, 光善仪, 徐洪耀. 不同固化剂复配的耐高温环氧树脂体系性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(5):69-80. LI Weijie, GUANG Shanyi, XU Hongyao. Properties of high temperature resistant epoxy resin cured by different mixed curing agents[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2022, 38(5):69-80. (in Chinese)
- [24] 李传习, 李游, 贺君, 等. 固化剂对室温胶黏CFRP板/钢板界面性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(2):339-347. LI Chuanxi, LI You, HE Jun, et al. Effect of curing agent on interfacial performance of adhesively bonded CFRP laminate/steel plate cured at room temperature[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(2):339-347. (in Chinese)
- [25] 李传习, 李游, 高有为, 等. 纳米SiO<sub>2</sub>质量分数对胶粘碳纤维增强树脂复合材料板-钢搭接界面黏结性能的影响[J]. 复合材料学报, 2020, 37(10):2619-2635. LI Chuanxi, LI You, GAO Youwei, et al. Effect of nano-SiO<sub>2</sub> mass fraction on the interface performance of glued carbon fiber reinforced polymer composite-steel specimen[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(10):2619-2635. (in Chinese)
- [26] 李传习, 龙洁杰, 李游, 等. 不同活性基团纳米SiO<sub>2</sub>环氧胶黏剂的力学性能[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2021, 41(1):30-38. LI Chuanxi, LONG Jiejie, LI You, et al. Mechanical properties of epoxy adhesives with nano-SiO<sub>2</sub> modified by different active groups[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science), 2021, 41(1):30-38. (in Chinese)