

文章编号:1007-9629(2021)02-0339-09

固化剂对室温胶黏CFRP板/钢板界面性能的影响

李传习¹, 李游^{1,2}, 贺君¹, 刘一鸣¹, 彭彦泽¹

(1. 长沙理工大学 桥梁与建筑绿色建造与维护湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410114;

2. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 基于自研的纳米SiO₂环氧树脂胶黏剂配比, 制作了室温固化的21个胶黏剂拉伸试件、20个碳纤维增强复合材料(CFRP)板/钢板双搭接接头试件, 进行了胶黏剂拉伸力学指标及搭接试件承载能力、有效黏结长度、传力模式和黏结-滑移本构等试验研究, 得到了固化剂种类及掺量对搭接试件界面黏结性能的影响规律。结果表明: 固化剂种类和掺量不同的7种胶黏剂的拉伸强度依次为GY34(基于缩氨105和聚醚氨D230按质量比1:2复配的胶黏剂)>GY35(基于聚醚氨D230的胶黏剂)>GY31(基于缩氨105的胶黏剂)>GY2(基于改进酚醛胺GR07的胶黏剂)>GY33(缩氨105和聚醚氨D230按质量比1:1复配的胶黏剂)>GY1(基于芳香氨BD11的胶黏剂)>GY32(基于缩氨105和聚醚氨D230按质量比2:1复配的胶黏剂); 搭接试件的抗剪承载力依次为GY34-S>GY31-S>GY35-S>GY2-S>GY33-S>GY1-S>GY32-S; GY31-S、GY35-S、GY34-S的破坏模式为CFRP板层离, 其界面胶层黏结强度大于CFRP板内层间剪切强度; 各CFRP板/钢板搭接接头有效黏结长度为50~80 mm; 4种采用单一固化剂粘接的搭接试件的黏结-滑移曲线均为双线性三角形模型; 采用GY34粘接的搭接试件的黏结-滑移曲线为三线性直角梯形, 界面韧性得到提升。

关键词: CFRP板/钢板双搭接接头; 纳米SiO₂环氧树脂胶黏剂; 固化剂; 室温; 平均抗剪强度; 黏结-滑移本构

中图分类号: TB332

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.02.016

Effect of Curing Agent on Interfacial Performance of Adhesively Bonded CFRP Laminate/Steel Plate Cured at Room Temperature

LI Chuanxi¹, LI You^{1,2}, HE Jun¹, LIU Yiming¹, PENG Yanze¹

(1. Key Laboratory of Green Construction and Maintenance of Bridges and Buildings of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

Abstract: Based on the developed ratio of nano silica adhesive, 21 adhesive tensile specimens and 20 carbon fiber reinforced composite(CFRP) laminate/steel plate double lap specimens cured at room temperature were fabricated, and the tests of tensile mechanical indexes of adhesive and bearing capacity, interfacial shear stress distribution, effective bonding length, bond-slip constitutive of the lap joint specimens were carried out. The influence of the type and amount of curing agents on the bond behavior of CFRP laminate/steel plate lap specimens were obtained. The results show that the tensile strength of nano-SiO₂ epoxy adhesives with different type and amount of curing agents cured at room temperature were GY34 (ad-

收稿日期:2019-10-21; 修订日期:2019-12-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078059, 51778069, 51708047); 广东省科技厅科技项目(201602010); 湖南省研究生科研创新重点项目(CX20190635); 桥梁工程安全控制教育部重点实验室开放基金项目(16BCX12)

第一作者: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

通讯作者:李游(1991—),男,湖南岳阳人,湖南工业大学讲师,博士. E-mail:liyoyou_2@163.com

hesive based on 1 : 2 compounding of condensed amine 105 and amino-terminated polyoxypropylene D230) > GY35 (adhesive based on amino-terminated polyoxypropylene D230) > GY31 (adhesive based on condensed amine 105) > GY2 (adhesive based on improved phenalkamine GR07) > GY33 (adhesive based on 1 : 1 compounding of condensed amine 105 and amino-terminated polyoxypropylene D230) > GY1 (adhesive based on aromatic amine BD11) > GY32 (adhesive based on 2 : 1 compounding of condensed amine 105 and amino-terminated polyoxypropylene D230). The shear capacity of the CFRP plate/steel lap specimens were GY34-S > GY31-S > GY35-S > GY2-S > GY33-S > GY1-S > GY32-S. The failure mode of CFRP/steel lap specimens GY31-S, GY35-S, GY34-S were CFRP laminate delamination, because the bond strength of the interface adhesive layer was greater than the interlaminar shear strength of the CFRP laminate. The effective bonding length of the CFRP laminate/steel plate lap specimens were 50 – 80 mm. The bond-slip curves of the CFRP-steel lap specimens glued by epoxy adhesives with four single curing agents were bilinear triangular models. The bond-slip curve of the CFRP plate/steel plate joints glued by GY34 was a trilinear rectangular trapezoid, interface toughness was improved.

Key words: CFRP laminate/steel plate double lap joint; nano-SiO₂ epoxy resin adhesive; curing agent; room temperature; average shear strength; bond-slip constitutive

传统钢结构连接方法,如焊接、铆接和螺栓连接等会对母材造成一定损伤^[1-2]. 粘贴碳纤维增强复合材料(CFRP)加固技术克服了传统钢结构加固方法上的不足,能够在结构尺寸和自重几乎不改变的前提下,有效提高结构的强度和刚度,适用于钢结构承载能力修复、疲劳修复、腐蚀修复和脆性修复等^[3]. CFRP板与钢板之间的界面黏结性能是该技术的关键问题之一^[4-9]. 已有研究表明,胶黏剂的性能对其影响显著. 环氧树脂和固化剂是胶黏剂组分中最主要的2个部分,两者发生化学反应后才能发挥胶黏剂的功能. 当主料确定后,固化剂对胶黏剂的性能起决定性作用^[10-11]. 现有固化剂种类繁多,其中胺类固化剂是常用的环氧树脂室温固化剂,主要包括脂肪胺、脂环胺、芳香胺、聚酰胺及其改性胺等^[12]. 脂肪胺、脂环胺和芳香胺属于初级胺^[13],初级胺直接作为固化剂时韧性较差,耐冲击性不良,耐候性欠佳^[14-16]. 为了克服这些缺点并扩大其应用领域,近年来国内外学者相继提出了许多胺类的改性方法,出现了众多性能各异的固化剂.

本文基于自研的环氧胶黏剂配方,改变其中固化剂的种类和掺量,研究了其对室温固化胶黏剂基本力学性能的影响. 采用该胶黏剂进行室温固化CFRP板/钢板双搭接接头试件(以下简称搭接试件)的剪切试验,研究了固化剂种类和掺量对搭接试件界面黏结性能(极限承载力、破坏模式、界面剪应力和界面黏结-滑移本构关系等)的影响,得到了适用于CFRP加固钢结构的最佳固化剂种类和掺量,以期对结构胶黏剂的制备及CFRP加固钢结构的工程应用提供依据.

1 试验

1.1 试验材料

纳米 SiO₂ 环氧树脂胶黏剂(以下简称胶黏剂)成分包括:双酚 A 型环氧树脂 E51、固化剂(改进芳香胺 BD11、改进酚醛胺 GR07、缩胺 105 和聚醚胺 D230)、增韧剂纳米 SiO₂ 颗粒、偶联剂 KH-560、促进剂 DMP-30、触变剂 HB-139 和消泡剂 D240 等. 7 种胶黏剂配比见表 1.

表 1 胶黏剂配比
Table 1 Mixing proportions of adhesives

Adhesive No.	Type of curing agent	Curing agent	Epoxy resin	Nano-SiO ₂	Thixotropic agent	Accelerator	Defoaming agent
GY1	BD11	35.00	120.00	0.60	0.70	3.00	0.50
GY2	GR07	35.00	120.00	0.60	0.70	3.00	0.50
GY31	105	35.00	120.00	0.60	0.70	3.00	0.50
GY32	105+D230	23.33+11.67	120.00	0.60	0.70	3.00	0.50
GY33	105+D230	17.50+17.50	120.00	0.60	0.70	3.00	0.50
GY34	105+D230	11.67+23.33	120.00	0.60	0.70	3.00	0.50
GY35	D230	35.50	120.00	0.60	0.70	3.00	0.50

CFRP 板/钢板搭接试件中的 CFRP 板采用南京海拓公司产单向板 CFP1.4-50,钢板采用桥梁结构钢 Q345D。CFRP 板及钢板的材料参数见表 2。

表 2 CFRP 板及钢板的材料参数
Table 2 Material parameters of CFRP laminate and steel plate

Material parameter	CFRP laminate	Steel plate
Thickness/mm	1.4	12.0
Width/mm	50	50
Tensile strength/MPa	2 263	514
Elasticity modulus/GPa	161.2	206.0
Elongation at break/%	1.65	

1.2 试件设计与制备

1.2.1 胶黏剂拉伸试件

胶黏剂拉伸试件按照 ASTM D638-10《Standard test method for tensile properties of plastics》制作,试件尺寸如图 1 所示。试件在室温下养护 7 d。

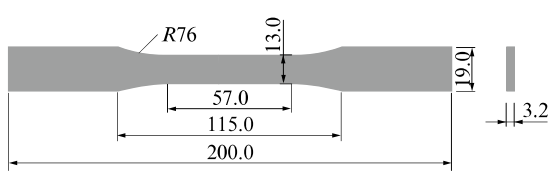


图 1 胶黏剂拉伸试件的尺寸
Fig. 1 Dimensions of tensile specimen of adhesive(size:mm)

1.2.2 搭接试件

搭接试件的设计与制作参考 ASTM D3528-96 (2008)《Standard test method for strength properties of double lap shear adhesive joints by tension loading》。图 2 为搭接试件尺寸及 CFRP 板表面应变片布置。钢板表面先用打磨机打磨除锈,然后用酒精清洗;CFRP 表面先用砂纸打磨,除去表层树脂,再用酒精擦拭干净。采用洒小钢珠方式,将胶黏剂胶层厚度控制在 1 mm 左右。试件在室温下养护 7 d。

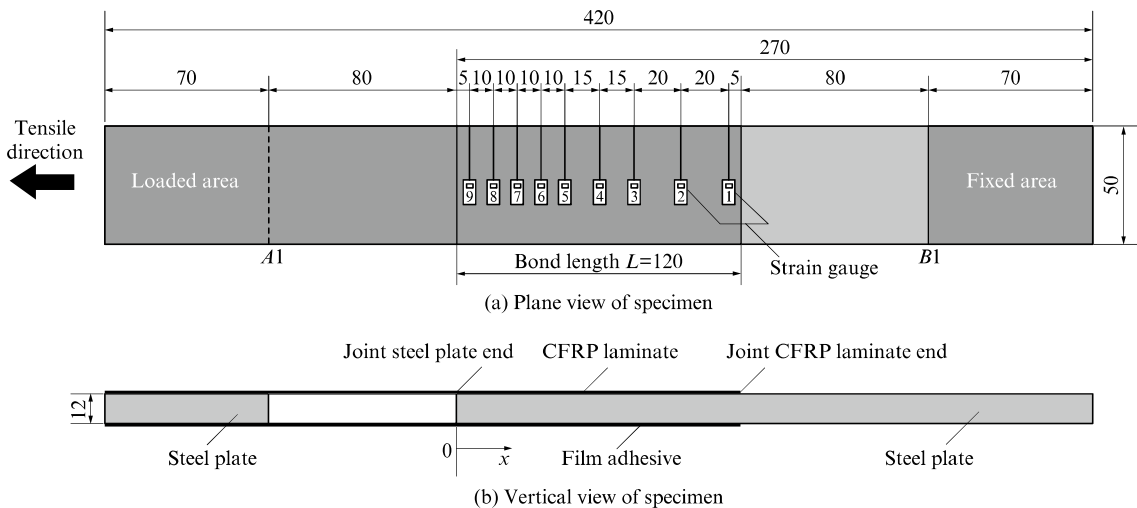


图 2 搭接试件尺寸及应变片布置
Fig. 2 Size and strain gauge arrangement of CFRP laminate/steel plate double lap joint(size:mm)

1.3 试验方法

1.3.1 胶黏剂试件拉伸试验

采用 50 kN 电子万能试验机测试胶黏剂试件的准静态拉伸性能,拉伸速率为 2 mm/min。

1.3.2 搭接试件剪切试验

搭接试件剪切试验在 300 kN 准静态拉伸试验机上进行,采用位移加载方式,加载速率为 0.3 mm/min。应变数据采用静态应变测试系统进行采集。

2 结果及分析

2.1 胶黏剂基本力学性能

图 3 为 7 种胶黏剂拉伸试件的基本力学性能指标。由图 3(a)可知:(1)基于固化剂 105 和 D230

按质量比 1 : 2 复配的胶黏剂 GY34 的拉伸强度最大,为 52.91 MPa;基于固化剂 105 和 D230 按质量比 2 : 1 复配的胶黏剂 GY32 的拉伸强度最小,仅为 22.90 MPa;7 种胶黏剂的拉伸强度由高到低依次为 GY34 > GY35 > GY31 > GY2 > GY33 > GY1 > GY32。(2)基于固化剂 D230 的胶黏剂 GY35 的弹性模量最大,为 3 705.94 MPa;基于固化剂 BD11 的胶黏剂 GY1 和基于固化剂 105 的胶黏剂 GY31 的弹性模量相对较小,分别为 2 603.05、2 380.02 MPa。由图 3(b)可知:(1)胶黏剂 GY1 的断裂伸长率最大,为 2.80%;胶黏剂 GY32 的断裂伸长率最小,为 0.88%。(2)胶黏剂 GY34 的应变能最大,为 0.072 96 N/mm²。

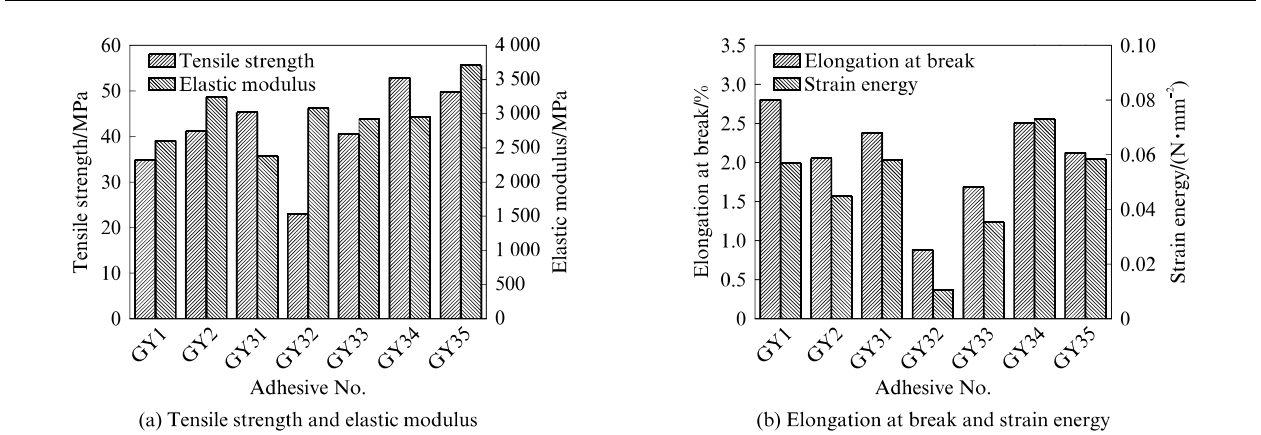


图 3 7 种胶黏剂拉伸试件的基本力学性能

Fig. 3 Basic mechanical properties of seven kinds of adhesive tensile specimens

2.2 搭接试件界面黏结性能

2.2.1 搭接试件的破坏模式和荷载-位移关系

各搭接试件的固化温度和工作温度均为

25 ℃. 其胶层厚度(T_a)、破坏时夹持端与加载端间的最大位移($D_{\max}$)、峰值荷载($P_{\max}$)及破坏模式见表 3.

表 3 固化剂对搭接试件试验结果的影响

Table 3 Effect of curing agent on test results of CFRP laminate/steel plate double lap joint specimens

Specimen No.	Serial No.	T_a /mm	$D_{\max}$ /mm		$P_{\max}$ /kN		$\bar{p}$ /MPa		$\bar{\tau}$ /MPa		Failure mode
			Test value	Average value	Test value	Average value	Test value	Average value	Test value	Average value	
GY1-S	GY1-1	1.06	1.10		58.68		4.89		11.74		b/d
	GY1-2	1.10	1.13	1.16	54.37	59.14	4.53	4.93	10.87	11.83	b/d
	GY1-3	1.06	1.26		64.36		5.36		12.87		b/d
GY2-S	GY2-1	1.08	1.39		78.22	80.53	6.52		11.17		d
	GY2-2	1.12	1.48	1.44	82.83		6.90	6.71	11.83	11.50	b/d
GY31-S	GY31-1	1.09	1.96		100.75		8.40		12.59		b/d
	GY31-2	1.13	1.90	2.11	90.25	102.31	7.52		11.28		d
	GY31-3	1.12	2.37		109.73		9.14	8.53	13.72	12.79	d
	GY31-4	1.11	2.21		108.51		9.04		13.56		d
GY32-S	GY32-1	1.11	0.87		43.93		3.66				c
	GY32-2	1.06	0.89	0.94	44.58	48.97	3.72	4.08			c
	GY32-3	1.05	1.07		58.40		4.87				c
GY33-S	GY33-1	1.12	1.33		70.95	75.43	5.91				a/b
	GY33-2	1.05	1.52	1.43	79.90		6.66	6.29			b/d
GY34-S	GY34-1	1.06	1.67		95.99		8.00		12.00		d
	GY34-2	1.11	2.10	1.90	118.35	106.89	9.86	8.91	14.79	13.36	d
	GY34-3	1.12	1.92		106.34		8.86		13.29		d
GY35-S	GY35-1	1.08	1.93		105.90		8.83		15.13		d
	GY35-2	1.10	1.58	1.71	90.13	95.09	7.51	7.93	12.88	13.59	d
	GY35-3	1.07	1.63		89.25		7.44		12.75		d

Notes: $D_{\max}$ —Limit displacement, it represents variation of distance between A1 and B1 point when specimens failed, as shown in Fig. 2; $P_{\max}$ —Ultimate load; $\bar{p}$ —Average bond strength; $\bar{\tau}$ —Nominal shear stress. Failure mode: a indicates CFRP and adhesive debonding failure; b indicates steel and adhesive debonding failure; c indicates cohesive failure of adhesive; d indicates CFRP delamination.

由表 3 可见:(1)固化剂的种类和掺量对搭接试件的极限承载能力和最大位移均有显著影响;采用

BD11 或 GR07 作为固化剂时,所对应的搭接试件 GY1-S 和 GY2-S 的峰值荷载和最大位移分别为

59.14 kN、1.16 mm 和 80.53 kN、1.44 mm,极限承载能力较小;而采用 105 或 D230 作为固化剂时,所对应的搭接试件 GY31-S 和 GY35-S 的峰值荷载和最大位移分别为 102.31 kN、2.11 mm 和 95.09 kN、1.71 mm,极限承载能力较 GY1-S 提升了 73.00%和 60.79%,较 GY2-S 提升了 27.05%和 18.08%。(2)在固化剂总用量不变的情况下,采用 105 与 D230 进行复配,当两者质量比为 1:2 时,所对应的搭接试件 GY34-S 的极限承载能力最大,峰值荷载和最大位

移分别为 106.89 kN、1.90 mm,其中峰值荷载较 GY31-S 和 GY35-S 分别提升 4.48%和 12.41%。

表 3 中平均黏结强度 $\bar{p}$ 按下式计算:

$$\bar{p} = P_{\max} / (b_p \cdot L_b) \quad (1)$$

式中: b_p 为 CFRP 板宽度; L_b 为搭接长度。

名义剪应力 $\bar{\tau}$ 按下式计算:

$$\bar{\tau} = P_{\max} / (b_p \cdot L_e) \quad (2)$$

式中: L_e 为有效黏结长度。

部分搭接试件的典型破坏模式照片见图 4。

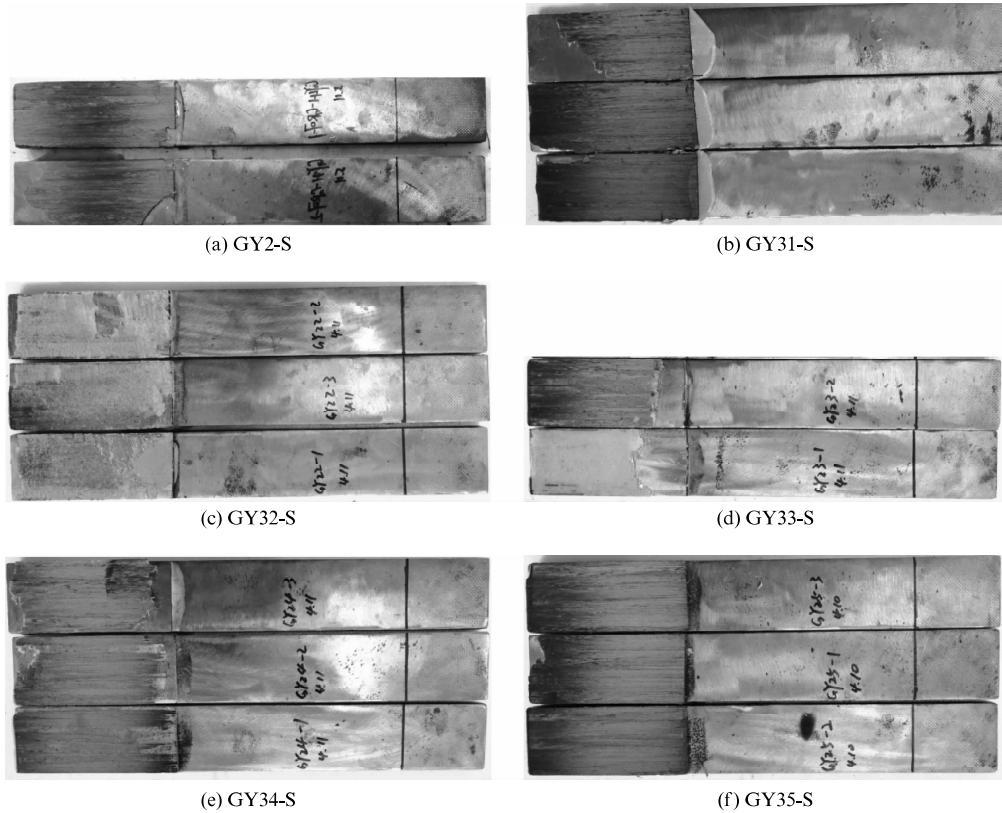


图 4 搭接试件的典型界面破坏模式

Fig. 4 Typical interface failure mode of CFRP laminate/steel plate double lap joint specimens interface

由表 3、图 4 可知:固化剂种类及掺量对搭接试件的破坏模式有一定影响,当搭接试件极限承载能力较小时,破坏模式以胶层内聚破坏(失效模式 c)为主;随着搭接试件极限承载能力的增大,破坏模式由胶层内聚破坏逐渐转变为界面破坏(失效模式 a 和 b);当搭接试件极限承载能力进一步增大后,破坏模式又转变为 CFRP 板层离破坏(失效模式 d),此时,搭接界面未出现剥离现象,说明搭接试件的界面黏结强度已超过 CFRP 板层间的剪切强度。

2.2.2 搭接试件的界面剪应力分布

通过布置在 CFRP 表面的应变片可求取测点 i 和相邻测点 $i-1$ 间的界面平均剪应力 $\tau_{i-1/2}$,其计算表达式^[17-18]为:

$$\tau_{i-1/2} = \frac{\Delta \epsilon_i E_p t_p}{\Delta l_i} = \frac{(\epsilon_i - \epsilon_{i-1}) E_p t_p}{l_i - l_{i-1}} \quad (3)$$

式中: $\Delta \epsilon_i$ 为测点 i 与 $i-1$ 处的应变差; Δl_i 为测点 i 与 $i-1$ 间的距离; ϵ_i 和 ϵ_{i-1} 分别为 CFRP 板表面测点 i 和 $i-1$ 处的应变; l_i 和 l_{i-1} 分别为测点 i 和 $i-1$ 距 CFRP 板自由端的距离; E_p 为 CFRP 板的弹性模量; t_p 为 CFRP 板厚度。

部分搭接试件在加载过程中的界面剪应力分布见图 5。由图 5 可知:(1)在加载初期,仅在搭接区域两端出现较大剪应力,随着荷载的增加,搭接区域两端面处剪应力逐渐增加,剪应力传递长度也逐渐变长。(2)在极限荷载作用下,搭接试件 GY1-3 的界面剪应力峰值为 15.84 MPa,出现在距钢板自由端

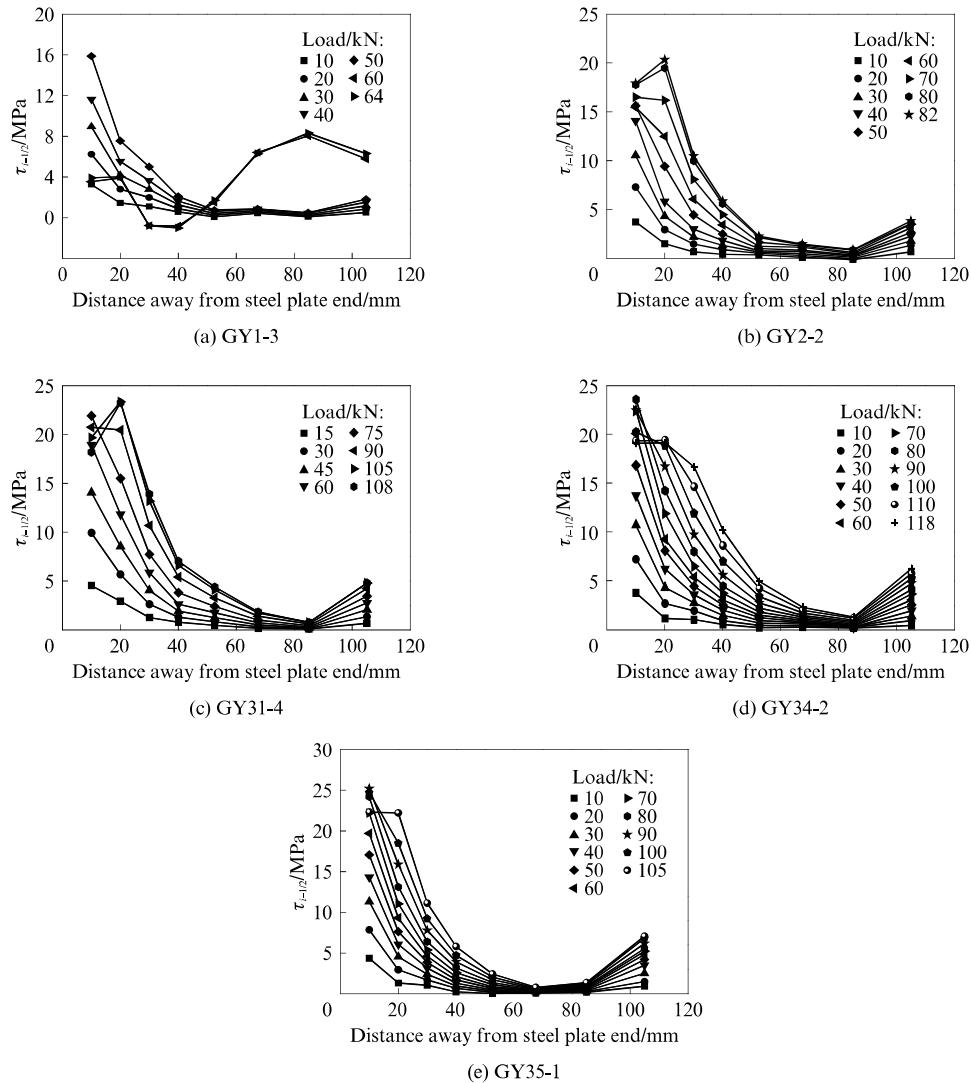


图5 搭接试件界面剪应力分布

Fig. 5 Interfaceshear stress distribution of CFRP laminate/steel plate double lap joint specimens

10 mm 处;距钢板自由端 20 mm 处的界面剪应力仅为 7.49 MPa,较钢板自由端 10 mm 处下降了 52.71%,距钢板自由端 50 mm 处的界面剪应力基本降为 0。(3)搭接试件 GY2-2 的界面剪应力距钢板自由端 10 mm 处为 17.92 MPa;其剪应力峰值出现在距钢板自由端 20 mm 处,为 20.33 MPa,较距钢板自由端 10 mm 处增加了 13.45%;距钢板自由端 70 mm 处,界面剪应力基本降为 0。(4)搭接试件 GY31-4 的界面剪应力分布情况与 GY2-2 基本类似,距钢板自由端 10 mm 处的界面剪应力为 21.94 MPa;剪应力峰值出现在距钢板自由端 20 mm 处,为 23.49 MPa,较钢板自由端 10 mm 处增加了 7.06%;距钢板自由端 80 mm 处,界面剪应力基本降为 0。(5)搭接试件 GY34-2 的界面剪应力峰值出现在距钢板自由端 10 mm 处,为 23.52 MPa;距钢板自由端 20 mm 处的界面剪应力为 19.34 MPa,较

钢板自由端 10 mm 处降低了 17.77%;距钢板自由端 80 mm 处,界面剪应力基本降为 0。(6)搭接试件 GY35-1 的界面剪应力峰值出现在距钢板自由端 10 mm 处,为 25.23 MPa;距钢板自由端 20 mm 处的应力为 22.23 MPa,较钢板自由端 10 mm 处降低了 11.89%,降幅较小;距钢板自由端 70 mm 处,界面剪应力基本降为 0。综上可知,采用基于缩胺 105、聚醚胺 D230、或按其质量比 1:2 混合的固化剂,所对应的搭接接头试件 GY31-4、GY35-1、GY34-2 均具有较好的界面承载力,适用于 CFRP 对钢结构的加固。

2.2.3 有效黏结长度

由上述试验可知:搭接试件界面剪应力峰值出现在搭接区域两端;搭接区域刚度大的端面附近(即钢板自由端)界面剪应力峰值较大,刚度小的端面附近(CFRP 板自由端)界面剪应力峰值较小;如果搭接区域足够长,则中间某点的剪应力必然降为 0(或

者可忽略不计);若将界面剪应力峰值点(两端点)与界面剪应力降为0的点之间的距离定义为有效黏结长度,则刚度大的端面有效黏结长度较长,另一端则较小.由文献[19-20]可知,有效黏结长度不但与胶层的性质有关,而且与搭接构件的刚度有关.

由图5可知,搭接试件GY1-S、GY2-S、GY31-S、GY34-S、GY35-S的有效黏结长度分别为50、70、80、80、70 mm.

3 黏结-滑移本构

黏结-滑移(τ - δ)关系为界面黏结性能的本构模型.假定搭接接头CFRP自由端滑移量为零,并忽略钢板的轴向变形,依据实测应变数据,从CFRP自由端端部到测点*i*,对CFRP表面应变进行数值积分,

可得测点*i*与测点*i*-1之间中点处的界面局部滑移量 $S_{i-1/2}$:

$$S_{i-1/2} = \frac{\epsilon_i + \epsilon_{i-1}}{4}(l_i - l_{i-1}) + \frac{\epsilon_{i-1} + \epsilon_{i-2}}{2}(l_{i-1} - l_{i-2}) + \sum_{i=3}^i \frac{\epsilon_{i-2} + \epsilon_{i-3}}{2}(l_{i-2} - l_{i-3}) \quad (4)$$

联合式(3)、(4),可获得搭接试件在加载过程中相邻测点间中点处界面剪应力与滑移量的关系.选取距离钢板自由端20 mm处的界面剪应力和对应滑移量数据绘于图6,得到搭接试件界面的 τ - δ 关系.图中 τ_i 为剪应力峰值、 δ_i 为本构模型上升段峰值所对应的滑移量、 δ_f 为极限滑移量.由图6可知,固化剂的种类及掺量对搭接试件的黏结-滑移本构关系影响显著.

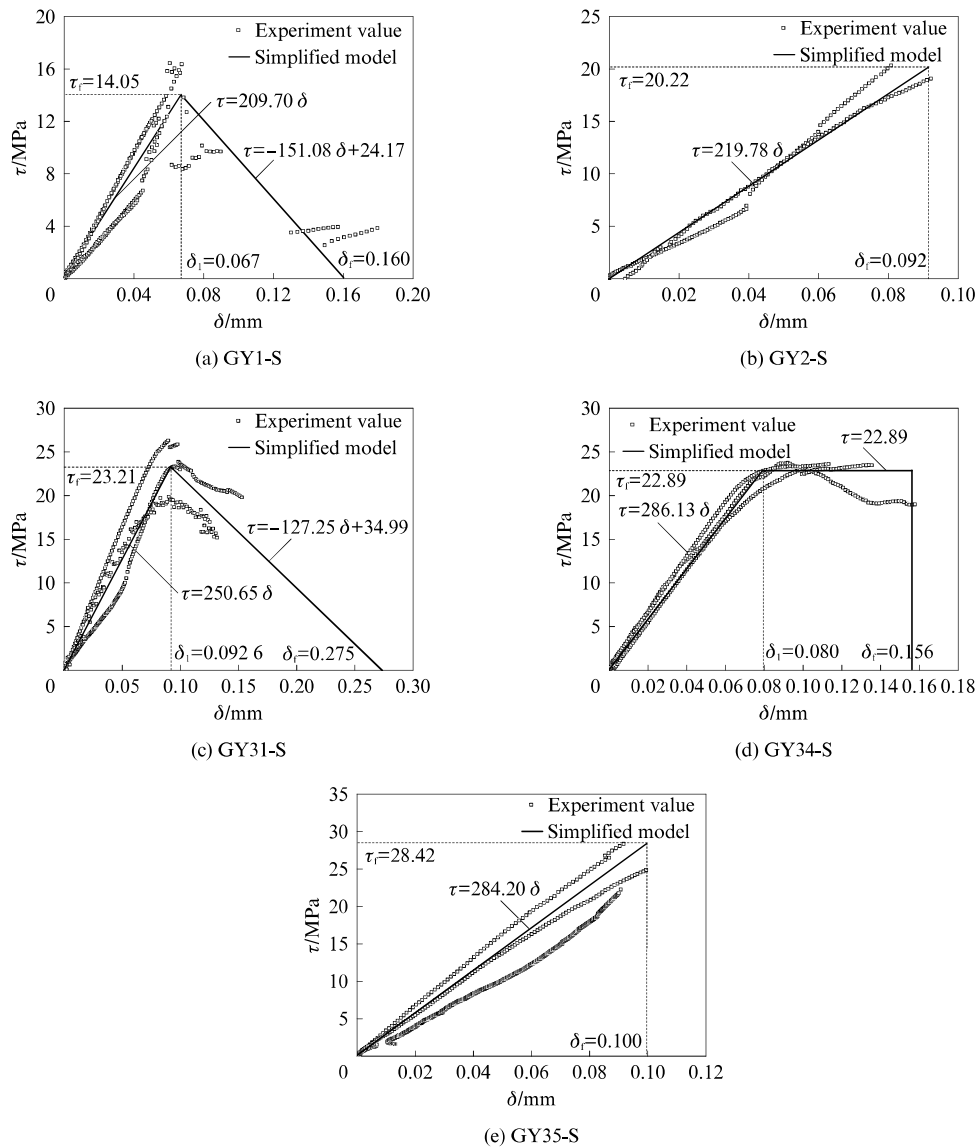


图6 搭接试件的界面黏结-滑移本构关系

Fig. 6 Bond-slip constitutive of CFRP laminate/steel plate double lap joint specimens

由图6可见:(1)采用单一固化剂时,搭接试件的黏结-滑移曲线均可简化为双线性三角形模型,如搭接试件GY1-S和GY31-S的黏结-滑移曲线存在一定的缓坡下降段,破坏过程相对缓慢,搭接界面具有一定的延性;搭接试件GY2-S和GY35-S的黏结-滑移曲线不存在明显缓坡下降段,界面剪应力达到峰值后试件突然破坏,破坏时没有明显预兆,黏结-滑移本构模型为直角三角形。(2)采用复合固化剂时,搭接试件GY34-S的黏结-滑移曲线可简化为三线性直角梯形,黏结-滑移关系可分为2个阶段:第1阶段为上升段,界面剪应力随滑移量增加呈线性增长;第2阶段为水平段,当达到峰值剪应力时,CFRP板/钢板界面损伤开始发展,但随着滑移量的继续增加,界面剪应力基本不再增长,而是出现了“屈服平台”,具有较长的软化发展过程,未出现缓坡下降度,当滑移量增大到某一值,搭接试件被拉断。

将图6中的各拟合曲线汇于图7。由图7计算出搭接试件界面的刚度 $K = \tau_i / \delta_i$,计算结果列于表4。

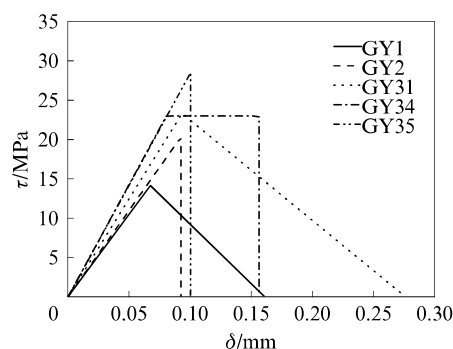


图7 固化剂对搭接试件界面黏结-滑移本构影响

Fig. 7 Effect of curing agent on the bond-slip constitutive behavior of CFRP laminate/steel plate double lap joint specimens interface

表4 搭接试件界面黏结-滑移本构参数的比较
Table 4 Comparison of parameters of the bond-slip constitutive of CFRP laminate/steel plate double lap joint specimens interface

Parameter	GY1-S	GY2-S	GY31-S	GY34-S	GY35-S
τ_i/MPa	14.05	20.22	23.21	22.89	28.42
δ_i/mm	0.067	0.092	0.093	0.080	0.100
δ_c/mm	0.160	0.092	0.275	0.156	0.100
$K/(\text{MPa} \cdot \text{mm}^{-1})$	209.70	219.78	250.65	286.13	284.20
$G_i/(\text{MPa} \cdot \text{mm})$	1.124	0.930	3.190	2.660	1.421

Notes: G_i —Interfacial fracture energy.

由图7和表4可知,搭接试件GY31-S和GY35-S的剪应力峰值、极限滑移值、界面刚度、界面断裂能分别为搭接试件GY1-S的1.65和2.02倍、1.72倍

和0.63、1.20和1.36倍、2.85和1.26倍。综上可知,固化剂的种类及掺量对CFRP板/钢板搭接界面黏结-滑移曲线具有一定影响,在常温固化及常温环境下使用时,可优先考虑采用缩胺105、聚醚胺D230或其按两者质量比1:2混合的固化剂。若高温固化或高温环境下使用时,固化剂的选型及掺量有待另文探讨。

4 结论

(1)固化剂种类和掺量不同的7种胶黏剂的拉伸强度从高到低依次为GY34>GY35>GY31>GY2>GY33>GY1>GY32。各搭接试件的抗剪承载力从高到低依次为GY34-S>GY31-S>GY35-S>GY2-S>GY33-S>GY1-S>GY32-S。

(2)搭接试件GY31-S、GY35-S和GY34-S的界面胶层黏结强度大于CFRP板内基体的剪切强度,其破坏模式均为CFRP板层离破坏。

(3)各搭接试件的有效黏结长度为50~80 mm,按有效黏结长度计算的各搭接试件的名义剪应力相差很小。

(4)基于4种单一固化剂的搭接试件GY1-S、GY2-S、GY31-S和GY35-S,其黏结-滑移曲线均为双线性三角形模型;基于复合固化剂的搭接试件GY34-S,其黏结-滑移曲线可简化为三线性直角梯形,当界面剪应力达到峰值时,滑移量会继续增加,出现“屈服平台”,但未出现缓坡下降度。

参考文献:

- [1] 岳清瑞,张宁,彭福明,等.碳纤维增强复合材料(CFRP)加固修复钢结构性能研究与工程应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2009:1-58.
YUE Qingrui, ZHANG Ning, PENG Fuming, et al. Research and engineering application of carbon fiber reinforced composite(CFRP) reinforced and repaired steel structure[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2009:1-58. (in Chinese)
- [2] 李游,李传习,陈卓异,等.基于监测数据的钢箱梁U肋细节疲劳可靠性分析[J].工程力学,2020,37(2):111-123.
LI You, LI Chuanxi, CHEN Zhuoyi, et al. Fatigue reliability of U-rib detail of steel box girder based on monitoring data[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(2): 111-123. (in Chinese)
- [3] KAMRUZZAMAN M, JUMAAT M Z, RAMLI SULONG N H, et al. A review on strengthening steel beams using FRP under fatigue[J]. The Scientific World Journal, 2014, 10(8): 1-21.
- [4] LI Y, LI C, HE J, et al. Effect of functionalized nano-SiO₂ addition on bond behavior of adhesively bonded CFRP-steel double-lap joint [J]. Construction and Building Materials, 2020, 244(5): 1-17.

- [5] AL-MOSAWE A, AL-MAHAIDI R. Performance of CFRP-steel joints enhanced with bi-directional CFRP fabric[J]. Construction and Building Materials, 2019, 197:72-82.
- [6] TANG H, DENG X, LIN Z, et al. Analytical and experimental investigation on bond behavior of CFRP-to-stainless steel-interface[J]. Composite Structures, 2019, 212(3):94-105.
- [7] HE J, XIAN G. Debonding of CFRP-to-steel joints with CFRP delamination[J]. Composite Structures, 2016, 153(6):12-20.
- [8] 李传习, 李游, 高有为, 等. 纳米 SiO_2 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_2 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)
- [9] 李传习, 罗南海, 柯璐, 等. 胶膜连接碳纤维增强树脂复合材料板-钢搭接接头室温条件的力学性能试验[J]. 复合材料学报, 2020, 37(2):318-327.
- LI Chuanxi, LUO Nanhai, KE Lu, et al. Experimental study on the carbon fiber reinforced polymer laminate-steel lap joints connected with film adhesive at room temperature[J]. Acta Materiae Composite Sinica, 2020, 37(2):318-327. (in Chinese)
- [10] 崔志强, 饶秋华, 李瑜, 等. 环氧树脂增韧固化剂的合成与性能研究[J]. 热固性树脂, 2018, 33(2):35-38.
- CUI Zhiqiang, RAO Qiuhua, LI Yu, et al. Synthesis and performance study of epoxy toughening curing agent[J]. Thermosetting Resin, 2018, 33(2):35-38. (in Chinese)
- [11] 侯雪光, 王卫华. 环氧固化剂的研究现状与未来[J]. 粘接, 2008, 29(1):49-51, 57.
- HOU Xueguang, WANG Weihua. Research status and future of epoxy curing agents[J]. Adhesion in China, 2008, 29(1):49-51, 57. (in Chinese)
- [12] MAEDA S, URAKAMI T, KAWABATA T, et al. Curing agent composition for epoxy resins, epoxy resin composition and use thereof:6911503[P]. 2005-06-28.
- [13] STARK W, JAUNICH M, MCHUGH J. Dynamic mechanical analysis(DMA) of epoxy carbon-fibre prepreps partially cured in a discontinued autoclave analogue process[J]. Polymer Testing, 2015, 41(11):140-148.
- [14] WAN J, LI C, BU Z Y, et al. A comparative study of epoxy resin cured with a linear diamine and a branched polyamine [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 188(1):160-172.
- [15] 高潮, 邱少君, 甘孝贤, 等. 氨基酯改性的端胺基聚醚型柔性固化剂的合成及性能研究[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(4):424-427.
- GAO Chao, QIU Shaojun, GAN Xiaoxian, et al. Synthesis and properties of polyurethane modified amino-terminated polyether flexible curing agent[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(4):424-427. (in Chinese)
- [16] 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 the mechanical properties of epoxy adhesives for structural strengthening [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3):642-649. (in Chinese)
- [17] WANG H T, WU G. Bond-slip models for CFRP plates externally bonded to steel substrates[J]. Composite Structures, 2018, 184(1):1204-1214.
- [18] NAKABA K, KANAKUBO T, FURUTA T, et al. Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete[J]. Structural Journal, 2001, 98(3):359-367.
- [19] 彭福明. 纤维增强复合材料加固修复金属结构界面性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2005.
- PENG Fuming. Research on the interfacial performance of metallic structures strengthened with fiber reinforced polymers[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2005. (in Chinese)
- [20] FERNANDO D, YU T, TENG J G. Behavior of CFRP laminates bonded to a steel substrate using a ductile adhesive[J]. Journal of Composites for Construction, 2013, 18(2):04013040.