

碳纤维布加固铝合金连接试验

郭小农¹, 王 奔^{1,2}, 蒋首超¹, 裴进玉¹

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;

2. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092)

摘要: 铝合金材料的可焊性较差, 焊接热影响区强度降低显著, 用碳纤维布加固铝合金是一种有效的措施。为此探究了碳纤维布与铝合金间的黏结性能, 完成 2 批共计 37 个碳纤维布加固铝合金双搭接节点试验, 研究了碳纤维布黏结长度、宽度、层数、碳纤维布材料以及黏结构造等对黏结效果的影响。总结了碳纤维布加固铝合金双搭接节点的破坏模式和破坏机理, 得到碳纤维布的应力应变分布规律, 提出了双搭接节点的有效黏结长度和承载力实用计算公式。

关键词: 碳纤维布加固铝合金; 剪切试验; 黏结性能; 有效黏结长度; 极限承载力

中图分类号: TU395.01

文献标志码: A

Experimental Study of Aluminum Alloy Plates Strengthened with CFRP Sheets

GUO Xiaonong¹, WANG Ben^{1,2}, JIANG Shouchao¹, PEI Jinyu¹

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Tongji Architectural Design (Group) Co. Ltd, Shanghai 200092, China)

Abstract: The strength in heat-affected zone of welded aluminum alloy decreases sharply. One of the effective measures is to use CFRP sheets for reinforcement. A shear experiment of 37 double-lap joints of aluminum alloy reinforced with CFRP sheets, including specimens with different CFRP bond length, bond width, bond layers, single layer thickness and bond form, was conducted. Failure modes, bond mechanism between CFRP sheets and aluminum alloy, and strain distribution were studied. Besides, effective bond length and ultimate load calculation formulas of the double-lap joint were proposed.

Key words: aluminum alloy strengthened with CFRP sheets; shear experiment; bond performance; effective bond length; ultimate load

纤维增强复合材料(FRP), 尤其是碳纤维增强复合材料(CFRP), 由于其材料性能和施工工艺方面的优越性, 在混凝土结构和钢结构加固领域的应用越来越多, 也是国内外研究的热点^[1-3]。铝合金材料由于具有轻质高强、耐腐蚀等优点, 在空间结构中的应用日趋广泛^[4]。但是铝合金的可焊性差, 在焊接热影响区内强度下降显著, 我国《铝合金结构设计规范(GB 50429—2007)》^[5]规定, 铝合金焊接热影响区的强度折减系数取 0.5(材料牌号 6061-T6), 这就大大减小了铝合金构件的使用效率。借鉴 CFRP 加固钢结构的相关研究成果, 在铝合金焊缝处, 粘贴 CFRP 配合加固, 是一种可行的解决方案。对于铝合金受拉构件, CFRP 抗拉承载力高, 可以承担大部分的拉力; 对于铝合金受弯构件, CFRP 在构件受拉侧同样可以提供有效帮助; 对于铝合金压弯构件, 粘贴 CFRP 进行加固, 可以在一定程度上提高构件刚度, 从而提高构件的稳定承载力。因此, 碳纤维布加固铝合金技术可以显著提高铝合金结构的适用性, 具有广阔的应用前景^[6-9]。

本文通过碳纤维布与铝合金黏结剪切试验, 对碳纤维布与铝合金间的黏结性能进行了研究。结合理论解析和数值分析, 总结了碳纤维布加固铝合金双搭接节点的破坏模式以及碳纤维布应变分布规律, 分析了各因素对加固效果的影响, 得出了有效黏结长度和极限承载力的计算公式。

1 试验研究

1.1 试验简介

铝合金采用工程中常用的牌号 6063-T5, 其中 A 批试件厚度为 6 mm, B 批试件厚度为 5 mm。两批试件材料相同, 材料力学性能参数由材性试验测出, 见

表 1. 碳纤维布型号采用国内结构加固工程中常用的 200 g UT70-20 和 300 g UT70-30, 单层厚度分别为 0.111 mm 和 0.167 mm. 其力学性能参数由材性试验测出, 见表 2. 黏结剂采用黏结金属和碳纤维布的专用胶(浸渍胶和结构胶, 即 AB 胶), 其材料力学性能参数见表 3^[10].

表 1 铝合金材性试验结果平均值

Tab.1 Material test result of aluminum alloy (in average)

材料牌号	弹性模量 E/GPa	屈服强度 $f_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 f_u/MPa
6063-T5	71.9	144.3	173.5

表 2 碳纤维布材性试验结果平均值

Tab.2 Material test result of CFRP (in average)

材料型号	厚度 t/mm	弹性模量 E/GPa	抗拉强度 f_u/MPa	极限应变 $\epsilon_u/10^{-6}$
200 g UT70-20	0.111	148.6	1 351.6	7 100.5
300 g UT70-30	0.167	148.1	1 332.2	7 032.8

表 3 黏结剂材料性能

Tab.3 Material property of adhesive

材料型号	弹性模量 E/GPa	抗拉强度 f_u/MPa	抗剪强度 τ_u/MPa
AB 胶	2.5	52.6	18.7

试件分为 A, B 两批. 其中, A 批为哑铃型试件, B 批为矩形试件. 如图 1 所示, 将铝合金板件从中间断开, 然后在试件两侧对称粘贴碳纤维布(图中, b_p 为碳纤维布宽度, l_p 为碳纤维布黏结长度). 贴布前需要对铝合金试件表面进行处理, 先用砂纸打磨需要粘贴的区域, 再用丙酮擦拭, 待丙酮挥发后立即均匀粘贴碳纤维布. 同时, 为了让试件破坏只发生在试件的一侧, 在另一侧缠绕玻璃纤维布加强. A 批试件

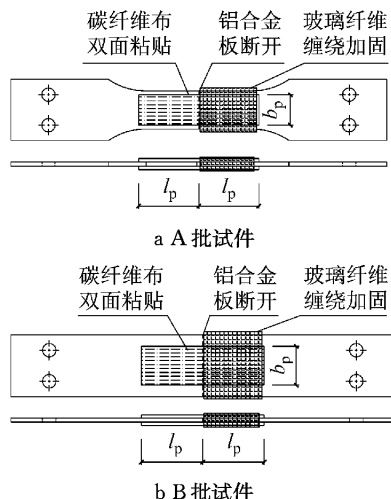


图 1 试件示意图

Fig.1 Sketch of specimen

一共设计了 5 组试件, 编号为 A1~A5, 每组 2 个试件, 每组试件分别粘贴不同长度的碳纤维布; B 批试件一共设计了 9 组试件, 编号为 B1~B9, 每组 3 个试件, 每组试件分别粘贴不同型号、宽度、层数的碳纤维布, 详见表 4. 表中除了 B9 试件组粘贴形式为回退形式以外, 其他试件组粘贴形式均为正常形式; 粘贴形式如图 2 所示.

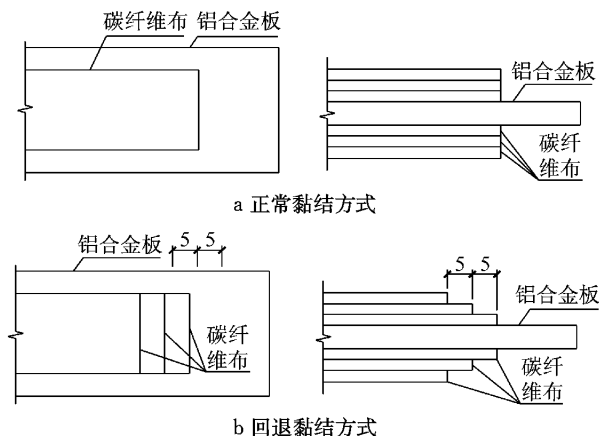


图 2 正常和回退黏结方式示意图(单位:mm)

Fig.2 Sketches of normal and back bond form (unit: mm)

在碳纤维布表面布置应变片, 用于测量碳纤维布纵向拉应变, 如图 3 所示. 其中, A 批试件碳纤维布中心线两侧 15 mm 处粘贴两排应变片, B 批试件在碳纤维布中心线上粘贴一排应变片.

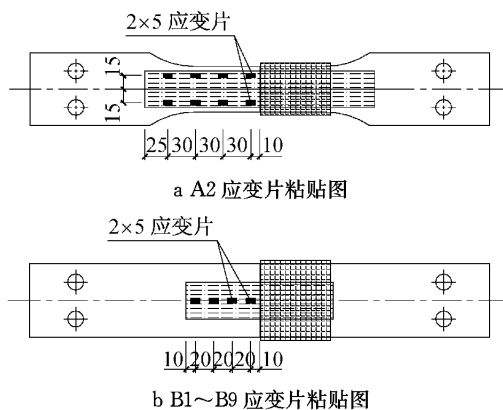


图 3 测点布置图(单位:mm)

Fig.3 Strain gauge positions in specimen (unit: mm)

试验在自制的拉伸试验装置上进行. 采用连续缓慢单调加载的方式, 应变数据采用微机系统自动采集. 试验加载情况如图 4 所示.

1.2 破坏模式和极限承载力

在加载初期, 试件外观没有明显变化; 当荷载增加到极限荷载的 40%~50% 时, 听到间断的撕裂声, 试件拼缝处的缝隙距离逐渐变大, 拼缝处两侧碳纤

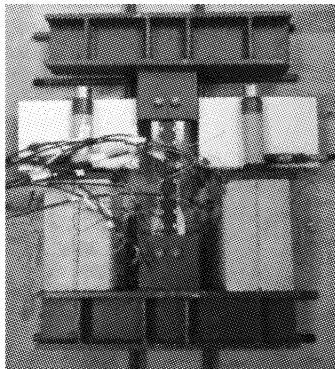


图 4 试验加载图
Fig.4 Set up of testing

维布出现剥离趋势,对于粘贴多层碳纤维布的试件,还伴随有层间剥离的趋势;荷载继续增大,撕裂声不断加剧,拼缝处间隙距离越来越大,伴随局部碳纤维布丝拉断;荷载增大到一定程度后,碳纤维布突然断裂或剥离。

本试验的试件破坏形式汇总详见表 4. 可以看出,试件的主要破坏形式有 3 种:碳纤维布拉断破坏,整体剥离破坏(包括完全剥离破坏和不完全剥离破坏),层间剥离破坏. 典型破坏模型如图 5 所示. 其中,碳纤维布拉断破坏是指拼缝处的碳纤维布拉断,而碳纤维布和铝合金之间没有发生剥离的破坏形

表 4 试验结果汇总表
Tab.4 Test results

试件组号	试件编号	CFRP 型号	CFRP 单层厚度 t_p/mm	CFRP 粘贴宽度 b_p/mm	CFRP 单侧粘贴长度 l_p/mm	CFRP 粘贴层数 $n/\text{层}$	破坏情况	极限承载力 P_u/kN	平均承载力 P/kN	平均黏结应力/ MPa
A1	A1-1	UT70-30	0.167	40	200	1	剥离,局部 CFRP 条拉断	13.70	14.34	1.79
	A1-2	UT70-30	0.167	40	200	1	CFRP 拉断	14.97		
A2	A2-1	UT70-30	0.167	40	125	1	剥离,局部 CFRP 条拉断	14.86	14.23	2.85
	A2-2	UT70-30	0.167	40	125	1	剥离,局部 CFRP 条拉断	13.59		
A3	A3-1	UT70-30	0.167	40	80	1	剥离,局部 CFRP 条拉断	15.87	14.95	4.67
	A3-2	UT70-30	0.167	40	80	1	剥离,局部 CFRP 条拉断	14.03		
A4	A4-1	UT70-30	0.167	40	60	1	不完全剥离	15.54	14.64	6.10
	A4-2	UT70-30	0.167	40	60	1	不完全剥离	13.75		
A5	A5-1	UT70-30	0.167	40	40	1	完全剥离	15.24	14.37	8.98
	A5-2	UT70-30	0.167	40	40	1	完全剥离	13.50		
B1	B1-1	UT70-20	0.111	40	80	1	完全剥离	11.89	12.73	3.98
	B1-2	UT70-20	0.111	40	80	1	完全剥离	13.53		
	B1-3	UT70-20	0.111	40	80	1	完全剥离	12.76		
B2	B2-1	UT70-20	0.111	30	80	1	完全剥离	9.26	9.59	4.00
	B2-2	UT70-20	0.111	30	80	1	CFRP 拉断	10.04		
	B2-3	UT70-20	0.111	30	80	1	CFRP 拉断	9.48		
B3	B3-1	UT70-20	0.111	50	80	1	完全剥离	14.10	14.44	3.61
	B3-2	UT70-20	0.111	50	80	1	剥离,局部 CFRP 条拉断	14.50		
	B3-3	UT70-20	0.111	50	80	1	完全剥离	14.73		
B4	B4-1	UT70-20	0.111	40	80	2	完全剥离	18.25	18.33	5.73
	B4-2	UT70-20	0.111	40	80	2	不完全剥离,伴随着层间剥离	17.67		
	B4-3	UT70-20	0.111	40	80	2	完全剥离	19.07		
B5	B5-1	UT70-20	0.111	40	80	3	不完全剥离,伴随着层间剥离	21.82	22.49	7.03
	B5-2	UT70-20	0.111	40	80	3	不完全剥离,伴随着层间剥离	22.08		
	B5-3	UT70-20	0.111	40	80	3	不完全剥离,伴随着层间剥离	23.58		
B6	B6-1	UT70-30	0.167	40	80	1	完全剥离	14.95	14.79	4.62
	B6-2	UT70-30	0.167	40	80	1	不完全剥离,局部 CFRP 条拉断	14.74		
	B6-3	UT70-30	0.167	40	80	1	不完全剥离,局部 CFRP 条拉断	14.68		
B7	B7-1	UT70-30	0.167	40	80	2	不完全剥离,伴随着层间剥离	21.36	21.94	6.86
	B7-2	UT70-30	0.167	40	80	2	CFRP 拉断	22.27		
	B7-3	UT70-30	0.167	40	80	2	不完全剥离,伴随着层间剥离	22.19		
B8	B8-1	UT70-30	0.167	40	80	3	完全剥离	26.70	26.51	8.28
	B8-2	UT70-30	0.167	40	80	3	铝合金拉断	—		
	B8-3	UT70-30	0.167	40	80	3	不完全剥离,伴随着层间剥离	26.32		
B9	B9-1	UT70-20	0.111	40	80	3	不完全剥离,局部 CFRP 条拉断	18.30	16.82	5.26
	B9-2	UT70-20	0.111	40	80	3	先在 CFRP 布回退处剥离,再整体剥离	15.38		
	B9-3	UT70-20	0.111	40	80	3	先在 CFRP 布回退处剥离,再 CFRP 拉断	16.77		

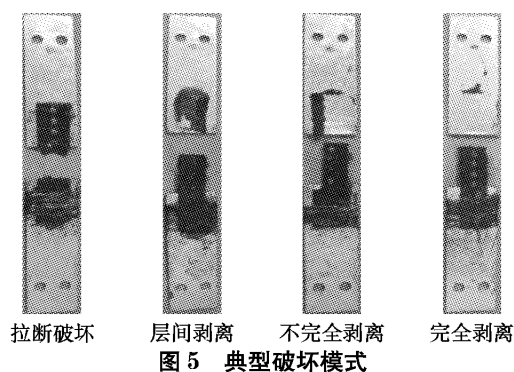


图5 典型破坏模式

式;层间剥离破坏是指多层碳纤维布层间发生剥离的破坏形式;整体剥离破坏是指碳纤维布层从铝合金板上剥离的破坏形式。整体剥离破坏的程度也有所不同:对于碳纤维粘贴面积较小的试件,呈现为完全剥离破坏,剥离面较为整洁和平整,没有残留的碳纤维条;对于碳纤维粘贴面积较大的试件,呈现为不完全的剥离破坏,剥离面上还残留有碳纤维细条,这些细条是拉断破坏的。粘贴单层碳纤维布的试件主要表现为整体剥离破坏和拉断破坏;粘贴多层碳纤维布的试件主要表现为整体剥离破坏和层间剥离破坏。

多数试件在靠近试件拼接缝处的小段距离内,胶层与铝合金表面完全脱离,并黏附在剥离后的碳纤维布上;在远离试件拼接缝处,胶层与铝合金表面零星脱离,大部分仍然黏附在铝合金表面。上述现象说明,在靠近试件拼缝处,碳纤维布和胶层作为一个整体协同工作,最早的剥离出现在此段的铝合金表面与胶层之间。此处剥离完成后,该区域的碳纤维布与铝合金已经脱开,碳纤维布与铝合金层之间已不是完全的平行关系,两者之间出现了相对剪切变形和滑移,这使后续的剥离更加容易进行,并主要发生在碳纤维单丝与胶层之间。

1.3 试验结果分析

图6为A2-1及B7-1试件的碳纤维布应变分布实测图。图中,数据点为试验实测所得,虚线段表示由数据点所得的近似拟合曲线。由图可知,可以将加载分为3个阶段:第1阶段为加载初期,对应于荷载小于极限荷载的30%,此阶段碳纤维应变沿全长都很小;第2阶段为加载中期,对应于极限荷载的30%~60%,本阶段靠近试件拼缝处的碳纤维应变显著增大,远离拼缝处的碳纤维应变仍然保持在较小的状态;第3阶段为加载后期,对应于极限荷载的60%及以上,本阶段中,随着荷载的增长,靠近拼缝处的碳纤维应变值急剧增大,直到试件破坏,远离拼

缝处的碳纤维应变有所增大,但是相比于拼缝处的应变值仍然很小。整个加载阶段,只在距离试件拼缝处的小段距离内,碳纤维应变有明显变化,其他部位碳纤维布应变较小,变化不显著。同时,粘贴单层碳纤维布的A2试件,碳纤维布应变在距离拼缝40 mm后基本保持不变;粘贴两层碳纤维布的B7试件,碳纤维布应变在50 mm后基本保持不变。因此,对于A2和B7,拉力的有效传递长度分别小于40和50 mm。试验中采样频率偏小,没有捕捉到更为精确的剥离破坏过程;应变片敏感栅长度偏大,导致应力梯度较大区域的应变测量不够精确,在后期研究中还有待进一步完善。

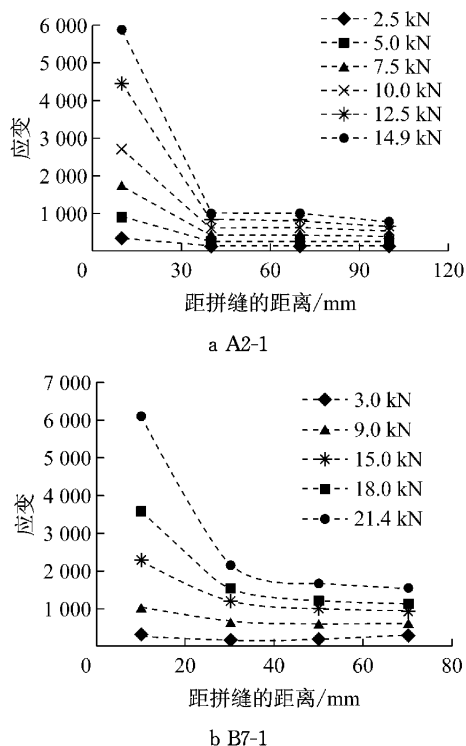


图6 不同荷载下碳纤维布拉应变分布实测图
Fig.6 Test result of CFRP strain distribution at different load

表4给出了试验结果汇总情况,由此可以得到各参数对黏结效果的影响:

(1) 碳纤维布黏结长度的影响。当碳纤维布粘贴长度在40~200 mm之间变化时,试件极限承载力差别不大,在13.5~15.9 kN之间波动(图7),而碳纤维布的单位面积平均黏结应力不断减小,从8.98 MPa一直减小到1.79 MPa(图8)。这说明随着黏结长度的增加,碳纤维布的有效利用率在下降,当超过有效黏结长度后,即使黏结长度增加,试件的极限承载力也不会提高。这是因为,在黏结剂性质一定

的情况下,胶层通过剪切变形传递荷载的能力是有限的,当施加的荷载超过这一限值时,胶层就会退出工作,碳纤维布与铝合金间的黏结失效,试件破坏。

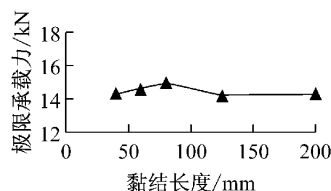


图7 碳纤维布黏结长度对极限承载力的影响

Fig.7 Ultimate loads of specimen with different CFRP bond lengths

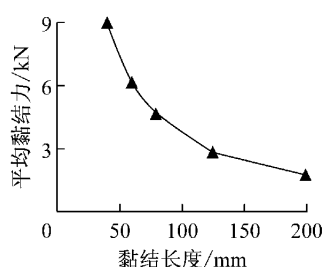


图8 碳纤维布黏结长度对平均黏结力的影响

Fig.8 Average bond stress of specimen with different CFRP bond lengths

(2) 碳纤维布黏结宽度的影响. 试件 B2, B1, B3 的碳纤维布宽度分别为 30, 40, 50 mm, 试验测得试件的平均承载力分别为 9.59, 12.73, 14.44 kN. 可以看出, 承载力随着碳纤维布黏结宽度的增加而近似于线性增加, 如图 9 所示。

(3) 碳纤维布单层厚度的影响. 试件 B1, B6 的碳纤维布单层厚度分别为 0.111, 0.167 mm, 试验测得试件的平均承载力分别为 12.73, 14.79 kN. 可以看出, 承载力随着碳纤维布黏结单层厚度的增加而增加, 但是承载力的增量和碳纤维布单层厚度的增量不是线性相关的。

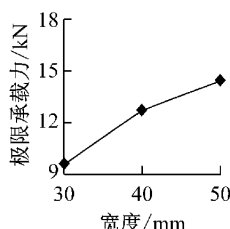


图9 碳纤维布宽度对极限承载力的影响

Fig.9 Ultimate loads of specimen with different CFRP bond widths

(4) 碳纤维布黏结层数的影响. 试件 B1, B4, B5 的碳纤维布(UT70-20, 单层厚度 0.111 mm)层数分别为 1, 2, 3 层, 试验测得试件的平均承载力分别为

12.73, 18.33, 22.49 kN; 试件 B6, B7, B8 的碳纤维布(UT70-30, 单层厚度 0.167 mm)层数分别为 1, 2, 3 层, 试验测得试件的平均承载力分别为 14.79, 21.94, 26.51 kN. 可以看出, 承载力随着碳纤维布黏结单层厚度的增加而增加, 承载力的增量和碳纤维布层数的增量近似于线性相关, 如图 10 所示。

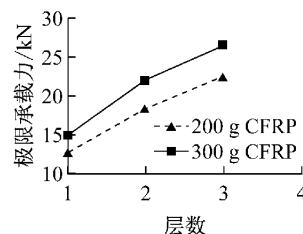


图10 碳纤维布层数对极限承载力的影响

Fig.10 Ultimate loads of specimen with different CFRP bond layers

(5) 碳纤维布黏结形式的影响. 试件 B5, B9 均粘贴 3 层碳纤维布, 但是对于试件 B9, 碳纤维布是采用逐层回退的形式粘贴的, 试验测得试件的平均承载力分别为 22.49, 16.82 kN. 可以看出, 正常粘贴碳纤维布的试件承载力高于回退粘贴的试件, 所以不建议采用回退的粘贴形式。

(6) 胶层层数的影响. 试件 B5, B7 的碳纤维布总厚度都为 0.333 mm, 但是试件 B5 粘贴的是 0.111 mm 厚的碳纤维布(3 层胶), 而试件 B7 粘贴的是 0.167 mm 的碳纤维布(2 层胶), 试验测得试件的平均承载力分别为 22.49, 21.94 kN. 可以看出, 两者相差不大, 说明本试验中胶层层数的影响很小。

2 应力应变分布规律

2.1 理论解析

Albat 等^[11]在分析胶层黏结加固连接节点时, 采用了以下 4 点假定: ①金属板、碳纤维、黏结剂均为匀质线弹性材料; ②胶层仅承受剪力, 不承受拉力; ③胶层剪应力沿厚度方向不变; ④碳纤维布及金属板纵向拉应力沿厚度方向不变。

根据上述假定, Albat 等^[11]建立了节点的一维线弹性模型, 得出加固连接的应力分布公式. 结合本试验特点, 修正后的界面剪应力 $\tau_0(x)$ 及碳纤维布拉应力 $\sigma_p(x)$ 公式为

$$\tau_0(x) = \frac{P_0}{2} \frac{\lambda}{1+2\alpha} \left(\sinh(\lambda x) - \left(\frac{2\alpha + \cosh(\lambda l_p)}{\sinh(\lambda l_p)} \right) \cosh(\lambda x) \right) \quad (1)$$

$$\sigma_p(x) = \frac{P_0}{2t_p} \frac{1}{1+2\alpha} \left(\cosh(\lambda x) - \left(\frac{2\alpha + \cosh(\lambda l_p)}{\sinh(\lambda l_p)} \right) \sinh(\lambda x) + 2\alpha \right) \quad (2)$$

式中: $\lambda = \left(\frac{1}{E_p t_p} + \frac{2}{E_n t_n} \right)^{1/2} / \left(\frac{1}{4} \frac{t_n}{G_n} + \frac{t_a}{G_a} + \frac{3}{8} \frac{t_p}{G_p} \right)^{1/2}$; $\alpha = E_p t_p / E_n t_n$; E_n, E_p, E_a 分别表示铝合金、碳纤维布、胶层的弹性模量; G_n, G_p, G_a 分别表示铝合金、碳纤维布、胶层的剪切模量; t_n, t_p, t_a 分别表示铝合金、碳纤维布、胶层的厚度。

2.2 数值模拟

本文采用通用有限元软件 ANSYS 建立数值分析模型. 由于试验试件完全对称, 取半结构建立有限元分析模型, 如图 11 所示. 有限元模型采用全实体模型, 即铝合金板件、碳纤维布及胶层均采用 3 维 8 节点实体单元 SOLID 45 来模拟. 铝合金和碳纤维的本构模型采用材性试验实测结果, 黏结剂为超弹性材料, 本文近似采用理想弹塑性本构模型, 材性参数如表 3 所示. 在试件对称截面, 即试件拼缝处, 约束 CFRP 断面上所有节点的 x, y, z 三向平动位移; 荷载以节点荷载的形式平均施加在铝合金板端头面上. 图 12 为有限元模型的拉应力分布云图. 综合考虑数值模拟的精确程度和计算成本, 在选取有限元模型网格尺寸时, 碳纤维布、胶层及粘贴碳纤维的铝合金部分的网格尺寸较小, 其他部分的网格尺寸较大, 网格从疏到密的过渡段采用自由划分的方式.

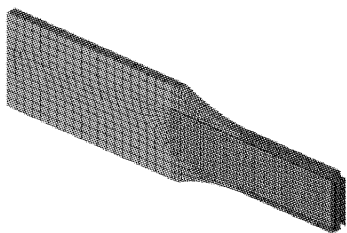


图 11 有限元模型图

Fig. 11 Finite element model

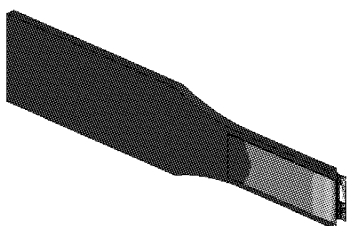


图 12 拉应力分布云图

Fig. 12 Strain distribution of FE mode

图 13 给出了试件 A3 的碳纤维布拉应力和界面剪应力的数值分析结果. 可以看出, 碳纤维布拉应力从拼缝处骤降, 然后维持在较低水平保持不变; 截

面剪应力在拼缝附近较大, 其余位置基本保持为 0.

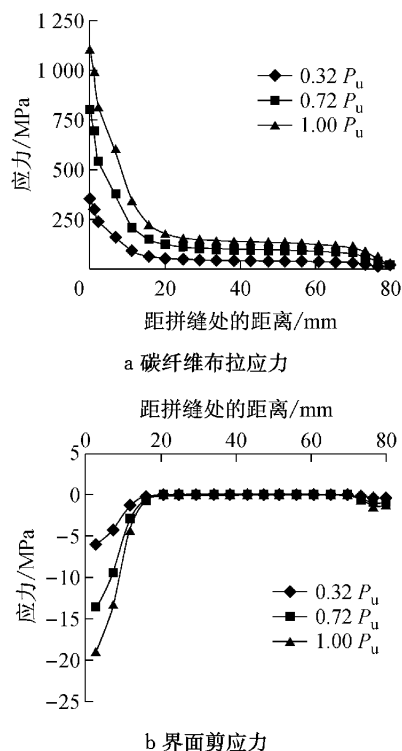


图 13 试件 A3 截面平均应力分布图

Fig. 13 Numerical simulation result of average CFRP strain distribution of specimen A3

图 14 给出了试件 B8 的铝合金截面平均拉应力的数值分析结果. 可以看出, 在未粘贴碳纤维布的区域, 铝合金应力分布较为均匀; 靠近拼缝处, 铝合金拉应力最小; 在拼缝处和碳纤维布端头区域, 拉应力渐变. 以上现象说明, 荷载传递是一个渐变过程, 荷载逐渐从铝合金板传递到碳纤维布, 碳纤维布能有效地分担一部分拉力荷载; 随着荷载的增加, 碳纤维布分担荷载的效果越来越显著.

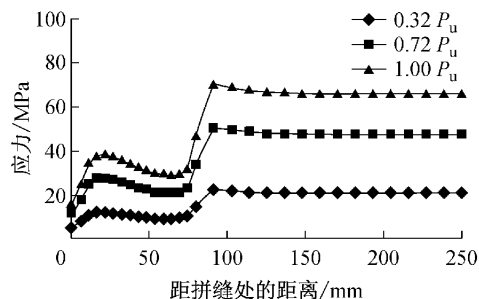


图 14 试件 B8 铝合金截面平均拉应力分布图

Fig. 14 Numerical simulation result of average aluminum alloy plant strain distribution of specimen B8

2.3 应力应变分布规律

碳纤维布拉应变的理论解析解、数值模拟结果

及试验结果的对比如图 15 所示.可以看出,三者吻合良好,碳纤维布应变分布趋势基本相同:在距离试件拼缝处附近一段范围(有效黏结长度)内,碳纤维布应变值较大,应变梯度大;超过此段范围后,碳纤维布应变值较小,并且基本保持不变.因此,可以用理论解析解和有限元结果近似表示实际的碳纤维布应力应变分布规律.但是,三者之间也存在一定差异,这是由解析解和有限元模拟解的假设条件引起的:解析解假定胶层为线弹性材料,有限元模拟解假定胶层为理想弹塑性材料.而实际上,胶层为超弹性材料.材料模型的不同造成了变形和应变值的差异.

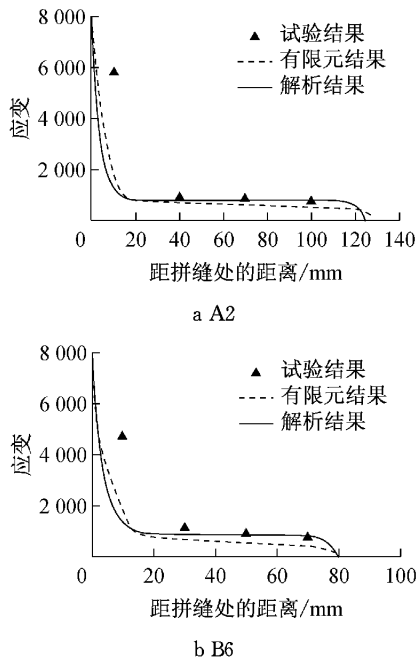


图 15 部分试件碳纤维布拉应变分布对比

Fig. 15 Comparison of CFRP strain distributions

3 极限承载力

3.1 有效黏结长度

如图 16 所示,假定碳纤维布拉应变沿厚度均匀分布, σ_A 和 σ_B 分别是A处和B处截面的正应力,且中点C的界面剪应力等于AB段剪应力的平均值.那么,利用试验实测碳纤维布应变值 ϵ_A 和 ϵ_B ,可近似计算中点C的界面平均剪应力 τ_C ,表达式为

$$\tau_C = (\epsilon_A - \epsilon_B)E_p t / \Delta l \quad (3)$$

式中: E_p 表示碳纤维布的弹性模量; t 表示碳纤维布的等效厚度; Δl 表示两测点A和B的间距.

为了较准确地得到碳纤维布加固铝合金的有效黏结长度 L_e ,作出各试件的碳纤维布-铝合金界面剪应力曲线,如图 17 所示.图中,试验结果的数据

点,表示按照式(3)计算得到的两测点中点的剪应力值,图中竖线表示有效黏结长度的位置.由图 17 可知,界面剪应力的理论解析解、数值模拟值及试验结果吻合良好:在拼缝处,界面剪应力绝对值最大;在有效黏结长度范围内,剪应力急剧减小至零;在碳纤维布端头的一段范围内,剪应力绝对值逐渐增大,但仍然小于拼缝处.三者相比,有效黏结长度范围和碳纤维布端头范围内,理论解析解应力梯度最大,试验结果计算值最小,有限元模拟值居中.这是由解析解和有限元模拟解中对胶层材料模型假定与实际胶层性质间的差异,以及式(3)对中心剪应力的近似简化引起的.

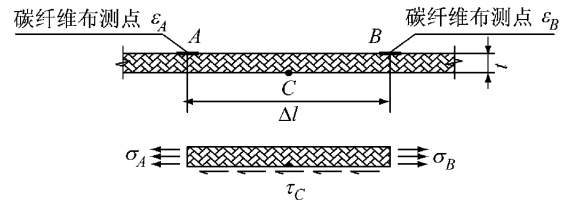


图 16 界面剪应力计算示意图

Fig. 16 Calculation diagram of shear stress

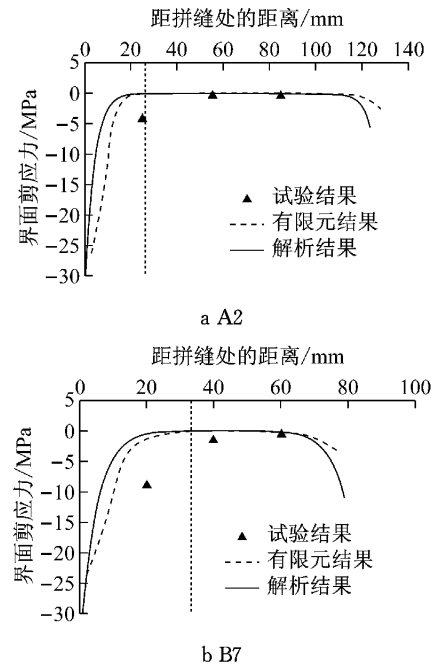


图 17 部分 A 批试件界面剪应力分布对比

Fig. 17 Comparison of interfacial stress distributions of A2 and B7

参照节点应力应变分布规律可以发现,理论解析曲线、有限元模拟解的曲线与试验曲线的吻合良好,有限元模拟曲线与试验曲线的贴合度更高.因此,以理论解析的公式为基础,参照有限元模拟结果对其进行修正,可得到加固节点的碳纤维布有效黏

结长度. 如图 17 所示, 界面剪应力在靠近拼缝的一段距离内较大, 拉力仅在这段距离内传递. 因此可定义碳纤维布有效黏结长度 L_e 为: 界面剪应力 $\tau_0(x)$ 减小到最大剪应力 $\tau_{0\max}$ 的 k 倍时所对应的长度, 根据式(1)有

$$L_e = -(\ln k)/\lambda \quad (4)$$

结合有限元模拟结果, 取 $k=0.001$, 此时界面剪应力从很大值减小到近似为 0 并保持不变, 代入式(4), 则碳纤维布加固铝合金的有效黏结长度 L_e 可表示为

$$L_e = 6.908/\lambda \quad (5)$$

其中: $\lambda = \left(\frac{1}{E_p t_{pm}} + \frac{2}{E_n t_n} \right)^{1/2} / \left(\frac{1}{4} \frac{t_n}{G_n} + \frac{t_a}{G_a} + \frac{3}{8} \frac{t_p}{G_p} \right)^{1/2}$; $t_{pm} = k_m n t_p$; n 表示碳纤维布粘贴层数; k_m 表示碳纤维布的厚度折减系数, 参考文献[1], 取 $k_m = 1 - n E_p t_p / 420\,000$, 且计算 k_m 时 t_p 单位为 mm, E_p 单位取 MPa.

3.2 极限承载力

根据本文分析结果, 在碳纤维布加固铝合金搭接节点中, 荷载主要在有效黏结长度范围内传递. 参照文献[12]对界面剪应力的处理方法(如图 18 所示), 按照曲线与坐标轴所围面积相等 $A_1 = A_2$ 的方法, 可以求出有效黏结长度 L_e 对应的等效平均剪应力 τ_{av} . 那么, 双搭接节点的极限承载力可表示为

$$P_u = 2\tau_{av} L_e b_p, \quad L \geq L_e \quad (6)$$

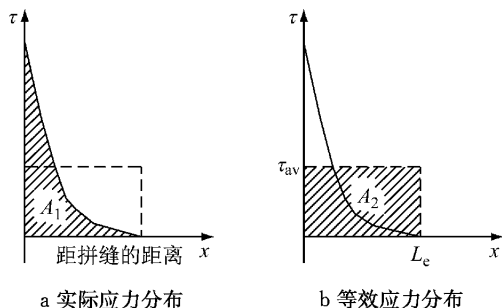


图 18 等效平均界面剪应力示意图

Fig. 18 Diagram of equivalent average interfacial shear stress

碳纤维布加固铝合金节点中, 胶层是薄弱环节, 拉力主要靠胶层的剪切变形来传递, 双搭接节点的承载力主要由胶层的抗剪能力决定. 对本文试验结果回归分析, 得到等效平均界面剪应力和胶层抗剪强度 τ_u 的关系为

$$\tau_{av} = 0.345\eta\tau_u \quad (7)$$

其中, η 为碳纤维层数调整系数. 利用数值分析结果回归可以得到: 当碳纤维层数为 1, 2, 3 时, 调整系数

η 平均值分别为 1.10, 1.21 和 1.29.

因此, 可以利用式(6)和(7)计算双搭接节点的极限承载力. 表 5 给出了节点承载力的计算值与试验值的比较. 可以看出, 计算结果与试验结果的比值范围为 0.95~1.07, 平均值为 1.001, 均方差为 0.036, 变异系数为 0.036. 因此, 承载力计算公式较为合理.

表 5 极限承载力结果对比

Tab. 5 Comparison of ultimate load results

编号	有效黏结长度 L_e/mm	平均黏结力 τ_{av}/MPa	承载力试验值 P_0/kN	极限承载力计算值 P_u/kN	计算值与试验值比值
A1	26.16	6.85	14.34	14.91	1.04
A2	26.16	6.80	14.23	14.91	1.05
A3	26.16	7.14	14.95	14.91	1.00
A4	26.16	7.00	14.64	14.91	1.02
A5	26.16	6.96	14.57	14.91	1.02
B1	21.60	7.37	12.73	12.31	0.97
B2	21.60	7.38	9.57	9.23	0.96
B3	21.60	6.69	14.44	15.39	1.07
B4	28.87	7.94	18.33	17.98	0.98
B5	33.57	8.37	22.49	22.39	1.00
B6	25.74	7.18	14.79	14.67	0.99
B7	33.60	8.16	21.94	20.93	0.95
B8	38.30	8.65	26.51	25.55	0.96

4 结论

碳纤维布加固铝合金受拉节点的主要破坏模式有整体剥离破坏、拉断破坏、层间剥离破坏 3 种. 碳纤维布加固铝合金受拉节点的应力主要在有效黏结长度范围内传递, 当黏结长度大于有效黏结长度时, 节点承载力没有明显提高. 回退的粘贴方式会降低节点承载力, 不建议采用回退的粘贴方式. 碳纤维布加固铝合金双搭接节点的有效黏结长度可按式(5)计算, 节点承载力可按式(6)计算.

参考文献:

- [1] 中国工程建设标准化协会. CECS 146—2003 碳纤维片材加固修复混凝土结构技术规程 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
China Engineering Construction Standardization Association. CECS 146—2003 Technical specification for strengthening concrete structures with carbon fiber reinforced polymer laminate [S]. Beijing: China Planning Press, 2007.
- [2] 郑云, 叶列平, 岳清瑞. FRP 加固钢结构的研究进展[J]. 工业建筑, 2005, 35(8): 20.
ZHENG Yun, YE Lieping, YUE Qingrui. Progress in research on steel structures strengthened with FRP [J]. Industrial Construction, 2005, 35(8): 20.

(下转第 435 页)