

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201808109

无机胶粘贴铝合金板与混凝土界面黏结性能试验

常虹¹,周威^{1,2,3}

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090; 3. 土木工程智能防灾减灾工业和信息化部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090)

摘要:为满足耐环境侵蚀及较高使用温度要求而采用的无机胶粘贴铝合金板加固混凝土结构,需解决铝合金板、胶与界面的黏结问题。以黏结长度为基本参数,分别采用硫铝酸盐水泥浆、磷酸镁水泥浆及碱激发矿渣浆三种无机胶粘剂,将3 mm厚铝合金板粘贴至素混凝土试块,完成了无机胶粘贴铝合金板与混凝土界面双剪性能试验。试验结果表明:铝合金板、胶层与界面黏结性能随黏结长度与胶粘剂种类不同而不同,破坏时主要表现为铝合金板脱粘、胶层失效及界面失效三种典型形态;发现相同黏结条件下,三类无机胶粘贴铝合金板与混凝土界面黏结强度中,磷酸镁水泥最大、硫铝酸盐水泥其次、碱激发矿渣最小。基于实测的界面黏结-滑移关系,获得了适用于不同胶粘剂的有效黏结长度取值方法,提出了与试验结果吻合较好的三类无机胶黏结强度-滑移关系模型。可为粘贴铝合金板加固混凝土受弯构件用无机胶粘剂优选提供参考。

关键词:铝合金板;无机胶;界面黏结性能;黏结强度;有效黏结长度

中图分类号: TU378.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2019)06-0058-06

Experiment on bond behavior of aluminum alloy plate bonded to concrete by inorganic adhesive

CHANG Hong¹, ZHOU Wei^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
2. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China;
3. Key Lab of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters (Harbin Institute of Technology), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The use of inorganic adhesive to bond aluminum alloy (AA) plate for strengthening reinforced concrete structure provides an effective solution to meet the requirement of corrosive environmental resistance and high ambient temperature, where the problem of interfacial bond of AA plate, adhesive, and concrete surface is essential to be solved. Taking adhering length as dominate parameter, the dual shear test of concrete-AA plate was conducted using three inorganic adhesives including sulfur aluminate cement, magnesium phosphate cement, and alkali activated slag for adhering two 3 mm-thick AA plate on prismatic concrete samples. Three typical failure modes (AA plate debonding, adhesive failure, and interfacial bonding failure) were observed for different bonding lengths and adhesives. It was found that under the same condition the maximum values of bonding strength between adhesive and AA plate were mainly provided by magnesium phosphate cement, followed by sulfur aluminate cement, and the last was alkali activated slag. The effective bonding length was analyzed on the basis of the data of interfacial bonding force and slip. A model of the relationship between bond strength and slip for three inorganic adhesives was proposed. This study provides reference for optimizing the inorganic adhesives applied to the flexural members strengthened by bonding AA plate.

Keywords: aluminum alloy (AA) plate; inorganic adhesive; interfacial bonding behavior; bonding strength; effective bonding length

虽然外贴 FRP 片材及钢板是当前应用广泛的外贴加固混凝土结构技术。然而,FRP 片材较低的延伸率会导致加固结构呈现一定的脆性破坏;钢材的

易腐蚀性也会使外贴钢板加固结构耐久性受限。由于具有轻质、高强、耐蚀及优良的延伸性能等特性,铝合金板材在土木工程结构领域逐步受到重视^[1]。体外粘贴铝合金板加固混凝土结构,对在沿海、海岸及侵蚀、潮湿、及较高温度等环境下的混凝土结构的维修与补强加固等具有一定优势。

体外粘贴铝合金板加固混凝土结构,其黏结界面剪应力控制着铝合金板与混凝土的协同工作能

收稿日期: 2018-08-22

基金项目: 国家自然科学基金(51778186);黑龙江省归国留学人员择优资助项目(黑人社函[2015]424号)

作者简介: 常虹(1986—),男,工程师,硕士研究生;

周威(1977—),男,教授,博士生导师

通信作者: 周威, zhouwei-hit@163.com

力. 铝合金板的强度能否充分发挥,胶粘剂性能起到决定性作用. 目前,体外粘贴加固采用的环氧树脂胶粘剂,因良好的物理力学性能、电绝缘性能、耐化学腐蚀性能及黏结性能,在混凝土结构加固研究及应用中占据主导地位. 然而,环氧类胶粘剂为有机材料,60℃开始逐渐软化,黏结性能随着温度提高逐步下降,难以保证较高使用环境温度下加固结构的受力性能. 水泥基无机胶具备与混凝土的亲合性及耐高温性等特性使其有替代环氧树脂类胶粘剂的潜力^[2-5].

目前对外贴材料与混凝土界面黏结性能主要通过单剪试验、双剪试验和梁式试验进行研究^[6-8]. 针对 FRP 材料和钢板与混凝土界面黏结-滑移性能等已经开展较多研究,取得大量成果^[9-15],然而,铝合金板与混凝土界面黏结性能研究相对较少,未形成较系统的理论. Zhu 等^[16-17]发现表面嵌入带肋铝合金板的加固构件抗弯承载力优于表面粘贴铝合金板;通过单剪试验获得了环氧树脂胶粘贴铝合金板与混凝土界面荷载-滑移关系,分析了粘贴宽度对极限荷载及滑移的影响. Abdalla 等^[18]通过单剪试验发现环氧树脂粘贴下铝合金板于混凝土界面黏结-滑移关系可近似使用 Nakaba 等^[19]及 Savioa 等^[20]提出的 FRP 模型进行分析. 国内外开展的少量铝合金板与混凝土的界面黏结性能研究均以环氧树脂作为胶粘剂,无机胶粘贴下铝合金板与混凝土界面黏结性能尚未见报道,也未有黏结-滑移关系模型.

因此,为对比优选与铝合金板黏结效果良好的水泥基无机胶粘剂,通过界面双剪试验,基于铝合金板与混凝土界面黏结性能,确定有效黏结长度和黏结强度,提出黏结应力-滑移关系模型,为采用无机胶粘贴铝合金板加固混凝土结构提供理论依据.

1 双剪试验

1.1 试验参数

聚焦硫铝酸盐水泥、碱激发矿渣、磷酸镁水泥三种水泥基无机胶粘剂,分别对应 100、130 及 160 mm 三种不同黏结长度,沿长度方向将 3 mm 厚铝合金板粘贴至混凝土棱柱体试块的两相对侧面. 采用的铝合金薄板宽度为 40 mm,混凝土棱柱体为 40 mm × 40 mm × 160 mm,试件分组及参数见表 1.

表中碱激发矿渣胶粘剂 A 组分激发剂为氢氧化钠与水玻璃按一定比例的混合溶液,B 组分激发剂仅为水玻璃.

1.2 材料性能

混凝土试块强度等级为 C40,采用的 5083 型铝合金板实测屈服强度 113 MPa、抗拉强度 222 MPa、弹性模量 27 700 MPa、断后伸长率 27%.

表 1 试件参数					
Tab. 1 Specimen parameters					
编号	胶粘剂类型	黏结长度/mm	编号	胶粘剂类型	黏结长度/mm
A100	硫铝酸盐水泥	100	N100	碱激发矿渣 (A 组分激发剂)	100
A130		130	N130		130
A160		160	N160		160
M100	磷酸镁水泥	100	S100	碱激发矿渣 (B 组分激发剂)	100
M130		130	S130		130
M160		160	S160		160

1.3 试验方案

试验目的是获得不同黏结长度下铝合金板应变分布、黏结应力及黏结强度. 通过沿铝合金板长度方向中线布置的电阻应变片获得相应位置应变发展,通过 TST3815 静态应变仪采集,应变片布置以黏结长度 130 mm 试件为例,见图 1,加载与试验装置见图 2.

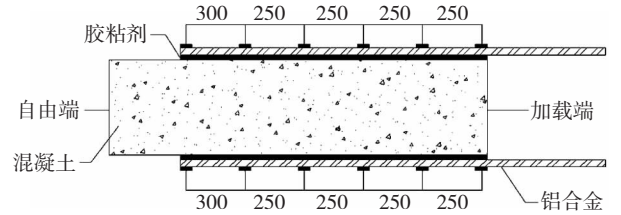


图 1 试件应变片沿铝合金板布置示意 (mm)
Fig. 1 Layout of strain gauge along the AA plate (mm)

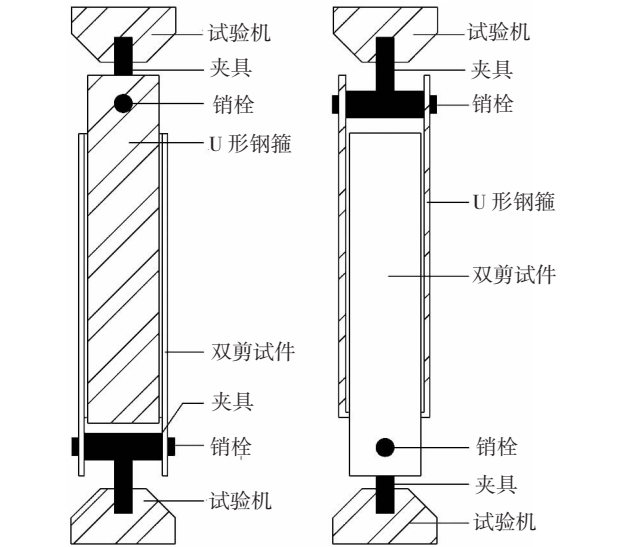


图 2 试验加载装置
Fig. 2 Test loading device

试件通过自制装置夹持在岛津万能试验机进行加载,试验以 10 N/s 的速度持续加载,直至任一侧铝合金板脱落或其他导致无法加载的破坏形式出现后停止加载.

1.4 试验现象

对于 A 系列试件,硫铝酸盐水泥从加水搅拌开始至凝结硬化时间为 4 min. 试件试验过程中无明显现象,破坏突然发生. A100 试件破坏时一侧铝合金

板与胶层完全剥离,另一侧混凝土与胶层完全剥离,属界面失效破坏;A130 及 A160 试件破坏时一侧铝合金板与胶层完全剥离,另一侧部分胶层与混凝土剥离层附着于铝合金板表面,属胶层失效破坏. A 系列破坏模式见图 3.

对于 M 系列试件,磷酸镁水泥从加水搅拌开始至凝结硬化时间为 10 min. M 系列试件破坏时均是铝合金板与胶层完全剥离,胶层完整附着在混凝土表面,胶层表面平整无缺陷. M 系列破坏模式见图 4.



图 3 A 系列试件试验破坏模式

Fig.3 Failure mode of series A specimen



图 4 M 系列试件试验破坏模式

Fig.4 Failure mode of series M specimen

对于 N 系列试件,浆体由开始搅拌至凝结硬化时间为 4 min,当浆体与铝合金板接触时结合部位发出轻微声响,铝合金板与胶层黏结边缘伴随气体溢出. N 系列试件破坏时均为铝合金板与胶层完全剥离,破坏后铝合金板与胶层界面有一层黄白色物质,胶层表面有大量气孔. N 系列破坏模式见图 5.



图 5 N 系列试件试验破坏模式

Fig.5 Failure mode of series N specimen

对于 S 系列试件,粘贴过程中无异常现象,凝结

硬化时间为 10 min. 破坏时 S100 及 S130 试件两侧铝合金板均与胶层完全剥离;S160 试件一侧铝合金板与胶层完全剥离,另一侧铝合金板与胶层剥离后附着少量胶粘剂,属胶层失效破坏;各试件破坏后胶层表面均分布着宽度为 0.5 ~ 2 mm 的不规则干缩裂缝. S 系列破坏模式见图 3,各系列试件的破坏参数见表 2.



图 6 S 系列试件试验破坏模式

Fig.6 Failure mode of series S specimen

表 2 试件破坏参数

Tab.2 Failure parameters of specimens

编号	黏结强度/MPa	破坏模式	编号	黏结强度/MPa	破坏模式
A100	28.42	界面失效	N100	4.39	铝合金板脱粘
A130	30.24	胶层失效	N130	5.04	铝合金板脱粘
A160	24.26	胶层失效	N160	8.69	铝合金板脱粘
M100	37.35	铝合金板脱粘	S100	1.96	铝合金板脱粘
M130	35.25	铝合金板脱粘	S130	2.79	铝合金板脱粘
M160	34.80	铝合金板脱粘	S160	1.01	胶层失效

由表 2 可知,各组试件黏结强度并未随着黏结长度的增加而增加. A 系列试件硫铝酸盐水泥黏结强度较其他胶粘剂表现良好,但其浆体凝结时间短、胶层与混凝土界面剥离较多,其与混凝土界面亲和性较其他胶粘剂差. N 系列试件碱激发矿渣浆体凝结硬化时间较短,与混凝土亲和性表现良好,但因其与铝合金表面发生化学反应生成的氢气导致胶层表面出现气孔,削弱了有效黏结面积,致使黏结强度较低. S 系列试件碱激发矿渣与混凝土亲和性表现良好,其硬化过程中产生的大量干缩裂缝削弱了有效黏结面积,直接影响了铝合金板粘贴效果而导致其界面黏结强度远低于其他胶粘剂试件. M 试件磷酸镁水泥抗剪强度、浆体拌制凝结硬化时间、水化过程无收缩及其与混凝土表面亲和性表现均优于其他胶粘剂,相比其他胶粘剂最适合作为铝合金板加固混凝土结构用无机胶.

2 结果与分析

2.1 荷载 - 应变关系

各试件铝合金板荷载 - 应变关系见图 7,由于 B 组分激发剂矿渣胶粘剂黏结强度明显低于其他三种胶粘剂,故不对 S 系列试件进行进一步研究.

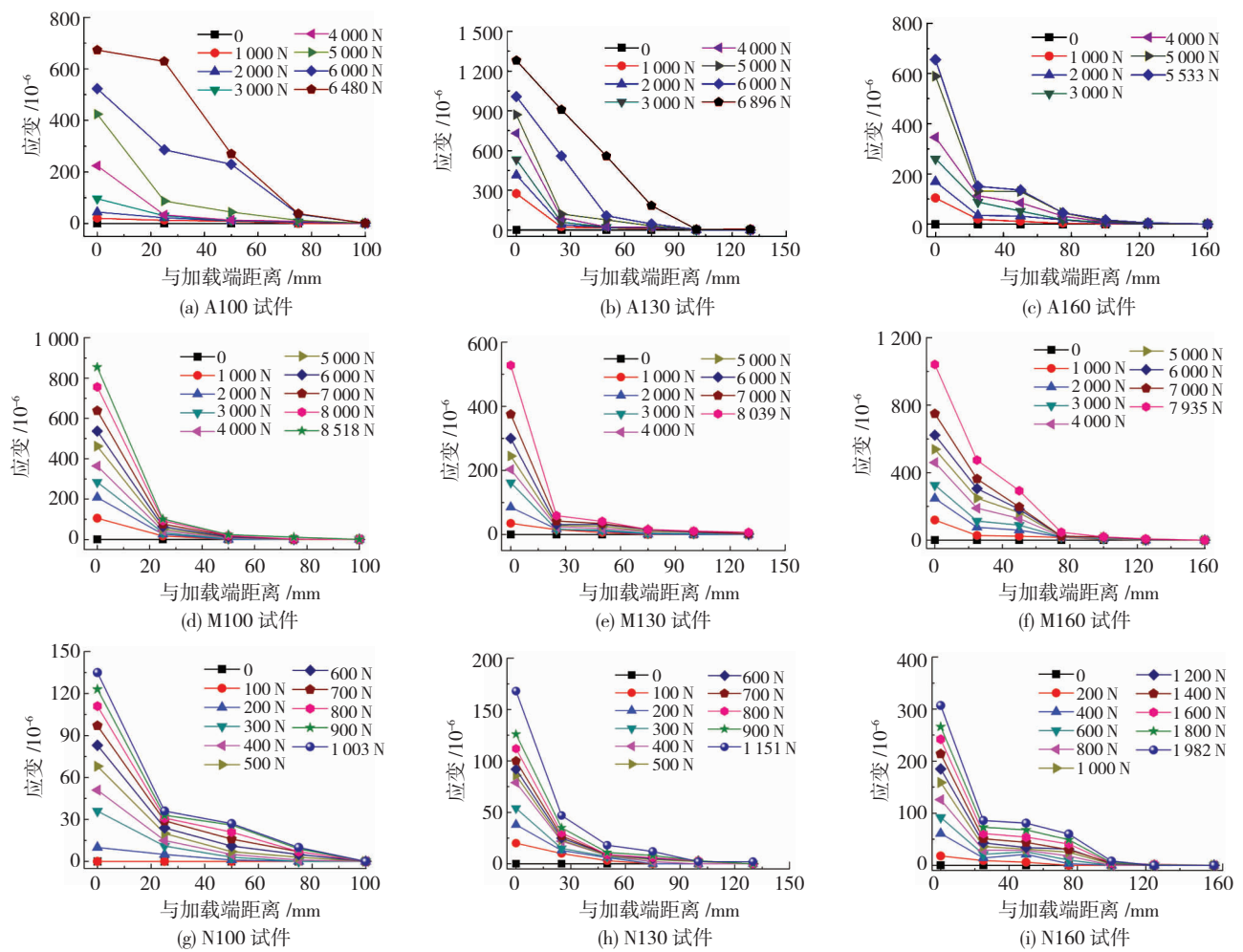


图 7 各级荷载下试件应变分布

Fig. 7 Strain distribution for specimens under different loads

由图 7 可知,对应于各类胶粘剂及三种黏结长度,铝合金板应变发展具有相似性:在加载初期,靠近加载端附近的铝合金板应变有明显增长,而随着离加载端越远,铝合金板应变越小,且逐渐趋向于 0,该阶段铝合金板的传力区域较小;随着荷载的增加,铝合金板的应变和传力区域不断增长;当荷载增加到一定值后,各试件铝合金板的应变变化区域基于保持不变,而仅传力区域内铝合金板应变随荷载增大而增大,直至铝合金板剥离或界面破坏。在整个加载过程中,自由端附近铝合金板的应变近似为 0。由此可知,铝合金板黏结长度超过一个有效长度后,黏结强度将不再受黏结长度影响。

考虑到包括胶粘剂厚度的不均匀性、铝合金板表面划痕处理的不一致性等施工偏差,以及加载装置的偶然偏心及试件安装偏差等试验误差,将测点所在一侧铝合金板极限拉应变作为判断标志,将铝合金应变不大于 5% 极限拉应变的测点作为应变未有效发展测点,即铝合金应变可有效发展的长度确定为有效黏结长度。由此,依据试验实际应变分布,可得各试件有效黏结长度见表 3。

对比表 3 中各试件黏结强度值可知,试件黏结长度超过有效黏结长度后黏结长度与黏结强度未表现出正比或其他规律性关系,证明了超过有效黏结长度后,黏结应力不再受黏结长度影响。

表 3 各试件有效黏结长度

Tab. 3 Effective bonding length of each specimen

编号	有效黏结长度/mm	编号	有效黏结长度/mm	编号	有效黏结长度/mm
A100	100	M100	75	N100	100
A130	100	M130	75	N130	100
A160	100	M160	75	N160	100

2.2 黏结-滑移关系曲线

试验加载过程中,铝合金板和混凝土应变的不协调使得铝合金板和混凝土界面产生了黏结应力。各应变片间的黏结应力为

$$\tau_i = E_a t_a \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}}{\Delta x_i}, \tag{1}$$

式中: τ_i 为 i 和 $i-1$ 点间的平均黏结应力; ε_i 为第 i 点处的应变值; Δx_i 为 i 和 $i-1$ 点间的间距; t_a 为铝合金板厚度; E_a 为铝合金板弹性模量。

第 i 个应变片位置处的滑移量 s_i 为

$$s_i = \frac{\Delta x}{2} \left(\varepsilon_0 + 2 \sum_{j=1}^{i-1} \varepsilon_j + \varepsilon_i \right).$$

(2)

根据式(1)、(2),可得界面黏结应力及滑移量.

由于无机胶粘贴下的铝合金板-混凝土界面剥离属于脆性破坏,只有靠近加载端的高应力区域能够得到完整的黏结-滑移曲线.考虑到试件粘贴作业不可避免的操作误差,如胶层厚度的不均匀导致的同一试件两侧黏结作用的差异,以及铝合金板与混凝土棱柱体长边会有微小夹角导致铝合金板偏心受拉等,同一试件两侧的铝合金板应变难以同步,这也为试验结果所证实.事实上,试件破坏均是一侧铝合金板剥离瞬时,试件受偏心荷载作用而使另一侧铝合金板随即剥离,即试件铝合金板应变发展较充分的一侧铝合金板黏结界面表现更接近实际受力状态且与实际破坏相一致,因此,选取各试件铝合金板应变发展较充分侧的黏结-滑移关系进行分析.由于实测曲线较为分散,故通过相对黏结应力和相对滑移对实测曲线进行变

换后得到的相对黏结-滑移关系进行研究.

2.3 黏结-滑移本构关系

2.3.1 A 系列试件

由 A 系列硫铝酸盐水泥黏结试件实测数据可知其曲线由上升段和下降段组成,上升段数值接近,其中 A100 及 A130 试件分别有下降段,A160 试件无下降段,对硫铝酸盐水泥粘贴下铝合金板与混凝土界面黏结-滑移本构关系采用双线性模型^[9]进行模拟,其表达式为

$$\frac{\tau}{\tau_u} = \frac{s}{s_0}, \frac{s}{s_0} \leq 1; \frac{\tau}{\tau_u} = 1 - \frac{\frac{s}{s_0} - 1}{\frac{s_u}{s_0} - 1}, \frac{s}{s_0} > 1. \quad (3)$$

式中: τ_u 为界面最大黏结应力值, s_0 为最大黏结应力对应时刻的滑移值, s_u 为最大滑移量, τ_u 、 s_0 、 s_u 为本构模型三个控制参数.拟合曲线与试验值关系见图 8,相关系数 $R^2=0.9037$,A 系列试件控制参数实测值见表 4.

表 4 试件控制参数表

Tab. 4 Control parameters of specimens

编号	τ_u/MPa	s_0/mm	s_u/mm	编号	τ_u/MPa	s_0/mm	编号	τ_u/MPa	s_0/mm
A100	1.123 3	0.008 9	0.028 9	M100	2.510 0	0.014 1	N100	0.330 0	0.003 5
A130	2.433 4	0.016 4	0.056 9	M130	1.563 3	0.009 9	N130	0.403 3	0.004 1
A160	1.680 0	0.017 0	0.017 0	M160	1.350 0	0.034 0	N160	0.736 7	0.009 7

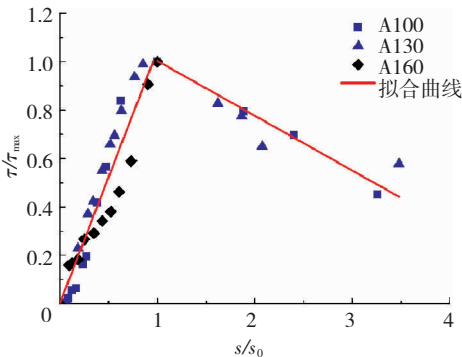


图 8 A 系列试件拟合曲线与试验值关系

Fig. 8 The relation between fitting curve and test value of series A specimen

2.3.2 M 系列试件

M 系列试件相对黏结应力与相对滑移呈现线性关系,对二者拟合后表达式近似为

$$\frac{\tau}{\tau_u} = \frac{s}{s_0}.$$

(4)

M 系列试件按式(4)拟合曲线与试验值关系见图 9,相关系数 $R^2=0.982$,试件控制参数值见表 4.

2.3.3 N 系列试件

N 系列试件相对黏结-滑移关系曲线拟合表达式同式(4),拟合曲线与试验值关系见图 10,相关系数 $R^2=0.983\ 2$,试件控制参数值见表 4.

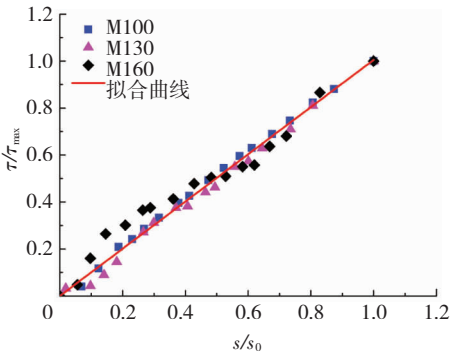


图 9 M 系列试件拟合曲线与试验值关系

Fig. 9 The relation between fitting curve and test value of series M specimen

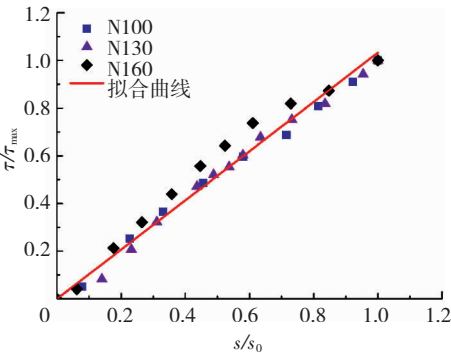


图 10 N 系列试件拟合曲线与试验值关系

Fig. 10 The relation between fitting curve and test value of series N specimen

大量已有研究成果显示,环氧树脂胶粘剂粘贴下的钢板及FRP片材与混凝土界面黏结-滑移曲线大多为近似封闭曲线,完整展示了界面受力破坏全过程。而本试验选用三种无机胶黏结-滑移曲线较上述曲线差异较大,多表现为黏结应力达到峰值后即破坏,体现了水泥基的无机胶较环氧树脂的脆性。

3 结 论

1)完成了三种水泥基无机胶粘剂粘贴铝合金-混凝土双面剪切试验,考察了不同黏结长度对界面极限黏结性能的影响。试验结果表明三种无机胶的界面黏结强度:磷酸镁水泥最大,硫铝酸盐水泥其次,碱激发矿渣最小。

2)随着胶粘剂种类不同、黏结长度不同,铝合金板与混凝土界面发生铝合金板脱粘、胶层失效及界面失效三种典型破坏模式;基于铝合金板应变分布,提出了各胶粘剂粘贴铝合金板平均有效黏结长度,其中磷酸镁水泥有效黏结长度最小,其余两种无机胶有效黏结长度相近。

3)基于各系列胶粘剂粘贴铝合金板界面相对黏结-滑移关系曲线,提出了各胶粘剂粘贴铝合金板与混凝土界面黏结-滑移本构关系模型,模型与试验曲线吻合度较高。

参考文献

[1] 沈祖炎,郭小农,李元齐. 铝合金结构研究现状简述[J]. 建筑结构学报,2007,28(6):106
SHEN Zuyan, GUO Xiaonong, LI Yuanqi. State-of-the-arts of research on aluminum alloy structures[J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6):106. DOI:10.3321/j.issn:1000-6869.2007.06.013

[2] 张爱莲. 新型无机胶加固钢筋混凝土梁板的应用[J]. 低温建筑技术,2015(5):95
ZHANG Ailian. Application of new inorganic adhesive to strengthen reinforced concrete beam plate[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2015(5):95. DOI:10.13905/j.cnki.dwjz.2015.05.033

[3] 陈伟宏. 用无机胶粘贴碳纤维布加固混凝土梁受力性能试验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011:123
CHEN Weihong. Experimental study on behavior of concrete beam strengthened with CFRP sheets bonded with inorganic matrix[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011:123

[4] 唐明,丛晓红. 硫铝酸盐水泥基结构加固胶的研究[J]. 混凝土,2007(7):53
TANG Ming, CONG Xiaohong. Study on the sulphoaluminate cement-based structural adhesive[J]. Concrete, 2007(7):53. DOI:10.3969/j.issn.1002-3550.2007.07.017

[5] 郑文忠,陈伟宏,徐威,等. 用碱激发矿渣耐高温无机胶在混凝土表面粘贴碳纤维布试验研究[J]. 建筑结构学报,2009(4):138
ZHENG Wenzhong, CHEN Weihong, XU Wei, et al. Experimental research on alkali-activated slag high temperature resistant inorganic adhesive pasting CFRP sheets on surface of concrete[J]. Journal of Building Structures, 2009(4):138. DOI:10.14006/j.jzjgxb.2009.04.001

[6] YAO J, TENG J G, CHEN J F, et al. Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints[J]. Composites Part B: Engineering,

2005, 36:111

[7] 曹双寅,潘建伍,陈建飞. 外贴纤维与混凝土结合面的黏结-滑移关系[J]. 建筑结构学报,2006,27(1):99
CAO Shuangyin, PAN Jianwu, CHEN Jianfei, et al. Bond and slip relationship at the interface of bonded FRP and concrete[J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(1):99. DOI:10.3321/j.issn:1000-6869.2006.01.015

[8] GUO Z G, CAO S Y, SUN W M, et al. Experimental Study on bond stress-slip behavior between sheet and concrete [C]//Proceedings of International Symposium on Bond Behavior of FRP in Structures. Hong Kong: International Institute for FRP in Construction, 2005:77

[9] 韩强. CFRP-混凝土界面黏结滑移机理研究[D]. 广州:华南理工大学,2010:96
HAN Qiang. Study on the bond-slip mechanism of CFRP-concrete interface[D]. South China University of Technology, 2010:96

[10] 童谷生,涂远鑫. CFRP-混凝土界面剥离破坏的试验研究[J]. 混凝土,2017(6):13
TONG Gusheng, TU Yuanxin. Experimental study on debonding failure of CFRP-concrete interface[J]. Concrete, 2017(6):13. DOI:10.3969/j.issn.1002-3550.2017.06.004

[11] 艾博雯. CFRP(混凝土界面特性)试验研究[D]. 上海:华东交通大学,2016:2
AI Bowen. Experimental study on interface characteristics between CERP and concrete [D]. Shanghai: East China Jiaotong University, 2016:2

[12] 陆新征,叶列平,滕锦光,等. FRP-混凝土界面黏结滑移本构模型[J]. 建筑结构学报,2005,26(4):10
LU Xinzhen, YE Lieping, TENG Jinguang. Bond-slip model for FRP-to-concrete interface [J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(4):10. DOI:14006/j.jzjgxb.2005.04.002

[13] 谢超. CFRP(混凝土界面黏结滑移本构关系及影响因素)研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2014:74
XIE Chao. Study on the interface bond slip constitutive relationship and influencing factors of CFRP-concrete[D]. Changsha: Changsha University of Science &Technology, 2014:74

[14] 鲍安红. 粘贴加固混凝土梁的剥离研究[D]. 重庆:重庆大学,2005:2
BAO Anhong. The study for the desquamation of affixed reinforced RC beam[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005:2

[15] 齐云. 粘钢加固混凝土梁的粘应力研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2006:69
QI Yun. Study on the interfacial stresses of the strengthened RC beams bonded with steel plates[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006:69

[16] ZHU Jihua, WEI Liangliang, WU Wenting. Experimental study of concrete strengthened by stiffened aluminum plate [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 584/585/586:1000. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.584-586.997

[17] ZHU Jihua, WEI Liangliang, ZHU Miaochange. Experimental study of bond behavior on aluminum alloy plate-to-concrete interface[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 501/502/503/504:809. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.501-504.805

[18] ABDALLA J A, HRAIB F H, HAWILEH R A, et al. Experimental investigation of bond-slip behavior of aluminum plates adhesively bonded to concrete [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2016, 31(1):95. DOI:10.1080/01694243.2016.1204741

[19] NAKABA K, KANAKUBO T, FURUTA T. Bond behavior between fiber-reinforced polymer laminates and concrete[J]. ACI Structural Journal, 2001, 98:364. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.501-504.1053

[20] SAVOIA M, FERRACUTI B. Nonlinear bond-slip law for FRP-concrete interface[C]//Kiang Hwee Tan. Fibre-reinforced Polymer Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-6). Singapore: World Scientific Publishing, 2003:165