

DOI:CNKI:61-1390/S.20111025.1728.001

网络出版时间:2011-10-25 17:28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20111025.1728.001.html>

CFRP 与落叶松和杉木木材有效粘结长度的研究

杨小军, 孙友富, 王 正

(南京林业大学 木材工业学院, 江苏 南京 210037)

【摘 要】 【目的】掌握影响碳纤维布(Carbon fibre reinforced polymer/plastic, CFRP)与落叶松和杉木有效粘结长度的木材因素, 为 CFRP 在木结构加固工程中的安全应用提供参考。【方法】采用单剪与半桥电测试验方法, 研究了树种及木材含水率、纹理方向、材面状态对 CFRP 与木材之间有效粘结长度的影响。【结果】CFRP 与木材间存在有效粘结长度, 当 CFRP 与木材间的粘结长度超过该有效粘结长度时, CFRP 与木材间的极限粘结承载能力将不再增加; 不同树种间有效粘结长度存在差异, 在含水率为 15% 的条件下, CFRP 与落叶松木材的有效粘结长度为 97~110 mm, 与杉木木材的有效粘结长度为 111~123 mm; 材面状态对 CFRP 与木材间的有效粘结长度影响较大, 刨切材面结合牢靠, 峰值荷载较大; 木材试验含水率及材面纹理等对 CFRP 与木材间的有效粘结长度几乎无影响。【结论】在应用 CFRP 前, 应将木材表面刨切平整; CFRP 可应用于杉木及落叶松构件的加固工程。

【关键词】 碳纤维布; 有效粘结长度; 速生材; 单剪试验; 半桥电测法

【中图分类号】 TS62

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2011)12-0101-06

Study on the effective bond length between CFRP sheets and fast-growing wood (*Larix olgensis*, *Cunninghamia lanceolata*)

YANG Xiao-jun, SUN You-fu, WANG Zheng

(College of Wood Science and Technology, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: 【Objective】 The study is to know wooden factors that affect effective bond length between CFRP sheets and Fast-growing wood (*Larix olgensis*, *Cunninghamia lanceolata*) so as to provide reference for safe application of CFRP in wood structure engineering. 【Method】 With an experimental method of single shear and half-bridge electrical test, aspects of species, wood moisture content, wood texture and wood face status have been studied. They have impacts on the effective bond length between CFRP and wood. 【Result】 The results shows that: the effective bond length between CFRP and wood exists. When the bond length between CFRP and wood is larger than the one mentioned above, ultimate load capacity of connecting between CFRP and wood stops growth. The effective bond length varies in different wood species. When the moisture content is 15%, the effective bond length between CFRP and *Larix olgensis* is 97—110 mm, *Cunninghamia lanceolata* 111—123 mm. The face status of wood has a great influence on the effective bond length between CFRP and wood. Samples of sliced surface have a firm strength. The moisture content of wood and texture shows little influence on the effective bond length between CFRP and wood. 【Conclusion】 Before the application of CFRP, wood surface should be sliced smoothly. CFRP can be applied in fast-

* [收稿日期] 2011-05-05

[基金项目] 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)

[作者简介] 杨小军(1978—), 男, 江苏兴化人, 讲师, 在职博士, 主要从事木材加工及木结构建筑工程理论与技术研究。

E-mail: yxj5460@yahoo.com.cn

[通信作者] 孙友富(1957—), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士生导师, 主要从事木材加工及木结构建筑工程理论与技术研究。

E-mail: sun@ailin.com.cn

growing wood members and reinforcement of their connecting nodes.

Key words: Carbon fibre reinforced polymer sheet; effective bond length; fast-growing wood; single shear test; half-bridge electrical method

碳纤维布(Carbon fibre reinforced polymer/plastic, CFRP)是碳纤维增强复合材料,具有质量轻、强度高、耐腐蚀、易剪裁及良好的抗疲劳和耐久性等特点,已被广泛应用于混凝土结构的加固中^[1-4]。自 20 世纪 90 年代以来,国内外学者开始研究将碳纤维布的高强性能应用于古木建筑及现代木结构的加固、增强与修缮中,通过其与木材的粘结复合来改善木材构件强度低、变形量大、易开裂等不足^[5]。试验研究和工程实践结果表明,CFRP 与木材之间的有效粘结,是保证 CFRP 与木材共同工作的关键^[6-7]。有资料表明,CFRP 与混凝土之间的粘结存在有效粘结长度,即表贴碳纤维布与混凝土之间存在一个重要特征,当粘结长度超过一定值后,极限粘结强度将不再随粘结长度的增加而持续增高,此定值即为有效粘结长度^[8-10]。当 CFRP 的粘结长度小于该长度值时,极限粘结强度将随着粘结长度的增加而增强。

目前,有关 CFRP 与木材之间有效粘结长度的研究尚比较少,尤其未能考虑木材材质、纹理、含水率等因素,而木材特性却是影响胶合效果的一个重要因素。因此,本研究通过剪切及半桥电测试验,探讨速生树种落叶松和杉木及其木材含水率、纹理方向、材面状态对 CFRP 与木材间粘结剪切性能和有效粘结长度的影响,以期 CFRP 在木结构加固工程中的安全应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 材料 1)速生材。选用产自东北的落叶松(*Larix olgensis*)锯材和产自江西的杉木(*Cunninghamia lanceolata*)锯材,木材有部分活节,纹理通直,为一等材,规格均为 100 mm×40 mm×4 000 mm。落叶松材的基本物理力学性能为:气干密度 0.632 g/cm³,顺纹抗压强度 56.5 MPa,抗弯强度 89 MPa,抗弯弹性模量 14.1 GPa,径面、弦面顺纹抗剪强度分别为 8.1 和 6.5 MPa。杉木材的基本物理力学性能为:气干密度 0.357 g/cm³,顺纹抗压强度 35.9 MPa,抗弯强度 65.2 MPa,抗弯弹性模量 9.1 GPa,径面、弦面顺纹抗剪强度分别为 5.8 和 7.1 MPa。

2)CFRP。为聚丙烯腈基碳纤维布,单向织物,理论厚度 0.111 mm,受拉弹性模量为 2.4×10^5 MPa,面密度 206 g/m²,抗拉强度 3 450 MPa,极限拉伸应变为 1%。

3)胶黏剂。为双组分环氧类,混合后初黏度(23℃)为 5 000 mPa·s,其混合体积比为 2:1。胶体的主要力学性能为:抗拉强度 50 MPa,弹性模量 2.0 GPa,延伸率 2.2%,由南京某公司提供。

1.1.2 试验用仪器设备 主要有 HPJY16-B 静态电阻应变仪、万能力学试验机、恒温恒湿试验箱、电阻应变片(外型 4 mm×2 mm,阻值 120 Ω,灵敏系数 2.1)等。

1.2 试验方法

1.2.1 复合材试件的制作 挑选无缺陷锯材,按设计方案精加工成长 200 mm、宽 50 mm、厚 20 mm 的试块。确定好粘结区域,在距试块端头 10 mm 处表面不涂胶,以减少胶合层受剪初期木材端头可能出现的崩裂现象。CFRP 的粘结宽度为 20 mm(约 5 束纤维),粘结长度为 140 mm。为确保粘结区域大小,在基材涂胶部位周围用聚氯乙烯薄膜进行包裹。将 2 块试块对接后在粘结区域涂布混合好的环氧树脂,涂胶量约 250 g/m²,顺纹方向铺放 CFRP 并用刮刀赶跑胶合部位空气,使 CFRP 紧贴于基材材面,48 h 后粘贴应变片,待树脂充分固化后开始试验,在试验机上装夹试件使试件粘结面处于平面受剪状态,并以 10 mm/min 的速度匀速加载直至试件拉断为止。试件尺寸及加载方式如图 1 所示。

1.2.2 应变片的粘贴方法 在试件的粘结长度范围内等间距(15 mm)粘贴应变片,应变片沿纤维布居中布置。在纤维布与木材的非粘结区域,粘贴一个应变片来测量非粘结区域纤维布的应变情况。

1.2.3 试件的基本状态 试件状态详见表 1,其含水率为 8%或 15%,材面纹理为径切面、弦切面,材面状态为锯切面、刨切面。

1.2.4 试件各测点应变值的测定 半桥电测法的基本原理是用电阻应变片测定复合材表面的线应变,再根据应变-应力关系确定复合材表面应力状态的一种应力分析方法。该方法具有测量精度高、传感元件小、测量范围广和可多点测量等优点^[11]。具体方法是将电阻应变片粘贴在待测试件表面,并在

待测试件外部另用温度补偿块以减少因温度引起的误差。当试件表面变形时,电阻应变片的电阻值将发生相应的变化,然后通过电阻应变仪将此电阻转

换成电压(或电流)信号,由此测得各复合材表面测点的应变。

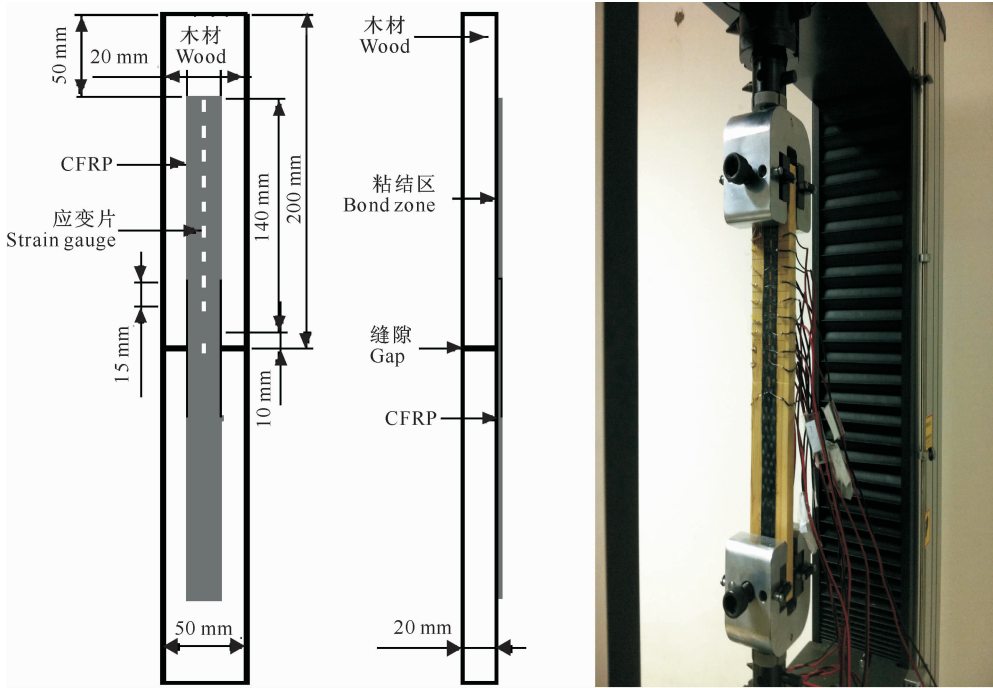


图 1 试件尺寸及加载示意图

Fig.1 Chart of samples' size and loading method

表 1 试件的基本状态

Table 1 Initial state of samples

试件编号 Sample name	树种 Wood species	材面纹理 Face texture	含水率/% Moisture content	材面状态 Face status
L-J-G-J	落叶松 <i>L. olgensis</i>	径切面 Radial section	15	锯切面 Sawn surface
L-J-G-B	落叶松 <i>L. olgensis</i>	径切面 Radial section	15	刨切面 Sliced surface
L-J-D-B	落叶松 <i>L. olgensis</i>	径切面 Radial section	8	刨切面 Sliced surface
L-X-G-B	落叶松 <i>L. olgensis</i>	弦切面 Tangential section	15	刨切面 Sliced surface
S-X-G-B	杉木 <i>C. lanceolata</i>	弦切面 Tangential section	15	刨切面 Sliced surface
S-J-G-B	杉木 <i>C. lanceolata</i>	径切面 Radial section	15	刨切面 Sliced surface
S-X-G-J	杉木 <i>C. lanceolata</i>	弦切面 Tangential section	15	锯切面 Sawn surface

1.2.5 有效粘结长度的测量 在试验峰值荷载条件下,取最大粘结应力值的 3%作为粘结应力的有效传递,即将实际测得的试验峰值荷载对应的 CFRP 峰值的轴向应变,与 CFRP 发生 3%峰值应变之间的距离作为有效粘结长度^[12-14]。试验操作时,采集不同荷载作用下粘贴在 CFRP 上的应变片的应变数据,之后采用内插法计算 CFRP 的有效粘结长度。

2 结果与分析

2.1 加载过程中试件的变化

在试件加载过程中发现,CFRP 与木材的局部产生滑移,同时伴随有较大的“吱吱”剥离声,荷载增

加到一定程度后不再继续增大,此时 CFRP 与木材的剥离迅速发展,最后随着“砰”的一声巨响,CFRP 与木材完全剥离,试件破坏。试件破坏形式均为 CFRP 与木材的剥离破坏,即剥离发生在木材表层,说明试件的施工方法合理,树脂的渗透性好,树脂粘结较充分,试件的破坏情况如图 2 所示。

2.2 粘结面的应变分布特点

以 L-J-G-B 试件为例,在荷载增加时,试件 CFRP 上各位置的应变沿粘结长度方向的分布情况如图 3 所示。图 3 显示,在加载过程中,CFRP 上的应变主要存在于加载端附近,远离加载端区域的应变始终很小;当荷载逐渐增加时,CFRP 上各位置的应变也逐渐增大。

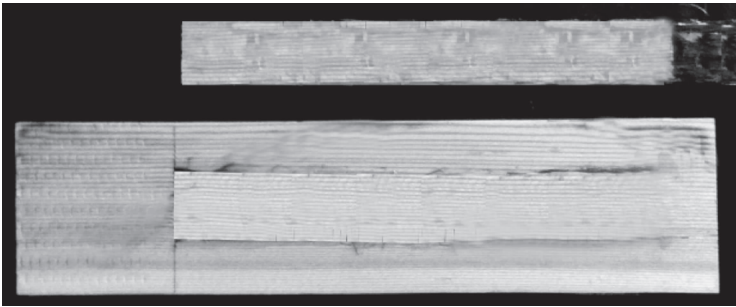


图 2 L-J-G-J 试件的最终破坏情况
Fig. 2 Final failure of the L-J-G-J sample

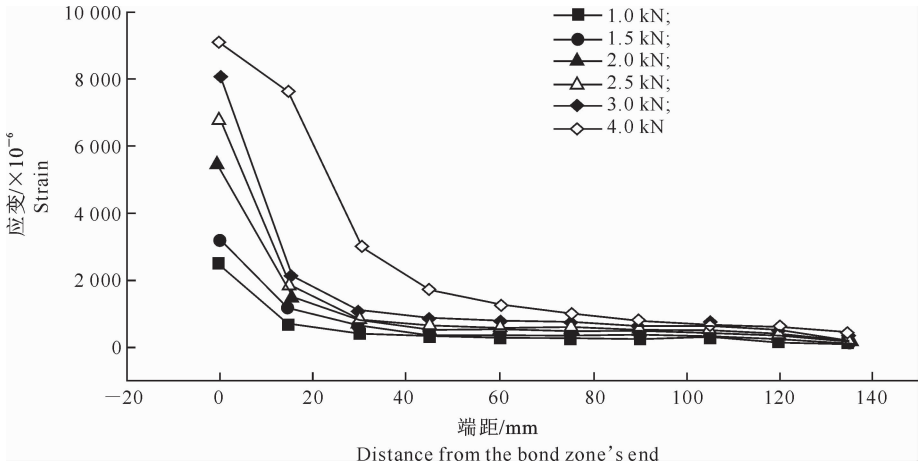


图 3 加载过程中 L-J-G-B 试件应变沿粘结长度的分布

Fig. 3 Strain distribution along the bond length of the L-J-G-B sample in the process of loading

当粘结层所受应力在弹性极限范围内时,应力与应变之间存在线性对应关系,即粘结应力的大小和分布可通过各测点的应变值来判断。由类似于图 3 L-J-G-B 试件各测点的应变值可以看出,各试件在达到极限荷载之前,剪切粘结应力主要出现在靠近加载端 90~130 mm 以内的区域;随着距加载点距离的增加,粘结应力逐渐降低,离加载点 130 mm 后,粘结应力基本为 0;另外,图 3 中 4 kN 应变曲线

在距受载点 15 mm 处应变较大,并接近非粘结区(即端距为 0 mm 位置处)的应变,表明随着荷载的增加,试件粘结应力峰值的位置向远离加载点方向略有移动。

2.3 木材状态对有效粘结长度的影响

通过测量并利用内插法计算各试件的有效粘结长度,结果如表 2 所示。

表 2 各试件的有效粘结长度

Table 2 Measured value of samples' effective bond length

试件编号 Sample name	峰值荷载/kN Maximum load	最大应变/ $\times 10^{-6}$ Maximum strain	有效粘结长度/mm Effective bond length
L-J-G-J	3.36	7 920	109.4
L-J-G-B	4.21	9 102	103.5
L-J-D-B	4.38	9 400	102.2
L-X-G-B	4.32	9 205	97.8
S-X-G-B	3.03	5 909	111.7
S-J-G-B	3.14	6 158	117.2
S-X-G-J	2.81	5 800	122.6

2.3.1 木材材质 由表 2 可以看出,落叶松木材的有效粘结长度明显小于杉木,在木材含水率为 15% 的条件下,CFRP 与落叶松木林的有效粘结长度为

97~110 mm,与杉木木材的有效粘结长度为 111~123 mm。有效粘结长度在 2 个树种间存在差异,这可能是由于落叶松木材密度较高,其力学性能优于

杉木,在粘结良好的情况下,木材自身强度高则有效粘结长度小,有效粘结长度小表示较短的粘结长度即可达到粘结强度峰值。表 2 还显示,峰值荷载及最大应变在 2 个树种间也存在较大差异。

2.3.2 含水率 比较含水率不同试件(L-J-G-B 与 L-J-D-B)的研究结果可以看出,含水率对有效粘结长度的影响很小。含水率为 8% 及 15% 皆处于木材纤维的饱和点以内,木材强度差异不明显,因而含水率对胶合质量无明显影响。由本试验结果可知,2 种含水率试件均表现出了相同的应力分布规律(图略),在距加载点 110 mm 以上时二者的应力几乎没有变化。因此,在含水率较低的情况下,可忽略水分对 CFRP 与木材间有效粘结长度的影响。

2.3.3 材面纹理 试验发现,落叶松木材径切面 CFRP 的有效粘结长度大于弦切面,而杉木相反尚存在一定的不确定性,且差值较小,表明材面的径、弦向不是影响有效粘结长度的主要因素。以图 4 中的 2 个试件为例,在试验过程中,2 种材面纹理不同试件的荷载与位移关系呈现出相同的规律,即粘结荷载随剪切位移增加而线性递增,达极限荷载后保持稳定直至突然剥离破坏。图 4 中的 2 条曲线在粘结荷载达极限值后趋于平缓,是因为 2 个试件的 CFRP 实际粘结长度超出了其有效粘结长度,因而延缓了试件粘结面的破坏。

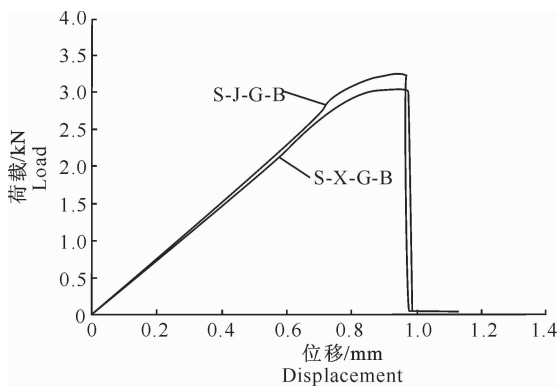


图 4 试件 S-J-G-B 和 S-X-G-B 荷载与位移的关系
Fig. 4 Load displacement curve of the S-J-G-B and S-X-G-B samples

2.3.4 材面状态 试验表明,试件 L-J-G-J 与 L-J-G-B 及 S-J-G-B 与 S-X-G-J 相比,落叶松和杉木木材均表现出锯切面的有效粘结长度明显大于刨切面,而其峰值荷载和最大应变相应均明显小于刨切面。这可能是因为材面状态影响了胶合质量,锯切面表面存在污物或细小木纤维,同时未经刨切的木块,胶合时往往不易密合,甚至会出现局部脱胶现象;而刨

切面平整光滑,胶液更易渗入木材的细胞壁内,压贴 CFRP 后胶层薄而均匀。因此在粘结 CFRP 前,宜将材面刨切平整。

3 结论与建议

1)CFRP 与落叶松及杉木木材间存在有效粘结长度,当粘结长度超过该有效粘结长度时,CFRP 与木材间的极限粘结承载能力将不再增加,可延缓粘结面的破坏。

2)不同树种木材与 CFRP 间的有效粘结长度存在一定差异。在木材含水率为 15% 的条件下,CFRP 与落叶松木材的有效粘结长度为 97~110 mm,与杉木木材的有效粘结长度为 111~123 mm。

3)材面状态对有效粘结长度影响较大,刨切材面结合牢靠,峰值荷载较大,建议在应用 CFRP 前,应将木材表面刨切平整;木材试验含水率(8% 及 15%)及材面径、弦向纹理等对 CFRP 的有效粘结长度影响不明显。本试验中,CFRP 粘结牢固且试验峰值荷载较大,说明 CFRP 可应用于杉木及落叶松构件的加固工程。

4)今后将进一步试验分析不同取材部位木材与 CFRP 的有效粘结长度的关系,同时研究粘结方向对有效粘结长度的影响。

[参考文献]

[1] 陆新征,叶列平,滕锦光. FRP 混凝土界面粘结滑移本构模型[J]. 建筑结构学报,2005(4):10-18.
Lu X Z, Ye L P, Teng J G. Bond slip model for FRP-to-concrete interface [J]. Journal of Building Structures, 2005(4): 10-18. (in Chinese)
[2] 滕锦光,陈建飞. FRP 加固混凝土结构[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.
Teng J G, Chen J F. FRP strengthened RC structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese)
[3] Teng J G, Cao S Y, Lan L. Behavior of RC cantilever slabs bonded with GFRP strips [J]. Construction and Building Materials, 2001, 15(6): 339-349.
[4] 李世宏,徐永红,李宝华. 碳纤维布增强杨木 LVL 梁、柱试验研究[J]. 江苏建筑,2007(6):13-17.
Li S H, Xu Y H, Li B H. Experimental study on Poplar LVL beam and column reinforced with CFRP sheets [J]. Jiangsu Construction, 2007(6): 13-17. (in Chinese)
[5] Triantafillou T C, Deskovic N. Prestressed FRP sheets as external reinforcement of wood members [J]. Journal of Structural Engineering ASCE, 1992, 118(5): 1270-1284.
[6] Rahimi H, Hutchinson A. Concrete beams strengthened with externally bonded FRP plates [J]. Journal of Composites for

Construction, ASCE, 2001, 5(1): 44-56.

[7] Chajes M J, Finch J W W, Januszka T F, et al. Bond and force transfer of composite material plates bonded to concrete [J]. ACI Structural Journal, 1996, 93(2): 209-217.

[8] Bizindavyi L, Neale K W. Transfer lengths and bond strengths for composites bonded to concrete [J]. Journal of Composites for Construction, 1999, 11: 153-160.

[9] Lu X Z, Teng J G, Ye L P. Bond slip models for FRP sheets/plates externally bonded to concrete [J]. Engineering Structures, 2005, 27(6): 938-950.

[10] Khalifa A T, Al Khrdajit, Nanni A. Anchorage of surface mounted FRP reinforcement [J]. Concrete International: Design and Construction, 1999, 21(10): 49-54.

[11] 柳昌庆. 实验方法与测试技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1985.

Liu C Q. Experiment method and test techlonogy [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1985. (in Chinese)

[12] 方恩权, 刘桂凤, 张雷顺. CFRP-混凝土界面粘结性能试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2007(1): 32-36.

Fang E Q, Liu G F, Zhang L S. Experimental research on the bond performance of CFRP-Concrete interface [J]. Journal of Building Materials, 2007(1): 32-36. (in Chinese)

[13] 庄荣忠, 杨勇新. BFRP 与木材的有效粘结长度的试验 [J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2010(1): 74-77.

Zhuang R Z, Yang Y X. Experiment on the effective bond length between BFRP sheet and wood [J]. Journal of Huaqiao University: Natural Science Edition, 2010(1): 74-77. (in Chinese)

[14] 王占桥, 高丹盈. 碳纤维片材与混凝土有效粘结长度的试验研究 [J]. 四川建筑科学研究, 2009(1): 36-39.

Wang Z Q, Gao D Y. Experimental investigation on the critical bond length between carbon fiber reinforced polymer and concrete [J]. Sichuan Building Science, 2009(1): 36-39. (in Chinese)

(上接第 100 页)

[7] 白降丽, 彭道黎, 庾晓红, 等. 森林景观生态研究现状与展望 [J]. 生态学杂志, 2005, 24(8): 943-947.

Bai J L, Peng D L, Yu X H, et al. Research advances in forest landscape ecology [J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(8): 943-947. (in Chinese)

[8] 张 爽, 刘雪华, 靳 强, 等. 秦岭中段南坡景观格局与大熊猫栖息地的关系 [J]. 生态学报, 2004, 24(9): 1950-1957.

Zhang S, Liu X H, Jin Q, et al. The relationship between landscape pattern and the habitat of giant pandas on the southern slope of the middle Qinling Mountains [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(9): 1950-1957. (in Chinese)

[9] 王 斌, 刘 华, 张硕新, 等. 秦岭火地塘林区景观格局破碎度分析 [J]. 中国农学通报, 2005, 21(10): 111-113.

Wang B, Liu H, Zhang S X, et al. Study on landscape fragmentation of Qinling Huoditang forest region [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(10): 111-113. (in Chinese)

[10] 王 斌, 张硕新, 杨校生. 人为干扰对秦岭火地塘林区景观格局的影响 [J]. 林业科学研究, 2010, 23(4): 544-553.

Wang B, Zhang S X, Yang X S. Dynamics of landscape pattern at Huoditang forest region [J]. Forest Research, 2010, 23(4): 544-553. (in Chinese)

[11] 赵安玖, 胡庭兴, 赖长鸿, 等. 区域森林景观破碎化对比分析 [J]. 四川农业大学学报, 2006, 24(2): 187-193.

Zhao A J, Hu T X, Lai C H, et al. Comparative study on fragmentation of forest landscapes in different regions [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2006, 24(2): 187-193. (in Chinese)

[12] 李秀珍, 布仁仓, 常 禹, 等. 景观格局指标对不同景观格局的反应 [J]. 生态学报, 2004, 24(1): 123-134.

Li X Z, Bu R C, Chang Y, et al. The response of landscape metrics against pattern scenarios [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(1): 123-134. (in Chinese)

[13] 孙 娟, 蓝崇钰, 夏汉平, 等. 基于 QuickBird 卫星影像的贵港市城市景观格局分析 [J]. 生态学杂志, 2006, 25(1): 50-54.

Sun J, Lan C Y, Xia H P, et al. Analysis on landscape pattern of Guigang City based on QuickBird imagery [J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(1): 50-54. (in Chinese)

[14] 杨国靖, 肖笃宁. 中祁连山浅山区山地森林景观空间格局分析 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(2): 269-272.

Yang G J, Xiao D N. Spatial pattern analysis of forest landscape in low coteau of Middle Qilian Mountains [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(2): 269-272. (in Chinese)

[15] 高 宾, 李小明, 陈 玮, 等. 锦州湾沿海经济开发区景观格局动态变化 [J]. 生态学杂志, 2010, 29(11): 2216-2222.

Gao B, Li X Y, Chen W, et al. Dynamic changes of landscape pattern in coastal economic development zone in Jinzhou bay [J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(11): 2216-2222. (in Chinese)