

文章编号:1674-2869(2008)04-0015-05

预应力碳纤维布加固梁最佳预应力水平的确定

庄芸

(武汉工程大学环境与城市建设学院,湖北 武汉 430074)

摘要:无论是抗裂、减小正常使用状态下的裂缝宽度和挠度、延缓钢筋屈服还是提高构件极限承载力,预应力碳纤维加固梁的性能均优于非预应力碳纤维加固梁,而预应力水平的取值直接影响加固构件的力学性能。在国内外已有的预应力碳纤维布加固一次、二次受力梁试验研究的基础上,对最佳预应力水平的取值进行理论分析,建议碳纤维布最佳的预应力水平在 $60\% \epsilon_{cf}$ 左右。

关键词:预应力水平;预应力 CFRP 布;加固;C 程序;数值模拟

中图分类号:TU 375.1 **文献标识码:**A

0 引言

预应力加固梁由于碳纤维布在加载前已经受拉,其强度在构件的使用阶段就得到了充分的发挥。根据许多学者的试验研究,预应力水平的高低直接影响加固构件的力学性能^[1~9]。

(1)预应力碳纤维布加固的受弯构件,开裂荷载、屈服荷载、极限荷载与抗弯刚度随预应力水平的提高而提高。其中对极限荷载的提高是通过提高破坏时碳纤维布的极限拉应变(允许拉应变)的值而实现的。

(2)随预应力水平的提高,裂缝数量增多、间距变小、宽度减小,使得构件在使用阶段及最终破坏时裂缝和挠度都有明显改善。

(3)预应力水平的不同对加固梁的延性有较大的影响。设计时,应适当控制预应力水平,使预应力 CFRP 构件具有良好的变形能力。

同时,实际加固工程中,由于很难做到完全卸载,因而加固后的原结构属于二次受力结构。本文在国内外已有的预应力碳纤维布加固一次、二次受力梁试验研究的基础上^[1~9],对最佳预应力水平的取值进行理论分析,这项研究成果应用于加固实践将会有很好的经济效益和社会效益。

1 破坏形态的分析

根据许多学者的试验研究,预应力碳纤维布对一次、二次受力钢筋混凝土梁进行受弯加固时的破坏形态可划分为以下几种类型^[1~9]。

(1)受拉钢筋先屈服,然后碳纤维布达到其允许拉应变 $[\epsilon_{cf}]$,最后受压区混凝土压坏。

(2)受拉钢筋先屈服,然后受压区混凝土压碎,此时碳纤维布未达到其允许拉应变 $[\epsilon_{cf}]$;

(3)碳纤维布先达到其允许拉应变 $[\epsilon_{cf}]$,此时钢筋未屈服,混凝土未压坏。

(4)钢筋未屈服,碳纤维布未达到其允许拉应变 $[\epsilon_{cf}]$,混凝土先压坏。

(5)在达到正截面极限承载力之前,碳纤维布与混凝土发生剥离破坏。

第(5)种破坏为脆性破坏,一般通过构造或锚固措施及施工工艺予以避免。第(4)种破坏可通过控制加固量的上限来避免发生。根据《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》第4.3.5.1款,为防止受拉钢筋达到屈服前受压区混凝土先压坏的超筋破坏,规定“受压区高度不宜大于 $0.8\xi_b h_0$ ”,即可控制不发生第(4)种破坏形态。第(3)种破坏是由于预应力水平过高造成的,应使预应力水平控制在一定值之下。第(1)和第(2)种破坏均为延性破坏,对受弯加固,应按此两种破坏形态进行设计计算。但第(2)种碳纤维布仍未充分利用,可能由于碳纤维布加固量过大或者预应力不够,所以在进行加固计算时应以第(1)种破坏为目标状态。

2 受弯构件加固前存在初始应变 ϵ_i 时最佳的预应力水平的确定

从上述1、2分析可以得出预应力水平对屈服荷载、极限荷载、裂缝发展、构件刚度及延性均有较大影响,因此,宜从破坏形态、延性与抗震的角度出发,分析预应力水平的影响,决定预应力的最佳范围。

收稿日期:2007-10-17

作者简介:庄芸(1969-),女,湖北武汉人,讲师,硕士,研究方向:结构工程。

2.1 从破坏形态确定预应力水平

当以第(1)种破坏为目标状态时,碳纤维布应在钢筋屈服之后,受压区混凝土压碎前达到允许拉应变 $[\epsilon_{cf}]$ (允许拉应变 $[\epsilon_{cf}]$ 随预应力水平的提高可提高取值,允许拉应变 $[\epsilon_{cf}]$ 的取值既要考虑碳纤维布强度的实际能达到的利用率,也要考虑构件的延性的要求。),如仅相对钢筋拉应变而言,碳纤维布必须在钢筋拉应变大于 $\epsilon_y = \frac{f_{yk}}{E_s} = \frac{335}{2.0 \times 10^5} = 1.675 \mu\epsilon$,小于 $[\epsilon_{su}] = 0.01 = 10\,000 \mu\epsilon$ 的范围内达到允许拉应变 $[\epsilon_{cf}]$ 。如相对混凝土压应变而言,碳纤维布必须在混凝土压应变大于 ϵ_{c0} (钢筋屈服时混凝土的压应变),小于 $\epsilon_{cu} = 0.003\,3$ 的范围内达到允许拉应变 $[\epsilon_{cf}]$ 。则对预应力水平的确定可作如下讨论。

2.1.1 有效预应力水平(ϵ_{pecf})的上限值 碳纤维布的有效预应力水平 ϵ_{pecf} (预应力损失以后的碳纤维布有效拉应变值)不能过高,碳纤维布应在钢筋屈服之后达到允许拉应变 $[\epsilon_{cf}]$,即碳纤维布的有效预应力水平有一上限值。此上限值是由钢筋屈服的同时,碳纤维布的应变达到允许拉应变 $[\epsilon_{cf}]$ 这一极限状态确定的。此时碳纤维布的预应力水平将会较大,混凝土的有效预压力也将比较大,可将混凝土看作为理想弹性体,按材料力学公式计算混凝土的预应力。

受弯构件加固后,继续增加荷载,由弯矩增量 ΔM 产生混凝土受拉边缘的应变增量 $\Delta\epsilon_{cl}$ 、碳纤维布的应变增量 $\Delta\epsilon_{cf}$ 和钢筋的应变 $\Delta\epsilon_s$,由平截面假定可认为 $\Delta\epsilon_{cl} \approx \Delta\epsilon_{cf} \approx \Delta\epsilon_s$,则混凝土受拉边缘的总应变为 $\epsilon_{cl} = \epsilon_i - \epsilon_{pc} + \Delta\epsilon_{cl} \approx \epsilon_s$,其中 $\sigma_{pc} = \frac{N_{pe}}{A_0} + \frac{N_{pe}e_0y_c}{I_0}$,而碳纤维布的总的应变 $\epsilon_{cf} = \epsilon_{pecf} + \Delta\epsilon_{cf}$,则 $\epsilon_{cl} = \epsilon_i + \epsilon_{cf} - \epsilon_{pecf} - \epsilon_{pc} \approx \epsilon_s$ 。可以预测二次受力梁由于加固前存在初始应变 ϵ_i ,将比同条件下一次受力梁存在应变超前现象,由此将带来二次受力梁在使用阶段的挠度、裂缝的开展会比同条件下一次受力梁大。并且是随着初始弯矩的增大,这种趋势更加明显。

因为 $\epsilon_{cl} = \epsilon_i + \epsilon_{cf} - \epsilon_{pecf} - \epsilon_{pc} \approx \epsilon_s$

当构件破坏时 $\epsilon_y \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{su}$

及 $\epsilon_y \leq \epsilon_i + [\epsilon_{cf}] - \epsilon_{pc} - \epsilon_{pecf} \leq \epsilon_{su}$

预应力损失后的碳纤维布的有效拉力为:

$$N_{pc} = \sigma_{pecf} A_{cf}$$

梁下边缘混凝土所受的预压应力为:

$$\sigma_{pc} = \frac{N_{pc}}{A_0} + \frac{N_{pc}e_0y_c}{I_0}$$

故梁底混凝土边缘的压应变为 $\epsilon_{pc} = \frac{\sigma_{pc}}{E_c}$

$$\text{即: } \epsilon_{pc} = \frac{\epsilon_{pecf} E_{cf} A_{cf}}{E_c A_0} + \frac{\epsilon_{pecf} E_{cf} A_{cf} e_0 y_c}{E_c I_0} < 10^{-2} \epsilon_{pc},$$

将此项忽略,

$$\text{即: } \epsilon_y \leq \epsilon_i + [\epsilon_{cf}] - \epsilon_{pecf} \leq \epsilon_{su}$$

$$[\epsilon_{cf}] + \epsilon_i - \epsilon_{su} \leq \epsilon_{pecf} \leq [\epsilon_{cf}] + \epsilon_i - \epsilon_y$$

如取 $f_y = 300 \text{ N/mm}^2$, $E_s = 2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,

$$\text{则: } \epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{300}{2.0 \times 10^5} = 1\,500 \mu\epsilon,$$

$$\epsilon_{su} = 0.01 = 10\,000 \mu\epsilon$$

$$\text{而: } [\epsilon_{cf}] = \min\{k_m \epsilon_{cfu}, \frac{2\epsilon_{cfu}}{3}, 0.01\} = 10\,000 \mu\epsilon$$

(式中符号含义及取值^[10])

所以,由 $[\epsilon_{cf}] + \epsilon_i - \epsilon_{su} \leq \epsilon_{pecf} \leq [\epsilon_{cf}] + \epsilon_i - \epsilon_y$ 得:

$$\epsilon_i \leq \epsilon_{pecf} \leq \epsilon_i + 8\,325$$

例如加固梁均为矩形简支梁,一次成形,截面尺寸为:150 mm×300 mm,跨度为3.2 m,净跨3.0 m。架立筋②采用 HPB235 热轧钢筋:2 ϕ 12;弯剪区段箍筋③为 HPB235 热轧钢筋 ϕ 10@100;主筋③采用 HRB335 热轧钢筋:2 ϕ 20。保护层厚度为25 mm。混凝土强度等级为 C25。加固梁参数及有效预应力水平的上限值如表1所示。其中 M_u 为未加固情况下的极限弯矩值。

表1 加固梁参数表

Table 1 Parameter table of test beam

证件 编号	初始弯矩 $M_i/\text{kN} \cdot \text{m}$	初始应变 $\epsilon_i(10^{-6})$	$\beta - M_i/M_u$	碳纤维布数 量/300 g	上限值 $\epsilon_{pecf}(10^{-6})$
L1	0	0	0	125×2 400	8 325
L2	20	694.4	0.426	125×2 400	9 019
L3	28	1 279.4	0.597	125×2 400	9 604
L4	35	1 393.0	0.716	125×2 400	9 718

2.2.2 有效预应力水平(ϵ_{pecf})的下限值 碳纤维布的有效预应力水平不能过低,否则,会因为变形过大导致剥离破坏或混凝土在碳纤维布达到允许拉应变 $[\epsilon_{cf}]$ 之前先压碎,使预应力加固起不到应有的效果,碳纤维布的高强性能也不能充分被利用。

界限破坏:受拉钢筋先屈服,然后碳纤维布达到其允许拉应变 $[\epsilon_{cf}]$,同时受压区混凝土压坏,由这一状态可确定有效预应力水平的下限值。此时,截面的应力应变关系如图1所示:

由图1中的应变几何关系可得:

$$\frac{\epsilon_{cu}}{[\epsilon_{cf}] - \epsilon_{cf1}} = \frac{x_b/0.8}{h - x_b/0.8} \rightarrow x_b = \frac{0.8\epsilon_{cu}h}{\epsilon_{cu} + [\epsilon_{cf}] - \epsilon_{cf1}} \quad (a)$$

$$\frac{\epsilon'_s}{\epsilon_{cu}} = \frac{x_{cb} - a'_s}{x_{cb}} \rightarrow \epsilon'_s = \left(\frac{x_{cb} - a'_s}{x_{cb}} \right) \epsilon_{cu} = \left(\frac{x_b/0.8 - a'_s}{x_b/0.8} \right) \epsilon_{cu} \quad (b)$$

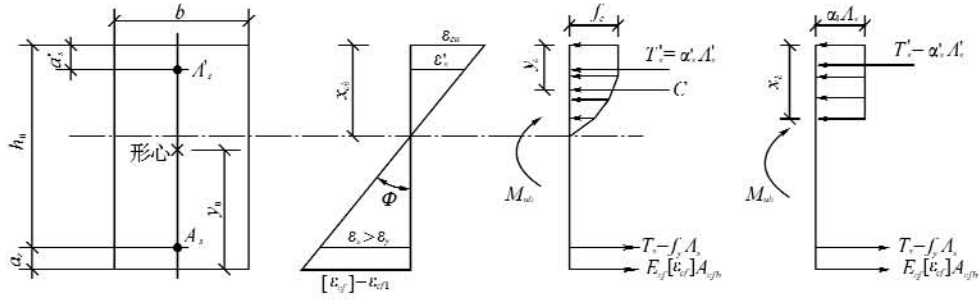


图1 界限破坏时的应力应变分布及截面力的平衡

Fig. 1 Stress strain distribution and balance of cross section force when boundary was destructed

由力的平衡关系:

$$\alpha_1 f_c b x_b + E_s \epsilon'_s A'_s = f_y A_s + E_{cf} [\epsilon_{cf}] A_{cfb} \quad (c)$$

将(a)、(b)代入(c)式,得:

$$A_{cfb} = \frac{\alpha_1 f_c b x_b + E_s \epsilon'_s A'_s - f_y A_s}{E_{cf} [\epsilon_{cf}]}$$

当实际 CFRP 布的加固量 $A_{cf} > A_{cfb}$ 时,发生破坏形式(2)。

此式为截面发生界限破坏时 A_{cfb} 与 $(\epsilon_{cf1})\epsilon_{pcf}$ 的关系式,由此式及可求出当发生破坏形式(1),并且碳纤维面积已知时,有效预应力水平的下限值;或当有效预应力水平为已知,且发生破坏形式(1)时,最大允许的加固量。由弯矩平衡:

$$M_{ub} = f_y A_s (h_0 - \frac{x_b}{2}) + E_{cf} [\epsilon_{cf}] A_{cfb} (h - \frac{x_b}{2}) + E_s \epsilon'_s A'_s (\frac{x_b}{2} - a'_s) \quad (d)$$

当荷载产生的 $M > M_{ub}$ 时,应采取的方法是提高预应力水平,而不是单纯的提高加固量。

本文主要是采用条带划分法,将混凝土的截面分成有限条带,并假定每一条带上的应力均匀分布,为保证碳纤维布能在混凝土压碎前达到允许拉应变 $[\epsilon_{cf}]$,加固梁有效预应力度的下限值的计算采用迭代法,并通过 C 语言编程实现下述迭代过程:

$$A_{cfb} = \frac{\alpha_1 f_c b x_b + E_s \epsilon'_s A'_s - f_y A_s}{E_{cf} [\epsilon_{cf}]} \quad (e)$$

$$x_b = \frac{A_{cfb} \times E_{cf} [\epsilon_{cf}] - E_s \epsilon'_s A'_s + f_y A_s}{\alpha_1 f_c b} \quad (f)$$

$$x_b = \frac{0.8 \epsilon_{cu} h}{\epsilon_{cu} + [\epsilon_{cf}] - \epsilon_{cf1}}$$

$$\epsilon_{cf1} = \epsilon_{cu} + [\epsilon_{cf}] - \frac{0.8 \epsilon_{cu} h}{x_b} \quad (f)$$

迭代过程为:

(1)由式(e)求出 x_b ;

(2)由式(f)求出 ϵ_{cf1}

(3)取曲率 $\phi = \phi - \Delta\phi$;

(4)由式(g)求出截面上任意纤维 k 处的混凝土的应变 ϵ_{ck} 、钢筋的应变 $(\epsilon_s, \epsilon'_s)$ 、和由平衡条件算得的碳纤维的应变 ϵ_{cf0} ;

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{ck} &= \phi y_k \\ \epsilon_s &= \phi (h_0 - x_c) \\ s'_s &= \phi (x_c - a'_s) \\ \epsilon_{cf0} &= \phi (h - x_c) \end{aligned} \right\} \quad (g)$$

(5)根据混凝土和钢筋的应力—应变关系,由式(h)分别求出 k 处混凝土的应力 σ_{ck} 、钢筋的应力 (σ_s, σ'_s) ;

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ck} &= f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_{ck}}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \\ &= f_c \left[1 - \left(1 - \frac{\epsilon_{ck}}{0.002} \right)^2 \right] (\epsilon_{ck} \leq 0.002) \\ \sigma_{ck} &= f_c \quad (0.002 \leq \epsilon_{ck} \leq 0.0033) \\ \sigma_s &= E_s \epsilon_s \\ \sigma'_s &= E_s \epsilon'_s \end{aligned} \right\} \quad (h)$$

(6)计算有效预应力度值: $\epsilon_{pcf} = \epsilon_{cf1} + \epsilon_{cf0}$;

(7)计算 $N_l = E_{cf} \epsilon_{pcf} A_{cf}$, $M_l = M_i - N y_0$;

(8)将上述应力代入公式(i)、(j),检验平衡条件(满足规定的精度要求);

$$N = \int_0^{x_c} \sigma_{ck} b(y) dy + A'_s \sigma'_s - A_s \sigma_s \quad (i)$$

$$M = \int_0^{x_c} \sigma_{ck} b(y) (h - y_0 - x_c + y_k) dy + A_s \sigma_s (y_0 - a_s) + A'_s \sigma'_s (h - y_0 - a'_s) \quad (j)$$

(9)如不满足,重新假定 ϕ ,重复(1)~(9);

(10)满足平衡条件后,由满足平衡条件求应于 ϕ 的 $\phi, \epsilon_{cf0}, \epsilon_{pcf}$;

(11)END.

根据 C 语言迭代结果,表 1 中加固梁的有效预应力水平的下限值如表 2 所示。

表2 加固梁有效预应力水平下限值

Table 2 Lower limit value for effective prestressing level of strengthening beam

证件编号	初始弯矩 $M_i / \text{kN} \cdot \text{m}$	初始应变 $\epsilon_i (10^{-6})$	下限值 $\epsilon_{pcf} (10^{-6})$
L1	0	0	5 135
L2	20	694.4	6 197
L3	28	1 279.4	6 538
L4	35	1 393	6 838

根据上述 1、2 点分析,在只考虑破坏形态的情况下,有效预应力水平的取值范围为 $(45\% \sim 75\%) \epsilon_{cfu}$,取值范围会随受弯构件加固前存在的初始应变 ϵ_i 的大小而改变。

2.2 从延性角度确定预应力水平

受弯构件的延性是指从屈服开始至达到最大承载力或达到以后而承载力还没有显著下降期间的变形能力。通常用截面曲率延性系数 $\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y}$ 来表示。一般认为混凝土抗震结构要求的延性比为 $\beta = 3 \sim 4$ 。

根据许多学者的试验资料,当有效预应力水平的取值范围为 $(25\% \sim 55\%) \epsilon_{cfu}$ 时,加固构件具有良好的延性。

2.3 预应力水平的确定

根据加固梁的破坏形态分析,碳纤维布有效预应力水平的取值范围为 $(45\% \sim 75\%) \epsilon_{cfu}$,取值范围会随受弯构件加固前存在初始应变 ϵ_i 的大小而有所改变。但为使构件同时具有良好的延性,建议碳纤维布有效预应力水平的取值范围为 $(45\% \sim 55\%) \epsilon_{cfu}$ 。如果将预应力损失考虑进去,碳纤维布最佳的预应力水平在 $60\% \epsilon_{cfu}$ 左右。具体取值应考虑受弯构件加固前存在初始应变 ϵ_i 的大小及张拉系统实际的预应力损失的大小。

2.4 试验梁 L1~L4 的实测数据分析

本次试验使用的是日本东丽公司的 UT70-30 型碳纤维布。试验结果:L1~L4 的有效预应力水平 ϵ_{pecl} 在 7 000 左右(碳纤维的应力沿宽度和长度分布不均匀),破坏形态为:受拉钢筋先屈服,然后碳纤维布达到其允许拉应变 $[\epsilon_{cf}]$ (约为 12 000~13 000 $\mu\epsilon$,高于非预应力碳布 10 000 $\mu\epsilon$),拉断后,最后受压区混凝土压坏^[9]。L2 的破坏情况如图 2 所示。



图 2 L2 的破坏实况

Fig. 2 Practical destruction of L2

3 结 语

为了充分发挥 CFRP 高强等优势,预先给 CFRP 布施加预应力后再进行粘贴,可以明显提高梁的开裂荷载、屈服荷载,减小梁在使用阶段的变形和梁内主筋的应力,更加有效地抑制裂缝的发展。而预应力水平的取值直接影响加固构件的力学性能,本文在国内外已有的预应力碳纤维布加固一次、二次受力梁试验研究的基础上,从破坏形态、延性与抗震的角度出发,对最佳预应力水平的取值进行理论分析,建议碳纤维布最佳的预应力水平在 $60\% \epsilon_{cfu}$ 左右。

参考文献:

- [1] Lu Z, Boothby T E, Nannies C E, et al. Transfer and Development Lengths of FRP Prestressing Tendons[J]. PCI Journal, 2000, 45(2): 84-95.
- [2] 尚守平,彭 晖,童 桦,等. 预应力碳纤维布材加固混凝土受弯构件的抗弯性能研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(5): 24-30.
- [3] 飞 渭,江世永,彭飞飞,等. 预应力碳纤维布加固混凝土受弯构件试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2003, 29(2): 56-60.
- [4] 飞 渭,江世永,彭飞飞,等. 预应力碳纤维布加固混凝土受弯构件正截面承载力分析[J]. 四川建筑科学研究, 2003, 29(3): 42-45.
- [5] 彭飞飞,江世永,飞 渭,等. 预应力 CFRP 布加固混凝土梁不卸载时的受弯性能试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2003, 29(2): 39-42.
- [6] 彭飞飞,江世永,飞 渭,等. 预应力 CFRP 布加固混凝土梁不卸载时的抗弯承载力[J]. 四川建筑科学研究, 2003, 29(3): 60-62.
- [7] 张坦贤,吕西林. 预应力碳纤维布加固一次二次受力梁抗弯试验研究[J]. 结构工程师, 2005(1): 34-40.
- [8] 张坦贤,吕西林. 预应力碳纤维布加固一次二次受力梁抗弯试验全过程理论分析[J]. 结构工程师, 2005(4): 43-49.
- [9] 庄 芸. 预应力碳纤维布加固二次受力梁抗弯试验研究[J]. 武汉工程大学学报, 2008(2): 65-69.
- [10] CECS146: 2003, 碳纤维片材加固混凝土结构技术规范[S].

Determination of the best prestressed level to reinforced concrete beams strengthened with prestressed carbon fiber reinforced polymer

ZHUANG Yun

(School of Environmental and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Whether resisting crack or reducing the normal state of the crack width and the deflection or delaying the yield of reinforced or increasing member ultimate capacity, the strengthening effect of prestressed CFRP sheets contrasting with non-prestressed-CFRP-sheets is obvious, The value of Prestressed level directly affects the mechanical properties of components . Based on the existing domestic and international experimental studying on primary and secondary load for RC beam is strengthened with prestressed CFRP sheet. This paper analyze the best value of prestress level and propose CFRP Prestressed best level which is about $60\% \epsilon_{cu}$.

Key words: prestress level; prestressed CFRP sheets; strengthening; C program; the calculations of numerical simulation

本文编辑:张 瑞



(上接第 14 页)

Synthesis of urea-formaldehyde/melamine-formaldehyde composite resin adhesive

GUAN Shi-long, LI Dai-hua, LIU Pan-pan, HU Feng

(School of Chemical Engineering and Pharmacy, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A urea-formaldehyde/melamine-formaldehyde composite resin adhesive with low free formaldehyde content and excellent water proof ability was synthesized by using urea, formaldehyde and melamine as the materials. The influence of the dosage of urea, the dosage of melamine, reaction temperature, reaction time and pH value on the free formaldehyde content was studied, and the properties of the product were investigated. The result showed when $n(\text{formaldehyde}) : n(\text{urea}) : n(\text{melamine}) = 1.8 : 1 : 0.3$, under the reaction temperature of $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ and pH value of 8.5, the synthesized product had the characteristics of low free formaldehyde content and excellent water-proof ability.

Key words: urea-formaldehyde resin; wood adhesive; free formaldehyde content; environment protection; melamine

本文编辑:张 瑞