

DOI: 10.19398/j.att.201703010

引用格式:陈妍,汪泽幸,李洪登,何斌.反复加载下 PVC 建筑膜材的应力松弛行为[J].现代纺织技术,2019,27(2):25-29,35.

反复加载下 PVC 建筑膜材的应力松弛行为

陈妍,汪泽幸,李洪登,何斌

(湖南工程学院纺织服装学院,湖南湘潭 411104)

摘要:为进一步研究膜材的松弛性能,对 PVC 膜材的反复应力松弛性能进行了测试,并讨论了初始松弛应力、松弛次数、单次松弛时间对残余应力、反复应力松弛率和反复应力松弛速率的影响。分析结果表明:残余应力随松弛次数和初始松弛应力的增加而增加,随单次松弛时间的增加而降低;反复应力松弛率随初始松弛应力和单次松弛时间的增加而增加,随松弛次数增加而降低;反复应力松弛速率随单次松弛时间和松弛次数的增加而增加,随初始松弛应力的增加而减少。

关键词:膜结构材料;反复应力松弛;残余应力;反复应力松弛率;反复应力松弛速率

中图分类号:TS101.923;TB332 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-265X(2019)02-0025-05

Stress Relaxation Behavior of PVC Architectural Membrane under Repeated Loading

CHEN Yan, WANG Zexing, LI Hongdeng, HE Bin

(College of Textile and fashion, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411104, China)

Abstract: To further investigate the stress relaxation property of membrane materials, the repeated stress relaxation property of PVC membrane was tested in this study, and the effects of initial relaxation stress, relaxation number and single relaxation time on the residual stress, repeated stress relaxation ratio and repeated stress relaxation rate were also discussed. The analytical results showed that residual stress increased with relaxation number and initial relaxation stress, and decreased with relaxation time. The repeated stress relaxation ratio increased with initial relaxation stress and single relaxation time, and decreased with relaxation number. The repeated stress relaxation rate increased with single relaxation time and relaxation number, and reduced with initial relaxation stress.

Key words: membrane structure material; repeated stress relaxation; residual stress; repeated stress relaxation ratio; repeated stress relaxation rate

膜结构作为一种利用张力保持其独特外形的新型建筑结构,在其长期工作过程中,其膜材内部应力会随着时间的增加而呈现逐渐衰减的变化趋势^[1-2],即产生应力松弛现象。

相对于蠕变,应力松弛过程中,外加伸长或应变保持不变,因而不存在外界力源能量的消耗,只是由

于材料内部结构的弱化而引起内部应力的降低,在此弱化过程中,伴随着以初始累积的变形能为代价的内摩擦对能量的消耗,应力松弛行为不会导致材料宏观破坏,但会导致外形产生变化,从而降低或丧失使用性能,因此对膜材的应力松弛行为进行研究具有重要的现实意义。

近年来,众多学者对各类膜材的应力松弛行为及模型进行了大量的研究,陈昭荣等^[3]对比分析了人工加速老化前后聚氯乙烯(PVC)膜材的应力松弛性能;孟雷等^[4-6]在对 PVC 与聚四氟乙烯(PTFE)膜材的应力松弛性能进行测试的基础上,采用粘弹

收稿日期:2017-03-12 网络出版日期:2018-03-21

基金项目:湖南省科技厅科学研究项目(2013FJ3091)

作者简介:陈妍(1994-),女,湖南湘乡人,硕士研究生,主要从事产业用纺织品方面的研究。

通信作者:汪泽幸,E-mail:zexing.wang@gmail.com

性理论模型对其进行了拟合分析,并研究了应力松弛对成形曲面的影响;郭郁等^[7]、朱勇奕等^[8]对机织和双轴向经编涤纶织物增强 PVC 柔性复合材料的应力松弛性能进行了测试与分析,并基于标准线性固体模型、四元件模型及欧林模型对应力松弛性能进行了模拟分析;许珊珊等^[9]、Zhang 等^[10]研究认为分数指数阶模型能较好地描述不同温度下膜材的应力松弛行为。此外,Xu 等^[11]、Meng 等^[12]、Zhang 等^[13]、Schiessel 等^[14]也对膜材应力松弛性能及粘弹性模型进行了研究。

在使用过程中,为避免因膜面张力不足而导致膜面下垂,特别是在风载荷作用下膜面发生颤抖现象^[15],需定期对膜面张力进行检测,确定因应力松弛行为造成的膜面张力减退,并对膜材张力进行适当调整。实际使用时,因膜材在预加张应力作用下发生应力松弛行为,而需对膜面张力进行反复调整的过程,实质上是在外加载荷下膜材进行反复应力

松弛的过程。因而现有实验研究中,仅研究膜材单次长时间的应力松弛性能,不能全面表达膜材的力学性能。

基于此,本文以 PVC 膜材为研究对象,对其在不同初始松弛应力和单次松弛时间条件下的反复应力松弛性能进行测试和分析。

1 实验

1.1 实验材料

以 1111dtex(1000 D) 高强涤纶长丝制备的机织方平织物为增强骨架,PVC 为基体,表层涂覆聚偏氯乙烯(PVDF)耐紫外线防护层的膜材为实验对象,织物经、纬向纱线密度均为 24 根/5 cm,膜材厚度为 0.72 mm,单位面积重量为 800 g/m²。

试样规格如图 1 所示,为减少实验过程中试样与夹具内表面之间的滑移及夹具内表面对夹持部位的损伤,夹持部位采用高强粘合剂粘合铝合金薄片来保护。

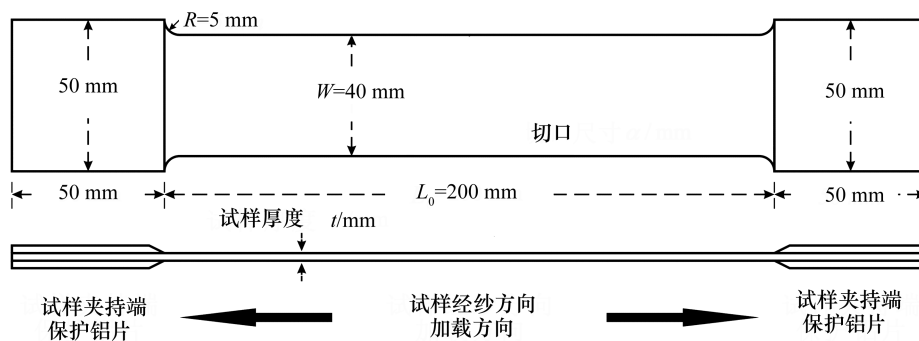


图 1 试样外形及尺寸

1.2 实验方法

目前,在膜结构建筑施工中,通常采用单面宽度内膜材上施加的载荷来表示预加张力^[1],因而在对膜材松弛性能进行实验研究时,通常采用在设定张力条件下,对膜材的应力松弛行为进行研究^[4-6,10-12]。基于此,为探讨初始松弛应力 σ_0 及单次松弛时间 t_s 对 PVC 建筑膜材松弛特性的影响,设定初始松弛应力分别设定为 8,12,16 N/mm,单次松弛时间分别选用为 60,90,120 s。

反复松弛实验在型号为 WDW-20C 万能强力机(上海华龙测试仪器有限公司)上进行。以 10 mm/min 的加载速率加载到设定载荷,保持伸长,松弛时间为 t_s s,后以 10 mm/min 的卸载速率卸载至初始夹持隔距,此后反复进行加载-松弛-卸载过程,设定松弛次数 N 为 30 次。实验过程如图 2 所示。

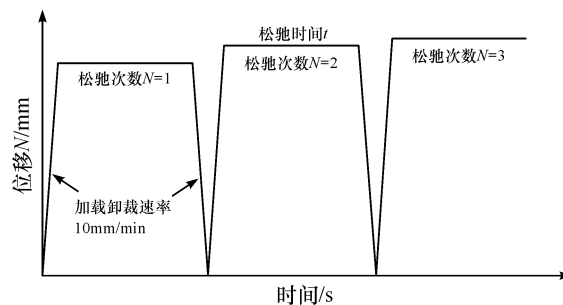


图 2 反复加载条件下应力松弛实验图示

2 结果与分析

2.1 应力松弛曲线分析

初始松弛应力为 16 N/mm,单次松弛时间为 120 s 时,松弛次数为 30 次的应力-应变曲线及应

力-时间曲线绘于图 3 中。基于实验获得的应力-时间数据,提取各次应力松弛过程的应力-时间曲线,

以便对各次应力松弛的特征进行分析和讨论。图 3(b)中对应的 30 次应力松弛曲线绘于图 4 中。

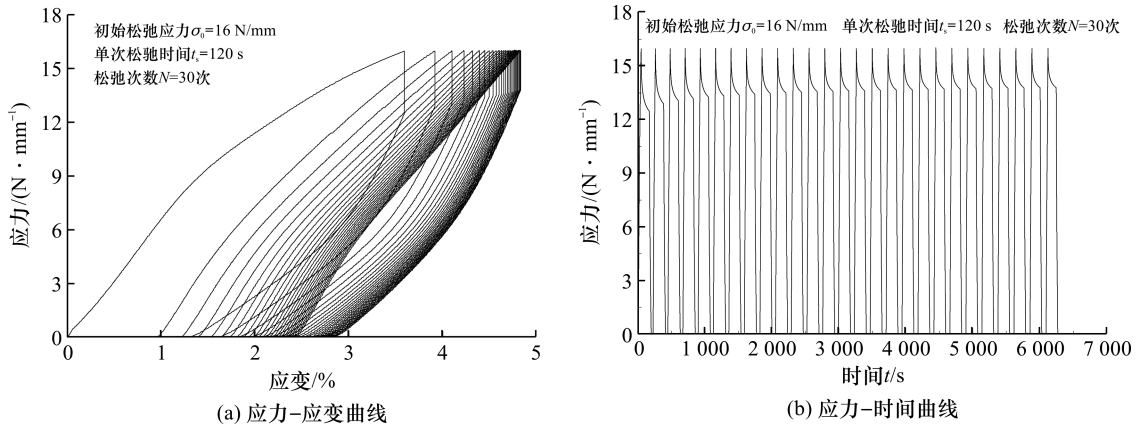


图 3 代表性反复松弛应力-应变曲线与应力-时间曲线

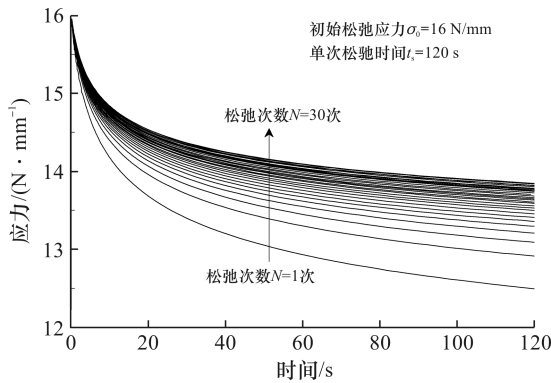


图 4 反复松弛过程对应的各次应力松弛曲线

图 4 表明,各次应力松弛曲线之间具有很好的相似性,表明各次应力松弛时,其松弛机理具有一致性。同时,随着松弛次数的增加,应力松弛曲线之间的差异性明显减少,并呈现重合的趋势。

为进一步分析松弛次数对各次应力松弛行为的影响,以 $-\frac{d\sigma(t)}{dt}$ 来表征单次松弛过程中的应力松弛速率,其中: $\sigma(t)$ 为松弛过程中试样受到的应力, t 为各次松弛时的松弛时间 ($0 \leq t \leq t_s$)。

分析发现,基于实测松弛曲线而获得的应力松弛速率曲线其光滑性较差,故需对实测松弛曲线进行数学处理,进而获得光滑的应力松弛速率曲线。基于许珊珊等^[9]、Zhang 等^[10]的研究结果,本文采用分数指数阶模型对各次松弛曲线进行拟合,其表达式为:

$$\sigma(t) = \sigma_{\infty} + (\sigma_0 - \sigma_{\infty}) e^{-\beta[(\gamma + \alpha)t]^{1-\alpha}} \quad (1)$$

则,在单次应力松弛过程中,应力松弛速率为:

$$-\frac{d\sigma(t)}{dt} = \beta(\sigma_0 - \sigma_{\infty})(\gamma + \alpha)[(\gamma + \alpha)t]^{-\alpha} [(\gamma + \alpha)t]^{1-\alpha} e^{-\beta[(\gamma + \alpha)t]^{1-\alpha}} \quad (2)$$

式中: σ_{∞} 为长期松弛后试样中残余的应力; σ_0 为初始松弛应力; α, β, γ 为待定拟合系数。

基于式(1),对实测数据进行拟合分析,拟合结果表明各次应力松弛曲线的拟合相关系数 R^2 均超过 0.99,表明分数指数阶模型在预测本文所选用膜材的应力松弛行为时,表现出较高的预测精度。

以初始松弛应力为 16 N/mm,单次松弛时间为 120 s 为例,各次应力松弛过程的应力松弛速率曲线绘于图 5 中。

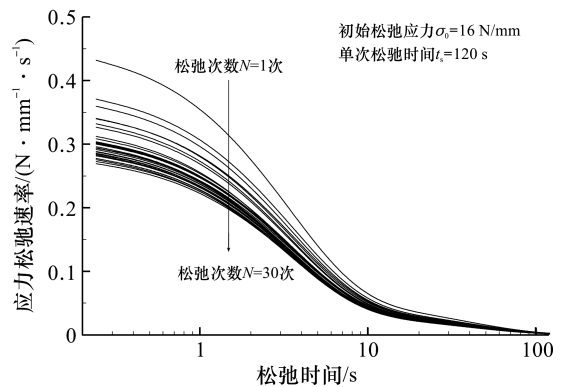


图 5 代表性各次应力松弛时应力松弛速率曲线

从图 5 可以看出,对于各次应力松弛过程而言,随松弛时间增加,应力松弛速率呈现先快后慢的下降趋势,并趋于恒定。这主要由于在松弛过程中,拉伸时张力作用使膜材的高分子材料中大分子内部构象变化和位移产生^[16],但这种变化是不平衡的,需通过粘性变形(分子链的滑移、重排)、普弹性变形(大分子链角、链长改变)、高弹变形(分子链构象调整)来实现构象的平衡,材料内部残余应力逐渐趋向于恒定。但由于高分子材料具有典型的粘弹性特

性,大分子构象的改变和位移的产生需要时间,故在应力松弛的初始段,应力松弛速率较高,并随着松弛时间的流逝,应力松弛的速率变缓且趋于稳定。

为进一步分析反复加载条件下,松弛次数对各次松弛时应力松弛速率的影响,基于图 5 选取松弛时间 t 分别为 0, 3, 6 s, 绘制不同松弛时刻对应的应力松弛速度与松弛次数之间的变化曲线,如图 6 所示。

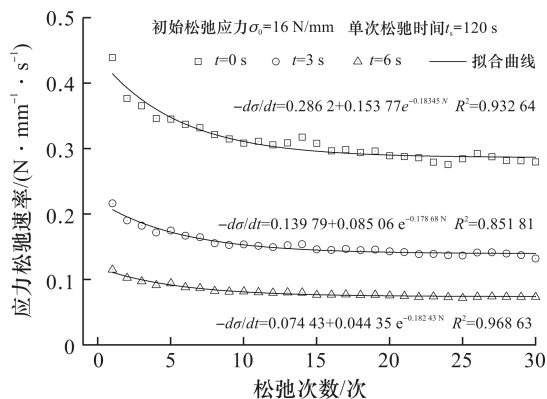


图 6 应力松弛速率随松弛次数变化曲线

从图 6 可以看出,在同等单次松弛时间条件下,随松弛次数的增加,应力松弛速率呈现指数函数规律递减,但均趋于稳定。这可归结为,随松弛次数的增加,应力松弛过程中,大分子构象调整中不可回复的粘性变形比例急剧减少,从而使得应力松弛速率降低。

2.2 残余应力

图 4 表明,在同一初始松弛应力和单次松弛时间条件下,任意相同松弛时间时,膜材中残余应力随松弛次数的增加而增加。不同测试条件下,残余应力与松弛次数之间的变化关系绘于图 7 中。

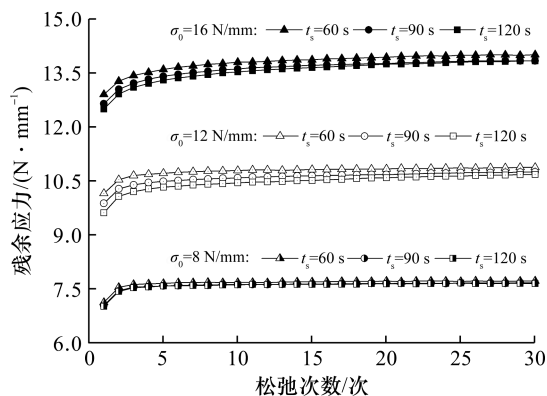


图 7 残余应力随松弛次数的变化曲线

从图 7 中可以看出,同等初始松弛应力条件下,随着单次松弛时间的增加,残余应力 σ_r 增加,这主要是由于大分子基团和大分子链段的运动为时间的函数,随着单次松弛时间的增加,大分子基团和大分子链段的运动越充分,导致材料内部应力释放越充分,表现为残余应力的下降(如图 7 所示)和应力松弛量($\sigma_0 - \sigma_r$)的增加(如图 8 所示)。

图 7 表明,同等初始松弛应力和单次松弛时间条件下,残余应力随松弛次数的增加而呈现先快后慢的增加趋势,并最终趋于稳定。这主要是由于应力松弛过程中所产生的应力松弛量,主要由大分子链的滑移和重排而产生;在同等初始松弛应力和单次松弛时间的实验条件下,随着松弛次数的增加,松弛过程中产生可产生滑移和重排的大分子的数量减少,且减少程度可表现为先快后慢,导致应力松弛量的减少(见图 8),从而在宏观上表现为残余应力的增加(如图 7 所示)。

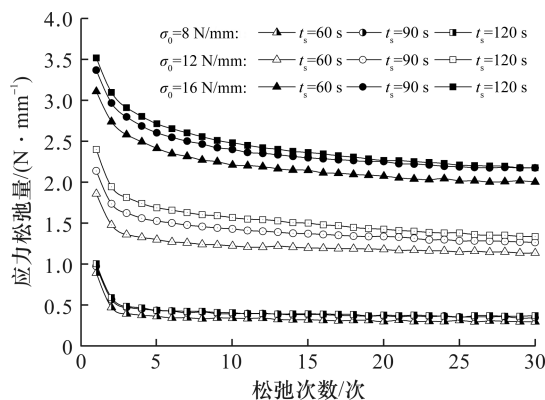


图 8 应力松弛量($\sigma_0 - \sigma_r$)随松弛次数变化曲线

图 7 还表明,相同单次松弛时间和松弛次数条件下,残余应力随初始松弛应力的增加而增加。这主要由于初始松弛应力的增加,骨架纤维及涂层层高分子材料中大分子链段受到的应力越高,导致大分子链段更易滑移,从而表现为应力松弛量增加。

2.3 反复应力松弛率

不同初始松弛应力 σ_0 条件下,本文采用反复应力松弛率 S_r 来表征因反复松弛过程时试样中应力的下降程度,其数学表达式可表示为:

$$S_r^N = \frac{\sigma_0 - \sigma_r^N}{\sigma_0} 100\% \quad 1 \leq N \leq 30 \quad (3)$$

式中: S_r^N 为第 N 次松弛后的反复应力松弛率; σ_r^N 为第 N 次松弛后,试样中的残余应力,即 $\sigma_0 - \sigma_r^N$ 为第 N 次应力松弛后产生的应力松弛量。

3 种初始松弛应力和单次松弛时间条件下,反复应力松弛率与松弛次数的变化曲线如图 9 所示。图 9 表明,在相同初始松弛应力和单次松弛时间下,随着松弛次数的增加,反复应力松弛率呈现先快后慢,并趋于恒定的衰减趋势。在同等条件下,反复应力松弛率随初始松弛应力和单次松弛时间的增加而增加,随着松弛次数的增加而减少。

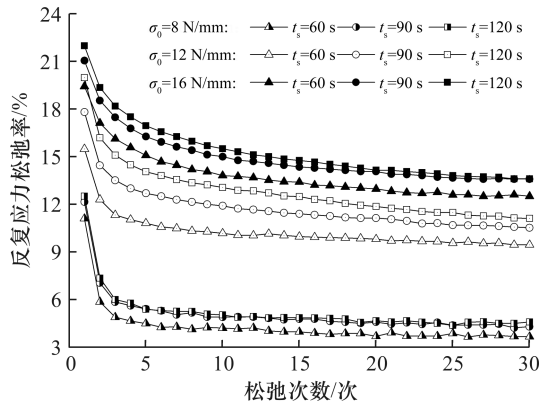


图 9 反复应力松弛率随松弛次数变化曲线

2.4 反复应力松弛速率

因本文选用 3 种不同的单次松弛时间 t_s , 本文引入反复应力松弛速率 V_r 来表征不同单次松弛时间 t_s 下, 松弛次数 N 对反复应力松弛行为的影响, 其数学表达式为:

$$V_r^N = 60 \frac{\sigma_0 - \sigma_r^N}{t_s} \quad 1 \leq N \leq 30 \quad (4)$$

式中: V_r^N 为第 N 次松弛后的反复应力松弛速率, $\sigma_0 - \sigma_r^N$ 为第 N 次应力松弛后产生的应力松弛量。

图 10 为不同初始松弛应力和单次松弛时间下, 反复应力松弛速率与松弛次数之间的变化趋势。从图 10 中可以看出, 与反复应力松弛率相似, 在同等

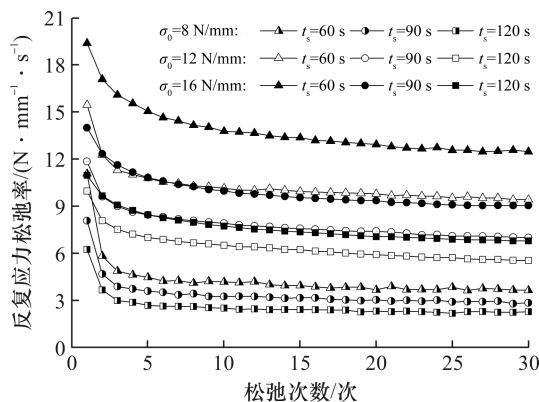


图 10 反复应力松弛速率随松弛次数变化曲线

初始松弛应力和单次松弛时间条件下,随着松弛次数的增加,反复应力松弛速率呈现先快后慢,并趋于恒定的衰减趋势。在同等条件下,反复应力松弛速率随初始松弛应力的增加而增加,随松弛次数和单次松弛时间的增加而降低。

3 结 论

本文对 PVC 膜材的反复松弛性能进行试验测试,并就松弛次数、初始松弛应力以及单次松弛时间对残余应力、反复应力松弛率和反复应力松弛速率的影响进行了分析和讨论。

实验结果表明,反复加载下,膜材料的应力松弛行为与初始松弛应力、单次松弛时间以及松弛次数密切相关。残余应力随着松弛次数和初始松弛应力的增加而增加,随单次松弛时间的增加而降低;反复应力松弛率随初始松弛应力和单次松弛时间的增加而增加,随着松弛次数的增加而降低;反复应力松弛速率随着松弛时间和松弛次数的增加而降低,随初始松弛应力的增加而增加。

此外,研究表明在同等条件下,随着松弛次数的增加,相邻两次松弛曲线差异系逐渐减少,基于可考虑在膜材施工前或膜材制备后,在设定的预加张力条件下,对膜材进行反复预松弛处理,以便减少施工后对膜结构膜面张力检测和调整的次数和周期,减少后期维护工作量。

参考文献:

- [1] 陈务军. 膜结构工程设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [2] WAKEFIELD S. Engineering analysis of tension structure: theory and practice[J]. Engineering Structures, 1999, 21(8): 680-690.
- [3] 陈昭荣, 蒯蓓蕾, 张其林. PVC 膜材人工加速老化力学性能试验研究[J]. 结构工程师, 2013, 29(5): 150-154.
- [4] 孟雷, 吴明儿. 建筑用 PTFE 膜材应力松弛和徐变性能研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(2): 206-210.
- [5] 孟雷, 吴明儿. 建筑用 PVC 膜材应力松弛性能研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(5): 919-922.
- [6] 孟雷, 吴明儿. 张拉成形曲面的应力松弛分析[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(5): 81-87.
- [7] 郭郁. 篷盖类柔性复合材料应力松弛和疲劳性能的研究[D]. 上海: 东华大学, 2006.
- [8] 朱勇奕, 刘晓明, 陈南梁. PVC 压延柔性复合材料应力松弛的力学模型[J]. 纺织学报, 2007, 28(11): 36-39.

(下转第 35 页)