

纤维缠绕复合材料固化工艺过程数值研究^{*}

NUMERICAL SIMULATION OF THE CURE PROCESS OF THE FILAMENT-WOUND COMPOSITES

杨 慧^{**}

(南京航空航天大学 金城学院,南京 210016)

YANG Hui

(Institute of Jincheng, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘要 基于 Springer 热化学模型,提出一种用于研究纤维缠绕复合材料圆筒结构固化工艺过程的数值方法。通过用子程序 HETVAL 把 Springer 热化学模型嵌入到 ABAQUS 有限元中,采用接触模型和变约束方法处理缠绕固化过程中的动态约束问题。利用该数值计算方法研究缠绕速率对固化反应中温度场和固化度分布的影响,结果发现缠绕速度对温度场和固化反应都会产生很大影响。速度快时缠绕结构内部温度场较缠绕速度慢时要低,从而导致缠绕速度快时的固化反应不充分。

关键词 缠绕复合材料 固化度 Springer 热化学模型 有限元方法

中图分类号 TB332 TB115

Abstract Based on the thermal chemical model of Springer, a new numerical method is developed to study the thermal cure process of filament-winding composite cylinder. The user subroutine HETVAL has been programmed for ABAQUS to simulate the Springer model, and the contact models and varied boundary conditions depended on the step have been adopted to deal with the dynamic conditions in the filament winding process. Finally, the effect of filament winding speed on the temperature field and the cure degree distribution has been studied. The conclusions can be drawn that the filament winding speed affects the cure process to a great extent. The temperature under lower winding speed will be higher than that of high winding speed, and the degree of cure reaction under lower winding speed can be more sufficient than that of high winding speed.

Key words Filament winding composite; Cure degree; Springer chemical model; Finite element method

Corresponding author: YANG Hui, E-mail: yangh-ll@sina.com, Tel: +86-25-81719175, Fax: +86-25-84895187

Manuscript received 20060622, in revised form 20061016.

1 引言

由于纤维缠绕复合材料结构具有比强度大、比刚度高、容易成型等诸多优点,在火箭发动机壳体、鱼雷发射管、压力容器、玻璃钢管等结构中得到日益广泛的应用。随着缠绕技术的不断提高,缠绕结构已不再局限于以往的圆筒型或回转体型结构,因而其应用范围又得到了进一步的拓宽,例如,飞机机身(全复合材料小型飞机)、直升机旋翼、机头雷达罩、轻型飞机的座舱框架和高性能战斗机的 S 形进气道等复杂形体也已经开始应用缠绕复合材料。另外由于缠绕复合材料与金属材料的损伤与破坏机理不同,纤维增强复合材料圆柱壳具有稳定的渐进破坏模式,损伤是逐步累积过程,因此可以把纤维缠绕复合材料作为缓冲结构,所以纤维增强复合材料作为缓冲吸能材料是近年来发展起来的另一个应用方向。在纤维缠绕过程中,固化制度直

接影响树脂基体的固化程度和缠绕复合材料结构的强度^[1-3]。Calius^{[4]1305-1307}、Dusi^[5]、Teplinsky^[6]、Schlediewski^[7]等对热塑性复合材料缠绕结构的工艺过程进行数值模拟,分别建立相应的热化学模型和材料模型,讨论了缠绕复合材料固化过程中物理、化学现象及其力学响应,研究在非稳定温度场工况下温度控制以及不同的固化方法对缠绕结构性能的影响。Springer^[8]提出一种热化学模型用于描述缠绕圆筒结构的固化反应过程,该模型将缠绕工艺过程中的诸多变量如缠绕速率、纤维张力、操作温度与复合材料筒体和芯轴的热化学和力学行为关联起来。李辰砂等^{[9]20-23[10-11]}对该 Springer 热化学模型进行了详细介绍,该热化学模型是针对缠绕复合材料结构固化工艺中而提出的用于处理温度、黏度和固化反应速率三者之间关系的理论模型。虽然上述研究取得了很多有工程意义的成果,但是对于缠绕复合材料工艺过程的研究,特别是在数值模拟

* 20060622 收到初稿, 20061016 收到修改稿。

** 杨 慧,女,1977 年 5 月生,山东省齐河县人,汉族。讲师,硕士,主要从事纤维复合材料的力学性能研究。

方面尚缺乏系统的分析和实用的计算方法。本文的主要目的是提出一种简单易行的数值计算模型,并基于该模型对几个重要的缠绕工艺参数进行详细系统的计算和分析。

基于 Springer 热化学模型,提出一种用于研究缠绕复合材料圆筒结构固化过程的数值模拟方法,通过用户子程序 HEIVAL 把 Springer 热化学模型嵌入到 ABAQUS 中,采用接触模型和变约束方法处理缠绕过程中的动态约束问题,利用该数值方法研究缠绕速率对固化反应过程中温度场和固化度分布的影响。

2 Springer 热化学模型

在固化炉内的加热作用下,树脂基体内会发生固化交联反应,反应会释放热量,同时固化体系内部及外部之间会发生热量传递。Springer 热化学模型可以把缠绕速率、操作温度与复合材料缠绕筒体和芯轴的热化学行为联系起来,可以描述固化度、温度 T 和黏度 μ 在复合材料结构内部的分布和变化。该模型思想如下。

任取一微元(图 1)进行能量分析,得出在炉内温度场均匀的前提下,关于复合材料筒体固化体系的温度分布和变化的关系式,该关系式包括热量沿轴向和径向的传递,不同于层合板的只沿垂直于层板的一维方向进行传递。

$$gC \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[K_r \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] + gQ \quad (1)$$

式中, T 为复合材料或芯轴内的温度, t 是时间, r 和 z 分别为径向和轴向坐标方向, g 是材料密度, K_r 和 K_z 是 r 和 z 方向的导热系数, C 是材料的热容。 Q 是固化反应放热速率。

由于固化反应只发生在复合材料内,关系式的最后一项可以表示为

$$gQ = g_r V_r Q_r^* + g_f V_f Q_f^* \quad (2)$$

式中, g_r 、 g_f 分别为树脂基体和纤维的密度, V_r 、 V_f 分别为树脂基体和纤维的体积含量, Q_r^* 和 Q_f^* 分别为树脂基体和纤维的反应放热速率,由于纤维不参与反应放热,所以关系式(2)的右边最后一项为 0。树脂基体的固化度定义为

$$= \frac{Q_r}{H_u} \quad (3)$$

上式中, Q_r 是从固化反应开始到时刻 t 的反应放热, H_u 是固化反应完全时所放总热量,式(3)经过变换可得到如下关系式

$$Q_r = \left(\frac{d}{dt} \right) H_u \quad (4)$$

对于包含无反应的纤维复合材料,结合式(1)、式

(2) 和式(4)可以推出

$$gC \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[K_r \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right] + g_r V_r H_u \frac{d}{dt} \quad (5)$$

对于芯轴,式(5)右端的最后一项为 0。固化反应速率随固化度和时间的关系如下

$$\frac{d}{dt} = f_1(, t) \quad (6)$$

初始时刻 t_0 时的初始温度 T_0 和初始固化度 α_0 必须给予指定。因此初始条件如下

$$T = T_0 \quad = \alpha_0 \quad (t = t_0) \quad (7)$$

初始时刻 t_0 是指纤维束刚刚缠绕在筒体上的时刻,因此对各层来说初始时刻是不同的。因此边界条件要求在缠绕过程中各个时刻在芯轴和缠绕筒体上的表面温度

$$\left. \begin{array}{l} T = T_e \text{ at } r = R_{mo} + h \\ T = T_m \text{ at } r = R_{mi} + h \\ T = T_L \text{ at } z = 0 \\ T = T_R \text{ at } z = L \end{array} \right\} \begin{array}{l} 0 \leq z \leq L \\ 0 \leq z \leq L \\ R_{mi} \leq r \leq R_{mo} + h \\ R_{mi} \leq r \leq R_{mo} + h \end{array} \quad (t > t_0) \quad (8)$$

由上述系列关系式可以求得复合材料固化体系内的温度、黏度和固化度沿轴向和径向的分布及它们随时间的变化。

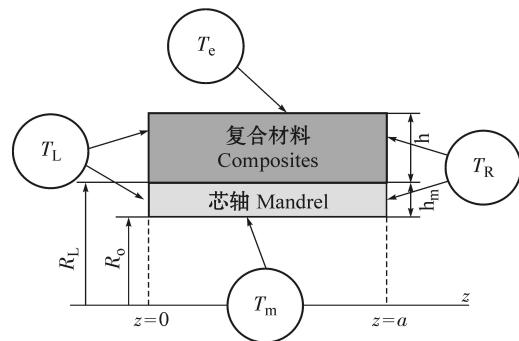


图 1 Springer 热化学模型及边界条件

Fig. 1 Springer thermal model and boundary conditions

3 材料

基体材料为 HBRF-55 材料,其固化反应速率和固化度、温度、时间之间关系式的具体表达形式如下

$$\frac{d}{dt} = \frac{H_T}{H_u} (K_1 + K_2 e^{-a}) (B - e^{-d})^c \quad (9)$$

式中 $K_1 = A_1 \exp(-E_1/T)$

$$K_2 = A_2 \exp(-E_2/T) = \frac{H_u}{H_T} \frac{d}{dt} \quad (10)$$

HBRF-55 材料与热化学反应过程有关的材料性质列在表 1 中,本文中的缠绕复合材料圆筒结构几何参数为 $R_o = 20 \text{ mm}$, $R_1 = 18 \text{ mm}$, $h_m = 2 \text{ mm}$, $h = 2 \text{ mm}$, $a = 2 \text{ mm}$ 。

表 1 HBRF-55 材料的固化度系数^{[4]1310-1311}Tab. 1 The cure degree parameters of HBRF-55 material^{[4]1310-1311}

A_1/s^{-1}	A_2/s^{-1}	$E_1/(J/mol)$	$E_2/(J/mol)$	B	a	c	d	H_u	H_T	$\mu/(Pa \cdot s)$	$U/(J/mol)$	$/(g/cm^3)$
490.6	2 052.4	4.47×10^4	4.28×10^4	1.07	0.84	1.0	1.0	545	545	9.08×10^{-6}	1.09×10^4	2.5

4 计算模型和数值方法

对于缠绕复合材料圆筒结构的固化过程进行研究,计算模型如图 2 所示。在研究过程中,由于缠绕圆筒结构长度较长(长度相对于直径比较大),并且经过试算可以发现,沿轴向长度方向的温度梯度对整个圆筒结构的温度固化度分布影响很小,因此在本文研究中不考虑沿轴向长度方向的温度梯度的影响,这样温度的分布变成一维的。采用轴对称计算模型进行分析,采用轴对称热传导单元对有限元模型进行离散,芯轴部分采用稀疏的网格以节省计算时间,而在复合材料结构部分采用较为精细的单元尺寸以充分体现和表征各个铺层内的温度场和固化反应梯度,整个模型大约 480 个 CAX-4 单元。

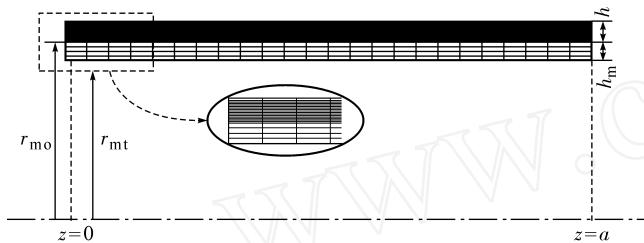


图 2 缠绕复合材料圆筒计算模型(网格密的部分为缠绕复合材料,稀疏部分为芯轴)

Fig. 2 Finite element model, refined meshes represent the filament winding composite, coarse meshes stand for the mandrel

文献 [9]²¹ 中采用传统的有限元理论和迭代过程分析了筒型缠绕复合材料结构的固化工艺。由于需要编制有限元程序来实现缠绕工艺中的动态边界条件,所以使得整个模拟过程比较复杂。本文采用 ABAQUS 有限元软件对缠绕固化过程进行数值计算。在缠绕加工过程中,纤维束是一层一层缠绕在芯轴上的,所以缠绕复合材料的固化过程是一个动态约束过程,温度载荷及边界条件在整个缠绕工艺过程中是逐步变化的。为了描述缠绕固化过程中的动态约束问题,采用接触计算方法,把每一铺层作为一个独立部分,利用经典接触算法实现各个铺层之间的顺序和相互作用。通过 ABAQUS 程序中的 STEP 调整和定义不同缠绕速度和不同几何参数下的温度载荷和动态边界约束条件,从而采用该数值计算方法可以实现整个缠绕固化过程的数值模拟。在整个计算过程中可以根据不同的缠绕复合材料结构和加工工艺条件任意调整各个参数,达到对缠绕固化工艺的数值计算。

Hetval 子程序可以描述固化过程中外界热场在缠

绕复合材料结构内的变化,从而表征缠绕复合材料构件中温度场的变化情况。上面提到 Springer 热化学模型可以把缠绕速率、操作温度与复合材料缠绕筒体和芯轴的热化学行为联系起来,从而描述固化度、温度 T 和黏度 μ 在复合材料结构内部的分布和变化。因此需要通过热传导程序 Hetval 把 Springer 热固化模型的基本思想嵌入到 ABAQUS 程序中,通过增量逐步迭代的数值方法研究缠绕工艺中固化反应速率与固化度、温度、时间之间的关系。通过该计算方法可以求得缠绕复合材料固化体系内的温度、固化度分布和温度场随时间的变化历程。

对于缠绕工艺过程,缠绕速度是一个影响缠绕结构强度的重要参数之一。本文中缠绕速度定义为缠绕每个铺层所用的时间。在该数值计算中,分别对不同的缠绕速度 50 秒、80 秒和 100 秒进行分析。

5 结果及讨论

图 3 为各个铺层表面温度随时间的变化曲线,由图中可以得出,在纤维缠绕过程中,缠绕在芯轴上的铺层由于直接受到外界温度的作用,表面温度较高,随着时间的延长,铺层内的热量向两侧的铺层传导,表面温度不断下降,等达到热平衡状态后,温度不再下降而保持恒定。图 4 为铺层内部温度场的分布情况。中间铺层的温度场分布较为均匀,表明该部分处于热平衡稳定状态,而内外铺层由于受到边界温度载荷的影响,温度不同于中间铺层。

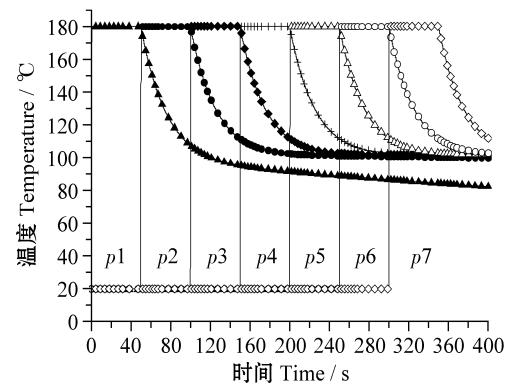


图 3 缠绕速度 50 s,8 个铺层内温度场随时间的变化

Fig. 3 The development of temperature field in eight plies under the winding speed 50 s

图 5 为铺层内部固化度随时间历程的变化曲线。固化度在缠绕过程中首先逐渐增大,等达到充分反应后将会保持恒定状态。图 6 为固化度在各个铺层内部

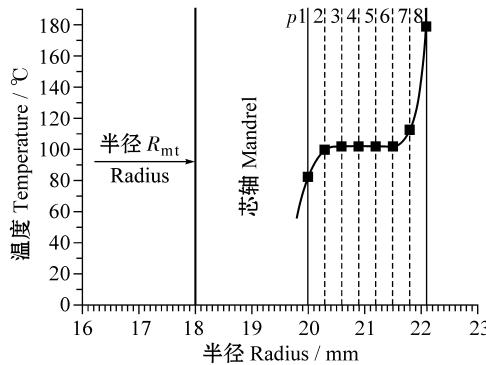


图 4 缠绕速度 50 s,8 个铺层内温度场的具体分布

Fig. 4 The detailed temperature field in eight plies under the winding speed 50 s

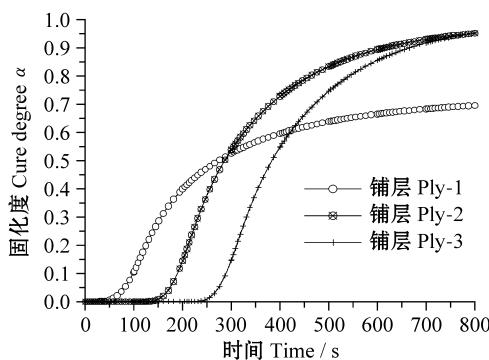


图 5 缠完 8 个铺层后固化度随时间的变化曲线

Fig. 5 The development of cure degree with time under the winding speed 100 s

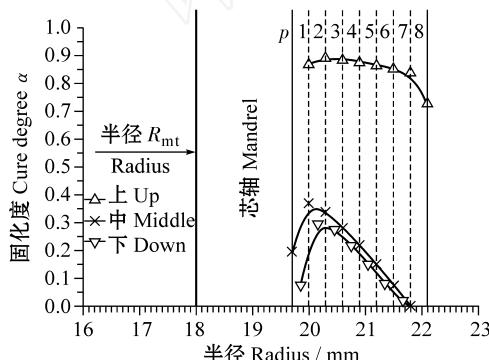


图 6 缠完 8 个铺层后铺层内固化度在上、中、下表面的分布

Fig. 6 The cure degree in eight plies under the winding speed 100 s

的分布曲线。由图中可以看出,在某一时刻的每一铺层内,受到外界温度载荷作用的上表面的固化反应比较充分,固化度较高;与前一铺层上表面接触的铺层下表面固化反应不是很充分,而铺层的中间区域部分反应最差,固化度最低。

缠绕速率对缠绕结构中的温度场和固化反应过程都会造成很大影响。图 7 为三种不同缠绕速率对温度场的影响曲线。缠绕速率高时,铺层内的温度较低,说明缠绕速率高时,刚刚缠上的复合材料受到外界温度载荷的作用时间短,由于热传导过程是时间累积过程,刚刚缠上的铺层没有获得更多的热量,所以温度较低。

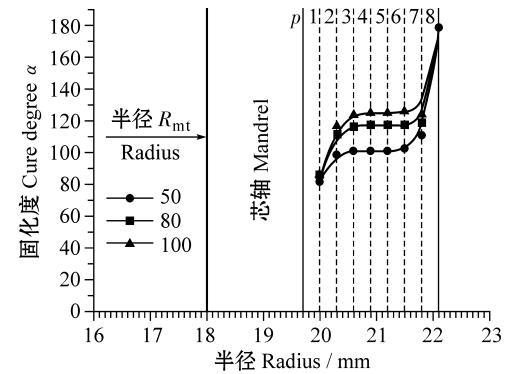


图 7 缠绕速度 50 s、80 s、100 s, 缠完 8 个铺层后各铺层内温度场的分布

Fig. 7 The temperature distribution in eight plies under different winding speeds

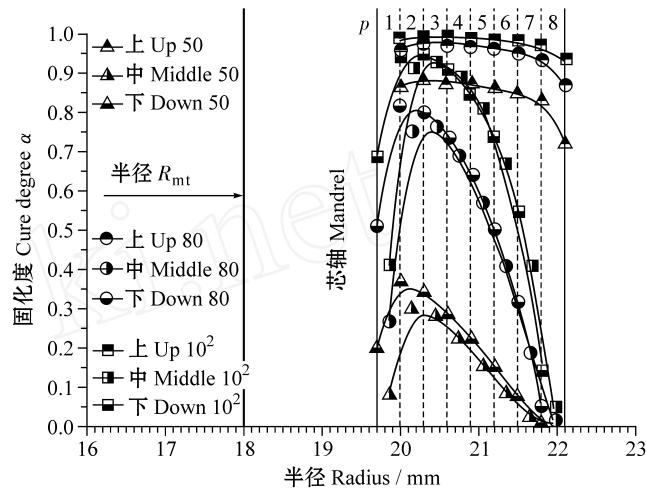


图 8 缠绕速度 50 s、80 s、100 s, 缠完 8 个铺层后各铺层内固化度的分布

Fig. 8 The cure degree distribution in eight plies under different winding speeds

而缠绕速率低时,铺层内的温度较高,说明缠绕速率低时,刚刚缠上的复合材料受到外界温度载荷的作用时间长,可以获得更多的热量,相应的内部温度也较高。

图 8 为三种缠绕速率对固化反应过程的影响曲线。固化反应过程是温度、时间和固化度之间的函数,当缠绕速率高时,每一铺层内固化反应的时间比较短,而且热量传递不充分,所以固化反应过程不充分。当缠绕速率低时,固化反应过程受时间历程的作用较长,在复合材料内部化学反应过程也较长,所以此时的固化度要高于缠绕速率高时的固化度。

6 结论

基于 Springer 热化学模型,提出一种用于研究缠绕复合材料固化过程的数值模拟方法,并对不同缠绕速率对固化反应的影响进行分析,为缠绕复合材料工艺、结构和强度设计一体化研究建立初步的分析计算模型。主要结论如下:

1) 在缠绕复合材料各个铺层内,固化度随时间的发展过程为,首先逐渐增大,达到一定值(通常为1)后保持恒定。

2) 缠绕复合材料结构中内外两铺层内的温度场受到边缘效应的影响,而中间铺层部分比较稳定且分布均匀;在靠近内层的部分固化反应比较充分,外层反应不足。

3) 缠绕速度对温度场和固化反应过程都会产生很大的影响。速度快时缠绕结构内温度场较缠绕速度慢时要低,从而导致在缠绕速度快时固化反应不充分。

参考文献 (References)

- [1] 刘桂萍. 纤维缠绕复合材料壳体制造工艺[J]. 宇航材料工艺, 1995(3): 57-58.
LIU GuiPing. The manufacture technology of fiber winding composite shell structure[J]. Aerospace Materials and Technology, 1995(3): 57-58 (In Chinese).
- [2] Kim H J, Hong C S. Buckling and post-buckling behavior of composite laminates with a de-lamination[J]. Composites Science and Technology, 1997, 57: 557-564.
- [3] 乔生儒,李 玮,韩 栋,张立同. 3D-C/SiC 的高温弯曲性能和后处理对弯曲性能的影响[J]. 机械强度, 2003, 25(5): 495-498.
QIAO ShengRu, LI Mei, HAN Dong, ZHANG LiTong. Flexural performance of 3D-C/SiC composites at high temperature and influence of post-heat-treatment on flexural performance [J]. Journal of Mechanical Strength, 2003, 25(5): 495-498 (In Chinese).
- [4] Calius E P, Lee S Y, Springer G S. Filament winding cylinders: validation of the model[J]. Journal of Composite Materials, 1990, 24: 1299-1343.
- [5] Dusi M R, Lee W L, Ciriscioli P R, Springer G S. Cure kinetics and viscosity of fiberite 976 resin[J]. Journal of Composite Materials, 1982, 16: 510-520.
- [6] Teplinsky S, Gutman E M. Computer simulation of process induced stress and strain development during cure of thick-section thermosetting[J]. Composites Computational Materials Science, 1996(6): 71-76.
- [7] Schledjewski R, Latrille M. Processing of unidirectional fiber reinforced tapes fundamental on the way to a process simulation tool[J]. Composites science and technology, 2003, 63: 1223-1230.
- [8] Locs A C, Springer G S. Curing of epoxy matrix composites. Journal of Composite Materials, 1983, 17: 135-169.
- [9] 李辰砂,冷劲松,王殿富,杜善义. 纤维缠绕圆筒复合材料固化成型过程机理模型(上)[J]. 纤维复合材料,2001, 19: 19-25.
LI ChenSha, LENG JinSong, WANG DianFu, DU ShanYi. Curing mechanism models for FW composites cylinders () [J]. Fiber Composites, 2001, 19: 19-25 (In Chinese).
- [10] 李辰砂,冷劲松,王殿富,杜善义. 纤维缠绕圆筒复合材料固化成型过程机理模型(中)[J]. 纤维复合材料,2001, 8: 8-10.
LI ChenSha, LENG JinSong, WANG DianFu, DU ShanYi. Curing mechanism models for FW composites cylinders() [J]. Fiber Composites, 2001, 8: 8-10 (In Chinese).
- [11] 李辰砂,冷劲松,王殿富,杜善义. 纤维缠绕圆筒复合材料固化成型过程机理模型(下)[J]. 纤维复合材料,2001, 13: 13-16.
LI ChenSha, LENG JinSong, WANG DianFu, DU ShanYi. Curing mechanism models for FW composites cylinders() [J]. Fiber Composites, 2001, 13: 13-16 (In Chinese).