

直升机复合材料桨叶固化过程的多物理场有限元模拟

贺继林^{1,2} 李 栋¹ 郑海华¹

(1 中南大学机电工程学院,长沙 410083)

(2 山河智能装备股份有限公司,长沙 410100)

文 摘 根据热传导、复合材料力学和固化动力学理论,采用基于偏微分方程的强耦合多物理场有限元方法,计算在 F650 双马来酰亚胺树脂建议温度周期下直升机复合材料桨叶固化过程中温度、固化度、固化度反应速率和内应力变化历程。通过仿真结果对温度周期进行优化调整,改善工艺过程。计算结果表明:桨叶中树脂固化反应同步度高,交联反应产热量少;调整后的加热周期与建议加热周期相比,最高加热温度由 460 K 降低为 393 K,但固化度由 0.1 增加到 1 的反应时间只由 25 min 增加为 30 min,固化反应速率峰值从 $1.35 \times 10^{-3}/s$ 降低为 $1.15 \times 10^{-3}/s$,PMI(聚甲基丙烯酸酞亚胺,Polymethacrylimide)泡沫的 Von Mises 热应力最大值从 0.82 MPa 降低为 0.482 MPa。

关键词 复合材料,固化,有限元分析,桨叶,双马来酰亚胺树脂,多物理场耦合

中图分类号:TB330.1

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.02.004

Multi-Physics Finite Element Simulation of Curing Process for Helicopter Composite Blade

HE Jilin^{1,2} LI Dong¹ ZHENG Haihua¹

(1 School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083)

(2 Sunward Intelligent Machinery, Co., Ltd, Changsha 410100)

Abstract Based on heat transfer theory, mechanics of composite materials and cure kinetics, the temperature, degree, reaction rate of cure and thermal stress in the composite helicopter blade's curing process under the recommended temperature cycle of F650 bismaleimide resin are calculated. The strong coupling multi-physics finite element method for solving partial differential equation is applied in this paper. The result shows that during the curing process, the curing reaction of resin is highly synchronized, and the exothermic crosslinking reaction is faint; compared with the recommended heating cycle, the highest heating temperature lowers from 460 K to 393 K in the adjusted heating cycle, but the reaction time of the curing degree from 0.1 to 1 only increases from 25 to 30 min, the peak value of the curing reaction rate decreases from $1.35 \times 10^{-3}/s$ to $1.15 \times 10^{-3}/s$, and the maximal thermal stress in the PMI foam drops from 0.82 MPa to 0.482 MPa.

Key words Composite, Cure, Finite element analysis, Blade, Bismaleimide, Multi-physics coupling

0 引言

在固化成形工艺的支持下,可以用较为简单的加工工艺使直升机复合材料旋翼桨叶具有优异的力学性能。但由于旋翼桨叶生产是一个受多物理化学因素交互影响的复杂工艺制造过程,其生产合格率仍然

不高,桨叶局部蒙皮开裂、残余应力过大和 PMI 泡沫压溃是常见问题。排除人为操作原因,合理设计各种固化工艺参数和结构参数可以提高复合材料旋翼桨叶制造成功率^[1]。如果采用试验方法对桨叶固化工艺参数和结构参数进行改善,试验次数多,生产周期

收稿日期:2014-02-20

作者简介:贺继林,1975 年出生,副教授,博士生导师,主要从事航空器设计工作。E-mail: hejilin@aliyun.com

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014 年 第 2 期

— 19 —

长,代价昂贵。所以浆叶固化过程需要采用多物理场耦合有限元仿真的方法对其中关键参数的变化历程进行仿真,帮助改善工艺参数。

国内关于复合材料固化过程的数值模拟仿真开展时间较短,大多数学者停留在参照国外复合材料层合板试验数据对自己所建数学模型进行验证的研究阶段,关于实际生产问题研究的相关文献较少^[2]。本文认为两方面原因导致这种现状:一是由于国内关于树脂的各种固化动力学参数还没有测试完成,只能对几种已经完成测试的树脂进行研究;二是因为学者采用的数学模拟算法多样、通用性不强,相互借鉴意义不大。张纪奎等^[3]采用三维有限元方法,考虑温度和固化度的耦合作用,对正交各向异性层合板固化过程中温度场和固化度历程及其变化规律进行数值模拟研究。谭华等^[4]建立了固化阶段热化学现象的数学模型,并通过所编写的相应算法的固化程序,对玻纤/聚酯层合板进行了三维瞬态数值分析。刘勇等^[5]利用多孔介质有效应力原理和体积平均方法,采用 Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) 移动网格建立了三维流动—热—化学耦合的有限元模型,对 AS4/3501-6 层合板的热压密实过程进行仿真。所以,树脂固化过程的研究需要在通用性强、可开发性高的多物理场耦合仿真平台上对已有固化数学模型进行仿真,才能尽快将相关研究成果应用于生产实际。

本文根据热传导、复合材料力学和固化动力学理论,采用基于偏微分方程有限元方法,对直升机复合材料浆叶固化过程中温度场、固化度场和应力场等参数的变化历程进行多物理场耦合有限元仿真计算。

1 基于偏微分方程的有限元方法

多物理场有限元软件 Comsol 选择根植于数学物理方法,直面数学物理方程,总结了绝大多数数理方程都可以演化到的三种基本偏微分方程应用模式——系数型偏微分方程、广义型偏微分方程和弱解型偏微分方程。通过解决这三种基本类型方程的通用有限元解法,支持用户使用多物理场强耦合方式验证各种可以用偏微分方程描述的研究模型。本文使用系数型应用模式完成复合材料浆叶固化分析,其基本形式如式(1)所示,式中参数的具体含义可参考文献[5]。

$$e \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla(c \nabla u + au - \gamma) + \beta(\nabla u) + au = f \quad (1)$$

2 数学模型

2.1 热传导方程

复合材料浆叶固化过程的热量主要来源于两方

面,一是经模具、辅助材料传递给复合材料结构的外界热量,另一部分是树脂固化过程化学反应产生的非线性内热源。本文采用 Fourier 热传导定律和能量平衡关系建立其数学模型^[6]。改变为系数型偏微分方程基本形式的瞬态热传导控制方程为:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(k \nabla T) = q \quad (2)$$

式中: T 、 c_p 、 k 、 t 分别为温度、比热容、热导率和时间。

q 为固化反应的热生成率,即单位时间内由于固化反应所生成的热量,可以用下式表示:

$$q = \rho(1 - V_f) H_R \frac{d\alpha}{dt} \quad (3)$$

式中: V_f 为纤维体积分; H_R 为单位质量树脂固化总反应放热,其值由实验确定; α 为反应固化度,为固化反应动力学方程的因变量。

2.2 固化反应动力学方程

树脂的固化反应是一个热激活的复杂化学反应,关于其时间、温度和固化度的关系有不同的模型。本文采用唯象固化动力学模型中 n 级反应动力学模型,唯象固化动力学模型不考虑整个反应过程中的动力学机理,只用简单的公式来表示反应中各参数的相互作用关系^[7]。浆叶蒙皮采用 Hexcel 公司 F650/7781 玻纤预浸料,黏接剂采用 Hexcel 公司的 F650 双马来酰亚胺树脂,其 n 级反应动力学模型的具体形式^[8]为:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(\frac{-\Delta E}{RT}\right) (1 - \alpha)^n \quad (4)$$

式中: A 为频率因子; ΔE 为反应活化能; R 为理想气体常数; n 为反应级数。

2.3 热—应力方程

对于正交各向异性材料,热载荷引起的总自自由度应变 $\boldsymbol{\varepsilon}^T$ 为:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^T = \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{Bmatrix} \Delta T \quad (5)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}^T$ 表示温度变化引起的应变矩阵; ΔT 表示温度变化量; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 分别为材料在 3 个主方向上的线胀系数。

由温度变化引起的单元载荷列阵可表示为:

$$\mathbf{F}^T = \iiint \mathbf{B}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}^T dV \quad (6)$$

式中: \mathbf{F}^T 为温度变化引起的单元载荷列阵; \mathbf{B}^T 为应变矩阵; \mathbf{D} 为弹性矩阵; V 为单元体积。

忽略惯性力和黏性力的作用,只考虑热载荷准静态平衡方程为:

$$\mathbf{K} \boldsymbol{\delta} = \mathbf{F}^T \quad (7)$$

式中： K 为单元刚度矩阵， δ 为单元结点位移向量。

3 实例分析

式(2)~式(7)定义了复合材料旋翼桨叶固化过程中热—化学场、热—应力场的全耦合数学模型。借助于有限元软件 Comsol, 可以对三组方程进行强耦合求解。本算例模拟如图 1 所示桨叶和模具在固化时承受 F650 双马来酰亚胺树脂建议固化温度周期过程中温度、固化度、固化度反应速率和热应力的变化历程。由于桨叶在长度方向固化过程基本同步, 故只建立二维有限元模型。模具和“C”型梁采用 6061 铝制作, 蒙皮采用 Hexcel 公司 F650/7781 多轴向玻纤预浸料, 铺层顺序为 $[0^\circ/45^\circ/0^\circ/45^\circ]$, 树脂层与蒙皮之间、PMI 泡沫与“C”型梁之间有一层约 1 mm 厚的双马来酰亚胺树脂, 其参数分别如表 1~表 4 所示。

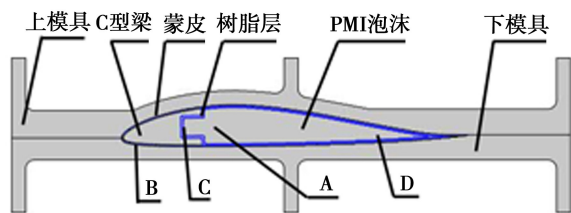


图 1 桨叶结构示意图

Fig. 1 Blade structure diagram

表 1 铝、PMI、7781/F650 和 F650 的热学性能

Tab.1 Thermal properties for Al, PMI, 7781/F650 and F650

materials	$K_{22} = K_{33} /$ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	$c_p /$ $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	$\rho /$ $kg \cdot m^{-3}$	$\alpha /$ $10^{-6} K^{-1}$
Al	237	81.1	2700	23.6
PMI	0.029	114.8	52	33.0
7781/F650	0.433	130.2	1890	62.7
F650	0.200	108.1	1850	120

表 2 铝、PMI 和 F650 的基本力学性能

Tab.2 Mechanical properties for Al, PMI and F650

materials	ν	E / GPa
Al	0.324	76.6
PMI	0.3	0.069
F650	0.4	3.2

表 3 7781/F650 复合材料的基本力学性能

Tab.3 Mechanical properties of 7781/F650 laminates

E_1 / GPa	E_2 / GPa	G_{12} / GPa	ν_{12}
15.88	15.88	3.2	0.14

表 4 F650 双马来酰亚胺树脂的反应动力学参数

Tab.4 Cure kinetics parameters for F650 bismaleimide resin

$A /$ 10^{11} min^{-1}	n	$E /$ $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	$H_R /$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$R /$ $\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$
2.208	0.9917	87.51	77.5	8.3143

4 结果与讨论

4.1 温度变化历程

图 2 给出了旋翼模具外界温度变化和桨叶蒙皮 A 处和中心位置 B (图 1) 处两个节点的温度变化历程, 图 3 给出了第 67 min 时桨叶和模具的温度云图。由图 2、图 3 可见, 在加热过程中 A 处升温较快, B 处升温最慢, 但 A、B 两处与外界环境温度的最大差值只有 5℃, 说明桨叶中树脂固化反应基本同时发生, 复合材料固化过程中常见的由于温度变化不一致而导致的层合板翘曲问题对此桨叶质量影响较小。本仿真对树脂交联产热反应进行了模拟, 但在图 2 中没有明显出现文献[3]中一段时间内树脂内部温度明显高于环境温度的现象。笔者认为这是由于同文献[3]中厚度为 25.4 mm 的层合板相比, 本仿真中 1 mm 树脂层厚度较小, 从而交联产热量少的原因。

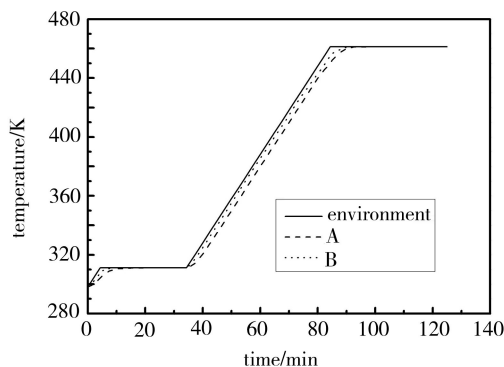


图 2 桨叶 A 点和 B 点的温度历程

Fig. 2 Temperature development at A and B points of the blade in recommended temperature cycle

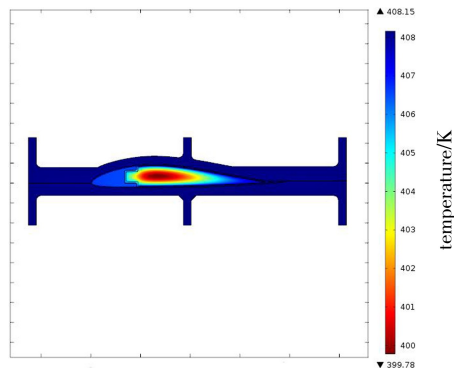


图 3 桨叶模具在第 67 min 时的温度分布云图

Fig. 3 Cloud image of the temperature distribution of the blade mould at 67th min in the recommended temperature cycle

4.2 固化度和固化速率变化历程

图4为在对桨叶模具使用Hexcel公司F650树脂建议的标准固化温度周期加热时,C处(图1)树脂固化度和固化反应速率的曲线,图5为第58min时预浸料和树脂层的固化度云图。F650树脂标准固化温度周期是Hexcel公司对50mm厚层合板建议的加热曲线。由图4可以看出,在0~35min的低温保温阶段,桨叶C处固化度值只产生微小增长,固化速率值为 10^{-6} 数量级,与峰值时的 10^{-3} 数量级相比很小,说明此阶段固化反应很微弱。从35min开始的二次升温阶段,固化度和固化反应速率都急剧增加,第70min、外界温度418.5K时固化度值已经为1,固化反应已经完成;第50min、温度为358.15K时,固化反应速率处于最大值 $1.35 \times 10^{-3}/s$,说明此阶段固化反应剧烈。从85~125min结束的460K保温阶段,固化度值和固化反应速率没有任何变化。实验固化反应所需时间少于F650树脂建议的固化时间,桨叶中树脂含量少(最厚处只有2.2mm),反应需要时间少,而总体反应同步度高。所以此桨叶固化过程采用产品建议的标准固化温度周期是不经济的,需要对固化温度周期进行调整。

议的温度固化周期进行调整,如图6所示:两个升温阶段的升温速率保持不变,将第一个保温阶段时间由30min改为15min,第二个保温阶段温度为393℃,保温时间改为15min。

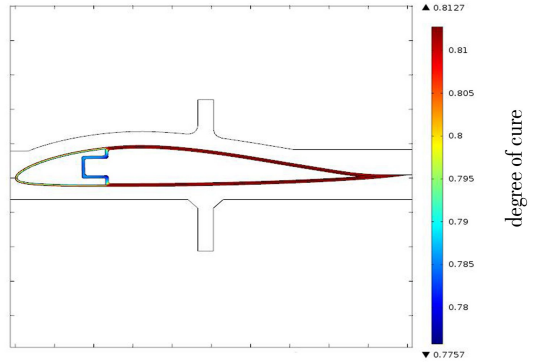
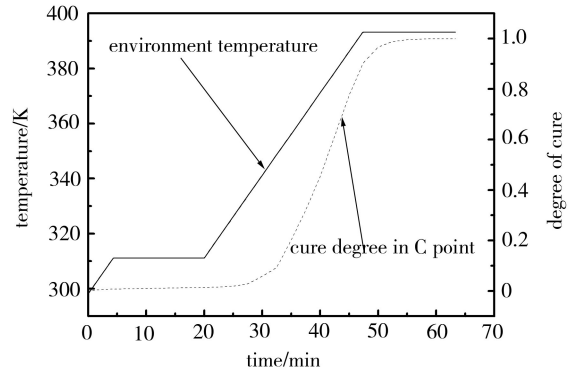


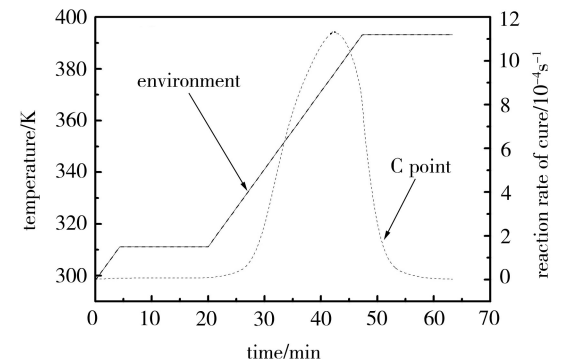
图5 在建议温度周期下桨叶模具在第58min时的固化度分布云图

Fig. 5 Cloud image of the cure distribution of the blade mould at 58th min in the recommended temperature cycle

图6为在对桨叶模具依据调整后的固化温度周期加热时C处树脂固化度和固化反应速率的变化曲线。



(a) 固化度

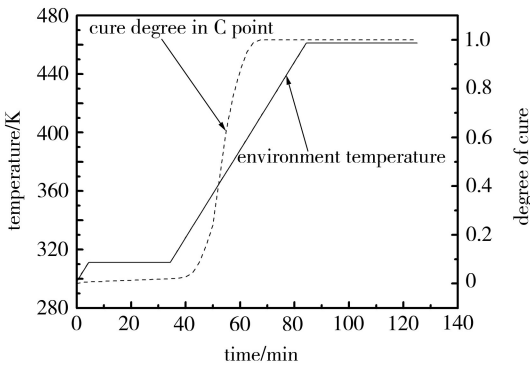


(b) 固化度反应速率

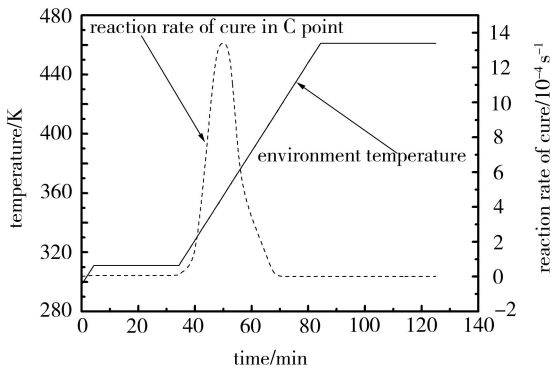
图6 调整后温度周期下桨叶C点的固化度和固化度反应速率历程

Fig. 6 Developments of the cure and the reaction rate of cure at C point of the blade in the adjusted temperature cycle

与调整前的固化过程相比,由于最高加热温度由460K降低为393K,导致固化度由0.1增加到1的



(a) 固化度



(b) 固化度反应速率

图4 在建议温度周期下桨叶C点的固化度和固化度反应速率历程

Fig. 4 Developments of the cure and the reaction rate of cure at C point of the blade in the recommended temperature cycle

在对上述固化变化规律认识的基础上,对产品建

反应时间由 25 min 增加为 30 min, 固化反应速率峰值由 $1.35 \times 10^{-3}/s$ 降低为 $1.15 \times 10^{-3}/s$, 可见反应剧烈程度降低。调整后的加热温度周期, 总体加热时间降低 1 h, 最高加热温度降低 67 K, 明显节省了时间和能耗, 而固化效果却没有降低。

4.3 热应力变化历程

在桨叶制造中, 桨叶尾部容易发生蒙皮与 PMI 泡沫开裂的现象, 模具在加热过程中热变形过大将 PMI 泡沫压溃是发生这种现象的原因之一。图 7 为在建议固化温度加热周期下尾部 D 处 PMI 泡沫的 Von Mises 内应力, 可知其最大值为 0.82 MPa, 而 PMI 泡沫的最大屈服强度为 0.883 MPa, 此时 PMI 泡沫有被压溃的风险。图 8 为在调整后温度加热周期下尾部 D 处 PMI 泡沫的 Von Mises 内应力, 可知其最大值为 0.482 MPa, 处于弹性范围之内, PMI 泡沫被压溃的风险降低。图 9 为在调整后温度加热周期下桨叶和模具的 Von Mises 应力分布云图。

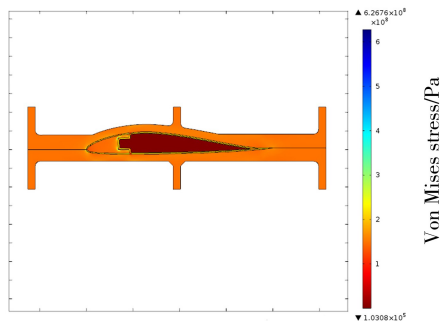


图 9 调整后温度周期下桨叶模具在第 63 min 时的 Von Mises 应力分布云图

Fig. 9 Cloud image of the Von Mises stress distribution of the blade mould at 63th min in the adjusted temperature cycle

5 结论

(1) 采用基于偏微分方程的有限元方法, 对直升机复合材料桨叶固化过程中温度场、固化度场和应力场进行多物理场有限元仿真研究, 采用强耦合算法进行迭代计算, 求得温度、固化度、固化度反应速率和热应力等参数随标准固化周期的变化历程, 验证了本文研究方法的可行性。

(2) 从桨叶 A 和 B 处两点的温度变化曲线可知, A 和 B 两处与环境的最大温差为 5℃, 桨叶整体固化反应基本同时发生。仿真中没有出现一段时间内树脂内部温度明显高于环境温度的现象。本仿真中 1 m 树脂层厚度较小, 从而交联产热量少。

(3) 通过对树脂固化和内应力变化过程的精确预测, 对固化加热周期进行了调整。调整后的固化加热周期最高加热温度由 460 K 降低为 393 K, 反应时间由 125 min 降低为 63 min, 固化反应速率峰值从 $1.35 \times 10^{-3}/s$ 降低为 $1.15 \times 10^{-3}/s$ 。固化反应剧烈程度降低, 加热时间变短, 热应力降低, 加热过程效率提高。

参考文献

- [1] 姜年超, 周光明, 张逊. 无人直升机复合材料旋翼桨叶研制[J]. 玻璃钢/复合材料, 2010(增刊): 132-133
- [2] 王志远, 陈刚, 郑志才. 树脂基复合材料固化过程温度场研究进展[J]. 工程塑料应用, 2010, 38(8): 85-88
- [3] 张继奎, 关志东. 热固性复合材料固化过程中温度场的三维有限元分析[J]. 复合材料学报, 2006, 23(2): 175-179
- [4] 谭华, 晏石林. 热固性树脂基复合材料固化过程的三维数值模拟[J]. 复合材料学报, 2004, 21(6): 165-172
- [5] 王刚, 安琳. COMSOL Multiphysics 工程实践与理论仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 1-30
- [6] 左德峰, 朱金福, 黄再兴. 树脂基复合材料固化过程中温度场的模拟[J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(6): 701-705
- [7] 王晓霞. 热固性树脂基复合材料的固化变形树脂模拟[D]. 山东: 山东大学, 2012
- [8] 于佳, 张博明, 王殿富. 典型双马来酰亚胺树脂固化动力学模型的研究[J]. 复合材料学报, 2004, 21(1): 78-83

(编辑 李洪泉)

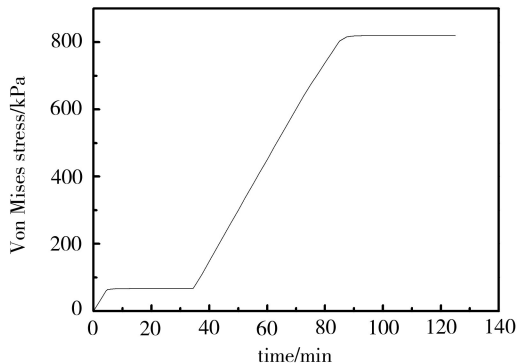


图 7 在建议温度周期下 D 点 PMI 泡沫的 Von Mises 应力变化历程

Fig. 7 Von Mises stress development at D point in the PMI foam in the recommended temperature cycle

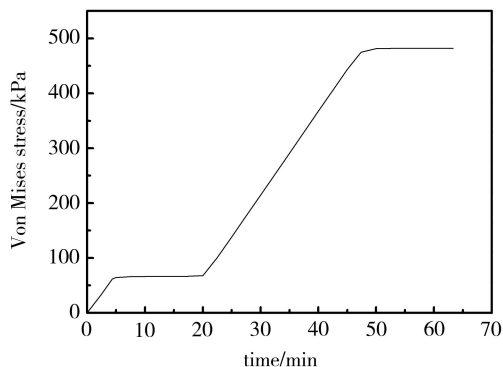


图 8 调整后温度周期下 D 点 PMI 泡沫的 Von Mises 应力变化历程

Fig. 8 Von Mises stress development at D point in the PMI foam in the adjusted temperature cycle