

树脂传递成型过程中温度场的数值研究*

施 飞¹, 程晓民¹, 张韬杰¹, 董湘怀²

(1. 宁波工程学院 机械工程学院, 浙江 宁波 315016;

2. 上海交通大学 塑性成形技术与装备研究院, 上海 200030)

摘要: 温度场是树脂基复合材料传递成型过程中最为重要的影响因素.通过对成型过程中温度场的数值研究,揭示温度场不仅仅影响了树脂浸润多孔介质的过程,而且本身也受到多孔介质的孔隙率、树脂反应热、树脂注入温度和树脂注入流量等因素的影响,并最终决定了制品的成型过程和制品质量.

关键词: 复合材料; 树脂传递成型; 温度场; 计算流体力学; 数值分析

中图分类号: O241.1 **文献标志码:** A

doi: 10.3879/j.issn.1000-0887.2016.03.004

引 言

树脂传递成型(resin transfer molding,简称 RTM)是树脂基复合材料一种低成本成型方法.在成型过程中,模腔壁、增强材料和树脂体系之间将发生复杂的热传递,同时发生化学反应并产生热量,模腔内的温度不断变化.当树脂的流动速度较高时,热传导对树脂流动的影响不能忽略,会改变树脂黏度,影响其流动模式,整个过程是非等温的.因此,复合材料的温度场分布对成型过程有很大影响.

Rudd^[1]假设模腔壁保持恒温,考虑了流动中树脂和模具型腔壁之间的热平衡,采用有限差分法研究树脂一维流动过程并进行了非等温模拟.Kendall^[2]进一步推广了该模型,考虑模具的压力损失和热量损失,从而改进了层合板与模具型腔壁之间能量平衡的计算.Abbassi 等^[3]模拟了在温度场和固化度场变化的情形下的树脂流动模式,揭示热传递和固化反应是如何相互影响的.计算表明,在纤维增强体被加热的情况下,黏性流体的热扩散对整个工艺过程有很大影响.Mal 等^[4]通过改进的 SUPG(streamline up-wind/Petrov-Galerkin)方法对树脂流动过程进行了二维非等温数值模拟.Shojaei 等^[5-6]基于结构化网格运用控制体/有限元方法(control volume/finite element method,简称 CV/FEM)对树脂流动过程进行了三维非等温模拟.Cheung 等^[7]运用有限元方法建立了树脂流动的三维非等温模型,计算了树脂前锋位置以及压力场、温度场,但计算结果与实验相比较还有一定的误差,计算时间也较长.Antonelli 等^[8]根据固-液混合理论,建立了多孔介质流体流动的温度耦合模型.Chen 等^[9]在研究 RTM 成型的数值模拟中,考虑了温度影响和固化反应对填充过程的影响,基于 CV/FEM 建立了数学模型.徐晶磊等^[10]详尽地介绍了基于 Eikonal 方程构造出类似 Euler 形式的输运方程在直角坐标系下的求

* 收稿日期: 2015-11-02; 修订日期: 2015-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(面上项目)(51275251)

作者简介: 施飞(1973—),男,讲师,博士(通讯作者. E-mail: nbut_shifei@163.com).

解过程,使用隐式 LUSGS 时间推进和迎风空间离散,成功应用该壁面距离求解方法计算了几个含 1-1 对应网格和重叠网格的复杂外形。

本文以 Darcy 方程为基础,研究基于树脂浸润多孔介质的低压成型方法,能量方程和固化反应方程在空间上采用三维一阶迎风格式进行离散,在时间上采用全隐式积分方案,通过与已经发表的数据进行比较,证明了本文方法的正确性,随后讨论了一些影响温度场的因素。

1 温度场控制方程

成型过程不仅要考虑树脂流动,还要计算树脂与模具和纤维增强体之间的热交换以及化学反应所引起的内热源,温度场的变化对成型过程有着重要的影响,如图 1 所示。

在树脂基复合材料成型过程中,随着温度的升高,树脂发生固化,而在固化过程中也伴随有放热,导致模具内的温度场发生变化。另一方面,由于树脂温度与固化度的变化,也改变了树脂黏度,从而使得树脂的流动模式发生改变,并最终影响了温度场的分布。因此,在树脂基复合材料传递成型过程中,树脂与模具和纤维增强体材料之间发生复杂的热传递,影响因素甚多,因此在建立能量方程时需要进行简化。研究者采用了如下简化假设:

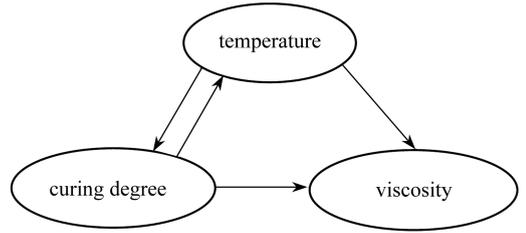


图 1 温度、固化度和黏度三者之间的关系
Fig. 1 The relationship between temperature, curing degree and viscosity

- ① 在每一个时间步长内,模具壁保持恒定温度;
- ② 在固化过程中,化学物质之间发生物质扩散时,黏性耗散被忽略不计。

在目前的数值研究中,比较常用的能量方程分为两大类^[11],即两相模型和平衡模型。对于两相模型来说,树脂的温度场和增强体的温度场是分别计算的;对于平衡模型来说,假定模具型腔内任何一点处树脂的温度与纤维增强体的温度是相等的,即 $T_r = T_f = T$ 。在实践中,虽然两相模型是比较精确的,但参数很难测定,计算结果可信度比较低;而平衡模型虽然在描述问题上有所欠缺,但从计算结果与实际情况的比较来看,两者相差不大,而且,由于只有一个微分方程,缩短了计算时间。故在本研究中采用平衡模型方程。方程左边第一项描述了树脂和纤维增强体的能量变化,第二项描述树脂的热对流;右边第一项是树脂和增强体在厚度方向上的整体热传导,第二项是树脂固化过程产生的内热源。其形式如下:

$$[\phi\rho_r c_{pr} + (1 - \phi)\rho_f c_{pf}] \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_r c_{pr} \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k_{lx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_{ly} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_{lz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \phi \dot{s}, \quad (1)$$

式中, ρ_r 是树脂密度, c_{pr} 是树脂的比热容, ρ_f 是纤维密度, c_{pf} 是纤维增强体的比热容, \dot{s} 是固化时产生的热量, ϕ 是纤维增强体的孔隙率, u, v, w 分别是树脂在 x, y, z 这 3 个方向的流动速度, k_{lx}, k_{ly}, k_{lz} 分别是在 x, y, z 这 3 个方向的树脂和增强体整体热传导系数,其计算表达式为^[11]

$$k_{lx} = \frac{k_{rx} k_{fx}}{k_{rx} W_f + k_{fx} W_r},$$

式中

$$W_r = \frac{\phi/\rho_f}{\phi/\rho_f + (1 - \phi)/\rho_r}, W_f = 1 - W_r,$$

其中, k_{rx} , k_{fx} 分别是树脂和纤维在 x 方向的热传导系数. 经过 x, y, z 坐标轮换, 便可得到 k_{lx} , k_{ly} , k_{lz} .

其边界条件:

- ① 入口: $T = T_{r0}$, 下标 $r0$ 表示树脂注入温度;
- ② 流动前沿: $T = T_f$ 或者 $k_l \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{ff} = (1 - \phi) \rho_f c_{pf} \mathbf{u}_n (T_{f0} - T)$;
- ③ 模具壁: $T = T_m$, 下标 m 表示模具.

对于第二个温度边界条件, Antonelli 等^[8] 认为常数边界条件和平衡温度条件最终能导出相等的数值结果.

2 其他控制方程

1) 树脂在流动过程中也必须遵循连续性方程:

$$\phi \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot \boldsymbol{\nu}, \quad (2)$$

式中, t 是时间, $\nabla \cdot \boldsymbol{\nu}$ 表示 $\boldsymbol{\nu}$ 散度.

其边界条件:

- ① 模腔壁: $\partial p / \partial \mathbf{n} = 0$, \mathbf{n} 为模具型腔壁的外法线矢量;
- ② 树脂注射孔: 如果采用等压注射 $p = p_0$, 如果采用等流量注射 $u = u_0$;
- ③ 流动前锋: 如果非抽真空则 $p = 0$, 否则 p 等于真空度;
- ④ 树脂前锋相交: $p_1 = p_2$.

2) 树脂的流动速度场在宏观上遵循 Darcy 方程:

$$\boldsymbol{\nu} = -\frac{1}{\mu} \mathbf{K} \nabla P, \quad (3)$$

式中, $\boldsymbol{\nu}$ 是 Darcy 速度, 与观察到的流体“宏观”速度 $\boldsymbol{\nu}_r$ 有区别, 两者之间相差一个增强体的孔隙率 ϕ 的比值, 即 $\boldsymbol{\nu}_r = \boldsymbol{\nu} / \phi$, 表明观察到的流体“宏观”速度要比 Darcy 速度要快; μ 是树脂黏度; \mathbf{K} 是增强体渗透率; ∇P 是树脂的压力梯度向量. 式(3)表明流体流动的速度与流体压力梯度成正比.

3) 在树脂传递成型过程中, 树脂会发生固化反应, 各组分遵循组分守恒方程^[12]:

$$\phi \frac{\partial \alpha}{\partial t} + u \frac{\partial \alpha}{\partial x} + v \frac{\partial \alpha}{\partial y} + w \frac{\partial \alpha}{\partial z} = \phi f(\alpha, T_r), \quad (4)$$

式中, α 是树脂的固化度, $f(\alpha, T_r)$ 是树脂的化学反应速率, 即 $f(\alpha, T_r) = \partial \alpha / \partial t$.

其边界条件:

- ① 入口: $\alpha = \alpha_0$;
- ② 被填充的模具内: $\frac{d}{dt}(\omega \alpha) = \omega f(\alpha, T_r)$, ω 是控制体填充系数.

4) 在传递成型过程中, 树脂发生固化的动力学模型一般采用如下形式^[13]:

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2 \alpha^{m_1})(1 - \alpha)^{m_2}, \quad (5)$$

其中

$$k_1 = A_1 e^{-E_1/(RT)}, \quad k_2 = A_2 e^{-E_2/(RT)},$$

E_1, E_2 是树脂的激活能, m_1, m_2 是常数.

3 控制方程的离散格式

将上述微分控制方程在空间上基于控制体/有限元法进行离散,在空间上基于控制体单元进行积分,在时间上基于全隐式积分方案进行离散,得到各控制方程的离散格式.控制体单元如图 2 所示.

3.1 温度场的离散

对于温度场控制方程的各项在如图 2 所示的控制体内进行积分^[12],结果如下:

1) 瞬时项的积分

$$\int_{\Delta V} [\phi \rho_r c_{pr} + (1 - \phi) \rho_f c_{pf}] \frac{\partial T}{\partial t} dV = \frac{[\phi \rho_r c_{pr} + (1 - \phi) \rho_f c_{pf}] [T - T^0]}{\Delta t} \Delta V. \quad (6)$$

2) 对流项的积分

对于对流项,应用 Gauss 散度定理,在控制体界面上使用一阶迎风格式,故

$$\int_{\Delta V} \rho_r c_{pr} \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) dV = \rho_r c_{pr} T \sum_{N=1}^{N_s} \left\{ -\frac{1}{6V_{ABCD}\mu} \left[\left(k_x \sum_{i=1}^4 (b_i p_i) n_x + k_y \sum_{i=1}^4 (c_i p_i) n_y + k_z \sum_{i=1}^4 (d_i p_i) n_z \right) S_{053} - \left(k_x \sum_{i=1}^4 (b_i p_i) n_x + k_y \sum_{i=1}^4 (c_i p_i) n_y + k_z \sum_{i=1}^4 (d_i p_i) n_z \right) S_{051} \right] \right\}_N. \quad (7)$$

3) 扩散项的积分

对于扩散项,一般使用中心差分格式来离散界面上的变量值,故

$$\int_{\Delta V} \left(k_{Lx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_{Ly} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_{Lz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) dV = \sum_{N=1}^{N_s} \left\{ \frac{T_A - T_C}{|\overline{CA}|} \left[(k_{Lx} n_x^2 + k_{Ly} n_y^2 + k_{Lz} n_z^2)_{051} S_{051} + (k_{Lx} n_x^2 + k_{Ly} n_y^2 + k_{Lz} n_z^2)_{053} S_{053} \right] \right\}_N. \quad (8)$$

4) 源项的积分

$$\int_{\Delta V} \phi \dot{s} dV = \int_{\Delta V} s_T dV = \int_{\Delta V} (s_c + s_p T) dV = s_c \Delta V + s_p T \Delta V. \quad (9)$$

综合式(6)、(7)、(8)和(9),在时间上采用全隐式时间积分方案,最后得到温度场控制方程的三维离散格式,如下:

$$m_c T_C = \sum_{N=1}^{N_s} m_A T_A + m_R, \quad (10)$$

其中

$$m_c = \sum_{N=1}^{N_s} m_A + \frac{[\phi \rho_r c_{pr} + (1 - \phi) \rho_f c_{pf}] \Delta V}{\Delta t} - s_p \Delta V,$$

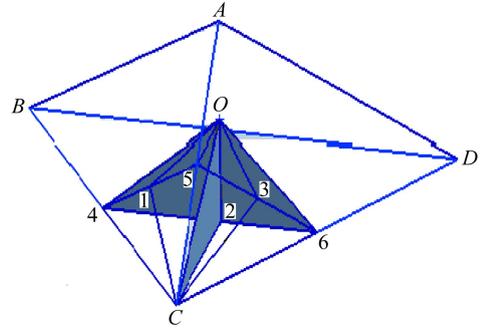


图 2 三维控制体子单元
Fig. 2 The 3D control unit

$$m_R = \frac{[\phi \rho_r c_{pr} + (1 - \phi) \rho_f c_{pf}] \Delta V}{\Delta t} + s_c \Delta V.$$

m_A 的值取决于对流项所使用的离散格式,在本文中,对流项使用了一阶迎风格式,故 m_A 可以根据一阶迎风差分格式计算得出^[14]

$$m_A = D_A + \max(0, -F_A),$$

其中

$$D_A = \left\{ \frac{1}{|CA|} [(k_{Lx} n_x^2 + k_{Ly} n_y^2 + k_{Lz} n_z^2)_{051} S_{051} + (k_{Lx} n_x^2 + k_{Ly} n_y^2 + k_{Lz} n_z^2)_{053} S_{053}] \right\}_N,$$

$$F_A = \rho_r c_{pr} \left\{ -\frac{1}{6V_{ABCD}\mu} \left[\left(k_x \sum_{i=1}^4 (b_i p_i) n_x + k_y \sum_{i=1}^4 (c_i p_i) n_y + k_z \sum_{i=1}^4 (d_i p_i) n_z \right)_{051} S_{051} - \left(k_x \sum_{i=1}^4 (b_i p_i) n_x + k_y \sum_{i=1}^4 (c_i p_i) n_y + k_z \sum_{i=1}^4 (d_i p_i) n_z \right)_{053} S_{053} \right] \right\}_N.$$

3.2 固化反应方程的离散

固化反应方程也做同样的处理,如下:

1) 瞬时项的积分

$$\int_{\Delta V} \phi \frac{\partial \alpha}{\partial t} dV = \phi \frac{\alpha - \alpha^0}{\Delta t} \Delta V. \quad (11)$$

2) 对流项的积分

$$\int_{\Delta V} \left(u \frac{\partial \alpha}{\partial x} + v \frac{\partial \alpha}{\partial y} + w \frac{\partial \alpha}{\partial z} \right) dV =$$

$$\sum_{N=1}^{N_s} \left\{ -\frac{\alpha}{6V_{ABCD}\mu} \left[\left(k_x \sum_{i=1}^4 (b_i p_i) n_x + k_y \sum_{i=1}^4 (c_i p_i) n_y + k_z \sum_{i=1}^4 (d_i p_i) n_z \right)_{051} S_{051} - \left(k_x \sum_{i=1}^4 (b_i p_i) n_x + k_y \sum_{i=1}^4 (c_i p_i) n_y + k_z \sum_{i=1}^4 (d_i p_i) n_z \right)_{053} S_{053} \right] \right\}_N. \quad (12)$$

3) 源项的积分

$$\int_{\Delta V} \phi f(\alpha, T_r) dV = \int_{\Delta V} f_\alpha dV =$$

$$\int_{\Delta V} (f_c + f_p \alpha) dV = f_c \Delta V + f_p \alpha \Delta V. \quad (13)$$

最终综合式(11)、(12)和(13)得到离散格式如下:

$$n_C \alpha_C = \sum_{N=1}^{N_s} n_A \alpha_A + n_R, \quad (14)$$

其中

$$n_C = \sum_{N=1}^{N_s} n_A + \frac{\phi \Delta V}{\Delta t} - f_p \Delta V,$$

$$n_R = \frac{\phi \Delta V}{\Delta t} + f_c \Delta V, \quad n_A = \max(0, -F_A),$$

$$F_A = \left\{ -\frac{1}{6V_{ABCD}\mu} \left[\left(k_x \sum_{i=1}^4 (b_i p_i) n_x + k_y \sum_{i=1}^4 (c_i p_i) n_y + k_z \sum_{i=1}^4 (d_i p_i) n_z \right)_{051} S_{051} - \left(k_x \sum_{i=1}^4 (b_i p_i) n_x + k_y \sum_{i=1}^4 (c_i p_i) n_y + k_z \sum_{i=1}^4 (d_i p_i) n_z \right)_{053} S_{053} \right] \right\}_N.$$

3.3 计算时间步长的选择

时间步长采用显式算法计算是比较合适的,其原因是隐式算法虽然有可能节约计算时间,但是隐式算法很难保证对于每一个控制体都做到质量守恒,会降低计算精度.而显式算法则是在一个时间步长内保证一个或几个控制体同时充满,流体进出控制体是守恒的,所以本文采用显式算法.

在显式算法中,一般将时间步长设定为:在所有即将被填充的控制体中,一个或者几个控制体同时被树脂充满所需要的时间步长 Δt_{\min} , 即

$$\Delta t_{\min} = \min \{ t_1, t_2, \dots, t_n \},$$

式中, t_1, t_2, \dots, t_n 是在该时刻流动前沿所有控制体将被填满所需要的时间.

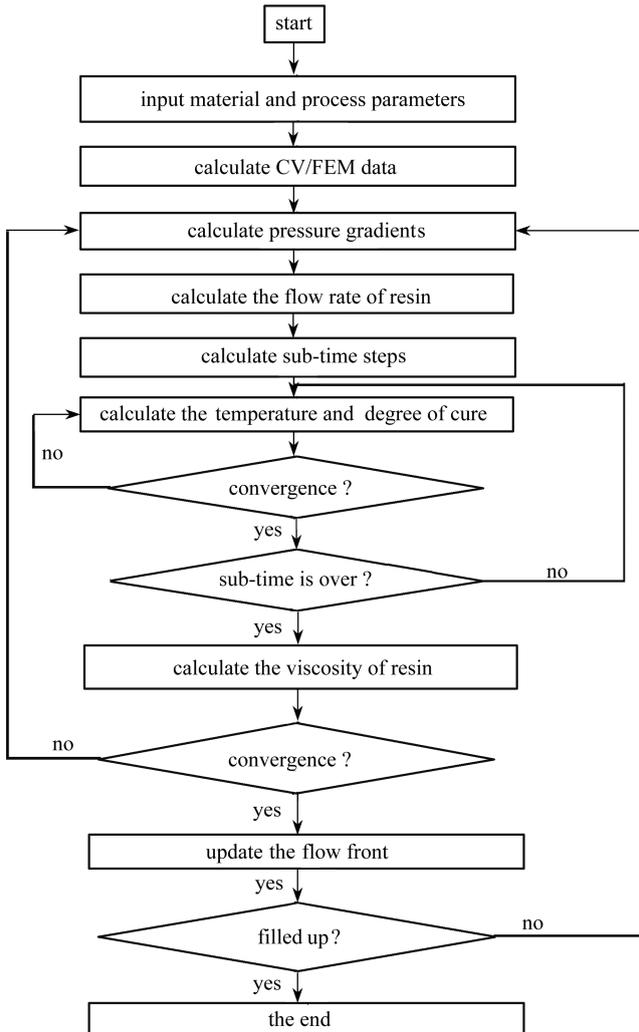


图 3 计算流程图

Fig. 3 The flow chart for calculation

4 案 例

对控制方程进行离散后,本文设计了计算流程,如图 3 所示,并编写了计算代码.图 4 是将使用案例的模型形状以及所划分的网格.计算中所使用到的树脂与纤维的相关参数见表 1.

计算表明,树脂填充的时间是 11 s 左右,与已经发表的文献[6]中的数据是一致的.图 5 实线和虚线为 A 点和 B 点的温度变化历史,三角形和四边形符号为文献[6]所提供的数据.比较发现,两者基本是一致的,说明了数值计算是正确的.

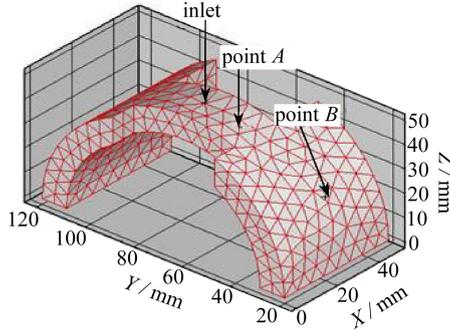


图 4 模型形状和四面体网格

Fig. 4 The model geometry and the tetrahedral mesh

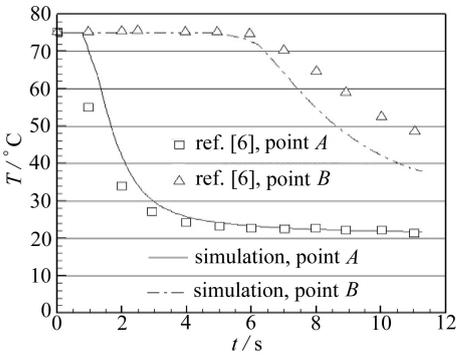


图 5 A 点和 B 点的温度曲线

Fig. 5 The temperature curves at points A and B

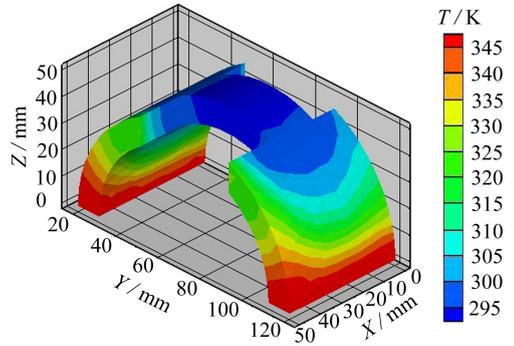


图 6 结束时整体温度分布

Fig. 6 The final temperature field

表 1 树脂和玻璃纤维的参数^[6]

Table 1 Parameters of the resin and glass fiber

parameter	value	parameter	value
$\rho_f / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 560	$\mu_0 / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	2.78×10^{-4}
$\rho_r / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 100	$E_\mu / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	18 000
$k_f / (\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	0.033 5	α_g	0.1
$k_r / (\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	0.168	d_1	1.5
$c_{pf} / (\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$	670	d_2	1.0
$c_{pr} / (\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$	1 680	$A_1 / (\text{s}^{-1})$	$3.783 3 \times 10^5$
$(k_x = k_y = k_z) / \text{m}^2$	2×10^{-9}	$A_2 / (\text{s}^{-1})$	$6.783 3 \times 10^5$
ϕ	0.7	$E_1 / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	54 418
$\Delta H / (\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$	1.54×10^8	$E_2 / (\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	50 232
m_1	0.3	m_2	1.7

5 结果讨论

1) 预测的成型结束时复合材料温度场分布如图 6 所示.通过该图可以看出,复合材料的整体温度比较不均匀,呈现了梯度分布.因此,需控制固化阶段的温度设置,以保证制品温度的均匀性,减少因温度不均匀性所产生的变形和内应力.

2) 图 7 是不同纤维孔隙率的情况下 A 点和 B 点的温度变化历史.由图可以看出,随孔隙率增大,复合材料的整体温度也随之增加.其原因在于随纤维孔隙率增大,多孔介质中的树脂含量增多,固化反应热增多,使得型腔内温度升高,但在注入口附近,却由于低温树脂的注入,温度的变化相对较小.

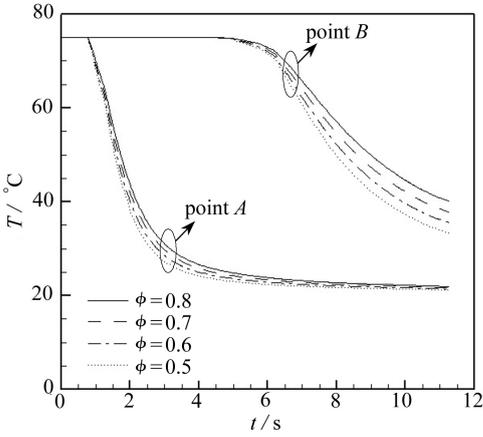


图 7 在不同孔隙率时 A 点和 B 点的温度历史曲线

Fig. 7 The temperature curves at points A and B for different porosities

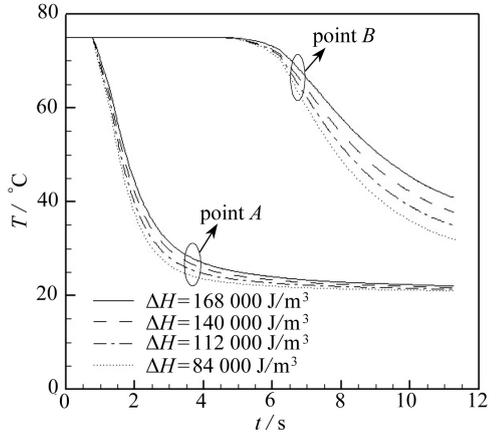


图 8 A 点和 B 点在不同的树脂反应热下的温度历史曲线

Fig. 8 The temperature curves at points A and B for different reaction heats

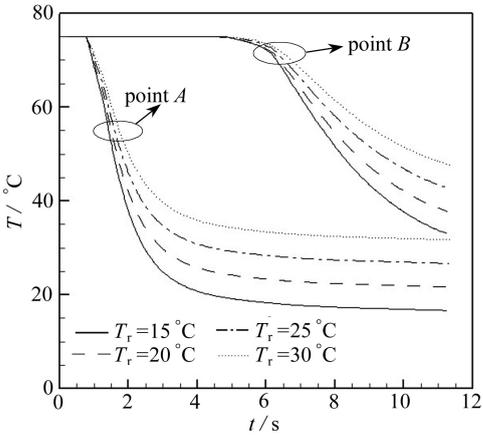


图 9 不同树脂注入温度下的 A 点和 B 点的温度历史曲线

Fig. 9 The temperature curves at points A and B for different initial inlet temperatures

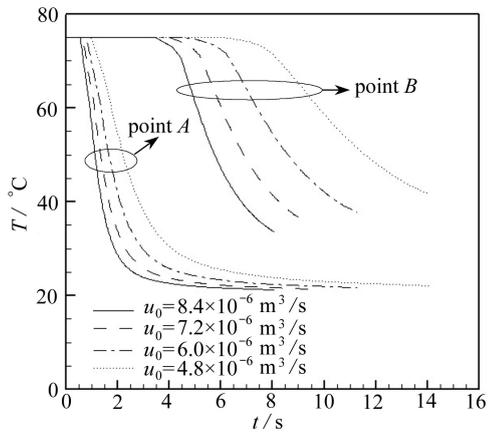


图 10 不同树脂注入流量下的 A 点和 B 点的温度历史曲线

Fig. 10 The temperature curves at points A and B for different fluxes

3) 树脂聚合过程的反应热对填充过程的影响与纤维孔隙率的作用相同.固化反应热使型腔内的温度发生变化.由图 8 看出,随着树脂反应热的增大,复合材料的温度提高了,且在远离注入口处温度变化明显,而在接近注入口处其作用较弱.

4) 树脂的注入温度对复合材料的温度有较大的影响.图 9 为在不同的树脂注入温度下 A 点和 B 点温度变化的历史.由图看出,较高的注入温度对整个复合材料温度有较大作用,且比前面所提到的因素影响作用要大.

5) 树脂的注入流量也是工艺设计的一个重要因素.图 10 是不同树脂注入量下监控点处

的温度变化历史,可以看出随注入流量增大,低温树脂的注入可以较大程度地改变复合材料温度,相对来说,在远离注入口处的作用更明显。

6 结 论

本文通过研究树脂传递成型过程中的温度场,发现温度场不仅仅影响了树脂浸润多孔介质的过程,而且本身也受到多孔介质的孔隙率、树脂反应热、树脂注入温度和树脂注入流量等因素的影响。

1) 在成型过程中,浇口处温度低而周围温度高,呈梯度分布。因此,在模具温度设置时,也应当作反向梯度分布,以保证制品温度均匀。

2) 在这些作用因素中,树脂的注入温度对复合材料的温度场分布的影响比其他的因素要明显得多。因此,在实践中,通过改变树脂的注入温度能更好地控制复合材料成型后温度场的分布,从而提高成型质量。

3) 在这些影响因素中,浇口处由于受到新鲜树脂的注入而作用不明显,在远离浇口处则作用效果明显得多,因此,在温度场测量时,要以远离浇口处的数据为准。

参考文献(References):

- [1] Rudd C. Preform processing for high volume resin transfer moulding(RTM)[D]. PhD Thesis. Nottingham: University of Nottingham, 1989.
- [2] Kendall K N. Mould design for high volume resin transfer moulding[D]. PhD Thesis. Nottingham: University of Nottingham, 1991.
- [3] Abbassi A, Shahnazari M R. Numerical modeling of mold filling and curing in non-isothermal RTM process[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, **24**(16): 2453-2465.
- [4] Mal O, Couniot A, Dupret F. Non-isothermal simulation of the resin transfer moulding process[J]. *Composites: Part A*, 1998, **29**(1/2): 189-198.
- [5] Shojaei A, Ghaffarian S R, Karimian S M H. Three-dimensional process cycle simulation of composite parts manufactured by resin transfer molding[J]. *Composite Structures*, 2004, **65**(3/4): 381-390.
- [6] Shojaei A, Ghaffarian S R, Karimian S M H. Simulation of the three-dimensional non-isothermal mold filling process in resin transfer molding[J]. *Composites Science and Technology*, 2003, **63**(13): 1931-1948.
- [7] Cheung A, Yu Y, Pochiraju K. Three-dimensional finite element simulation of curing of polymer composites[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2004, **40**(8): 895-912.
- [8] Antonelli D, Farina A. Resin transfer moulding: mathematical modelling and numerical simulations[J]. *Composites: Part A*, 1999, **30**(12): 1367-1385.
- [9] CHEN Ren-liang, LI Ming-cheng. Study of flow and temperature in resin transfer molding process by numerical model[J]. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2003, **20**(2): 165-171.
- [10] 徐晶磊, 阎超, 范晶晶. 通过求解输运方程计算壁面距离[J]. 应用数学和力学, 2011, **32**(2): 135-143. (XU Jing-lei, YAN Chao, FAN Jing-jing. Computations of wall distances by solving a transport equation[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2011, **32**(2): 135-143. (in Chinese))
- [11] Rudd C D, Long A C, Kendall K N, Mangin C. *Liquid Molding Technologies*[M]. England: Woodhead Publishing Limited, 1997.
- [12] Chow P, Cross M, Pericleous K. A nature extension of the conventional finite volume method

- into polygonal unstructured meshes for CFD application[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 1996, **20**(2): 170-183.
- [13] Kamal M R, Sourour S. Kinetics and thermal characterization of thermoset cure[J]. *Polymer Engineering & Science*, 1973, **13**(1): 59-64.
- [14] 张红娜, 宇波, 王艺, 魏进家, 李凤臣. 对论文“任意精度的三点紧致显格式及其在 CFD 中的应用”的评论[J]. *应用数学和力学*, 2009, **30**(5): 623-630. (ZHANG Hong-na, YU Bo, WANG Yi, WEI Jin-jia, LI Feng-chen. Comments on the paper ‘three-point explicit compact difference scheme with arbitrary order of accuracy and its application in CFD’[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2009, **30**(5): 623-630. (in Chinese))

Numerical Research of Temperature Field During Resin Transfer Molding

SHI Fei¹, CHENG Xiao-min¹, ZHANG Tao-jie¹, DONG Xiang-huai²

(1. School of Mechanical Engineering, Ningbo University of Technology,
Ningbo, Zhejiang 315016, P.R.China;

2. Institute of Forming Technology & Equipment, Shanghai Jiao Tong University,
Shanghai 200030, P.R.China)

Abstract: The temperature field is the most important concern during resin transfer molding of resin-based composite materials. The temperature field deciding the molding process and product quality was investigated through numerical simulation. Some factors influencing the temperature field, such as porosity of the porous media, resin reaction heat, resin injection temperature and resin injection flux, were discussed. In the simulation the 3D 1st-order upwind scheme was applied for spatial discretization, and the implicit scheme was used for time integration. Comparison between the present results and those previous ones proves the correctness and effectiveness of the proposed numerical method. It is also shown that, the resin injection temperature influences the temperature field much more markedly than the other factors, and the factors' effects on the part near the resin inlet are much weaker than those on the parts far away from the inlet, which means more temperature measure points shall be arranged in the zones far away from the inlet to better detect the real temperature field.

Key words: composite; resin transfer molding; temperature field; CFD; numerical analysis

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (General Program)
(51275251)

引用本文/Cite this paper:

施飞, 程晓民, 张韬杰, 董湘怀. 树脂传递成型过程中温度场的数值研究[J]. *应用数学和力学*, 2016, **37**(3): 256-265.

SHI Fei, CHENG Xiao-min, ZHANG Tao-jie, DONG Xiang-huai. Numerical research of temperature field during resin transfer molding[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, **37**(3): 256-265.