

RTM树脂流动模拟及其对 模具设计的意义

Resin Flow Simulation in RTM and Its Significance
to Mould Design

上海交通大学塑性成形系 施 飞 董湘怀



施 飞

讲师,2002年7月至2006年2月在华东交通大学材料成形与控制教研室工作,主要研究方向为模具设计与制造。2006年3月至今在上海交大塑性成形系攻读博士学位。

在复合材料加工中,模具的设计和制造对整个生产过程具有决定性影响。要设计和制造出合理的模具,仅仅依赖经验是不够的,因此国内外都开展了RTM工艺的数值模拟技术研究,利用数值模拟对模具设计方案检验和优化。近年来国外已推出了一些模拟软件,其中比较著名的软件有密西根州立大学的LMPC、福特公司开

在复合材料加工中,模具的设计和制造对整个生产过程具有决定性影响。要设计和制造出合理的模具,仅仅依赖经验是不够的,因此国内外都开展了RTM工艺的数值模拟技术研究,利用数值模拟对模具设计方案检验和优化。

发的CFILL等^[1]。在国内,孙玉敏^[2]等利用RTM模拟仿真系统对风机叶片的RTM充模过程进行了三维模拟,以优化成型工艺方案得到最佳的注射位置、合理的溢料口位置以及选择溢料口的依据,从而设计出合理的模具;邓京兰等^[3-8]详细探讨了RTM成型工艺中树脂流动的充模过程,利用多孔介质流体力学基本理论和Darcy方程对RTM充模过程进行深入的数值分析,建立模拟RTM成型工艺中树脂等温填充过程的数学模型;王秀君^[9]等针对三维异型零件,采用贴体坐标法与有限差分相结合的方法,研究RTM注射工艺的过程;Junying Yang^[10]等提出了在纤维增强体束内采用Brinkman方程描述流动,在纤维束间采用Stokes方程进行描述,从而说明气泡的产生是由于微观和宏观树脂流动速度不一致导致两者的流动前锋

不平行而形成的。上海交通大学塑性成形系^[11]也根据流体力学的基本理论和Darcy方程编写代码模拟非等温过程,取得一定进展。国外的相关研究更为广泛和深入,Akbar Shojaei^[12-22]等利用Darcy方程、守恒方程和能量公式以及固化方程建立数学模型进行模拟,计算出树脂前锋位置以及压力场、温度场等,并与试验结果进行比较,吻合得较好。D. Antonelli^[23]等根据固-液混合理论,建立多孔介质流体流动的温度耦合模型,从而能更精确地描述树脂在填充时的流动模式。通过这些数值模拟可以发现,纤维的渗透率、树脂的黏度和注射压力(或者注射流率)对制定合理的工艺和设计模具是非常重要的。本文运用非结构化四面体网格,结合控制体/有限元(CV/FEM)方法,根据流动控制方程,编写计算代码,对RTM工艺进行三维

实体模拟,探讨其对模具设计的影响。

流动控制方程

为便于说明问题,采用三维等温树脂流动模型。

在RTM工艺中,流体的宏观流动过程可以用Darcy方程很好地描述。Darcy方程可写成以下形式^[1]:

$$v = -\frac{1}{\mu} [k] \nabla P, \quad (1)$$

式中, v 是流体的Darcy速度, ∇P 是流体的压力梯度, $[k]$ 是增强体的渗透率张量, μ 是树脂黏度。RTM工艺的流动过程为一准静态过程,质量守恒方程可写成如下形式:

$$-\nabla \cdot v = 0, \quad (2)$$

这样,方程(1)代入方程(2)得到流动控制方程:

$$\nabla \cdot \left[\frac{[k]}{\mu} \nabla P \right] = 0, \quad (3)$$

其边界条件是:

- (1) 在注射口处,常压注射时 $P = P_0$, 常流率注射时 $V = V_0$;
- (2) 在流动前沿处, $P = 0$;
- (3) 在模具壁处, $\left[\frac{\partial P}{\partial n} \right] = 0$ 。

数值模拟

对于控制方程的离散,一般采用控制体/有限元(CV/FEM)的方法进行。这种方法最大的优点在于计算过程中无需网格的重新划分,大大节约了计算时间并降低了计算误差。在追踪流动前沿的过程中,用参数 f_i 表示控制体是否被填充或者被部分填充。当 $f_i = 1$ 时,表示控制体被完全填充;当 $f_i = 0$ 时,控制体完全没有被填充;当 $1 > f_i > 0$ 时,表示控制体正在被填充,此处为流体流动前沿。

通过填充系数,流动前锋位置就可以确定下来,控制体的填充的状态就可以确定下来。填充系数 f_i 由下式确定:

$$f_i = \frac{Q_i(t) \Delta t_{\min} + f_i^0 V_i}{V_i}, \quad (4)$$

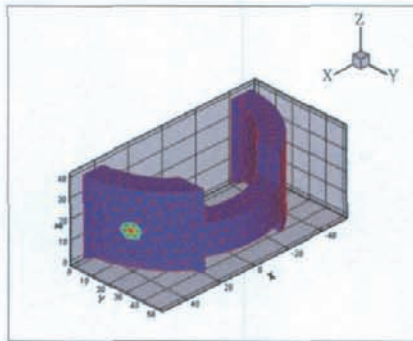


图1 零件形状和注射孔位置

式中, $Q_i(t)$ 为流入该控制体的总的流率, Δt_{\min} 为在所有即将被填充的控制体中花费最少的时间, f_i^0 为前一次的填充系数, V_i 为控制体的体积。

数值计算过程按以下步骤进行:

- (1) 模拟开始,计算单元参数并生成控制体模型与相关控制体参数;
- (2) 充模开始时,假定注射孔所在的控制体首先一次性充满,而在填充过程中,控制体被填充的程度是根据填充系数来确定的;
- (3) 根据控制方程以及边界条件,计算节点压力;
- (4) 根据Darcy方程确定流体运动速度,从而确定下一个时间步长,计算树脂流进每一个流动前锋控

制体的体积,根据公式(4)更新相应的控制体填充系数;

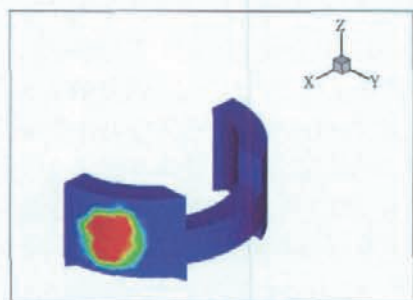
(5) 对新的被填充区域重复步骤(3)、(4),直至所有的控制体填充系数都为1.0,填充过程结束。

计算案例

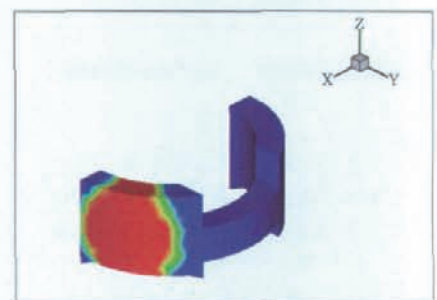
根据流动控制方程和计算步骤,编写了计算程序。

在本案例中,使用的材料为石墨纤维/环氧树脂,模腔形状如图1所示,由于四面体网格对制品形状适应性很强,体现流体的三维实体流特点,故本例中划分了474个四面体单元。

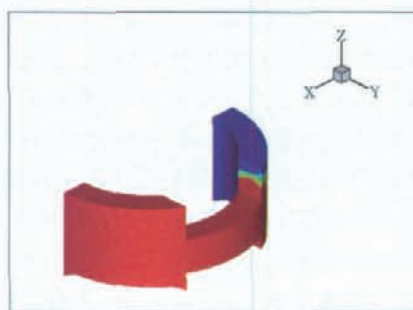
案例1:各向同性的纤维渗透率张量 $k_x = k_y = k_z = 1.2 \times 10^{-8} \text{m}^{-2}$, 树脂粘度 $\mu = 0.5 \text{Pa} \cdot \text{s}$, 恒压注射,注射压力 $P = 0.1 \text{MPa}$ 。在流动模式中会发现流动不是按照制品中心对称的,需要注意。因此为便于观察树脂的流动模式,注射孔坐标为(44.57, 22.67, 20.21),不在中心处。整个注射时间非常短,只有5.68s。图2为预测的树脂流动模式。根据图2可知,树脂最后填充的位置是模具的四周角点,因此,模具的排气孔可



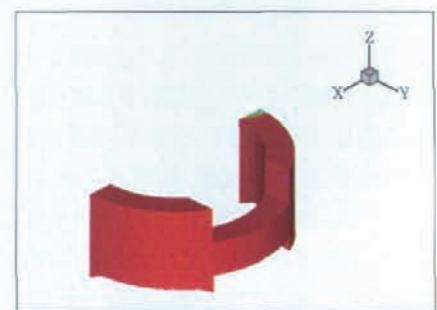
(a) 时间为 0.16s 时



(b) 时间为 0.62s 时

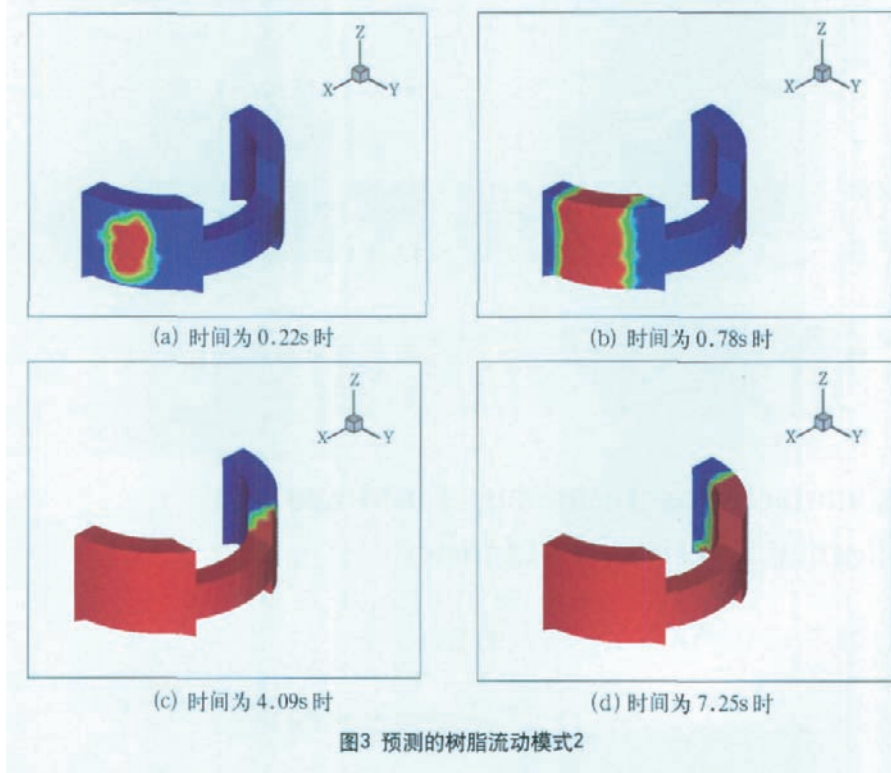


(c) 时间为 2.57s 时



(d) 时间为 5.67s 时

图2 预测的树脂流动模式1



以设置在四周角点附近。

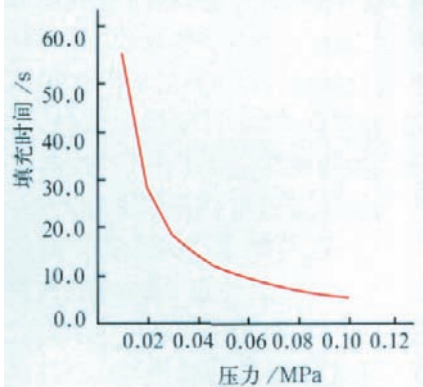
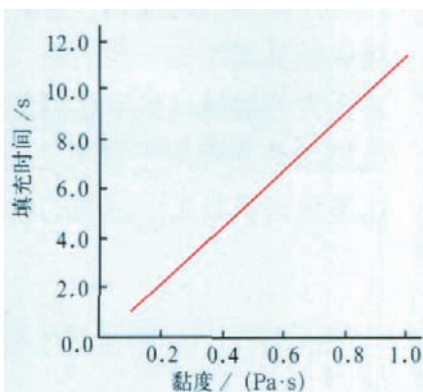
另外,由于在本例中,假定纤维在各个方向上的渗透率是一样的,在理论上,树脂应该以球形方式从注射孔向四周渗透,这样在 $X-Y$ 平面内就表现为圆形,由图2(a)和(b)就可以明显看出这一点。

案例2:改变渗透率,使 $k_p=1.2 \times 10^{-8} \text{m}^2$,其他参数不变。整个注射时间为9.57s,预测的树脂流动模式如图3所示。

对比例1和案例2可以发现,当纤维渗透率发生变化时,不仅树脂填充时间被改变,树脂流动模式也发生了变化,树脂以椭球面形状向外流动。这种树脂流动模式的变化将影响到模具的设计,特别是排气孔的形状和布置,需要引起特别注意。本例中,树脂由球形流动向椭球形流动变化,模具排气孔就不能布置在四周角点,而应与2个外侧面平行,可以设计成一条狭缝,这样才能较好地排气,否则有可能形成干斑或者表面气孔。

关于材料的另一个参数——树脂黏度,经过模拟发现,在不改变其他参

数的情况下,黏度仅改变树脂的填充时间,而对树脂的流动模式没有影响。黏度与填充时间的关系为线性,如图4所示。随黏度的增大,填充时间也会



线性地增大;采用较小的黏度可以减少注射时间,但黏度过低的树脂容易从模具的分模面溢出,导致分模面要求提高或不得不采用复杂的模具设计以阻止树脂的溢出。

注射压力也仅仅是改变树脂的填充时间,而对流动模式没有什么影响,但与黏度的不同在于其与填充时间是非线性关系,如图5所示。在压力比较低的时候,提高注射压力能显著降低填充时间,但到达一定值后,压力的增加对降低填充时间的作用就变小了,对模具强度提出了较高的要求,设计时需要选用更好的材料或者对模具壁加厚,以抵抗较高压力下模具的损坏和变形,因此,可以根据预测的压力-填充时间曲线优化注射压力,减弱对模具强度的要求。

结论

综上所述,可以得到以下结论:

(1) RTM的数值模拟对模具设计非常重要,通过对数值模拟结果的分析,可以得到很多对模具设计非常有帮助的数据,从而指导模具的设计和制造,对可能出现的缺陷进行预测并制定改进方案。

(2) 纤维渗透率的变化不仅改变填充时间,而且可能会引起树脂流动模式的改变,改变了模腔内气体的排出方式,对模具设计影响较大,需要给予足够注意。

(3) 树脂黏度虽然不会改变树脂的流动模式,但对于黏度过低的树脂需要采用合理的模具设计来阻止其溢出。

(4) 注射压力仅会改变填充时间,不会影响树脂的流动模式,与填充时间呈非线性关系,可以据此优化注射压力,减弱对模具强度的要求。

本文有参考文献23篇,由于篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 淡蓝)