第 14 卷 第 2 期 复 合 材 料 学 报 Vol. 14 No. 2
1997 年 5 月 ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA May 1997

片状模塑料模压流动仿真分析

晏石林 梅启林* 沈大荣 吴代华*
(武汉工业大学工程力学系、材料学院*, 武汉 430070)

摘 要 本文采用有限元分步计算方法, 对酚醛片状模塑料(P-SMC) 在模压过程中的流动变形情况进行了计算机仿真模拟, 与试验结果做了对比。编制了相应的有限元计算与后处理软件, 分析了模压料在封闭模具中充满模腔的过程、在一定合模速率下的充模时间以及在一定粘度下的模压成型压力。对 SMC 模压时模具的设计以及优化成型工艺参数具有一定的理论指导意义。

关键词 片状模塑料(SMC), 模压流动, 计算机仿真
中图分类号 TB332, O373

片状模塑料(SMC) 是一种近三十年才发展起来的新型模压材料, 由经树脂糊充分浸渍的短切玻璃纤维(或毡) 组成。由于 SMC 具有机械化程度高、产品质量稳定、原材料利用率高、操作条件好等突出特点, 在汽车、建筑、化工、宇航等领域得到了广泛应用。近年来, 随着对材料防火要求的不断提高, 酚醛片状模塑料(P—SMC) 的研究与应用引起了世界各国的日益关注, 我国也因此将 P—SMC 的研究列为八•五攻关的重点课题。对 SMC 模压流动过程进行计算机模拟, 是优化工艺参数和模具设计的有效方法和手段, 它可以减少模具设计和新产品开发的时间和费用, 减少试制周期, 减少模压制品机械性能的不稳定性, 帮助控制模压件的翘曲、收缩、残余应力, 甚至纤维的取向与分布。总之, 模压料在模腔中的流动行为是决定模压制品质量的最重要的因素。由于计算机模拟技术能预先显示材料及工艺参数改变带来的结果, 因而为消除制品缺陷提供了详尽的信息。

1 GHS 模型及控制方程的导出

一般 SMC 模压制品的几何形状都呈片状, 即厚度与其它两个方向的尺寸相比很小。根据这个特征, Heiber 和 Shen[1] 提出了一个模拟模压料流动的简化模型(简称 GHS 模型)。该模型做了如下几个假设: (1) 模腔在 z 方向薄而平滑, 在 x, y 方向可以是任意的; (2) 模压料厚度 h 是随 x, y 缓慢变化的; (3) 模压料为不可压缩流体, 在 x, y 面内是各向

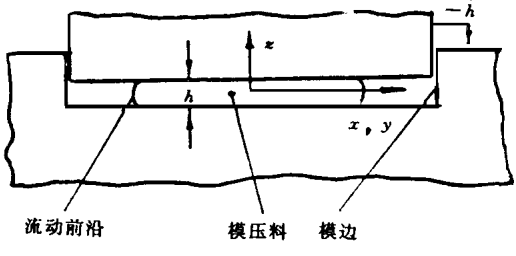

图1 压模断面示意图

本文于 1996 年 5 月 2 日收到修改稿, 1995年 12 月 5 日收到初稿。 国家八•五攻关资助项目

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://ww

同性的, 其粘度仅依赖于应变速率、温度和固化度; (4) 模边界无泄漏。

视 SMC 模压料为广义牛顿流体, 其本构方程为

$$\tau_{ij} = \eta\dot{\gamma}_{ij} \tag{1}$$

式中, τ_{ij}, $\dot{\gamma}_{ij}$ 分别为应力张量和应变率张量; η 为粘度, 是温度 T 、应变速率 $\dot{\gamma}$ 和固化度 C 的函数

$$\eta = \eta(T\dot{\gamma}C) \tag{2}$$

由于模压料厚度 h 远小于 x, y 方向的尺寸, 运动方程中许多项可以忽略, 可以写为

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad , \quad \frac{\partial P}{\partial y} = \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \tag{3}$$

式中, P 为模压料流体压力。将上式积分并考虑到在 $z = 0$ 处剪应力为零, 得

$$\tau_{xz} = \frac{\partial P}{\partial x} \cdot z \quad , \quad \tau_{yz} = \frac{\partial P}{\partial y} \cdot z \tag{4}$$

设 u, v 为模压料沿 x, y 向流动的速度, 有

$$\dot{\gamma}_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} \quad , \quad \dot{\gamma}_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} \tag{5}$$

即任意一点的流动速度为

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}\int_{\frac{h}{2}} \frac{z}{\eta}\mathrm{d}z, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}\int_{\frac{h}{2}} \frac{z}{\eta}\mathrm{d}z \tag{6}$$

在厚度方向的平均速度为

$$\left.\begin{aligned} \bar{u} &= \frac{1}{h}\int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} u\mathrm{d}z = -\frac{S}{h}\frac{\partial P}{\partial x} \\ \bar{v} &= \frac{1}{h}\int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} v\mathrm{d}z = -\frac{S}{h}\frac{\partial P}{\partial y} \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

式中:

$$S = \int_{\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{1}{\eta}\left(\frac{h^2}{4} - z^2\right)\mathrm{d}z \tag{8}$$

对不可压缩流体的连续性方程沿厚度积分得

$$\frac{\partial}{\partial x}(h\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(h\bar{v}) + \dot{h} = 0 \tag{9}$$

式中, $\dot{h}$ 为合模速度。将(7) 代入(9) 得

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(S\frac{\partial P}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(S\frac{\partial P}{\partial y}\right) - \dot{h} = 0 \tag{10}$$

此即为描述模压料压力分布的控制方程, 边界条件为

$$P|_{\Gamma} = 0 \quad , \quad \frac{\partial P}{\partial x}\Big|_{\Gamma_x} = 0 \quad , \quad \frac{\partial P}{\partial y}\Big|_{\Gamma_y} = 0 \tag{11}$$

这里, Γ 为模压料的自由边界; Γ_x, Γ_y 分别为垂于 x 和 y 轴的模具边界。

2　模拟思想与有限元程序设计

2.1　模拟思想

一般说来, 起始铺放的 SMC 模压料都很少或不会铺满整个模腔, 在模腔填充过程中, 部分物料通过流动才能到达模边界, 当物料与全部模边界接触时, 就完成了模腔的填充过程。若通过适当的方法求解方程(10), 即可得到某一时刻模压料的压力分布, 然后用方程(7) 求得模压料各处的流动速度和方向, 就可得到该时刻模压料的变形和形状。

SMC 模压料在模腔中的流动过程是一个非线性问题。一方面是 SMC 在模压时变形相当大; 另一方面, 模压料的粘度 η 随应变速率、温度和固化度的可变性, 使得其本构关系是非线性

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www

的。因此,本文采用有限元分步求解的方法,即将模压过程分成若干个时间步长,在每个时间步长内,模压料的变形可看作是小变形的,且 $\dot{\gamma}$, T, C 也可近似地处理为不变的,因而在每个时间步长内模压料的粘度 η 可视为常数(各时间步内 η 可以不同)。每次计算所需的节点坐标都以上步的计算结果为基础,这样就可以得到模压料中任意点的运动轨迹,从而也反映出了模压料的流动规律及任一时刻模压料的形状,并可以计算出充满模腔所需的时间和压力。

2.2 有限元格式

对于每一个时间步,模压料粘度 η 可视为常数,则控制方程(10)可简化为

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}=\frac{\dot{h}}{S} \tag{12}$$

式中:

$$S=h^3/12\eta \tag{13}$$

考虑到三角形单元具有较强的几何边界适应性,本文采用三角形单元作为基本单元。因为计算量不太大,其精度可以通过加密网格的办法得到提高。

2.2.1 单元分析

以节点压力 P 为基本未知量,对于任一单元,节点编号为 i,j,m。取试函数:

$$P^e(x,y)=\sum_{i,j,m}N_i(x,y)P_i^e=[N]\{P\}^e \tag{14}$$

式中: $\{P\}^e=[P_iP_jP_m]^{\mathrm{T}}$ 为节点压力列阵, $[N]=[N_iN_jN_m]$ 为形函数矩阵,且

$$N_i=\frac{1}{2A}(a_i+b_ix+c_iy)\qquad(i,j,m) \tag{15}$$

其中:

$$a_i=x_iy_m-y_ix_m,\quad b_i=y_j-y_m,\quad c_i=x_m-x_j\qquad(i,j,m) \tag{16}$$

A 为单元面积

$$A=\frac{1}{2}(c_mb_j-c_jb_m) \tag{17}$$

由式(7)得速度为

$$\begin{Bmatrix}\bar{u}\\ \bar{v}\end{Bmatrix}^e=-\frac{S}{h}\begin{Bmatrix}\frac{\partial}{\partial x}\\ \frac{\partial}{\partial y}\end{Bmatrix}P^e=-\frac{S}{h}[B]\{P\}^e$$

式中:

$$[B]=\begin{bmatrix}\frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_j}{\partial x} & \frac{\partial N_m}{\partial x}\\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_j}{\partial y} & \frac{\partial N_m}{\partial y}\end{bmatrix}=\frac{1}{2A}\begin{bmatrix}b_i & b_j & b_m\\ c_i & c_j & c_m\end{bmatrix} \tag{18}$$

所以

$$\begin{Bmatrix}\bar{u}\\ \bar{v}\end{Bmatrix}^e=-\frac{S}{2Ah}\Big[\sum_{i,j,m}b_iP_i^e\quad\sum_{i,j,m}c_iP_i^e\Big]^{\mathrm{T}} \tag{19}$$

显然单元的位移为

$$\begin{Bmatrix}\Delta X\\ \Delta Y\end{Bmatrix}^e=\Delta t\begin{Bmatrix}\bar{u}\\ \bar{v}\end{Bmatrix}^e=-\frac{S\Delta t}{2Ah}\Big[\sum_{i,j,m}b_iP_i^e\quad\sum_{i,j,m}c_iP_i^e\Big]^{\mathrm{T}} \tag{20}$$

式中, Δt 为时间步长, ΔX, ΔY 为 x, y 向位移。

对于方程(12),取泛函

$$\Pi^e=\int_{\Omega^e}\Big[\frac{1}{2}\Big(\frac{\partial P}{\partial x}\Big)^2+\frac{1}{2}\Big(\frac{\partial P}{\partial x}\Big)^2+\frac{\dot{h}}{S}P\Big]\mathrm{d}\Omega \tag{21}$$

将

$$\Big(\frac{\partial P}{\partial x}\Big)^2+\Big(\frac{\partial P}{\partial y}\Big)^2=\Big[\frac{\partial P}{\partial x}\ \frac{\partial P}{\partial y}\Big]\Big[\frac{\partial P}{\partial x}\ \frac{\partial P}{\partial y}\Big]^{\mathrm{T}}=(\{P\}^e)^{\mathrm{T}}[B]^{\mathrm{T}}[B]\{P\}^e$$

及(14)代入(21)得

$$\Pi^e=\frac{1}{2}(\{P\}^e)^{\mathrm{T}}[k]\{P\}^e+\frac{\dot{h}}{S}\int_{\Omega^e}[N]\{P\}^e\mathrm{d}\Omega \tag{22}$$

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://ww

式中

$$[k] = \int_{\Omega_e}[B]^{\mathrm{T}}[B]\,\mathrm{d}\Omega = [B]^{\mathrm{T}}[B]A = \begin{bmatrix} k_{ii} & k_{ij} & k_{im} \\ & k_{jj} & k_{jm} \\ \text{对称} & & k_{mm} \end{bmatrix} \tag{23}$$

为单元特性矩阵, 其中

$$k_{rs} = \frac{1}{4A}(b_r b_s + c_r c_s) \qquad (r, s = i, j, m) \tag{24}$$

由 $\dfrac{\partial \Pi^e}{\partial \{P\}^e} = 0$, 有

$$[k]\{P\}^e = \{F\}^e \tag{25}$$

式中 $\{F\}^e$ 相当于等效节点荷载列阵, 其中 $\{I\} = [1\ 1\ 1]^{\mathrm{T}}$ 为单位列阵。

$$\{F\}^e = -\frac{\dot{h}}{S}\int_{\Omega_e}[N]^{\mathrm{T}}\mathrm{d}\Omega = -\frac{\dot{h}}{S}\frac{A}{3}\{I\} \tag{26}$$

2.2.2　整体分析

将 $[k]$, $\{P\}^e$, $\{F\}^e$ 逐个累加到总体系数矩阵的相应位置, 可得到总体支配方程

$$[K]\{P\} = \{F\} \tag{27}$$

2.3　程序设计

本程序共分为两部分, 第一部分为有限元计算程序, 共有12个程序段, 包括一个主程序段和11个子程序段; 第二部分为后处理程序, 可以将每一个时间步的计算结果通过图形方式在屏幕上显示出来。有限元计算程序中, 修正后的总体支配方程采用 Crout 直接解法。由于采用三节点三角形单元计算出来的速度和位移是单元的平均速度和位移, 而模压料的流动情况是用网格的扩展来描述的, 所以有必要计算节点的位移。本程序中节点位移采用绕节点单元位移的面积加权平均来计算, 边界节点位移采用线性外推求得。

对于有边界的封闭模腔的模压流动模拟, 程序中按照边界条件(11), 根据模压料流动前沿是否到达了模具边界而设置了对约束情况进行自动修正处理的功能。

3　算例分析

3.1　无模边流动模拟及与试验结果的比较

结合所承担的国家八• 五攻关项目, 选取 P—SMC 进行分析。模压料尺寸为60× 120× 5mm, 因为对称只取1/4进行计算模拟。首先进行网格剖分, 见图2, 根据其节点、单元和边界约束信息, 形成一个数据文件, 运行时键盘输入粘度η、合模速率$\dot{h}$和时间步长Δt, 此三个参

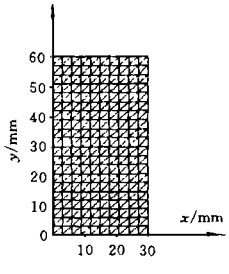

图2

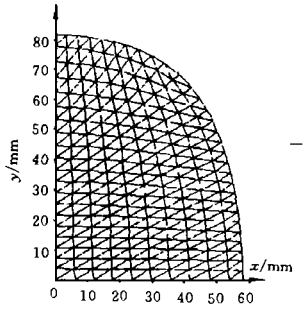

图3

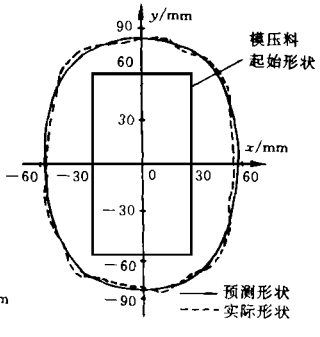

图4

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://ww

数在各时间步可以根据实际情况变化。为了便于比较, 本文的模压试验均在22℃常温下, 以0.02mm/s的恒定合模速度进行。在该温度下, 采用平行板双剪试验预先测得P—SMC的粘度为$\eta = 3.5\times10^5$Pa•s, 按此参数值计算得到在$t = 150$s时的网格扩展如图3所示, 它反映了模压料在该时刻的变形流动情况。试验时, 将P—SMC试样置于两块钢板中, 在试验机上以恒定压缩速度(0.02mm/s)加压, 当$t = 150$s时停机, 立即取出试样并画出边界形状。图4为模拟结果与实际形状的比较。可见, 根据GHS模型, 采用本文的方法及程序对P—SMC的模压流动进行模拟预测, 其结果是令人满意的。

3.2 在封闭模腔中模压料的流动模拟

通过对无模边模压流动的计算模拟结果表明, GHS模型能较好地描述SMC的模压流动情况。下面, 本文对在封闭模腔中模压料流动情况和充模过程做了理论计算模拟。

取与上例相同的模压料及其尺寸, 模腔尺寸为80×150mm, 计算得到模压料充满模腔的过程如图5。

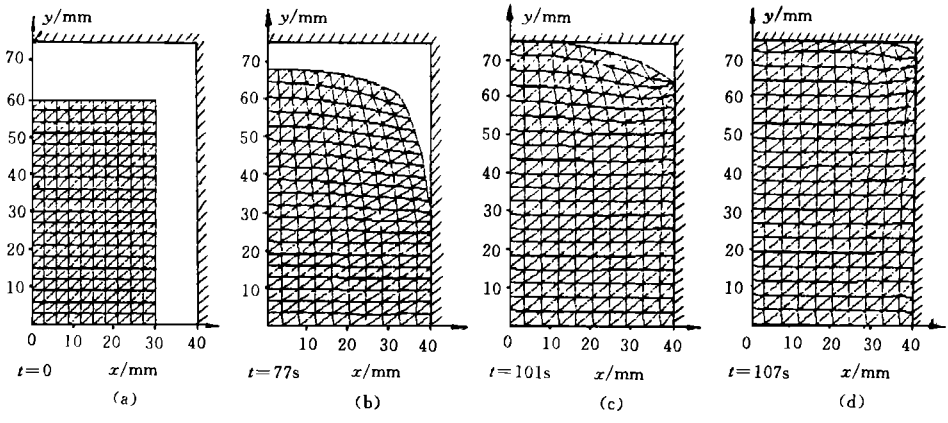

图5 模压填充过程

通过此算例同时也得出: 在合模速率$\dot{h} = -0.02$mm/s时, 模压料完成充模约需108s, 在粘度$\eta = 3.5\times10^5$Pa•s时, 充满模腔所需施加的压力约为15MPa。

4 结 语

通过对P—SMC试样在相同的环境及模压条件下分别进行计算机模拟流动分析和实际流动试验分析, 说明本文采用GHS模型实现对SMC的模压流动情况进行计算机模拟, 其结果是令人满意的。对于实际产品的模压成型, 因为在充模过程中温度会有所变化, 但是只要预先根据充模过程的温度—时间曲线和SMC的粘度—温度曲线找到SMC粘度在充模时随时间的变化关系(实际上充模时间通常较短, 粘度在充模过程中变化并不显著), 则也可以类似地计算出模压料在模腔中每一时刻的流动位置, 充满模腔的时间以及预测模压成型压力。当然, 对实际产品的模压流动模拟还有必要进一步研究完善和实验验证, 但是本文对此进行的初步研究工作, 其意义是显然的, 它对于模具设计, SMC铺料的方式以及压制工艺参数的最终确定等都有一定的理论指导作用。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://ww

参 考 文 献

1 Heiber C A, Shen S F. A finite element/finite difference simulation of the injection mold filling process. J Non-Newtonian Fluid Mech, 1980, 7: 1～32

2 Lee C C, Folgar F, Tucker C L. Simulation of compression molding for fiber-reinforced thermosetting polymers. J Eng for Indu, 1984, 106: 114～125

3 Castro J M, Griffith R M. Sheet molding compound compression-molding flow. Poly Eng Sci, 1989, 29: 632～638

4 [英] 监凯维奇 O C 著, 尹泽勇等译. 有限元法(下册). 北京: 科学出版社, 1985. 446～452

SIMULATION AND ANALYSIS OF SHEET MOLDING COMPOUND COMPRESSION-MOLDING FLOW

Yan Shilin　Mei Qilin　Sheng Darong　Wu Daihua

(Wuhan University of Technology, Wuhan 430070)

Abstract　Automatic computer simulation of phenolic sheet molding compound (P-SMC) compression-molding flow is realized by finite element step-by-step computing method, and compared with the result of experiments. Finite element computing and post analysis programs have been written. The compression mold filling process, time and pressure needed of P-SMC in a closed mold are analyzed. It will be of theoretical significance to mold design and to the optimization of the technological parameters in the compression molding of sheet molding compound.

Key words　sheet molding compound, compression flow, computer simulation

---

(上接第96页)

二年前,我因 SMC 的关系访问过中国,当时中国在1985年前后曾有 SMC 化的机会,很多地方曾想引进压机设备,可是那以后一点也没有发展,直到如今。在这次访问中得以看到上海、哈尔滨、北京 FRP 研究所的 SMC 成型制品,知道了当前的技术水平。

展示会上,在北京玻璃钢研究设计院技术基础上设立的北京汽车玻璃钢制品总公司展示了 SMC 制的汽车部件等,该公司和另一公司——重庆益民机械厂(中国兵器工业总公司)展台的制品有相当高的水平。

远间　关于中国 FRP 产业的规模,在中国玻璃钢工业协会陈博秘书长发表的(1995年的 FRP 产量)16万吨中,曾有人提出过是否包括台湾的产量,实际上先前日本 FRP 协会原料部会成员访台交流时已经搞清楚:台湾95年的 FRP 产量为5.71万吨,不包括在中国统计数字之中。

日本95年的产量为46万吨。国家的大小不同,不能单纯加以比较,我考虑,要说中国的产量是日本的1/3,不知这样去把握全体是否恰当。刚才筱原先生说过,这次展示会的规模大约为日本 CONEX(综合讲演会附设的展示会)的2倍,我感觉这次展览会的面积大约为今年筑波的4倍左右。

(因篇幅关系,仅刊登至此,详见中国玻璃钢工业协会通迅)

(申从祥 摘译自 EPJ 97年1月1日第630号)

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://ww