

RTM 工艺充填过程的动态仿真^{*}

余晓容 卜建辉 申长雨

(郑州大学橡塑模具国家工程研究中心, 郑州 450002)

摘要 建立了树脂传递模塑成型(RTM)工艺充模过程的数学模型,并采用有限元/控制体积法实现了对复杂薄壁构件的充填模式、压力场和速度场的动态仿真。算例表明,该法可以快速有效地描述RTM工艺的充填过程。

关键词 复合材料 树脂传递模塑成型 数值模拟 有限元/控制体积法

树脂传递模塑成型(RTM)工艺是在一定温度及压力下将低粘度的树脂注入预先置有增强纤维的模具中,然后固化成型的一种树脂基复合材料的液体成型方法^[1]。该工艺以其效率高、投资低、工作环境好、能耗低、工艺适应性强等一系列优点,广泛应用于建筑、交通、电讯、航空、航天等领域^[2]。

RTM工艺中纤维/树脂的浸润是由低粘度的树脂在闭合模腔中流动并渗入增强材料预成型体,最终排除增强材料织构中的气体而完成纤维/树脂的浸润,具有较高的技术应用难度。所以,虽然国内引进RTM工艺设备始于20世纪80年代^[3],但是RTM制品的产量还很低,该工艺在国内还处于初级阶段^[4]。高效生产质量稳定的树脂基复合材料的关键技术在于模具及工艺方案设计的合理性。传统的设计方法是经验加试错法,这对于生产板类制品或许行得通,但是对于具有复杂形状的模具则意味着多次的试错过程。因此若能在模具和制品生产之前,借助计算机仿真技术来预测树脂在型腔内的状态及变化规律,仿真其成型过程,可以充分发挥RTM工艺适应性强的优势,对缩短新产品的研制周期、降低研发成本和提高产品质量具有重大的意义。

笔者针对RTM工艺的特点,建立了RTM工艺中树脂充填过程的数学模型,利用有限元/控制体积法求解压力场方程,追踪流动前沿,实现了对树脂充填过程的动态模拟,并将其作为郑州大学橡塑模具国家工程研究中心研究开发的塑料成型计算机辅助分析软件Z-MOLD的一个功能模块,实现了模型建立、参数设定、数值分析和结果显示的一体化。利用该软件可在产品设计阶段优化模具和工艺设计。

1 数学模型

1.1 基本假设

为了模拟RTM加工过程,需要对RTM加工过程进行简化,因而做了以下的一些简化或假设^[5-6]:

①在固体(纤维布)和液体(树脂)之间没有质量交

换;②纤维布和树脂的密度保持不变,即充模过程是不可压缩的;③树脂是牛顿流体,即粘度不随剪切速率变化;④忽略惯性作用,由于注射速率比较低,这是合理的;⑤表面张力与粘性力相比忽略不计;⑥重力与粘性力相比可以忽略不计;⑦把充模过程看成是一个物理过程。由于理想的RTM成型材料体系是固化反应能在模具被物料充满后才开始发生,并在很短的时间完成。而在充模过程中使流体粘度较低并保持恒定,这是可以做到的。

1.2 守恒方程

根据以上的假定,树脂流过纤维预制体的过程相当于不可压缩流体通过多孔介质的过程。因此RTM工艺中,充模阶段的物理过程遵循平面内不可压缩物质的质量守恒定律,并可采用Darcy定律描述动量守恒,流动相的质量守恒方程见式(1)^[5]。

$$\nabla \cdot \vec{\mu} = 0 \quad (1)$$

式中 $\vec{\mu}$ 是表面速度矢量,包括 x 、 y 和 z 三个方向的速度分量 μ_x 、 μ_y 和 μ_z 。

Darcy定律的张量表达式见式(2)。

$$\vec{\mu} = -[K] \nabla P / \eta \quad (2)$$

其中 η 为树脂粘度, P 为压力梯度, $[K]$ 为渗透率张量。

由(1)、(2)式即可得到树脂浸渍区域中压力场的控制方程,见式(3)。

$$\nabla \cdot ([K] \nabla P / \eta) = 0 \quad (3)$$

同时,由式(2)可以得到表面流率,见式(4)。

$$q = (-h[K] \nabla P \cdot n) / \eta \quad (4)$$

式中 h 为壁厚。

1.3 渗透率张量的确定

渗透率是增强材料的固有特性,即增强材料能够被树脂浸渍的性能。大多数的材料具有一定的孔

^{*} 教育部科学技术研究重点项目(207066)

收稿日期:2011-04-01

隙率,渗透率可以表征流体流经孔隙的难易程度。准确的渗透率数据是获得可靠模拟结果的关键。一般用式 (5) 来描述各向异性多孔介质的渗透率张量。

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \quad (5)$$

在正交各向异性纤维预制件中,如果坐标轴与增强材料的流动主轴相对应,则渗透率张量可以简化为对角形式,见式 (6)。

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

k_1 、 k_2 和 k_3 分别是三个方向上的主渗透率。对于各向同性介质,渗透率张量简化成一个值,即 $k = k_1 = k_2 = k_3$ 。

考虑到 RTM 工艺生产的制品通常是类似于壳体的薄壁构件,其中一个方向的尺寸远小于其它两个方向,因此忽略厚度方向的流动,将问题简化为二维问题,此时渗透率张量表达式见式 (7)。

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 \\ 0 & k_{yy} \end{bmatrix} \quad (7)$$

然而一般很难找到一个共同的主坐标系使每一单元的渗透率张量都为对角形式(如渗透率的张量由于增强材料的变形或者预制体铺层的改变而变化),此时渗透率张量的分量可通过一个转换矩阵对主值进行变换^[5,7],见式 (8)。

$$\begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中 θ 是相对于主流动轴方向的增强材料取向。

1.4 边界条件

对于复杂型腔模具,型腔中的边界条件主要包括:①树脂注射孔:在注射孔处的流率 q 或压力 p 是给定的,即 $q = q_{inj}$ 或 $p = p_{inj}$;②树脂流动前锋:通常假定树脂流动前锋处的压力为大气压,即压力为零;③模腔壁和其它密封表面:满足无渗透边界条件,即流体的法向压力梯度为 0,法向速度也为 0;④排气孔处:当树脂流动前锋到达排气孔位置时,需要指定此处的局部压力,该局部压力通常设为大气压,即压力为 0;

2 数值算法

由以上可知,RTM 充填过程的数学模型实际上可归结为一组偏微分方程及相应的定解条件,除非做大量的假设和简化,否则很难得到解析,只能借助于数值方法来实现。对于充填过程,数值分析的关键在于运动边界的确定,即熔体前沿位置的确定,笔者采用有限元法求解型腔面内的压力场,并根据节点控制体积的充填状况更新流动前沿,从而实现充填过程的动态仿真。

2.1 压力场的有限元计算

当树脂浸渍区域在任意充填时刻给定时,可以利用压力边界条件通过求解压力控制方程而得到压力场的分布。压力场的求解在流动平面内进行,二维流动平面被离散成三角形单元,采用面积坐标构造三角单元的插值函数,单元内的压力 P^e 可以采用线性插值表示,见式 (9)。

$$P^e(x, y) = N_1 P_1 + N_2 P_2 + N_3 P_3 \quad (9)$$

式中 N_i 为面积坐标表示的插值函数, P_i 为单元的三个节点的压力值。

对压力控制方程应用 Galerkin 加权有限元法,并利用边界条件,整理后可得压力场的单元刚度矩阵,见式 (10)。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

其中:

$$a_{ij} = \int_{\Omega^e} \nabla N_i \cdot \frac{[K]}{\eta} \cdot \nabla N_j d\Omega^e \quad (11)$$

$$q_i = h \int_{\Gamma^e} N_i \cdot \frac{[K]}{\eta} \cdot \nabla P \cdot \vec{n} d\Gamma^e \quad (12)$$

由此建立压力场有限元单元刚度矩阵,见式 (13)。

$$\begin{bmatrix} A_{aa} & A_{ab} \\ A_{ba} & A_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_f \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Q_f \\ Q_m \end{Bmatrix} \quad (13)$$

式中:

$$A_{ij} = \sum_e \int_{\Omega^e} \nabla N_i \cdot \frac{[K]}{\eta} \cdot \nabla N_j d\Omega^e \quad (14)$$

$$Q_i = \sum_e h \int_{\Gamma^e} N_i \cdot \frac{[K]}{\eta} \cdot \nabla P \cdot \vec{n} d\Gamma^e \quad (15)$$

其中 $[A]$ 为刚度矩阵, $\{P\}$ 为节点压力矢量, $\{Q\}$ 为节点流率矢量,下标 f 表示已充满区域, m 表示前沿区域。相应的边界条件为流动前沿节点的压力为 0,入口处的流率或压力已知,而已充满的节点静流

率为0。

在有限元方程的求解过程中,将刚度矩阵、压力矢量及流率矢量分解,首先求解与注射口和已充满节点相关的方程,见式(16)。

$$[A_{nn}]\{P_f\} = \{Q_f\} \quad (16)$$

由式(16)得到注射口和已充满节点的压力场分布,然后回代,得到前沿节点的静流率,再由前沿节点的静流率来确定新的前沿点位置和计算域。

2.2 熔体前沿位置及时间步长的确定

采用控制体积法实现熔体前沿的自动跟踪。控制体积法^[8]是基于FAN的基本思想,在有限元网格内定义一个附加的几何模型。每个单元通过每条边中点与单元质心的连线划分成子单元。一个控制体由围绕某一结点的所有子单元组成。引入充填因子 f 表征树脂对控制体的浸渍程度(控制体积的充填百分比),相应地定义四种节点:空点($f=0$)表示熔体还没有到达结点的控制体;内点($f=1$)表示该控制体已经完全充满;前沿点($0 < f < 1$)则表示熔体正流经该控制体;入口点($f=1$)表示熔体由该节点进入。

对于RTM工艺,节点控制体积=节点实际控制体积 $\times$ 孔隙率 ϕ 。对于任意给定时刻 t_i ,如果树脂浸渍区域已知,求解式(13)可以得到入口点和内点的压力场分布以及各前沿节点的静流率。时间步长的选择则保证每个时间步长刚好有一个前沿节点被充满,而与其相连的空节点将变成新前沿节点,前沿节点的充填因子 f 将根据静流率和时间步长得到修正。

3 算例研究

3.1 圆形平板

圆形平板的模腔半径为0.160 m,厚度为0.01 m,注射孔半径 r_{inj} 为0.013 m。图1是进行有限元分析时采用的有限元网格模型,节点数是1505,单元数是2895。采用恒流率注射,注射速率为 $2.1 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$,树脂的粘度为 $0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,纤维渗透率为 $4.56 \times 10^{-9} \text{ m}^2$,孔隙率为50%。

对于一维径向恒流率注射,熔体前锋到达时,注射口处压力的解析解为^[5]:

$$P_{inj} = \frac{q_{inj} \eta}{2 \pi h K} \ln(r_f / r_{inj}) \quad (17)$$

其中 q_{inj} 为入口流率。由式(17)可以得到充满型腔所需的充填时间约为19.02 s,入口压力约为 $1.84 \times 10^4 \text{ Pa}$ 。同样对圆形板的充填过程进行动态

仿真,得到充填结束时的入口压力为 $1.8368 \times 10^4 \text{ Pa}$,所需充填时间为19.37 s,误差为1.5%。图2对熔体到达不同位置时,入口所需压力的数值解和解析解进行了比较,可以看到两者基本重合。图3为数值仿真得到的充填结束时的压力分布图。由图3可知,树脂是以预期的径向方式向前推进。由以上算例可以看到,对于简单的符合单向流动的RTM制品,利用解析解来计算充填时间、压力分布是一个不错的选择。



图1 圆形板有限元网格模型

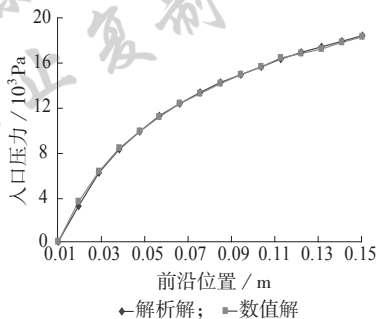


图2 圆形板前沿位置与入口压力关系

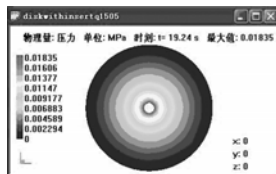


图3 圆形板充填到19.24 s的压力分布

3.2 盒形制品

盒形制品的尺寸为长0.2032 m,宽0.1397 m,高0.1016 m,厚0.004 m。浇口设置在盒底部,为双浇口,位置分别为(0.02 m, 0.0695 m, 0 m)和(0.183 m, 0.0695 m, 0 m)。采用恒流率注射,流率为 $2.221 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$,树脂粘度为 $0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。用于有限元分析的网格模型见图4,单元数为2378,节点数为1224。该算例通过改变盒形制品铺放的预制体材料来研究预制体材料对充填模式的影响,并利用仿真结果确定排气孔位置和所需的锁模机构。

(1) 方案A

盒子底部和四周采用同一纤维预制体,且预成

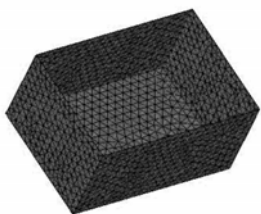
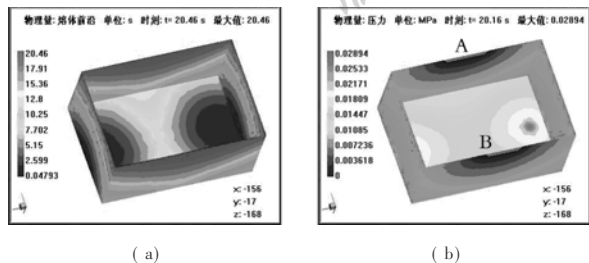


图4 盒形制品有限元网格模型

型体为各向同性,相应的渗透率为 $4.56 \times 10^{-9} \text{ m}^2$,孔隙率为 50%。对该模型进行动态仿真,结果见图 5。从图 5a 可以看到,树脂分别从两个注入口以预期的径向方式向前推进,直到两股树脂相遇,然后逐渐由径向方式转为直线方式,直到最终到达盒子中部的顶部,即 A 和 B 处(见图 5b)。根据仿真结果和排气孔的设置原则^[9],即保证树脂在模腔内顺畅流动,并完全排出模腔内的空气,避免制品中形成干斑缺陷,应该在树脂最后充填位置,即 A 和 B 处设置排气孔。

方案 A 所需的最大入口压力为 0.02894 MPa,相应的锁模力为 $1.80 \times 10^3 \text{ N}$ 。由于树脂先到达盒子左右两壁的顶部,然后到达中部的顶部,因此会对左右两壁的模壁产生压力,如在 20.16 s 时, A 处的压力为 0.0121 MPa,约为入口压力的 40%,所以对模具的密封性要求很高,如果模具的密封性不好,就会有一部分树脂从左右两端溢出。



a—树脂前沿; b—充填到 20.16 s 时的压力分布

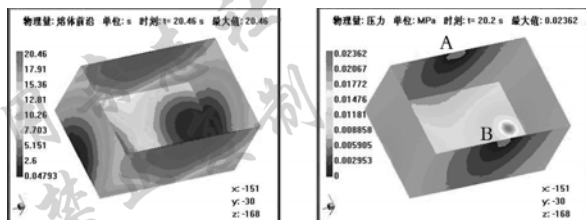
图5 方案 A 的仿真结果

(2) 方案 B

盒子底部的预制体不变,而盒子四壁的预制体为各向异性,即沿 x 轴和 y 轴方向的渗透率为 $4.56 \times 10^{-9} \text{ m}^2$,而沿 z 轴方向的渗透率为 $1.368 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ 。对其进行数值仿真,结果见图 6。从图 6a 可以看到,盒子底部的充填模式由于预制体没有发生变化,所以基本未变,但是由于四壁所采用的预制体为各向异性,且 z 轴方向的渗透率要高于其它两个方向,所以当熔体到达盒子左右两端的壁时,树脂沿 z 轴方向的流速加快,当熔体到达左右壁的顶部时,盒子的底部还未充满,这与方案 A 明显不同。

比较方案 A 和 B 所需的最大入口压力,可以发现,方案 B 所需的最大入口压力 0.02362 MPa,比方案 A 要降低约 18.4%,相应的锁模力也由 $1.80 \times 10^3 \text{ N}$ 降到了 $1.20 \times 10^2 \text{ N}$,下降了约 30%。这说明恒流率注射时,渗透率的提高使得充模变得更容易,可以降低入口所需压力和相应的锁模力。

对于方案 B,由于树脂也是先到达左右两壁的顶部,因此会对模壁产生压力,如在 20.2 s 时, A 处的压力为 0.01075 MPa,为入口压力的 43%。可以看到,由于入口压力的降低,使得 A 处在充填快结束时承受的压力要低于方案 A,但是由于方案 B 中树脂的流动不平衡性要高于方案 A,所以它相对于入口最大压力的比例值有所提高。同样对于方案 B,对于左右两端模具的密封性也有要求。



(a)

(b)

a—熔体前沿; b—充填到 20.2 s 时的压力分布

图6 方案 B 的仿真结果

4 结论

(1) 建立了 RTM 工艺充模过程的数学模型,采用有限元/控制体积法实现了对复杂薄壁构件的充填模式、压力场和速度场的模拟,并将其集成到塑料成型计算机辅助分析软件 Z-MOLD 中。

(2) 模拟软件可以快速、准确地模拟 RTM 工艺的充模过程,利用该软件在设计阶段对产品进行模具和工艺设计,可以缩短新产品的研制周期、降低研发成本和提高产品质量。

参考文献

- [1] 翟继业. RTM 成型技术及原材料的选用[J]. 玻璃钢, 1996(1): 34-37.
- [2] 张刚翼, 沈玉考. 浅谈 RTM 工艺中对树脂流动性的控制[J]. 玻璃钢/复合材料, 1999(5): 10-12.
- [3] 陈刚. RTM 工艺国内外发展概况[J]. 玻璃钢, 1994(3): 12-14.
- [4] 段华军, 马会茹, 王钧. RTM 工艺国内外研究现状[J]. 复合材料, 2000(5): 46-48.
- [5] C·D·拉德, A·C·朗, K·N·肯德尔, 等. 王继辉, 李新华, 译. 复合材料液体模塑成型技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [6] 江顺良. RTM 加工工艺充模过程的计算机模拟[J]. 复合材料

学报,2002,19(2):13-17.

[7] 李海晨,张明福,王彪.RTM 工艺增强纤维渗透率测量方法研究[J].航空材料学报,2001,21(1):51-54.

[8] Tadmor Z, Broyer E, Guttinger C. Flow analysis network (FAN)

method for solving flow problems in polymer processing[J]. Polymer Eng and Sci,1974,14(9):660-665.

[9] 孙玉敏,段跃新,李丹,等.风机叶片 RTM 工艺模拟分析及其优化[J].复合材料学报,2005,22(4):23-29.

DYNAMIC SIMULATION OF MOLD FILLING IN RTM PROCESS

Yu Xiaorong, Bu Jianhui, Shen Changyu

(NERC of Mold and Die, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

ABSTRACT Mathematical model of filling process of resin transfer molding (RTM) was built, the dynamic simulations of filling model, pressure field, velocity field of complex thin-walled components were achieved by using finite element/control volume method. Results demonstrated that the proposed method could correctly describe the filling process of RTM quickly.

KEYWORDS composites, RTM, numerical simulation, finite element/control volume method

沙伯基础创新塑料推出汽车内饰新兴特种材料

沙伯基础创新塑料在 VDI 汽车工程用塑料研讨会上隆重推出两款新型特种材料,这些材料能极大地简化高性能且美观的汽车内饰的设计和保养。第一款新型产品是用以打造雅致、低光泽度部件的 Cyclocac 苯乙烯共聚合物/聚碳酸酯树脂,它能避免二次喷漆带来的成本上升、磨损以及破坏环境的问题。第二款创新产品是 Geloy 聚碳酸酯/丙烯酸树脂,该产品持久的防静电性能为汽车内饰提供清新、洁净的表面。除了上述新型 Cyclocac 和 Geloy 材料,沙伯基础创新塑料还展出了一系列其他的高科技树脂和车窗应用,这些不断丰富汽车材料产品系列表明了公司重视通过锐意创新来帮助全球汽车客户改善车辆性能以及满足消费者诉求。

“消费者可能因为外观设计而选择一辆汽车,但与他们时时相伴的则是汽车内饰。”沙伯基础创新塑料汽车产品与营销总监 V. Umamaheswaran 说:“我们新型的 Cyclocac 和 Geloy 树脂将帮助我们客户为消费者提供多样化、美观的内饰选择,同时又能耐内部磨损。与同类产品相比,在购车新鲜感渐渐褪去之后,上述材料更能有效地保持消费者的满意度。”

新型 Cyclocac DL100LG 旨在成为汽车主机厂商和各级供应商降低成本,且通过免喷漆来实现环保性的理想低光泽度材料。该产品可为各种纹理和色彩(包括定制颜色)带来低光泽度外观所需的美学度及可感知的卓越品质,同时可以结合不同的工具表面处理。因为不需要喷漆,该产品能降低制造成本以及减少挥发性气体对环境造成的影响。

Cyclocac DL100LG 外观出众且具有优异的尺寸稳定性、耐热性和抗冲击性等特性。其潜在应用包括装饰部件、车门踏板和仪表板。沙伯基础创新塑料展出了采用这种新型 Cyclocac 制成的转向杆护罩。

Geloy HRA170D 复合材料具有持久的防静电特性,能使汽车内饰在使用多年后依然保持出厂时的外观。与容易吸引灰尘的传统材料相比,该新型 Geloy 复合材料可有效防止灰尘的吸附。这款来自沙伯基础创新塑料的产品使用了一种添加剂替代增滑剂来确保其防尘的特性。

由于上色可能会对防静电效果产生很大的影响,沙伯基础创新塑料推出了各种颜色的 Geloy HRA170D 复合材料。减除了注塑供应商添加着色剂的工序,并达到最佳防静电效果。其目标应用包括饰板、内部后视镜外罩和车顶仪表板。该新型 Geloy HRA170D 复合材料是基于 Geloy HRA170 复合材料而研发的, Geloy HRA170 复合材料几年来已成功地被很多领先的主机厂商用于生产汽车内饰板。(互联网)

鉴别劣质塑料制品的方法

目前实施市场准入的 39 种食品用塑料制品中,质量抽查合格率不是很高的主要是快餐盒、塑料袋等几类产品。中国塑料协会再生利用专业委员会副会长董金狮认为,由于现在很多食品用塑料产品上并没有 QS 标志,市场上难免存在产品良莠不齐的现象。

为了使人们尽量避免使用不合格产品,专家给出了一些鉴别劣质产品的小窍门:

快餐盒:一般来说,合格的产品光洁度、亮度比较好,捏起来有一定的强度,手撕撕不破,闻上去也没什么味道。而劣质的餐盒,摸上去软绵绵,没有弹性,轻轻一撕就破裂,闻上去有一股刺鼻的味道。

除了用以上方法鉴别外,还可以用沉水实验来验证快餐盒的优劣:劣质产品一般加入便宜的矿物质如碳酸钙、滑石粉,密度比水大,把快餐盒弄碎后放到水里搅拌,沉下去的就是不合格的,而合格的快餐盒密度小,会浮在水面上。

塑料袋:一般劣质的塑料袋主要有两个特点,一是杂质比较多,对着光线看,里边有好多的黑点或者杂质点,一般都是用废塑料生产的;二是闻味道,劣质的塑料袋闻上去有很大的刺鼻气味。

另外,消费者在家里也可以用棉球沾一些食用油,在有色塑料袋上擦拭,容易脱色的就是劣质塑料袋。

保鲜膜:用 PE 材料制成的保鲜膜,可以安全使用,而用 PVC 材料制成的保鲜膜不应该接触油脂,也不可以加热,需谨慎使用。通过燃烧的方法可以鉴别这两种保鲜膜:在燃烧的过程中,如果滴油、烟雾比较小的是 PE 保鲜膜,烟雾比较大、不滴油的是 PVC 保鲜膜。(塑资)