

数值模拟方法在橡胶注射成型中的应用研究

张惠敏, 张 聪, 杨 德, 韩雷雷

(青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要:应用数值模拟方法对橡胶注射成型过程进行研究, 分析不同熔体温度和模具温度下橡胶的流动前沿温度、充填结束时的体积硫化率、硫化成型阶段的体积硫化率及硫化的均匀程度等, 确定最佳工艺参数, 从而在确保顺利充模、熔料汇合处无熔接痕、硫化程度和温度均匀分布及无残余应力等的前提下, 缩短硫化时间, 提高生产效率。

关键词:橡胶; 注射成型; 反应粘度模型; 反应动力学模型; 硫化程度; 数值模拟方法

中图分类号: TQ330.6+6; O241.82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2015)07-0422-06

数值模拟方法在塑料注射成型研究中应用越来越多, 所起的作用也越来越大, 但在橡胶注射成型研究中应用却很少, 主要原因是橡胶的流变特性比塑料复杂得多, 并且成型中还伴随有放热的化学交联反应。随着工业技术的发展, 橡胶制品的种类越来越多, 对质量的要求也越来越高, 如航空航天、医疗、阀门、电子等高精密度产品。要加快橡胶工业的发展, 将先进的技术应用到橡胶注射成型中势在必行。

应用数值模拟方法优化注射成型工艺及模具, 可以大大缩短模具的设计周期和降低制造成本, 提高生产效率和橡胶制品的成型质量。本工作运用数值模拟方法对橡胶注射成型过程进行模拟研究, 分析不同熔体温度和模具温度下橡胶熔体的流动前沿温度、充填结束时的体积硫化率、硫化成型阶段的体积硫化率和壁厚方向上硫化的均匀程度等, 进而优化橡胶注射成型工艺参数, 缩短硫化时间, 提高生产效率。

1 有限元模型和数学模型

1.1 有限元模型

本研究对象为橡胶喷嘴, 因为制件小, 采用了一模八腔。为了节省原材料并保证制品的质量, 浇注系统设计为冷流道, 整体有限元模型如图1所示。

作者简介:张惠敏(1954—), 女, 辽宁沈阳人, 青岛科技大学教授, 博士, 主要从事高分子材料成型加工设备和成型模具CAD/CAE/CAM的教学与研究工作。

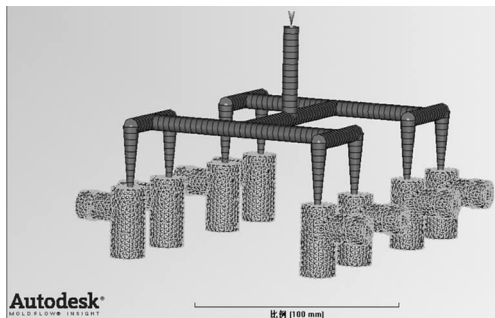


图1 整体有限元模型

1.2 数学模型

橡胶注射成型过程十分复杂, 在充填阶段和硫化阶段胶料所发生的变化完全不同, 因此两个阶段采用的数学模型也不同。

1.2.1 充填阶段

在充填阶段, 橡胶熔体与塑料一样都是不可压缩、非等温瞬态非牛顿流体, 均需用数值法联合求解质量守恒、动量守恒、能量守恒和粘度本构方程。与塑料注射过程不同, 橡胶注射成型过程伴随有交联反应现象, 即由于型腔高温作用和流动引起的剪切作用使橡胶熔体在充填过程中发生部分交联反应, 而这部分交联反应会导致熔粘度增大, 流动阻力提高, 从而影响橡胶熔体流动顺利进行。

在描述橡胶熔体流动的粘度本构方程中, 不仅剪切速率和熔体温度与粘度有关, 硫化程度也与粘度有关。这个本构方程就是本研究采用的Cross-exponential交叉指数模型(反应粘度模型):

$$\eta(\alpha, T, \dot{\gamma}) = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau}\right)^{1-n'}} \left(\frac{\alpha_g}{\alpha_g - \alpha}\right)^{C_1 + C_2 \alpha} \quad (1)$$

$$\eta_0(T, p) = B \exp(T_b/T) \quad (2)$$

式中, η 为剪切粘度; α 为硫化程度; T 为温度; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率; η_0 为零剪切粘度; p 为最大注射压力; τ 为流体剪切应力; n' 为非牛顿指数; α_g 为凝胶转化度; T_b 为参考温度; C_1 , C_2 和 B 为常数。

由反应粘度模型可见: 当 $\alpha=0$, 即刚开始充填时, Cross-exponential 粘度模型与塑料流动的 Cross 粘度模型相同, 随着 α 逐渐增大, η 也迅速增大, 当 $\alpha=\alpha_g$ 时, $\eta=\infty$, 即随着硫化程度增大, 粘度提高, 一直到完全停止流动为止。注射过程是非等温过程并伴随有少量的硫化反应, 可近似看作是非等温硫化过程。在非等温硫化过程中, 硫化程度又是温度和时间的函数^[1], 即随着熔体温度升高和注射时间的延长, 硫化程度增大, 粘度也增大。因此流动过程中的硫化程度较小为好。而熔体温度是一个重要的影响因素。

1.2.2 硫化成型阶段

当型腔充满后, 在型腔高温的作用下胶料发生剧烈的化学交联反应, 同时放出更多热量, 以致加速了硫化反应。在这一阶段, 硫化程度与温度相互影响, 是一个复杂的耦合过程。这个阶段主要受反应动力学模型和能量方程的控制。

(1) 硫化反应动力学模型如下:

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2 \alpha^m)(1 - \alpha)^n \quad (3)$$

$$k_1 = A_1 \exp(-E_1/T)$$

$$k_2 = A_2 \exp(-E_2/T)$$

式中, t 为时间; m 和 n 为硫化反应指数; A_1 和 A_2 为频率因子; E_1 和 E_2 为反应活化能。

从硫化反应动力学模型可见, 温度越高, 反应速率越快, 成型周期越短, 生产效率越高。

(2) 在硫化成型阶段, 胶料不仅受模具高温加热, 而且本身也会因化学交联反应生成大量热量, 硫化成型阶段可视为有内热源的三维瞬态传热过程^[2], 且硫化阶段熔料不可压缩、熔料间无对流传热、无粘性热。因此硫化阶段采用与充填阶段不同的能量方程, 即采用瞬态、非等温、不可压缩、无对流传热、有内热源的方程:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{q} \quad (4)$$

$$\dot{q} = \rho H_R \frac{\partial \alpha}{\partial t} \quad (5)$$

式中, ρ 为胶料密度, c_p 为比热容, K 为热导率, $\dot{q}$ 为内热源, H_R 为硫化过程反应释放出的热量。

由式(3)~(5)得知, 内热源是硫化速度和硫化程度的函数^[3], 即硫化反应的速度直接影响到内热源大小, 而内热源又影响整个温度场。反过来, 温度也是硫化程度和硫化速度的函数, 即温度的升高促使硫化程度和硫化速度增大。因此对于这样的复杂状态, 必须用数值法对温度与硫化程度进行耦合求解。

在硫化阶段, 温度高、硫化速度快可以缩短硫化时间, 提高生产效率, 但温度不可过高, 过高易使胶料焦烧或制品变形。

在注射阶段, 硫化速度太快, 粘度增大的速度也随着加快, 易导致注射充填困难, 甚至有可能在充满型腔之前就开始硫化, 从而导致注射失败^[4]。

要合理控制硫化程度和硫化速度, 使胶料在充填阶段硫化程度较小、硫化阶段硫化速度较快, 重要的手段就是选择最佳的模具温度和胶料温度。因此, 本研究以提高制品质量、缩短成型周期为优化目的, 以模具温度、胶料温度为变量, 通过数值模拟方法分析温度场及硫化程度分布状况, 获得最佳的模具温度和胶料温度。

2 模拟分析与讨论

本研究选择的天然橡胶材料参数为: $\rho=0.98 \text{ Mg} \cdot \text{m}^{-3}$, $c_p=1878 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$, $K=0.2143 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$, $\alpha_g=0.9$, $\tau=146137 \text{ Pa}$, $T_b=4198.69 \text{ K}$, $C_1=0.5489$, $C_2=0$, $B=0.346081 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $n'=0.2261$, $m=1.962$, $n=1.694$, $A_1=1.9149 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$, $A_2=6.4618 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$, $E_1=6823 \text{ kJ}$, $E_2=6750 \text{ kJ}$ 。工艺参数为: $p=180 \text{ MPa}$, 速度/压力切换控制类型的转换点为“填充百分比”, 设置为 98%。

该胶料的注射温度较低, 根据一般情况设计了 4 个方案, 如表 1 所示。

2.1 流动前沿温度

流动前沿温度直接影响产品的质量。温度过低会影响到熔料的流动性, 使充填难以完成, 且因

表 1 方案参数

方 案	熔体温度/℃	模具表面温度/℃
1	60	160
2	75	175
3	60	175
4	75	160

外壁不光滑而影响产品的外观质量;温度过高易产生焦烧现象,在流料汇合处易形成熔接痕。4个方案的流动前沿温度如图 2 所示。

从图 2 可以看出,方案 1~4 的最高温度分别为 130.8、128.0、120.0 和 134.9℃,最低温度分别为 60、75、60 和 75℃。其中方案 3 的最高流动前沿温度数值最小,方案 2 也比较小,前沿熔体在充模过程中产生的交联反应极少,不易在流料汇合处形成熔接痕,不会影响产品质量,并且在此温度范围内,熔料具有较好的流动性,可以顺利完成充模过程。方案 3 的流动前沿温度最小值虽然小于方案 2 和 4,但是最低温度位于型腔最高处,即最后充填处,因此不会影响充模。

2.2 充填结束时的体积硫化率

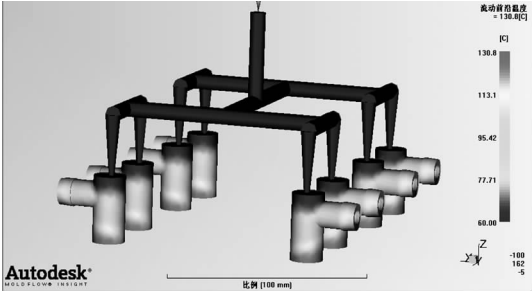
橡胶体积硫化率是指在硫化过程中硫化反应的胶料所占的比例。充填阶段要求熔体能够充满型腔,即不产生交联化学反应而阻碍充模,因此充填过程体积硫化率越小越好,4 个方案充填结束时的体积硫化率如图 3 所示。

从图 3 可以看出,方案 1~4 在充填结束时的体积硫化率分别为 0.003 7、0.005 9、0.004 7 和 0.004 8。方案 1 和 3 的体积硫化率较小,说明充填过程中仅有少量胶料发生化学交联反应,不易产生焦烧,操作安全,熔体能够顺利充满整个型腔,有利于充模。

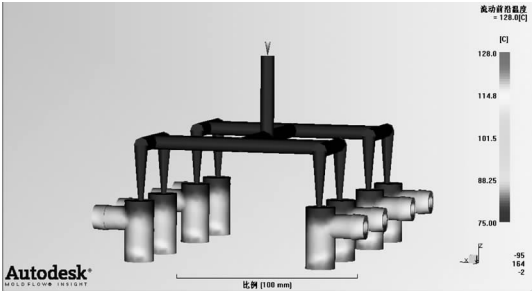
2.3 硫化成型阶段的体积硫化率

胶料注入型腔后,借助型腔的高温,橡胶分子之间会产生剧烈的化学交联反应,某一时刻体积硫化率越高,说明制品硫化所需要的时间越短,生产效率越高。4 个方案在硫化约 35 s 时的体积硫化率如图 4 所示。

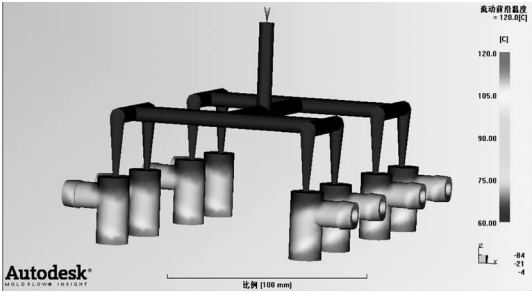
从图 4 可以看出,方案 1~4 在硫化约 35 s 时的体积硫化率分别为 0.076 0、0.140 3、0.134 9 和 0.078 8。由于方案 2 和 3 提高了模具的表面温度,在硫化约 35 s 时体积硫化率有大幅提高,能够在较短的时间内完成硫化反应,从而可在保



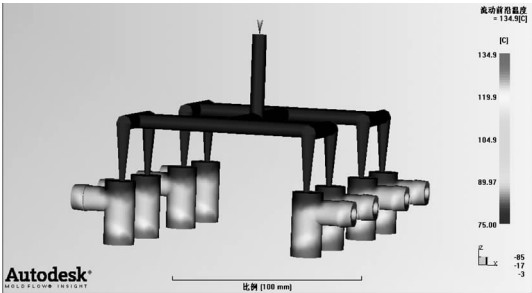
(a) 方案 1



(b) 方案 2



(c) 方案 3



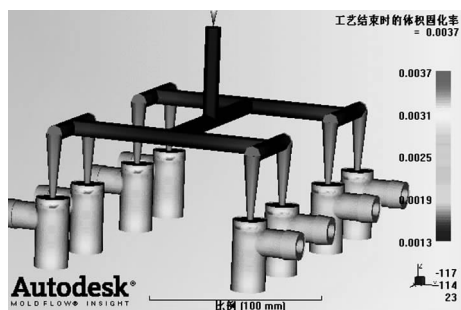
(d) 方案 4

图 2 流动前沿温度

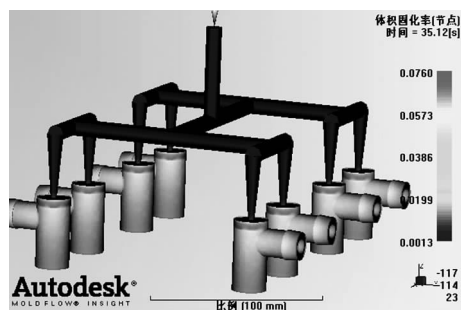
证产品质量的前提下提高生产效率。

2.4 最佳方案确定

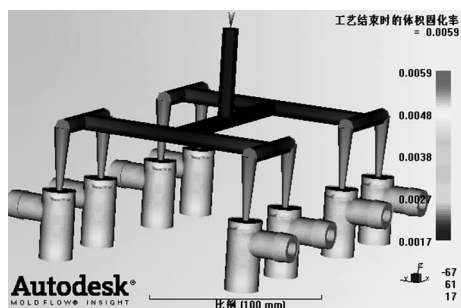
通过以上模拟分析,可以看出模具温度和熔体温度对流动前沿温度、充填结束时的体积硫化率和硫化约 35 s 时的体积硫化率影响较大。方



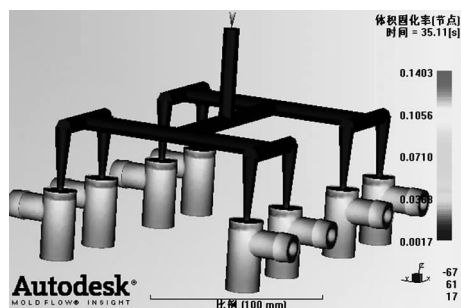
(a) 方案 1



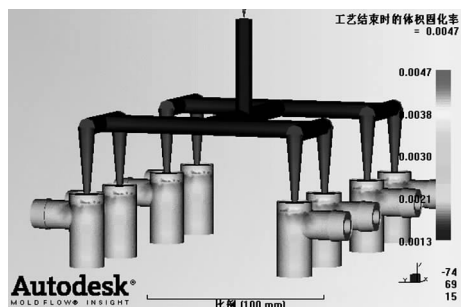
(a) 方案 1



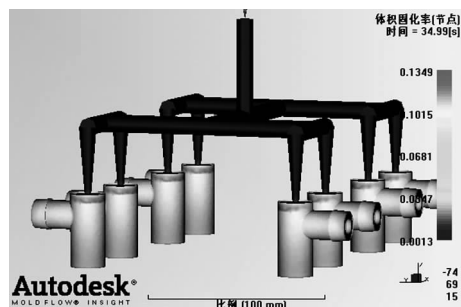
(b) 方案 2



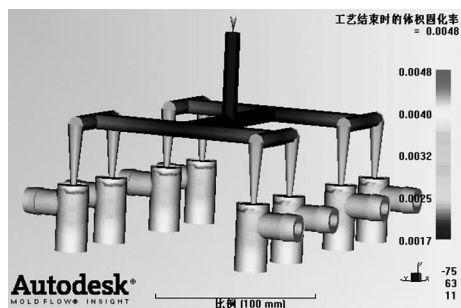
(b) 方案 2



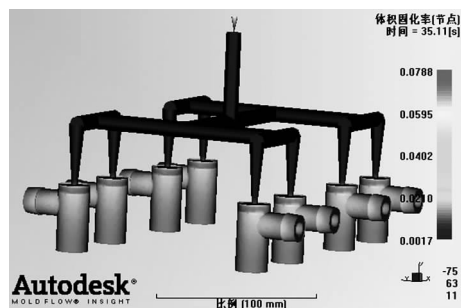
(c) 方案 3



(c) 方案 3



(d) 方案 4



(d) 方案 4

图 3 充填结束时的体积硫化率

图 4 硫化成型阶段的体积硫化率

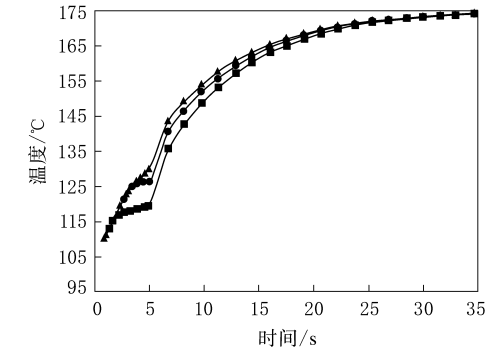
案 1 和 3 充填结束时的体积硫化率较小,因而流动阻力小,可以顺利完成充模,保证注射成型操作的安全性,避免出现制品表面粗糙不光泽现象。而硫化约 35 s 时方案 2 和 3 的体积硫化率较大,

硫化阶段胶料交联反应速度快,因而可缩短硫化时间,提高生产效率,且方案 2 和 3 流动前沿温度比较低,因而能够保证前锋胶料在流动过程中不至于因温度过高产生剧烈的化学交联反应,避免

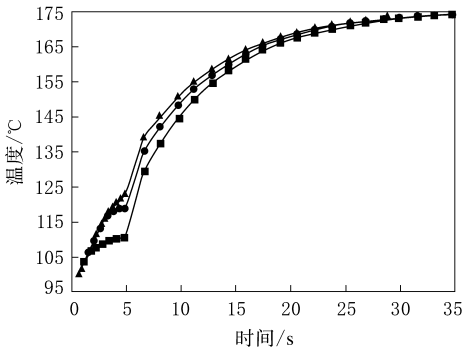
前锋胶料出现焦烧现象。

从顺利充模、提高硫化速度、减少熔接痕等方面综合考虑,方案2和3比较合理。但以上模拟结果不能判断是否可能导致制品的其他缺陷,如尺寸误差、残余内应力及变形情况等。硫化程度和温度分布是判断制品缺陷的重要因素。因此本研究将方案2和3的硫化程度和温度分布状况进行比较,如图5~7所示,以获得最佳方案。

从图5可以看出,方案2和3的各点温度分布都比较均匀,各点的温度变化曲线在20 s后逐渐重合。从图6可以看出,方案2和3的各点硫化程度分布也都比较均匀,各点的硫化程度曲线始终基本重合在一起,方案3比方案2重合得更紧密些。这仅说明制品的表面硫化程度分布很均匀,即制品表面各节点的硫化程度曲线趋于重合,而从沿制品厚度方向的分布(见图7)来看不是很均匀,在制品芯部有2个节点处的硫化程度曲线重合在一起,另一个节点处的硫化程度曲线没有与其相重合。但比较起来,方案3的3条曲线比方案



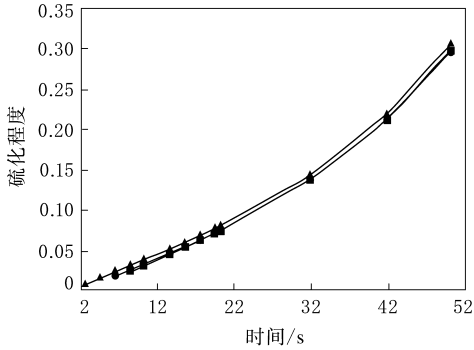
(a) 方案2



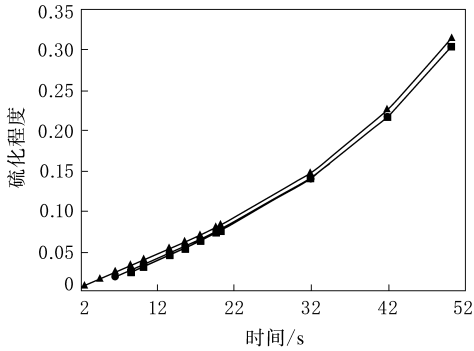
(b) 方案3

模型节点: ■—N21968; ▲—N21984; ●——N21959。

图5 总体温度



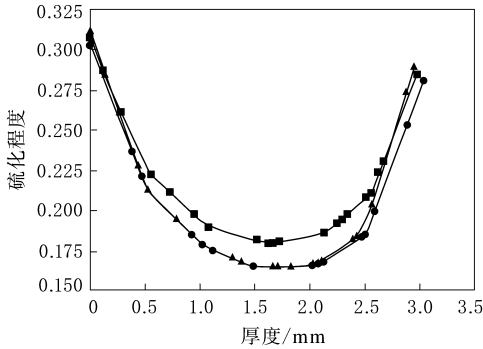
(a) 方案2



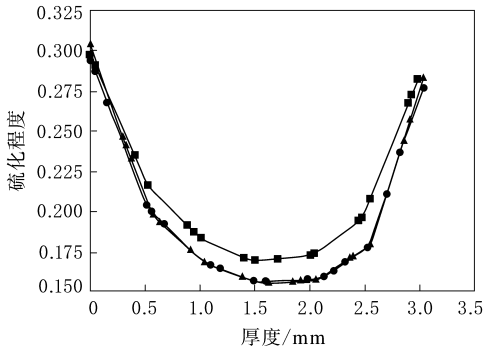
(b) 方案3

模型节点: ■—N34998; ▲—N35090; ●——N35776。

图6 总体硫化程度



(a) 方案2



(b) 方案3

注同图6。

图7 厚度方向的硫化程度

2 更近些。

另外,从图 7 还可以看出,制品表面附近的硫化程度较大,制品芯部硫化程度较小,这说明模具温度对硫化速度和胶料温度影响较大,高模温使制品表面硫化速度加快,温度升高,但对制品芯部的影响较小,这与橡胶低热导率的特性有关。

综上所述,方案 3 为最佳方案。

3 结论

采用数值模拟方法对橡胶的注射成型过程进行模拟研究,得出结论:橡胶熔体温度为 60 ℃、模具温度为 175 ℃时,充填和成型效果最好。在此注射成型条件下,流动前沿温度比较低,因而能够保证前锋胶料在流动过程中不至于因温度过高产生剧烈的化学交联反应,导致前锋胶料出现焦烧现象;充填结束时的体积硫化率较小,充填过程中

仅有少量胶料发生化学交联反应,在充模过程中不易产生焦烧,熔体能够顺利充满整个型腔;而硫化约 35 s 时的体积硫化率较大,硫化阶段胶料交联反应速度快,可缩短硫化时间;硫化程度和温度分布也很均匀,可避免制品产生残余应力等,保证制品质量。

参考文献:

- [1] 程源,刘会平,王定国. 橡胶注射过程中温度分布的研究[J]. 橡胶工业,1996,43(6):323-330.
- [2] 申长雨. 注塑成型模拟及模具优化设计理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2009:112-157.
- [3] 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(12):167-172.
- [4] 程源,安瑛. 橡胶注射过程中压力变化的研究[J]. 橡胶工业,1996,43(7):387-395.

收稿日期:2015-01-27

Numerical Simulation Study on Injection Molding of Rubber

ZHANG Hui-min, ZHANG Cong, YANG De, HAN Lei-lei

(Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: The rubber injection molding process was studied through numerical simulation method. Under different melt temperature and mold temperature, the flow front temperature, volume curing rates at the end of filling and during curing process, and vulcanization evenness were analyzed to determine the optimal process parameters. As a result, the mold filling process was smooth, there was no weld line in the material flow front, the curing degree and temperature field were uniformly distributed, and there was no residual stress in the molded article. Moreover, the curing time was shortened and production efficiency was improved.

Key words: rubber; injection molding; cross-exponential model; reaction kinetics model; curing degree; numerical simulation method

一种导电橡胶垫的加工装置及工艺

中图分类号: TQ336.4+6 文献标志码: D

由昆山思拓机器有限公司申请的专利(公开号 CN 103551735A, 公开日期 2014-02-05)“一种导电橡胶垫的加工装置及工艺”,涉及的导电橡胶垫加工装置包括激光器、扩束镜、反射镜、切割头和样品移动平台。激光器产生的激光首先进入扩束镜(安装于激光器输出端,用于扩展激光

束直径),再依次经过反射镜(安装于扩束镜输出端,用于改变激光行进方向)及聚焦镜(安装于反射镜下方的切割头中),入射到移动平台上固定的待加工的导电橡胶上,通过程序控制移动平台上导电橡胶的移动,激光加工出所需的产品形状。该发明利用激光加工精度高、速度快的特点,解决了传统机械加工精度有限、成型周期长的问题。

(本刊编辑部 赵 敏)