

# 碰撞混合器中物料流动的能量及动量衡算

柳和生

(青岛化工学院橡胶新技术研究所 266042)

**摘要** 对反应注射成型机所采用的碰撞混合器进行分析,并就其进料喷嘴及混合室中的物料流动进行了能量及动量衡算。得出并分析了混合器的结构参数和物料物性参数之间的关系。研究结果不但有助于对这种混合器工作机理的认识,而且对混合器的结构设计亦有参考价值。

**关键词** 碰撞混合器,物料流动,能量衡算,动量衡算

物料间的高速碰撞是目前反应注射成型机(RIM)广泛采用的混合方式。物料在碰撞混合器内的流动过程中,存在着各种形式的能量及动量的转换。这些转换与物料的物理性质、混合器的结构以及工艺条件等密切相关。因此,对混合器中的物料流动进行能量及动量衡算,不仅有助于对混合器工作机理的认识,而且可以指导混合器的结构设计和工艺条件的选择。

图1为一种典型碰撞混合器的结构示意图。在圆筒形混合室3的两侧,面对面排列着组分A的进料喷嘴1和组分B的进料喷嘴2。组分A和B分别通过这两个喷嘴,高速注射到混合室3中,经碰撞形成湍流混合后,以层流方式流出混合室。在大多数情况下,两个进料喷嘴都含一个锥形收敛区和一个直管区。在这两个区域中,物料的流动各不相同,本文将分别对喷嘴的上述两区域和混合室内的物料流动进行能量及动量衡算,并由此展开讨论。

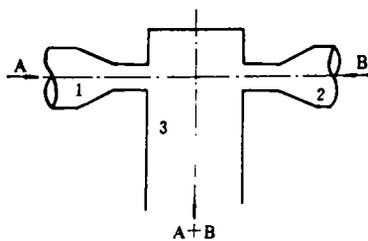


图1 碰撞混合器结构

1—组分A 进料喷嘴;2—组分B 进料喷嘴;3—圆筒形混合室

## 1 能量及动量衡算

在进行衡算之前,我们先对混合器中的物料流动作如下假设(除特殊说明外,这些假设将贯穿本文的整个计算过程)。

- 流动过程中,物料与混合器壁面之间没有任何热交换;
- 物料的流动属不可压缩的定常流动;
- 在与流动方向相垂直的截面上,流速无变化,且截面上任一点的流速均为该面上的平均流速;
- 进料喷嘴水平设置,混合室垂直向下开口。

### 1.1 锥形收敛区

图2为锥形收敛区的几何结构和工作状态示意图。物料在该区域内流动的基本特征是:由于进口处有较高的压力 $P_1$ (出口压力为 $P_2$ ),物料在较短时间内获得较大的速

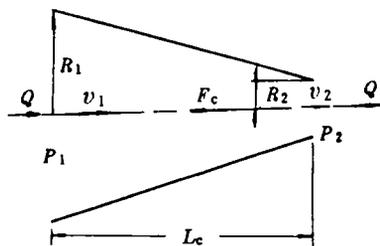


图2 锥形收敛区的几何结构和工作状态

$Q$ —体积流率; $F_c$ —壁面对物料的纵向反推力; $L_c$ —区域的纵向长度; $P_1$ —进口处压力; $P_2$ —出口处压力; $v_1$ —进口处平均流速; $v_2$ —出口处平均流速; $R_1$ —进口处横截面半径; $R_2$ —出口处横截面半径(下面公式中出现上述符号不再另加说明)

度增量( $v_2 - v_1$ ),从而在出口处达到较高的平均流速  $v_2$ ;在该区域内,对物料起主导作用的力是  $P_1, P_2$  以及壁面对物料的纵向反推力  $F_c$ ,相对而言,壁面上的粘性阻力可忽略;在能量方面,主要是压力能和动能之间的转换,比较而言,壁面上粘性阻力所作的功和内摩擦功也可忽略不计。

根据上述分析,由流体流动体系的能量及动量衡算理论<sup>[1]</sup>可知:对于锥形收敛区内的流动物料有下列等式成立。

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} \quad (1)$$

$$P_1 A_1 - P_2 A_2 - F_c = \rho Q (v_2 - v_1) \quad (2)$$

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (3)$$

式中  $\rho$ ——物料密度;

$A_1, A_2$ ——截面积。

由以上各式不难导出

$$\begin{aligned} \Delta P_c &= P_1 - P_2 \\ &= \frac{1}{2\pi^2} \rho Q^2 \left( \frac{1}{R_2^4} - \frac{1}{R_1^4} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$v_2 = R_1^2 \sqrt{\frac{2\Delta P_c}{\rho(R_1^4 - R_2^4)}} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} F_c &= (R_1^2 - R_2^2) (\pi P_1 \\ &\quad - \frac{R_1^2 - R_2^2}{2\pi R_1^4 R_2^2} \rho Q^2) \end{aligned} \quad (6)$$

式(4)~(6)揭示了锥形收敛区工作状态参数和该区域的结构参数,以及它们之间的关系。

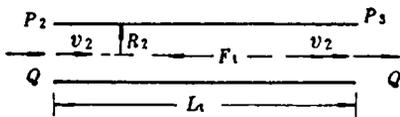


图3 直管区的几何结构和工作状态

$F_1$ —壁面对物料的粘性阻力; $L_1$ —区域的纵向长度;

$P_2$ —进口处压力; $P_3$ —出口处压力; $v_2$ —管中平均

流速; $R_2$ —管半径

## 1.2 直管区

图3为直管区的结构和工作原理示意图。该区直接与锥形收敛区相连,因此在连接

处物料流动状态为两区共有。

由于直管区横截面面积恒定,管两端的压差与壁面的粘着阻力相平衡,压力能、壁面粘着阻力所作的功以及内摩擦功都将转化为物料的内能,因而使其温度上升。因此在这种情况下,不能再用式(1)所示的伯努力方程计算直管区两端的压差,而必须依据有关粘性流体力学原理进行计算。

在计算压差之前,必须确定管中物料的流型。有资料表明<sup>[2~4]</sup>:在碰撞混合器中,除组分间相互碰撞形成湍流外,其余各区域的流动均因雷诺数( $R_e$ )小于临界值而属层流,但是直管区长度  $L_1$  一般都小于在管内形成充分层流所需的入口长度,故认为,直管区内物料的流动属不充分层流。对于这种流型,其两端压力降  $\Delta P_t$  可由下式<sup>[5]</sup>计算

$$\begin{aligned} \Delta P_t &= P_2 - P_3 \\ &= \frac{1}{2} \left( \frac{64}{R_e} \frac{L_1}{2R_2} + m \right) \rho v_2^2 \end{aligned} \quad (7)$$

将雷诺数  $R_e = \frac{2R_2 v_2 \rho}{\eta}$  和  $Q = \pi R_2^2 v_2$  代入式(7),整理后有

$$\Delta P_t = (8\eta L_1 + \frac{m}{2\pi} \rho Q) \frac{Q}{\pi R_2^4} \quad (8)$$

式中  $\eta$ ——物料粘度;

$m$ ——压力降校正系数,与无量纲数  $(\frac{L_1}{2R_2})$  及雷诺数  $R_e$  有关<sup>[5]</sup>。

求出  $\Delta P_t$  后,我们可以根据动量衡算,求得管壁的流动阻力

$$F_t = \pi R_2^2 \Delta P_t = (8\eta L_1 + \frac{m}{2\pi} \rho Q) \frac{Q}{R_2^2} \quad (9)$$

为求出物料在该区域内的温升,可对区域内的物料流动列出如下能量衡算式:

$$\frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} = \frac{P_3}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + \Delta e - \frac{F_t}{A_2 \rho} \quad (10)$$

式中  $\Delta e$  是出口端单位质量的物料相对于进口端的内能增量,它和物料在出口端相对于进口端的温升  $\Delta T$  有关,即

$$\Delta e = C_v \Delta T \approx C_p \Delta T \quad (11)$$

式中  $C_v$ ——定容比热;

$C_p$  —— 定压比热。

由式(10)和式(11)求得

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{2\Delta P_t}{C_p \rho} \\ &= (16\eta L_t + 0.42\rho Q) \frac{Q}{\pi R_2^4 C_p \rho} \quad (12) \end{aligned}$$

式(7)~(12)反映了直管区工作状态参数之间以及它们与物性参数及该区域结构参数的关系。

### 1.3 混合室流动区

图4为混合室流动区的工作状态及其几何结构示意图。物料在该区域的流动情况下：组分从各自的进料喷嘴以高速注射进混合室，其相互碰撞形成湍流混合，此后，混合物以层流方式流出混合室。对这一区域内的物料流动，我们主要关心的是两组分进料时注射动量的平衡以及机械能和内能间的转换。

资料表明<sup>[4]</sup>：为使混合区域保持在混合室中心，两组分进料时的注射动量应满足

$$Q_a \Delta P_a = Q_b \Delta P_b \quad (13)$$

式中， $\Delta P_a$  和  $\Delta P_b$  分别为组分 A 和组分 B 的进料喷嘴两端的压力降，可分别由式(4)和(8)求得，即

$$\Delta P_a = (\Delta P_c)_a + (\Delta P_t)_a \quad (14)$$

$$\Delta P_b = (\Delta P_c)_b + (\Delta P_t)_b \quad (15)$$

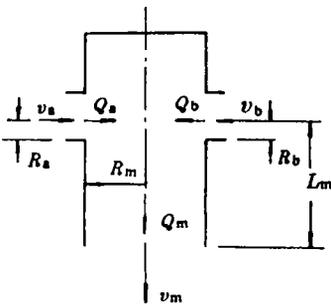


图4 混合室流动区的工作状态和几何结构

$v_a, v_b$ —组分 A, B 的平均进料流速;  $v_m$ —混合物平均出料流速;  $Q_a, Q_b$ —组分 A, B 的进料体积流量;  $Q_m$ —混合物出料体积流量;  $R_a$ —组分 A 进料口半径;  $R_b$ —组分 B 进料口半径;  $R_m$ —混合室半径;  $L_m$ —混合室长度

混合室中两组分进料料流的面对面碰撞，将使物料的温度上升。考虑到混合室中的压力较小，且变化不大<sup>[3,4]</sup>，若忽略混合室壁面作用力对物料所作的功，则对混合室内的物料流动可列出如下能量衡算式：

$$\begin{aligned} &\rho_a Q_a \left( \frac{1}{2} v_a^2 + g L_m + U_a \right) \\ &+ \rho_b Q_b \left( \frac{1}{2} v_b^2 + g L_m + U_b \right) \\ &= \rho_m Q_m \left( \frac{1}{2} v_m^2 + U_m \right) \quad (16) \end{aligned}$$

式中  $\rho_a, \rho_b, \rho_m$  —— 组分 A, B 及其混合物的密度；

$U_a, U_b, U_m$  —— 组分 A, B 及其组分混合物单位质量所具有的内能。

若设组分 A 和组分 B 在进入混合室时的料温分别为  $T_a, T_b$ ，混合物流出混合室时所具有的温度为  $T_m$ ，则由式(16)导出

$$\begin{aligned} T_m &= \left[ \frac{1}{2} \rho_a Q_a (v_a^2 - v_m^2) \right. \\ &+ \left. \frac{1}{2} \rho_b Q_b (v_b^2 - v_m^2) + \rho_m Q_m g L_m \right. \\ &+ \left. C_{Pa} T_a + C_{Pb} T_b \right] / \rho_m Q_m C_{Pm} \quad (17) \end{aligned}$$

式中， $C_{Pa}, C_{Pb}, C_{Pm}$  分别为组分 A、组分 B 以及它们的混合物的定压比热。在推导该式时，可利用质量衡算所得出的衡等式，即

$$\rho_a Q_a + \rho_b Q_b = \rho_m Q_m \quad (18)$$

求得进料流速与出料流速之关系式，即

$$v_m = \frac{\rho_a}{\rho_m} \left( \frac{R_a}{R_m} \right)^2 v_a + \frac{\rho_b}{\rho_m} \left( \frac{R_b}{R_m} \right)^2 v_b \quad (19)$$

上述各式给出了混合室流动区工作状态参数之间以及它们与该区域结构参数和物性的物性参数之间的关系。

## 2 讨论

(1) 由于进料喷嘴起端处压力  $P_1$  与计量系统的操作压力直接相关，故关于进料嘴内的压力计算一直是人们关注的问题。文献<sup>[3]</sup>曾提出按充分的层流流型计算直管区两

端的压力降,这显然忽略了该区域内的物料有不充分层流这一事实,根据文献[3]的观点计算出的压力降将比本文式(8)的计算值小。还有一种观点,认为可根据伯努力方程计算整个进料喷嘴的压力降<sup>[4]</sup>。这种计算方法适用于直管区长度  $L_t$  为零的情况,当  $L_t \neq 0$  时,由于它未计入直管区两端的粘性压力降,所以,当  $L_t \neq 0$  时,应按本文的有关公式进行计算。

(2)在通常情况下,进料喷嘴的进口处与出口处的截面积相差很大( $A_2 \ll A_1, R_2 \ll R_1$ )。因此,式(4)~(6)可近似为

$$\Delta P_c = \frac{1}{2(\pi R_2^2)^2} \rho Q^2 \quad (20)$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2\Delta P_c}{\rho}} \quad (21)$$

$$F_c = \pi R_1^2 P_1 - \frac{1}{2\pi R_2^2} \rho Q^2 \quad (22)$$

以上的有关讨论将根据这3个等式进行。

(3)将式(20)和式(7)相加可得进料喷嘴两端的压力降

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_c + \Delta P_t = \frac{m+1}{2(\pi R_2^2)^2} \rho Q^2 + \frac{8\eta L_t Q}{\pi R_2^4} \\ &= \frac{1}{2(\pi R_2^2)^2} \rho Q^2 \left( m + \frac{32}{Re} \frac{L_t}{R_2} + 1 \right) \quad (23) \end{aligned}$$

由于进料喷嘴进口端压力  $P_1$  与计量系统的操作压力直接相关,而  $P_1$  又取决于  $\Delta P$ ,故有必要分析  $\Delta P$  与式(23)右边各参数之间的关系。

结合文献[5]中关于压力降校正系数  $m$  的研究结果,分析式(23)可知:①物料的粘度和密度  $\rho$  越大(小),则  $\Delta P$  越大(小);②进料喷嘴中的体积流率  $Q$  越大(小),则所需的  $\Delta P$  就越大(小);③直管区的长度  $L_t$  越长(短),截面半径  $R_2$  越小(大),则  $\Delta P$  就越大(小)。

为降低计量系统的操作压力,我们希望在保证一定的体积流率  $Q$  时,减小进料喷嘴

两端的压力降  $\Delta P$ 。为此,可以适当缩短直管区长度  $L_t$  或增大其截面半径  $R_2$ 。一种极限情况是  $L_t=0$ ,此时有

$$\Delta P = \frac{1}{2(\pi R_2^2)^2} \rho Q^2 \quad (24)$$

值得一提的是,  $R_2$  的增大应有一定的限制,它必须保证直管区内物料流动的雷诺数大于形成碰撞湍流混合所需的临界雷诺数。此外,增大  $R_2$  的同时也应增大  $R_1$ ,否则,  $\Delta P$  不但不能下降,甚至有可能上升。因为当  $R_2$  大到接近  $R_1$  时,进料喷嘴的锥形收敛区就近似变为直管形,这时必须用有关粘性流动的理论,而不是用伯努力方程来计算其两端的压力降。

(4)将式(22)与式(9)相加,可求得进料喷嘴壁面对物料流动的总阻力  $F$ ,其大小应与物料作用于进料喷嘴的总推力相等。组分  $A$  和  $B$  在向混合室内进料时作用于混合器的合力应等于它们作用于各自进料喷嘴的总推力之差值。该合力的计算对校核混合器上的紧固件强度有参考价值。从式(22)和式(9)不难看出,上述作用力均是进料喷嘴的工作状态参数( $P_1, Q$ ),物料的物理参数( $\rho, \eta$ ),以及进料喷嘴的结构参数( $R_1, R_2, L_t$ )的函数。

(5)对于反应注射成型加工过程来说,混合室中混合物的温度是一个至关重要的参数,它直接影响着混合物的凝胶期。过高的温度将会使混合物的凝胶期提前,从而影响混合器的正常工作。因此,我们必须将物料在进料喷嘴及混合室内的温升控制在允许的范围。这些温升可由式(12)和(17)计算得到。它们同样是工作状态参数、结构参数和物理参数的函数。

(6)设组分  $A$  和  $B$  的体积配比为  $n$ ,由式(13)可知

$$n = \frac{Q_a}{Q_b} = \frac{\Delta P_b}{\Delta P_a} \quad (25)$$

因此,若我们希望组分  $A$  和  $B$  的进料料流以

给定的体积配比在混合室的中心经碰撞形成湍流混合,则我们必须合理设计它们的进料喷嘴,以使它们两端的压力降 $\Delta P_a$ 和 $\Delta P_b$ 满足式(25)所给定的相互制约关系。

### 3 结语

混合是反应注射成型过程的三个关键步骤(计量、混合、充模)之一。碰撞混合器是反应注射成型机目前采用最多的混合装置。在碰撞混合过程中,两个需重点研究的问题是碰撞湍流的混合机理和混合器内物料流动体系的能量转换及动量传递。前者涉及到混合质量的优劣,后者可以反映混合器的工作状态,这不仅有助于更清楚地认识混合器的工作机理,而且对混合器的结构设计有指导意义。

本文第2部分对所得出的一些关系式展开了讨论。由于立论之初,曾作a,b,c,d4条假设,且此假设与实际情况有些出入,故上述分析和计算均为理论值。其计算结果是否与实际吻合,尚有待于试验检验和修正。

### 参考文献

- 1 王绍亨、陈涛,动量、热量与质量传递,37~50,天津科学技术出版社,天津,1986。
- 2 Charles L. Tucker and Nam P. Suh, Polym. Eng. Sci., 20[13],875(1980).
- 3 P. D. Coates, A. I. Sivakumar and A. F. Johnson, Plast. Rubb. Process. Appl., 10[1],27(1988).
- 4 Fritz W. Schneider, 陆兆珍译,高压RIM和RRIM计量、混合技术的新进展,天津国际塑料展览会。
- 5 戴干策、陈敏恒,化工流体力学,387~389,化学工业出版社,北京,1988。

收稿日期 1993-10-13

## Balance Calculations of Energy and Momentum of Reactant Flows in Impingement Mixing Unit

Liu Hesheng

(Qingdao Institute of Chemical Technology 266042)

**Abstract** The balance calculations were carried out of energy and momentum of reactant flows in an impingement mixing unit used for reaction injection molding. The resultant relations between the operation performance and configuration of the mixing unit and the physical properties of reactants were analysed. The results were beneficial to understanding the working mechanism of mixing unit and mapping out its configuration.

**Keywords** impingement mixing, mixing unit, reaction injection molding balance calculation of energy, balance calculation of momentum

### 横滨橡胶公司开发跑气保用轮胎

美国《橡胶和塑料新闻》1993年12月6日11页报道:

日本横滨橡胶公司开发了一种跑气保用轮胎,其最高时速可达100km。

AVS行驶和支撑系统装有气压传感器,它采用了可使轮胎在低气压、甚至无气压的条件下行驶的技术。试验证明,在10月20日东京汽车博览会上推出的AVS轮胎可在

无气压的条件下持续行驶100km。该轮胎的特点是增强了的胎侧限制了在低气压下的屈挠,驼峰不对称的轮辋提高了轮胎胎圈固着在轮辋上的能力。

AVS系统是横滨公司专为具有优异操作性能的低断面轮胎开发的。该公司说,这种系统既可用于原配胎,也可用于替换胎。

(涂学忠译)