

啮合异向双螺杆挤出过程聚合物粉料熔融可视化研究

朱林杰 耿孝正

(北京化工大学机械工程学院, 北京 100029)

摘 要: 借助于玻璃视窗可视化挤出机, 对啮合异向双螺杆挤出过程中聚合物粉料的熔融进行了实验研究; 考察了螺杆构型、操作条件对聚合物熔融的影响, 并总结出熔融过程的基本模型。研究表明, 螺杆元件的结构与输送机理是聚合物熔融过程的决定性因素; 海-岛熔融模型与固体床-熔膜模型是啮合异向双螺杆挤出过程中聚合物熔融的典型形态, 且在前者中聚合物的熔融效率更高。

关键词: 聚合物; 熔融; 双螺杆挤出过程; 可视化技术

中图分类号: TQ026.7

引 言

啮合异向双螺杆挤出机已广泛用于热敏性塑料聚氯乙烯的混炼与成型加工^[1,2]。

熔融是啮合异向双螺杆挤出机的必备功能, 但过程十分复杂, 影响因素众多。

在挤出过程中, 聚合物的熔融是在封闭的塑化挤出系统中、在机筒热传导与螺杆机械能的共同作用下完成的。挤出过程熔融机理研究的首要任务是设计与采用合适的实验设备, 以准确获取封闭的挤出系统中聚合物的熔融信息。目前用于双螺杆挤出过程中聚合物熔融机理研究的常用设备是剖分式机筒与装有玻璃视窗的可视化挤出机^[3]。

文献[4,5]对啮合异向双螺杆挤出过程聚合物熔融机理进行的研究, 为该领域奠定了基础, 但仍存在不足: (1) 聚合物熔融过程中螺杆构型较为简单(即为等导程螺纹元件), 并未考虑不同螺杆构型对聚合物熔融的影响; (2) 螺杆转速 n 较低(即 4.3 r/min 与 10.2 r/min), 与实际生产有一定差距; (3) 受实验设备的制约, 只能进行熔融机理的静态研究。

本文以装有玻璃视窗的可视化双螺杆挤出机为工具, 对聚丙烯(PP)粉料在多种螺杆构型中与不同操作条件下的熔融过程进行了动态、在线研究, 讨

论螺杆构型、加料量、螺杆转速对聚合物熔融的影响, 总结聚合物熔融的基本规律, 为挤出过程聚合物熔融的模型化提供依据。

1 实验

1.1 实验设备

德国产 Leistritz 双螺杆挤出机(型号为 LSM 30, 34)及自行研制的装有玻璃视窗的可视化双螺杆挤出机^[6](以下简称可视化挤出机)。

1.2 实验物料

聚丙烯粉料(PP), 燕山石化生产。

1.3 实验机筒螺杆组合与螺杆元件

在啮合异向双螺杆挤出机中, 两根螺杆的旋转方向相反; 将具有正向(即挤出方向)输送能力的螺纹元件称为正向螺纹元件; 反之称为反向螺纹元件。机筒与螺杆组合方式见图 1 与表 1。表 1 中 SS、TS、THS 分别表示单头、双头与三头螺纹元件, 螺纹元件的规格由 X/Y 表示, X 为螺纹元件的导程, Y 为螺纹元件的长度; SP7.5 表示长度为 7.5 mm 的柱状间隔元件(Spacer); G30 表示长度为 30 mm 的齿形盘; R 表示反向螺纹元件。

可视化机筒结构分为玻璃视窗位于上啮合区与位于下啮合区两种, 如图 2 所示, 从而可对比研究挤出过程中上下啮合区聚合物熔融的不同。

1.4 操作条件设定

三节机筒的设定温度均为 200 , 螺杆转速(n)、加料螺杆转速(n (加))与加料量(q)见表 2。

收稿日期: 1999-06-28

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(59733070)

第一作者: 男, 1972 年生, 博士

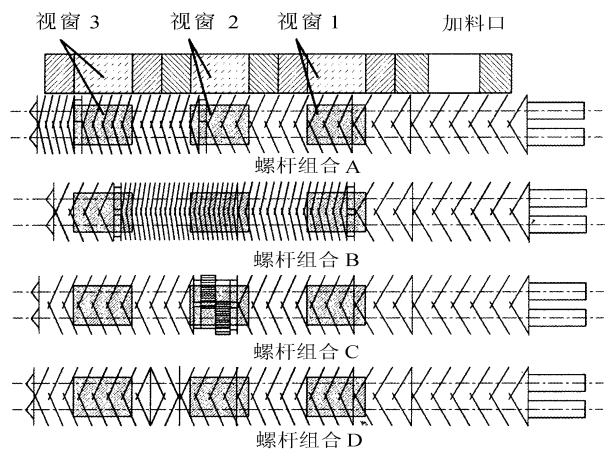


图 1 实验用螺杆构型与机筒组合
Fig. 1 Screw and barrel configurations

表 1 螺杆构型

Table 1 Screw configuration

螺杆编号	螺杆结构
螺杆 A	SS30/120 + SS30/60 + SS20/120 + SS20/30 + SP7.5 + TS30/120 + SP7.5 + THS30/30
螺杆 B	SS30/120 + SS30/60 + SP7.5 + THS48/120 + THS30/90 + SP7.5 + SS20/60
螺杆 C	SS30/120 + SS30/60 + SS20/120 + SP7.5 + G30 + SP7.5 + SS20/120 + SS20/30
螺杆 D	SS30/120 + SS30/60 + SS20/120 + SS20/60 + SS20/30 (R) + SS20/120

表 2 螺杆转速与加料量设定

Table 2 Screw speed and feed rate

$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$n(\text{加})/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$q/(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$
40	90	9.4
40	110	11.5
60	90	9.4

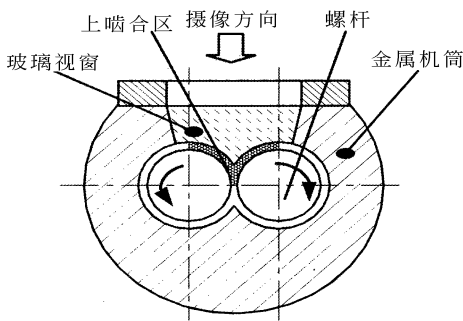
1.5 熔融过程可视化照片的获取

当挤出过程稳定后，对玻璃视窗中聚合物的熔融过程进行连续拍摄，并采用计算机进行图像分析。

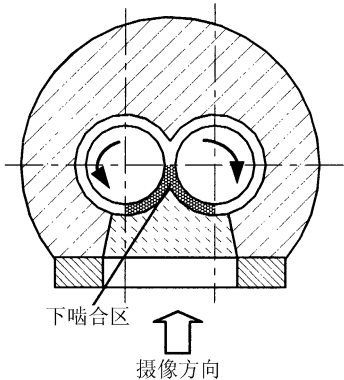
2 结果与讨论

2.1 等螺槽体积正向螺纹元件组合中聚合物熔融

实验所采用的螺杆组合为螺杆 A，见图 1 与表 1。从视窗 2 到视窗 3，螺纹元件由单头过渡为双头，但单位导程的螺槽体积基本保持恒定。挤出过



(a) 玻璃视窗位于上啮合区



(b) 玻璃视窗位于下啮合区

图 2 可视化机筒结构

Fig. 2 Structure of visualization barrel

程中聚合物熔融的可视化照片(由图 1 中的视窗 2 与 3 拍摄获得)如图 3 所示，在下啮合区中螺槽基本上为全充满，而在上啮合区中螺槽的充满度很低。因为：在啮合异向双螺杆挤出机中物料主要依靠正位移机理输送，此时整个螺槽为部分充满，上啮合区中的物料在螺杆往外旋转过程中被带入并堆积到下啮合区。下啮合区中物料主要是沿螺杆轴向作正位移输送，但有少部分物料通过两根螺杆间的侧间隙进入到上啮合区，或通过机筒与螺杆的径向间隙进入上游的 C 形小室。

在单头螺纹元件的下啮合区(见图 3 (b))，螺槽基本上被聚丙烯粉料全充满，物料与机筒内表面接触处首先熔融并形成熔膜，部分熔体通过螺棱与机筒的间隙往上游的 C 形小室中运动。在单头螺纹元件的上啮合区(见图 3 (b))，螺槽中物料的充满度低，在玻璃视窗的内表面有部分熔融的聚丙烯粉料粘附，这是由于有部分熔融的聚合物粉料粘附在螺杆表面输送。

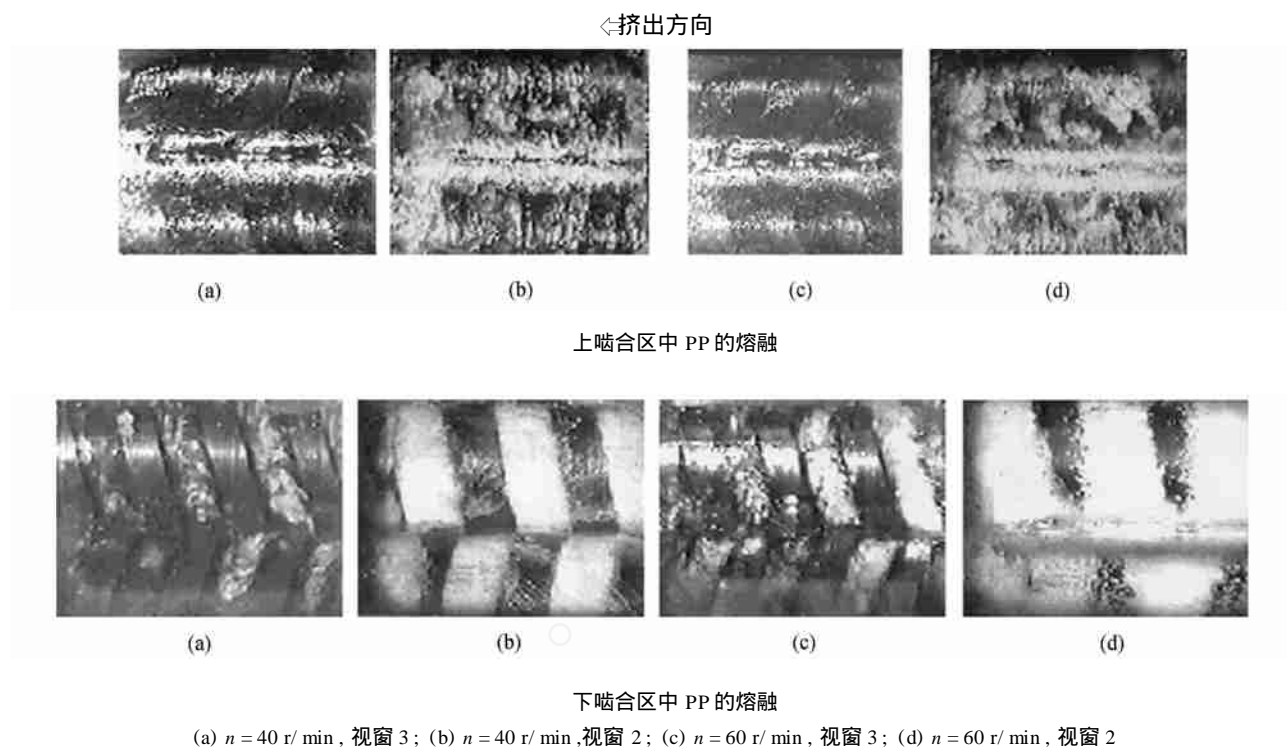


图 3 等螺槽体积正向螺纹元件组合中 PP 粉料的熔融可视化照片 ($q = 9.4 \text{ kg/h}$)

Fig. 3 Picture of the melting of PP powder in forward screw element configuration with equivalent channel volume

在双头螺纹元件的下啮合区(见图 3 (a)), 螺槽被聚丙烯的固液两相混合物全充满, 且以聚合物熔体为连续相, 少部分残留固相悬浮其中, 形成海-岛熔融模型^[7]。残留固相主要集中在推进螺棱侧附近, 并在螺杆的旋转过程中往上啮合区及上游的 C 形小室流动。沿挤出方向, 残留固相的比例减小。在双头螺纹元件的上啮合区(见图 3 (a)), 螺槽部分充满且物料基本上全部熔融。

在保持加料量恒定, 提高螺杆转速后, 在单头螺纹元件的下啮合区(见图 3 (d)), 螺槽被聚丙烯固体粉料全充满, 但在机筒的内表面处未形成熔膜。在其上啮合区中(见图 3 (d)), 机筒与螺杆表面均有部分熔融的聚合物粉料粘附; 在双头螺纹元件的下啮合区(见图 3 (c)), 螺槽被聚合物固液两相混合物充满, 但其中残留固相的含量比低螺杆转速下有所增加。在其上啮合区(见图 3 (c)), 螺槽充满度低但聚合物已全部被熔融。说明在螺杆转速提高后, 熔融的起始点与结束点往挤出方向发生移动。

研究表明, 聚合物粉料熔融过程中的主要能源是机筒热传导, 但啮合区的螺杆间隙、机筒与螺杆的径向间隙中物料的交流对聚合物的熔融起到了重

要的作用。该过程中聚合物粉料的熔融可简化为图 4 所示的模型, 其特点是: (1) 物料的熔融主要发生在下啮合区; (2) 在大部分区域内聚合物的熔融是与单螺杆类似的固体床-熔膜熔融机理^[1]下完成的, 但其螺槽仅为部分充满, 并未形成单螺杆挤出过程中的密实固体塞; (3) 在聚合物熔融过程的末端, 形成以残留固相为分散相的海-岛熔融机理。

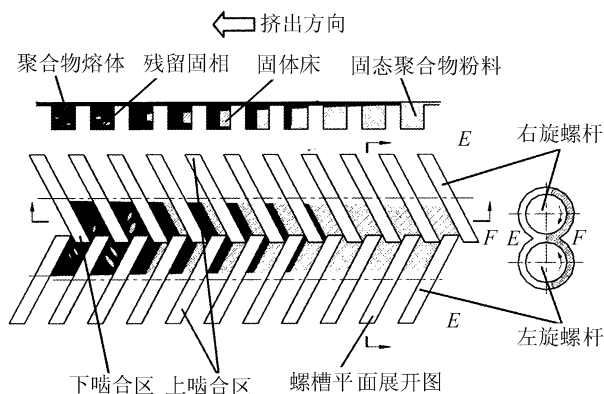


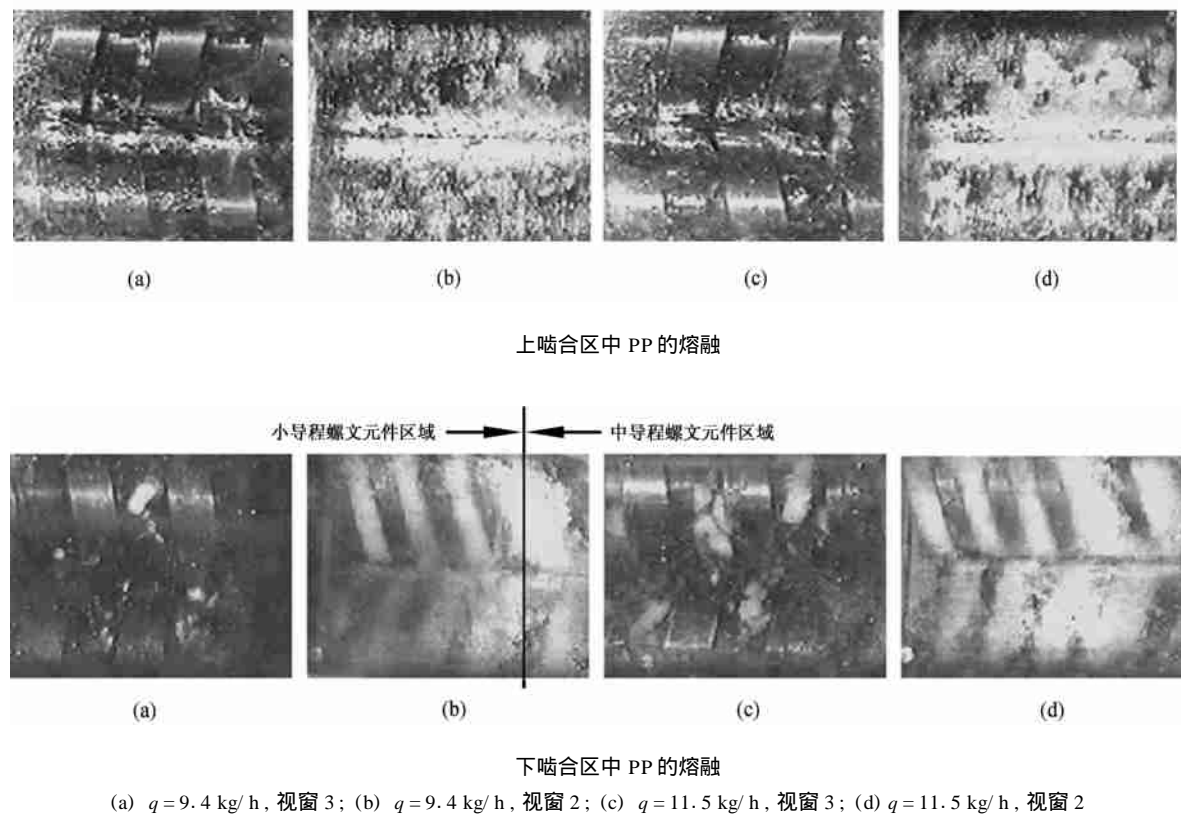
图 4 正向螺纹元件组合中聚合物粉料的熔融模型

Fig. 4 Melting model of polymer powder in forward screw element configuration

2.2 减导程正向螺纹元件组合中聚合物的熔融

实验所采用的螺杆组合为螺杆 B，见图 1 与表 1。从视窗 1 到视窗 2，螺纹元件导程减小，螺槽

体积缩小(螺槽体积压缩比为 1.6)。挤出过程中聚合物熔融的可视化照片如图 5 所示。



(a) $q = 9.4 \text{ kg/h}$, 视窗 3; (b) $q = 9.4 \text{ kg/h}$, 视窗 2; (c) $q = 11.5 \text{ kg/h}$, 视窗 3; (d) $q = 11.5 \text{ kg/h}$, 视窗 2

图 5 减导程正向螺纹元件组合中 PP 熔融的可视化照片 ($n = 40 \text{ r/min}$)

Fig.5 Picture of the melting of PP powder in pitch reduced forward screw element configuration($n = 40 \text{ r/min}$)

由图 5 (b)可见，在中导程三头螺纹元件的下啮合区，螺槽中物料的充满度较低，且物料基本保持固态，在中导程到小导程螺纹元件的过渡区，螺槽中物料的充满度上升，在小导程螺纹中，机筒内表面处的物料开始熔融，因此螺纹元件的导程减小区域即为聚丙烯粉料熔融的起始点。在三头螺纹元件的上啮合区(图 5 (b))，螺槽充满度很低，在机筒与螺杆表面均有部分熔融的聚合物粘附。

在视窗 3 的下啮合区(图 5 (a))，螺槽被聚合物熔体全充满，且有极少量聚丙烯粉料残留固相相互粘结后悬浮在其中；在视窗 3 的上啮合区，物料基本上被熔融，且螺槽的充满度很低。

若保持螺杆转速恒定、增加加料量，在视窗 2 的下啮合区(图 5 (d))，螺槽中物料的充满度上升，物料的压实程度增加，但聚合物的熔融起始点仍在螺纹元件的减导程区域；在视窗 2 的上啮合区

(图 5 (d))，螺槽中物料的充满度有所增加，聚合物部分熔融且其中残留的比例增大；在视窗 3 的下啮合区(图 5 (c))，固液两相混合物中固相的比例增大，且残留固相主要集中在螺纹元件的推进面侧。这表明加料量增大后，聚合物熔融所需的长度增长。

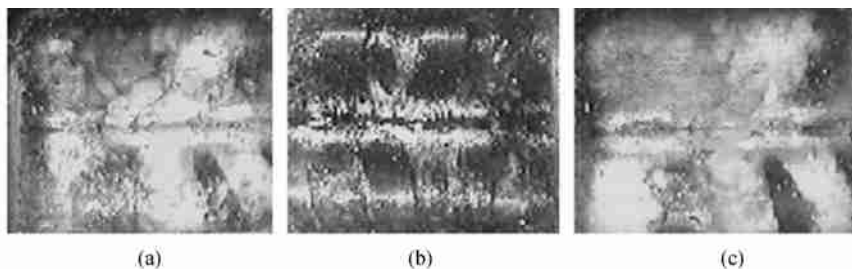
本螺杆构型中，聚合物粉料的熔融过程与螺杆构型 A 中(见图 4)的较为类似，即主要的熔融形态是固体床-熔膜模型。

2.3 组合齿形盘螺杆中聚合物的熔融

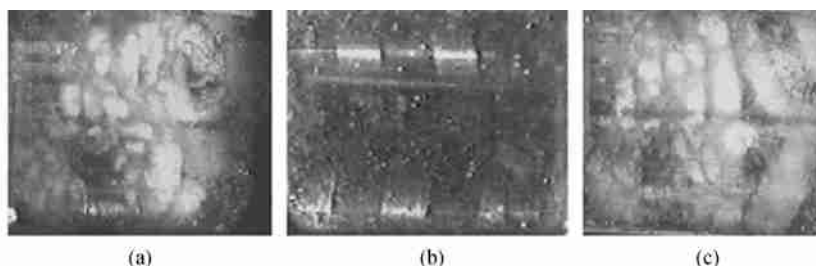
由于齿形元件对物料输送的阻碍作用，在上下啮合区中(见图 6 (a)与 6 (a))，螺槽基本上被聚合物固液两相混合物全充满。在齿形元件中，粉料不再形成固体床，而是相互粘结形成分散相；上下啮合区中聚合物的熔融形态基本相同，即为海岛熔融模型。随着加料量的增大(见图 6 (c)与 6

(c)), 齿形盘中海-岛熔融模型的残留固相比例增大。在齿形盘下游的螺纹元件中(图 6

(b)), 聚合物全部被熔融, 且上下啮合区的螺槽中熔体充满度仍相差很大。



上啮合区中 PP 粉料的熔融



下啮合区中 PP 粉料的熔融

(a) $q = 9.4 \text{ kg/h}$, 视窗 2; (b) $q = 11.5 \text{ kg/h}$, 视窗 3; (c) $q = 11.5 \text{ kg/h}$, 视窗 2

图 6 齿形盘中 PP 熔融的可视化照片 ($n = 40 \text{ r/min}$)

Fig. 6 Picture of the melting of PP powder in the screw with gear elements ($n = 40 \text{ r/min}$)

该熔融过程可简化为图 7 所示的模型, 即在齿形盘区域, 螺槽全充满, 部分聚合物粉料熔融形成连续的熔体相, 而聚合物固体粉料相互粘结形成分散相悬浮其中, 即形成海-岛熔融模型。

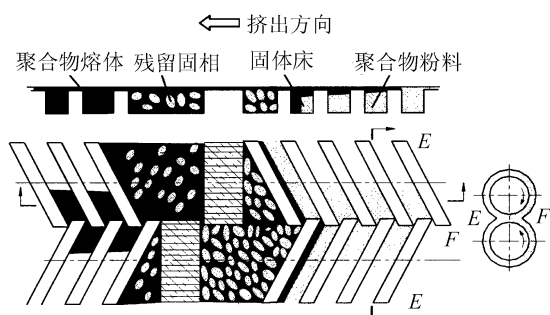


图 7 齿形盘元件中聚合物粉料的熔融模型

Fig. 7 Melting model of PP powder in the screw with gear elements

2.4 带反向螺纹元件的螺杆构型中聚合物的熔融

由于反向螺纹元件对物料的阻碍作用, 在其上游(即与挤出方向相反)的螺纹元件中形成一定长度

的全充满区域, 且在下啮合区中熔体充满区的长度比上啮合区中的长得多。在下啮合区中(图 8 (a)), 在螺棱推进面侧形成聚丙烯粉料固体床, 且沿挤出方向固体床的宽度与长度均减小, 其原因是: (1) 沿螺杆轴向, 固体聚合物被逐渐熔融; (2) 下啮合区中部分聚合物残留固相通过螺杆侧间隙进入上啮合区。在推进螺槽的背面聚合物熔体堆积并形成熔池。在上啮合区中(图 8 (a)), 螺槽中物料的充满度较低, 聚合物粉料未被压实, 即以松散的粉料直接进入聚合物熔体全充满区域而形成海-岛熔融模型。

随着加料量的增加, 螺槽中残留固相的比例增大。下啮合区中(图 8 (b)) 固体床的长度增大, 聚合物的熔融长度增长, 熔融结束点往挤出方向移动。上啮合区中(图 8 (b)), 形成海-岛熔融模型且残留固相的比例较低加料量下的增大。

在反向螺纹元件的螺杆组合中, 聚合物的熔融可简化为图 9 所示的模型。熔融主要发生在下啮合区, 聚合物熔融的主要形态是固体床-熔膜熔融模型, 但在上啮合区也有少部分粉料悬浮在连续的熔体中形成海-岛熔融模型。

对比聚合物粉料在四种螺杆构型中的熔融过程可以发现，在螺杆构型 C(带齿形盘的螺杆)与 D(带反向螺纹元件的螺杆)中聚合物的熔融长度较螺杆 A 与 B(正向螺纹元件的组合螺杆)短。这是由于在螺杆 C 与 D 中，螺槽被聚合物固液两相混合物全充满并形成海-岛熔融模型；在螺杆的旋转作用下，聚

合物熔体发生强烈的剪切并产生大量粘性耗散热，从而促进了聚合物的快速熔融。由此可见，海-岛熔融模型中聚合物的熔融效率比固体床-熔膜熔融机理中的高。

3 结论

(1)在啮合异向双螺杆挤出过程中，聚合物的熔融取决于螺杆元件的结构形式与输送机理；在螺纹元件中，上下啮合区聚合物的熔融过程差异很大，且熔融主要发生在下啮合区，聚合物熔融的主要能量来源是机筒的热传导；在齿形盘中，上下啮合区的熔融过程基本相同，且熔融的主要能量来源是熔体的粘性耗散热与机筒的热传导。

(2)双螺杆的间隙对聚合物熔融的作用很大，侧间隙与径向间隙中的熔体漏流促进了物料的交换与熔融的进行。

(3)啮合异向双螺杆挤出过程中聚合物的熔融机理主要有两种，即固体床-熔膜模型与海-岛模型；但其固体床-熔膜熔融模型与单螺杆中的不同，其螺槽通常是在下啮合区局部充满，即未形成单螺杆中螺槽全充满的压实固体床结构；其海-岛熔融模型的形成主要是由于相邻螺杆元件结构的变化而导致固体床的破碎，以及物料通过压延间隙时的“拉伸加速”而造成固液两相的混合，在海-岛熔融模型中聚合物的熔融效率较固体床-熔膜模型中的高。

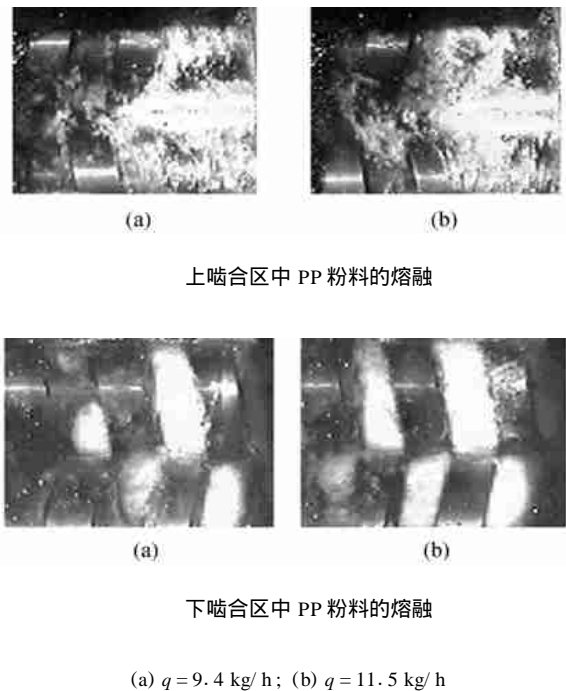


图 8 反向螺纹元件组合中 PP 粉料的熔融照片 ($n = 40$ r/min, 视窗 2)

Fig.8 Picture of the melting of PP powder in the screw with reversed screw elements($n = 40$ r/min, Win-dow 2)

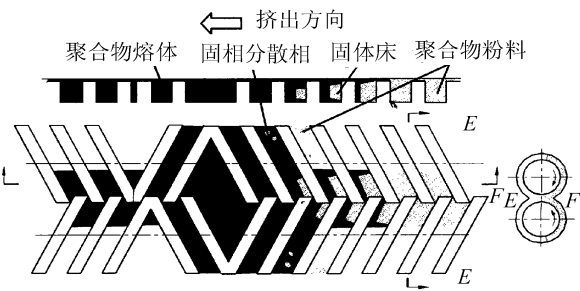


图 9 反向螺纹元组合中聚合物粉料的熔融模型

Fig. 9 Melting model of PP powder in the screw with reversed screw elements

参 考 文 献

[1] Tadmor Z, Gogos C G. Principle of polymer processing. New York: John Wiley & Sons, 1979

[2] Wolf D, Holin N, White D H. Residence time distribution in a commercial twin-screw extruder. Polymer Engineering & Science, 1986, 26: 640

[3] 朱林杰, 耿孝正. 啮合同向双螺杆挤出过程聚合物粒料熔融机理研究(一). 中国塑料, 1999 (6): 90

[4] Jassen L P B M. Twin screw extrusion. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1978

[5] 耿孝正, 张沛. 塑料混合及设备. 北京: 中国轻工出版社, 1992

[6] 耿孝正, 余全平. 带有透明玻璃视窗的双螺杆挤出机. 中国, ZL 93217951.7. 1994-09-14

[7] 朱林杰, 耿孝正. 啮合同向双螺杆挤出过程聚合物粒料熔融机理研究(二). 中国塑料, 1999 (7): 76

Visualization research of polymer melting mechanisms in intermeshing counter-rotating twin-screw extrusion

ZHU Lin-jie GENG Xiao-zheng

(College of Mechanical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract : With visualization twin-screw extruder, the melting progressing of Polypropylene (PP) in intermeshing counter-rotating twin-screw extrusion was investigated. The influence of screw configurations and operational conditions on polymer melting were discussed. It showed that the structure and the conveying mechanism of screw elements were the decisive factors of polymer melting progressing. The solid-bed film melting and islands-sea melting were two typical melting models of polymer powder in intermeshing counter-rotating twin-screw extruder. The melting efficiency of polymer powder in islands-sea melting model was higher than that in the solid-bed film melting model.

Key words : polymer; melting; twin-screw extrusion; visualization technology

(上接第 41 页)

Experiment research on measuring surface temperature on gear teeth by dynamic thermocouple method

ZHANG You-chen¹⁾ MENG Hui-rong²⁾

(1) College of Mechanical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

2) China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract : Surface temperature on gear teeth was measured by dynamic thermocouple method. A test gear construction consisting of three pieces and electric resistance was designed. Test results agreed with theoretical results on the whole. The method of calculating integral temperature by measured flash temperature curve was put forward.

Key words : gear; flash temperature; thermocouple; experiment

本刊诚征优秀外稿

本刊在今年“全国优秀高校自然科学学报及教育部优秀科技期刊”评比中荣获二等奖。并据中国科技信息研究所“中国科技期刊引证报告”,本刊 1998 年的影响因子为 0.143,居全国高校学报(自然科学版)第 32 位。为了更好地贯彻办刊宗旨,扩大刊物的影响,本刊拟从 2000 年开始,向国内外征求优秀稿件。文稿可选用中、英文撰写,要求具有创新性。来稿具体格式要求详见本刊的征稿简则。校外作者可通过邮局寄送文稿及软盘,或采用电子邮件投稿。对于校外来稿,本刊将尽快告知录用结果,优秀外稿将优先刊载。

欢迎广大校外作者踊跃投稿或来电查询各有关事宜。

e-mail: xuebao @ buct.edu.cn

Tel: (010) 64434926

北京化工大学学报编辑部