

挤压(膨化)技术及其在浮性水产饲料和 宠物饲料中的应用¹

EXTRUSION TECHNOLOGY AND APPLICATION IN FLOATING AQUICULTURE FEED AND PET FOOD

谢富弘 博士

美国密苏里大学生物与农业工程学院

前 言

挤压 (Extrusion, 俗称膨化) 是一种集混合、剪切、加热、揉合、冷却和成形等多种作业在一起的加工过程。这种加工工艺是将一种材料放在多种受控条件下压制成一种半固体, 再使之以预定的速率通过一个受限制的出口, 譬如一定形状的圆孔或长孔(Dziezak, 1989)。最早关于挤压加工的记载是在 1797 年, 当时 Joseph Bramah 用一个活塞驱动装置制造无缝铅管(Janssen, 1978)。这项发明后来被食品工业应用于制作通心面。最早的双螺杆挤压机是由 Follows 和 Bates 于 1869 年研制的, 用来制作肉肠(Janssen, 1978)。1873 年为 Phoenix Gummiwerke A.G. 开发出由浅纹螺杆旋转于圆筒机膛中的单螺杆挤压机 (Linko 等人, 1981)。

三十年代中期, 有人用成形挤压机将粗粒面粉与水混合制作面条。几年之后, 有人用这种集输送、混合及成形在一起的挤压技术, 将预调制过的燕麦面团制成了最早的即食早餐粮 (Harper, 1981)。三十年代后期, Robert Colombo 和 Carlo Pasquetti 研制了啮合同向转动双螺杆挤压机, 用这种挤压机不加溶剂即可混合纤维素 (Martelli, 1983)。四十年代中后期, 用单螺杆挤压机规模性地生产了最早的挤压膨化食品, 即玉米片 (Hauck and Huber, 1989)。五十年代、六十年代和七十年代, 先后出现了用单螺杆挤压机生产的膨化干宠物饲料、即食早餐粮和质构化植物蛋白 (Harper, 1981; Hauck and Huber, 1989)。七十年代前期, Creusot—Loire

¹首次发表于 1998 年 9 月

为食品加工研制了双螺杆塑料挤压机。到八十年代，用挤压技术生产水产饲料迅速发展商品化规模（Hauck and Huber，1989）。

挤压技术在浮性水产饲料方面的应用

前 言

水产品是最重要的农业产品之一。全世界食品总量的 7.5% 左右来自海洋、湖泊和河流。据估计，十亿多发展中国家的人口以水产品作为他们摄取动物蛋白的主要来源（Fondon，1998）。虽然目前野生水产品仍然占据水产食品的大部分，但是，这类野生资源正在逐渐萎缩，这将继续促进水产养殖技术的提高，推动水产养殖业发展，人们也将愈加仰赖于水产养殖业。

现在，水产养殖业每年生产 2550 万吨鳍鱼、贝壳类和植物类，大约可获 1800 万吨可食水产品（图 1），比 1988 年（年产 1100 万吨）增长了 64%。1995—1996 年水产养殖业的产量占食用水产品总量的 22%，而 1984 年仅占 11%（Fondon，1998）。这样的增长量相当于每年产量增长 9% 以上，产值增长 14%。水产养殖已成为农业生产中增长最快的部分。同时，越来越多的国家看到水产养殖的重要性。

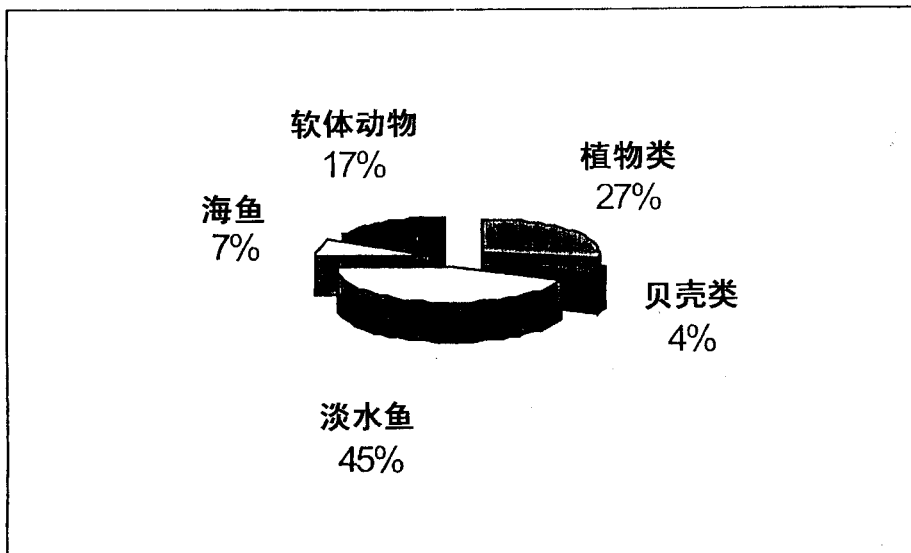


图 1 水产品分类分布

例如，1970 年仅有 32 个国家报道他们的水产养殖业产量，到 1994 年报道水产品产量的国家跃升至 147 个（Fondon，1998）。不过，对水产养殖业大量投资的国家

仍占少数。可见水产养殖业对大多数国家来说仍是一个“新领域”。占产量75%以上的水产品都产自亚洲发展中国家（图2）。

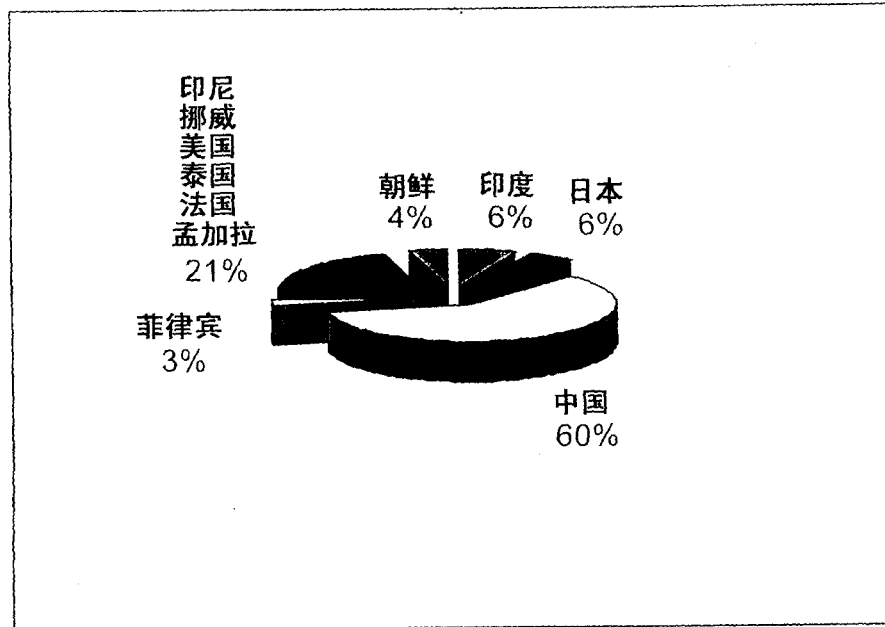


图2 水产品主要生产国

据估计，到2010年水产养殖业提供的产品差不多将占到人们水产品消费的40%。这些产品将由养鱼场和海水养殖场采用基因改良的鱼类、贝类品种进行生产。目前世界各地养殖的水产品有50多种，其中为人熟知的有鲤鱼、鲑鱼、鳟鱼、斑点叉尾鮰、蛤、虾、海扇和蟹。鲤鱼是最大的养殖鱼种，但其市场仅局限于东欧和亚洲。在美国，斑点叉尾鮰最有发展潜力，虹鳟鱼、鲑鱼、鳊鱼（crawfish）、观赏鱼类和钓饵鱼也都大量养殖。在日本，重要鱼种是鳟鱼、鲤鱼、虹鳟鱼、海鲷鱼和鳊鱼。在台湾，人们在人工控制条件下集约养殖鳟鱼、罗非鱼和海虾。其他有经济价值的养殖鱼类有鲑鱼、鳟鱼、斑点叉尾鮰和虾。全世界增长最快的水产养殖是海虾养殖，在中、南美洲和亚洲的热带沿海区域正在开辟一些大型养殖场。

水产养殖业除有水产品的经济价值外，更有一些长远的经济价值；这个行业还为成千上万的人提供就业，估计在美国有30多万个工作岗位直接与水产养殖业有关（Fondon, 1998）。

水产饲料加工

商品化水产饲料生产的主要棘手问题中的两个就是饲料配方和饲料加工。有代表性的商品化配合水产饲料含有 25%—45%粗蛋白，主要由鱼和动物的副产品组成。以单位蛋白质成本来看，豆粕的成本大约是鱼粉成本的二分之一。现在，许多种鱼都用豆粕制作的饲料养殖，包括杂交条纹鲈鱼、鲑鱼、斑点叉尾鮰、罗非鱼、鳊鱼和虾 (Hayes, 1996)。多数情况下用豆粕代替 30—70%鱼粉。但是，必须采取措施解决大豆中的抗营养因子的问题，也就是要设法使胰蛋白酶抑制因子钝化或破坏，方法有热处理、干法或湿法挤压熟化。表 1 列出了三种鱼饲料的代表性配料构成 (Loveall, 1985)。

鱼饲料常制成颗粒饲料形式。鱼颗粒饲料必须能在水中被鱼吃掉之前保持颗粒完整。如颗粒在水中解体，释放出的糖、淀粉和其他物质就会形成一层胶状物，这样一来，清理鱼箱、鱼池的费用很贵，还会导致细菌、真菌在鱼池底部大量繁殖而出现高的鱼死亡率。水质及鱼箱、鱼池的底部状况还与鱼肉出现色味异常具有一定的相关关系。可见，饲料或颗粒饲料的品质可对水质产生严重影响。

在水产饲料开发早期，是用制粒机将饲料压实，当时已知道用粉料养殖斑点叉尾鮰不如颗粒饲料利用率高。用小颗粒饲料或含粉量高的饲料喂养大鱼时，小颗粒难以被充分采食，从而使饲料转化率降低；未被采食的颗粒还会使养殖场发生富化作用 (eutropication)，而致氧气溶解量降低，无效代谢增高。

颗粒大小是鱼饲料的一个重要物理特性。颗粒应当尽可能大些，以尽量减少由于在水中溶解或解体所造成的营养损失，但又不能大到妨碍鱼类采食。表 2 列出大小不同的斑点叉尾鮰所用颗粒饲料的适宜粒度。饲料的质地对有些鱼类很重要。大多数商品化养殖的鱼类都能很好地采食硬质颗粒饲料，但是有些鱼，如鳊鱼，则更喜欢软质颗粒饲料 (Loveall, 1985)。

水产饲料加工的一般流程示于图 3 (Li and Robinson, 1994; Robinson and Li, 1996)。将整粒或粗破碎谷粒用带 7 号筛的锤式粉碎机或类似碾磨装置磨碎，然后经配料，混合。配料时，将各种粉料先进入混合器上方的进料斗，称重，再于混合器内混合一定时间 (2—4 分钟)。混合好的物料再经细粉碎使之通过 14 号或 16 号筛片，筛号大小取决于所制作的饲料类型。再粉碎后的物料转移到制粒机或挤压机上方的进料斗内。图 4 表示了制粒机或挤压熟化之前的原料制备过程。

表 1 三种鱼饲料的配料组成^a

配料	斑点叉尾鮰 ^b	虹鳟鱼 ^c	美鳊鱼 ^a
	(%)	(%)	(%)
步鱼粉或鲜鱼粉	8	35	10
肉骨粉			5
豆粕 (蛋白质 48%)	48.2	20	40
黄玉米粉	31.2		33
小麦细麸	10	32	
酒精酒糟残液干燥物			7.5
动物脂肪 (饲料级)	1.5		3.5
鲱鱼油		10	
磷酸二钙	1		1
维生素预混料 ^e	0.05		0.05
维生素蛋氨酸预混料 ^f		2	
微量矿物质预混料 ^g	0.05		0.05
矿物质预混料 ^h		1	

^a资料来源: Channel catfish, National Research Council (1983); rainbow trout, C201 Guelph reference diet, C.Y.Cho, University of Guelph, Guelph, Ont., Canada (personal communication); golden shiners, Felts (1979)。

^b斑点叉尾 日粮, 挤压加工, 蛋白质 32%。

^c虹鳟鱼日粮, 制粒机产品, 蛋白质 37.5%。

^d美鳊鱼日粮, 粉料, 蛋白质 32%。

^e预混料提供 150% 的各种维生素需要量 (生物素除外), 300% 的维生素 C 需要量。

^f预混料提供虹鳟鱼全部维生素需要量, 维生素 C 比需要量加倍 (弥补加工损失); 提供的蛋氨酸为 3000mg/kg (毫克/公斤, 下同)。

^g提供量如下 (mg/kg 饲料): 镁 25, 碘 5, 铜 3, 锌 80, 铁 44, 钴 5。

^h提供量如下 (mg/kg 饲料): 氧化镁 89, 碘化钾 4.3, 氧化铁 28, 硫酸铜 8.2, 氧化锌 1.2, 氯化钴 0.8, 氯化钠 2000, 磷酸二钙 4500。

表 2 不同大小的斑点叉尾鮰的饲料颗粒适宜粒度^a

鱼大小 (cm)	颗粒饲料 型 号	美 制 标 准 筛		
			孔径(mm)	筛 号
鱼苗	鱼苗饲料	存留	0.42	40
		通过	0.59	30
1.2—2.5	No.1	存留	0.59	30
		通过	0.84	20
2.5—3.8	No.2	存留	0.84	20
		通过	1.19	16
3.8—6.3	No.3	存留	1.19	16
		通过	1.68	12
6.3—10	No.4	存留	1.68	12
		通过	2.38	8
10—15	No.5	存留	2.38	8
		通过	3.36	6
>15	0.5cm 颗粒			

^a 引自 NRC(1981)

一、制粒

制粒加工水产饲料，是通过水、热和加压使配料凝聚成大的均质颗粒。将粉碎过的原料先用蒸汽处理，再压制成颗粒。对制粒质量和制粒机模具磨损影响最大的环节是进行原料调制的蒸汽调制器和大功率混合器。通过调制器加热加水，使淀粉一定程度地糊化而在颗粒内部起到一定的粘合作用。通常是用一定量的蒸汽使物料在通过模具之前水分达到 15—18%，温度达到 70—85℃。颗粒出机后须立即进行适当冷却以去除水分。这样制成的颗粒一投进水中就很快沉落，短时间内即膨胀解体。这就要求所养殖的鱼在很短时间内采食。制粒机的初期投资少，且产量大，现仍被许多厂家使用。图 5a 和 5b 表示了制粒机的典型加工流程和一个制粒机供料仓的设计。

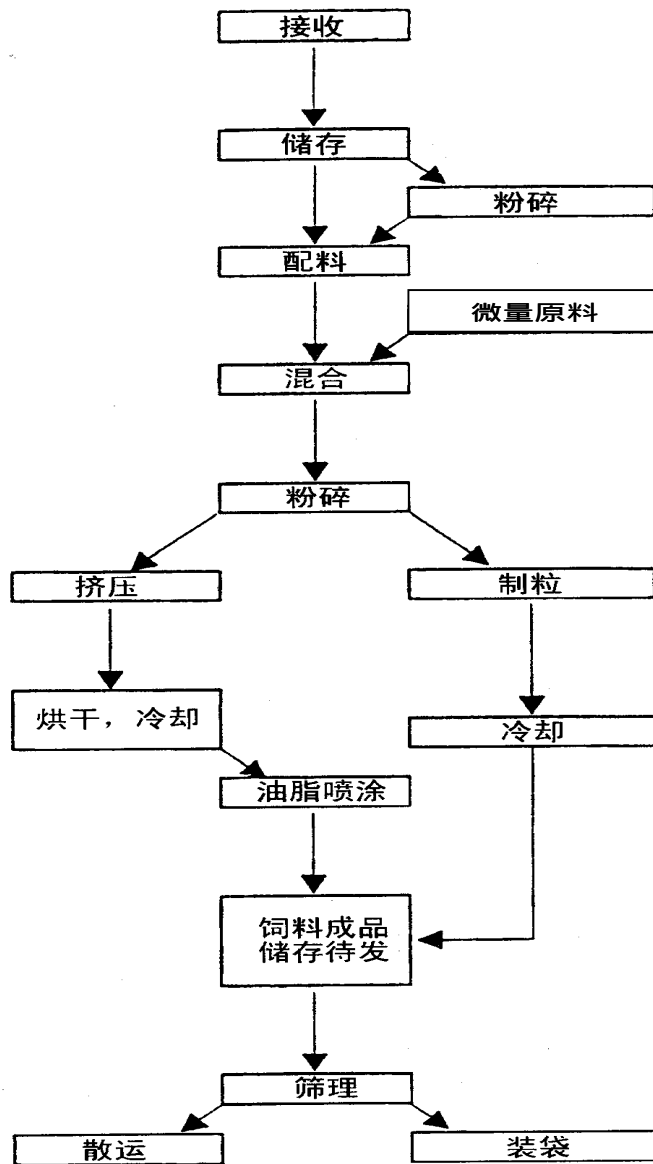


图 3 水产饲料加工一般流程

虽然斑点叉尾鮰和其他一些池底采食鱼类并不要求饲料能够飘浮,但仍然希望饲料颗粒具有强的凝聚力,在水中能保持其形状而不致解体成碎片。经挤压加工的膨化水产饲料能在水中更好地保持原来的密度。挤压加工的饲料还能在水面飘浮,这一点很受养鱼人的欢迎,这让他们可以观察鱼的采食情况,防止过度饲喂,还可藉以查看疫情或水质问题。因此,尽管制粒花钱较少,加工成本要比用挤压饲料低 10—12%,但美国商品化养殖斑点叉尾鮰的 90% 仍用挤压的膨化饲料喂养。

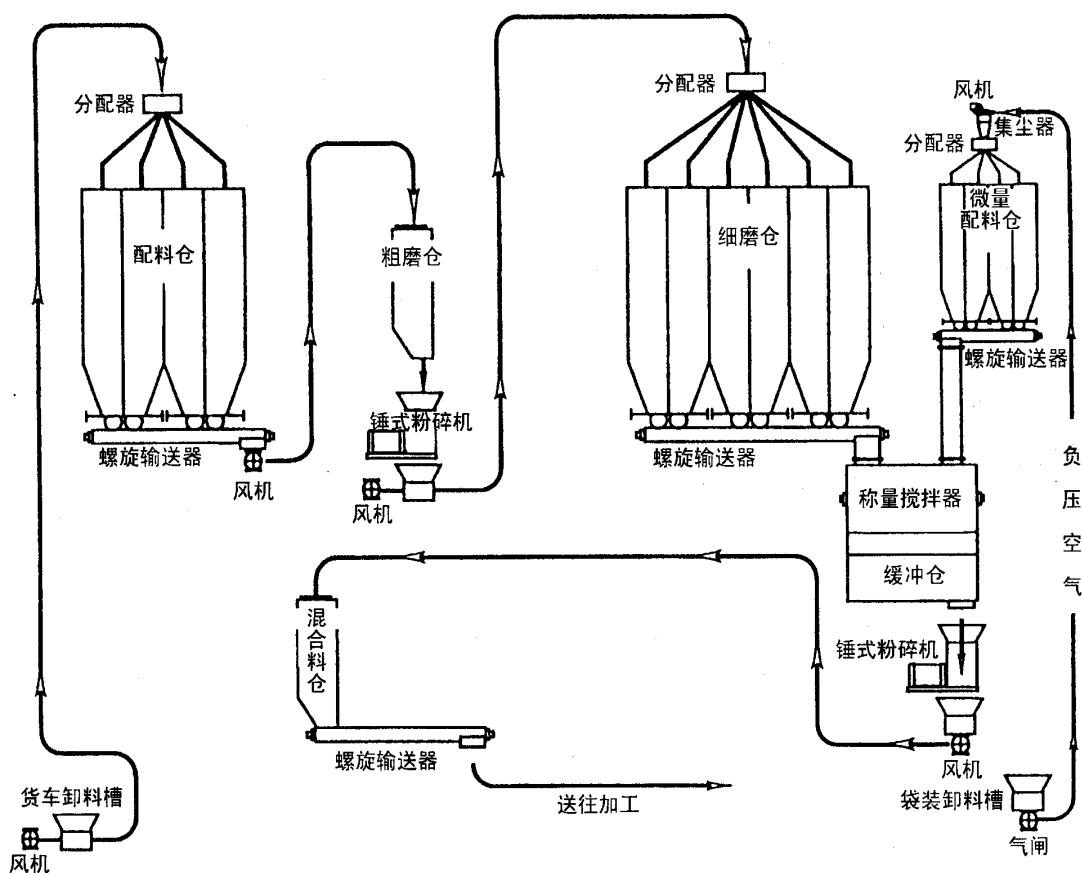


图4 制粒或挤压熟化前的原料准备

二、挤压熟化

挤压加工所要求的水、热、压力水平都比制粒机要高。图 6 所示是挤压制作鱼类饲料的工艺流程，图 7 所示是挤压熟化系统的各个组成部分。通常的作法是将经过细粉碎（通过 16 目筛）的配合好的粉料用蒸汽或水调制 3 至 5 分钟。进入挤压机之前的这一预调制过程可使物料达到初步熟化。预调制可以增进香味，提高饲料消化率，减少机镗磨损，并提高挤压机的产量。调制过的混合物料含水 25% 左右，在挤压机里面的高压下压紧，升温至 135—175℃。挤压机是由一个带螺片的旋转轴（或螺杆）在一个套筒或机镗内旋转构成。螺片的作用是将蒸煮器调制过的“塑化”物料向前推进，在出料压模后面形成一定压力，从而将物料挤压出机。机镗可以加上套筒进行加热或冷却。熟化是通过蒸汽注入机镗直接加热或通过套筒间接加热，以及物料内部形成的剪切力使机械能转化为热能而完成的。直接火力蒸汽发生器也可用于挤压加工。

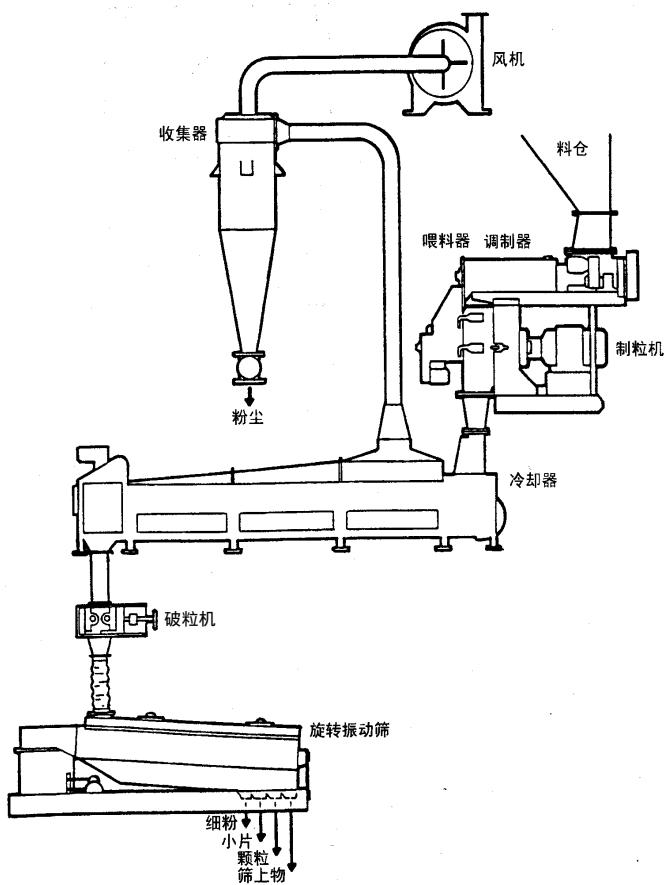


图 5a 制粒流程图

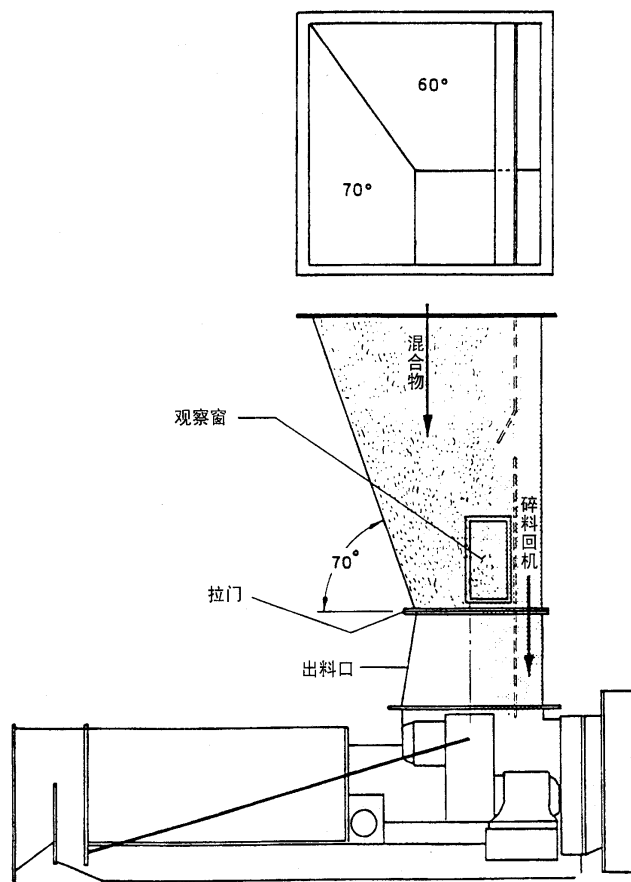


图 5b 制粒机供料仓设计

在挤压熟化过程中，当物料顺螺杆前移时，在加热、加压和机械剪切的作用下从颗粒状变成一种粘稠无定形物体，最后变成某种特定性质的产品，这些变化都与挤压机螺杆的几个特定区段的作用分不开。一个单螺杆挤压机机膛断面图(图 8)表示了这三个加工区段：喂料区、揉合区、最终熟化或计量区。

喂料区通常都有一些深的沟槽接纳物料。这个区段将物料混合，轻微加压，使物料在螺片之间形成更为均质的状态。此时可以注入水或蒸汽，以增加水分并加强机膛内的热传递。

揉合区的螺片降低了深度。这个区段对物料加压，施加中度剪切并施加热能。在这区段末尾，物料变成粘稠无定形物体，温度达到或高于 100 。挤压物完全填满螺杆槽并开始变热的这个点称为“阻塞点”(chokepoint)，因为从这个点往前，机膛被充分阻塞。阻塞点的位置也就是物料进入最终熟化区的点。

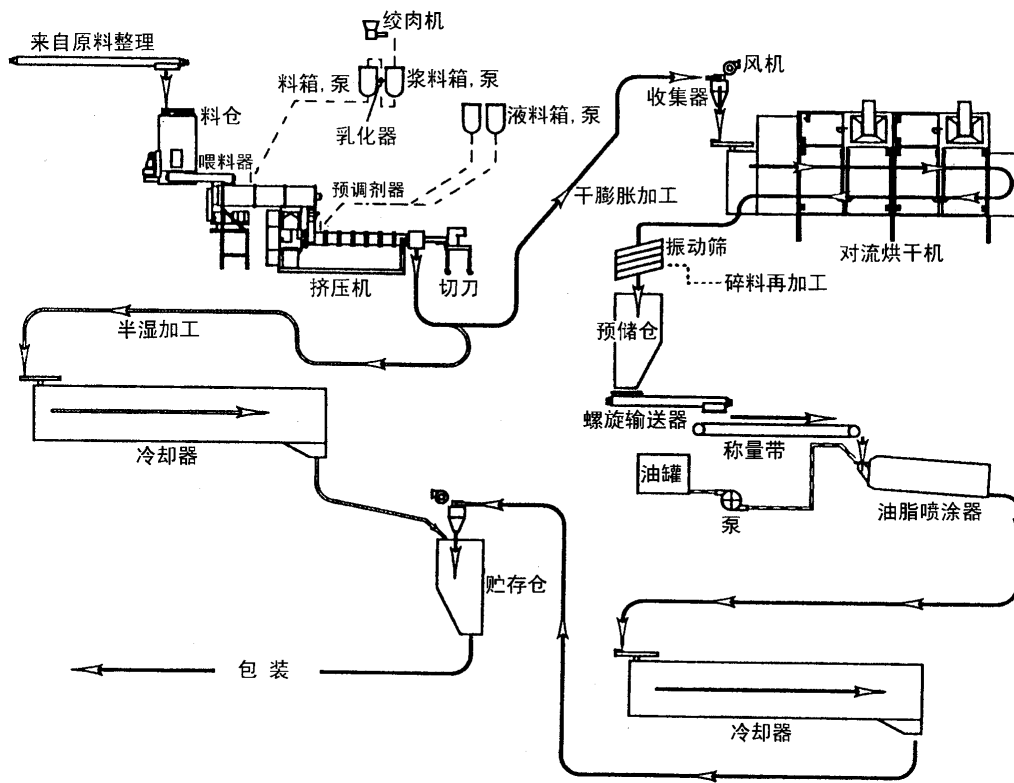


图6 挤压加工浮性水产饲料流程图

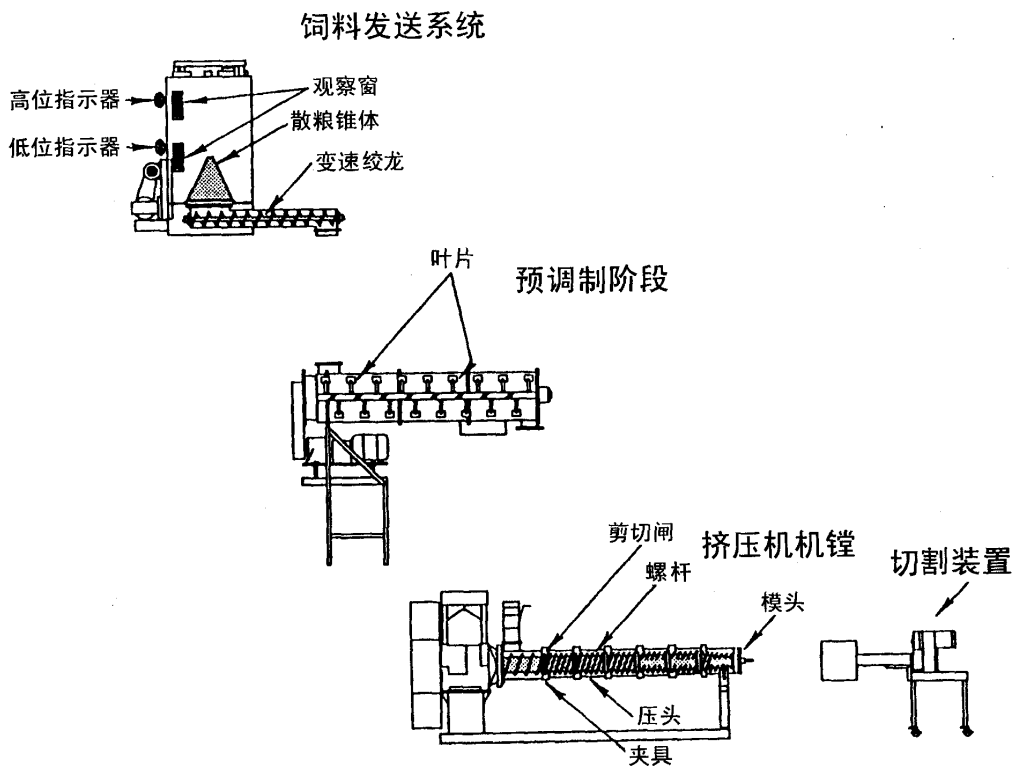
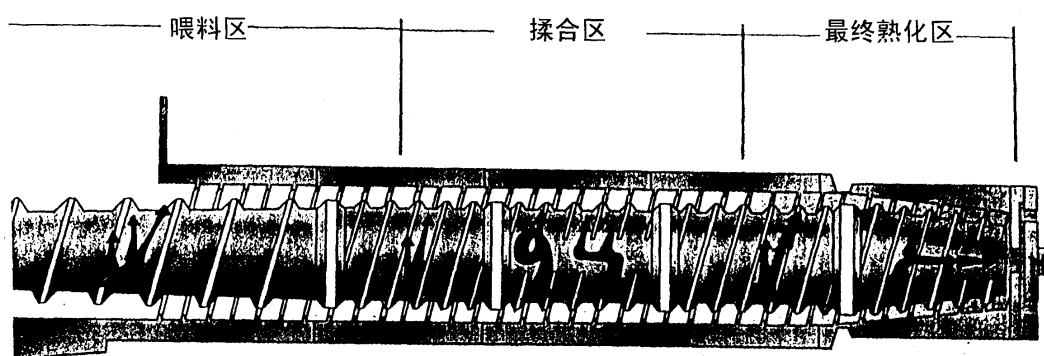


图7 挤压熟化系统组成



挤压熟化过程

图 8 单螺杆熟化挤压机的三个加工区段

最终熟化区的槽沟最浅。这个区段起加压作用，并将塑体状态的物料向压模推压。这个区段的剪切力最高，物料温度迅速上升达到最高温度，在制品通过压模之前保持此高温不到 5 秒钟。压模决定成品的形状，并影响挤压机的反压力 (back pressure)。

通过模孔出机的制品进入到压力较低的大气环境中，高温物料中的水分迅即蒸发并导致膨胀。压模尾端的外置旋转切刀将挤压加工的制品“条索”按预定长度切段。最终成品的水分必须降到 9—12%，这通常是用连续烘干机带一个单独的冷却器（或者是烘干机/冷却机联合装置）来完成。制品均匀地撒布在一条移动着的传送带上，制品层的厚度依制品性质而定。令热空气按每分钟 60 米的速度通过制品层，热空气温度在 95—150 之间。烘干是时间/温度的综合结果，烘干机提供的传送带面积决定了需要多高的空气温度。干燥后的挤压加工的鱼饲料的容重如下：斑点叉尾鮰是一种池底采食鱼，饲料容重是 433—560kg/m³ (公斤/立方米，下同)，亦即 27—35 lb/ft³ (磅/立方尺，下同)；而鳟鱼是一种上层采食鱼，饲料容重是 320—480kg / m³，即 20—30 lb / ft³ (Smith, 1985)。

利用各种不同的压模可以制作各种大小的水产颗粒饲料，从 1.5 毫米的养虾饲料到一些很长很宽的特种饲料。用挤压机制作更小的颗粒或许是可能的，但要求配料的碾磨更为精细。高温/短时的挤压加工可以使淀粉糊化，蛋白质变性，并使许多导致饲料储藏变质的酶发生钝化，一些天然产生的毒性物质（如胰蛋白酶抑制因子）被破坏，还能消灭成品中的微生物。

由于挤压机内部的高剪切力以及蒸煮器(调制器)和挤压机机镗加给原材料的

蒸汽，在挤压制成的颗粒中，淀粉全部糊化，部分蛋白质变性。这一过程在制成的颗粒中形成一种间质，含有可溶性糖和可溶性纤维，还具备一种可以吸收脂肪的多孔结构。再者，挤压制品中的物质是膨胀的，也是熔化的，不像制粒机轻度压制的颗粒那样紧紧压在一起。因此，挤压加工比制粒能更好地封闭颗粒表面，也缩小了颗粒受水侵袭的表面积。

因原材料的配方不同，可以形成两种不同的间质。一种间质是以原料中的大量淀粉为基础；另一种是以高含量的蛋白质为基础。在制粒机轻度压制的颗粒中，淀粉粒形成很小的颗粒，产生一种砂粒状结构。而挤压制成的颗粒，则是由长长短短的碳水化合物分子链组成一种交联的间质结构。

淀粉及蛋白质发生的许多反应和变化可提高营养成分的消化率。当蛋白质置于高温中时，其四级结构和三级结构断裂，有时二级结构也断裂，在挤压机里面形成一种熔化的类似面团的物体；蛋白分子中的氢键和双硫键重新排列，形成一种有弹性的像肉一样结构的物体。这样的间质含有多种可溶性物质，可以与淀粉间质相互混合。

如将各种颗粒饲料加以比较，在振动中最先解体的是制粒机制成的颗粒饲料，其次是高碳水化合物材料经挤压加工制成的颗粒饲料，最为坚固的是高蛋白质材料经挤压加工制成的颗粒饲料（Kazemzadeh, 1986）。

有些饲料原料会影响鱼饲料的粘合性或成粒性。例如，油脂会降低饲料的粘合性，对制粒机制粒和挤压机加工都有影响。为此应在成粒或挤压之后再添加油脂。通常，在加工之前添加 2% 或更少的油脂不致于明显影响颗粒饲料的粘合性。对水产饲料的粘合性来说，淀粉是一种重要成分。一般地说，用挤压机制粒时，要想在加工过程中得到适度的膨胀，配料中至少要有 20% 的谷类。用制粒机制粒时，经常使用有机粘合剂，如硫化木质素或半纤维素（都是木质纸浆的副产物），用量 2—2.5%，可提高水中稳定性（Loveall, 1980）。图 9 表示了一种自动外加油脂的装置，对制粒和挤压加工都适用。

挤压加工能满足一些客户的特殊需要。例如，要求颗粒饲料以各种速度下沉，或要求颗粒飘浮，甚或要求制成反复沉浮的颗粒饲料（Oscillating pellets），意思是能在池中先飘浮，然后下沉，短时间后又上浮。这种反复沉浮颗粒饲料的比重是上下波动的，这是由于它的高度多孔性和充分发展的蛋白型间质结构所致，这种性状可以兜住油脂和可溶性糖，又从颗粒的不同层次将它们释放。这些经挤压

加工的颗粒饲料可以提高水产养殖的饲料效率，减少鱼的排泄物数量。

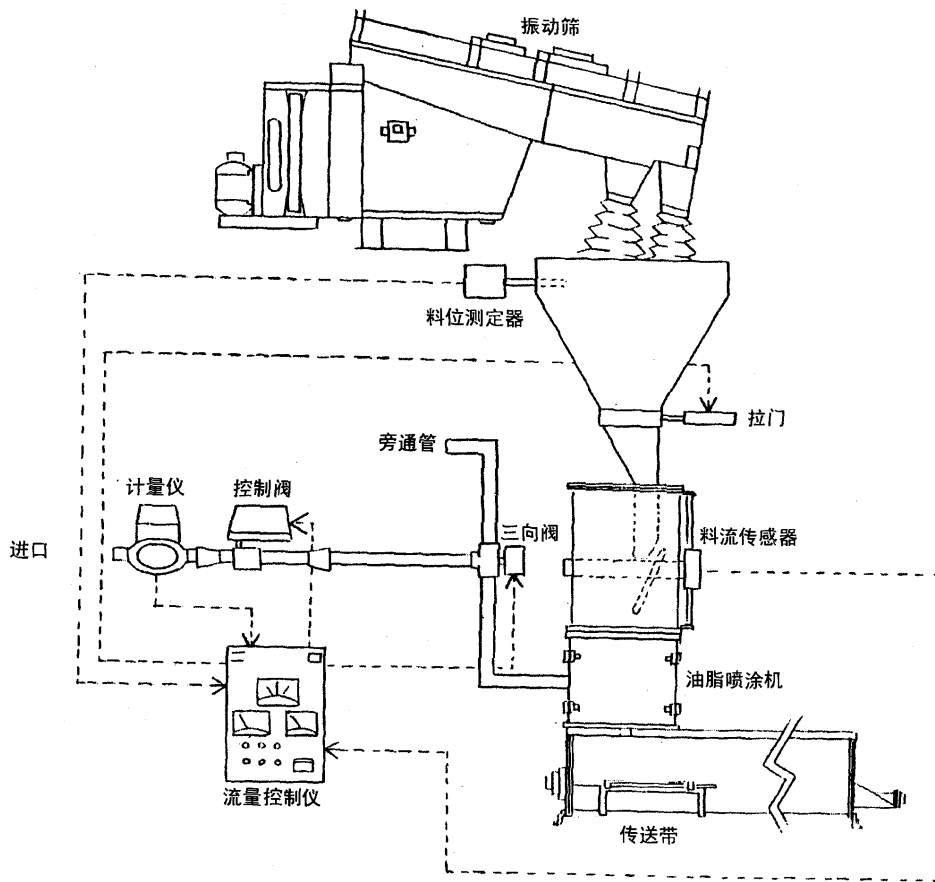


图9 自动外加油脂系统

挤压技术在宠物饲料方面的应用

挤压加工的干宠物饲料在配方上与浮性水产饲料十分相似，只是几种次要配料有所不同。这两类产品的主要差别是产品的颗粒大小不同，浮性水产饲料的颗粒小一些。水产饲料的颗粒大小取决于所养殖的鱼种，以及饲喂的对象主要是鱼苗还是中等大小的鱼，或者是大鱼。

加工制作挤压的干宠物饲料的原料与制作浮性水产饲料相似，主要差别是水产饲料很大一部分是散装发送，而不是包装成袋。二者共同之处很多，如：都要进行蒸汽处理（预调制），加工工艺所要求的水分相近，成品的容重相近，等等。典型的挤压加工的干产品的容重大致是 $320\text{—}352\text{kg/m}^3$ ($20\text{—}22\text{ lb/ft}^3$)。由于这两类产品在加工方面如此相似，大家公认用来加工制造浮性水产饲料的设备也可以

用来加工制造干挤压宠物饲料，除配方有所差别外，设备方面不需任何变动就可以进入宠物饲料市场。这个市场的潜在业务量可以与浮性水产饲料相当，甚至更大。

干的猫狗饲料通常含水 10—12%，用谷物、粮食加工付产物或再制品、大豆制品、动物制品、奶制品、油脂、矿物质及维生素添加剂加工而成。干的狗饲料和猫饲料分别含粗脂肪 5—12.5%（干基）和 8—12%（干基）。适当增加油脂含量可以提高适口性，通常的作法是将液化脂肪和/或增味剂喷涂在成品表面。上市的干狗饲料有粉料、制粒所得颗粒饲料和挤压加工的颗粒饲料；而干的猫饲料通常都是用挤压机熟化加工的制品。粗蛋白含量（干基）通常如下：挤压加工的干狗饲料 18—25%，挤压加工的干猫饲料 30—36%（Rokey 等人，1985）。普通的挤压加工的干狗饲料的配方大致如下：玉米（44%），豆粕（17%），肉骨粉（17%），小麦细麸（16%），脂/油（5%），维生素和矿物质预混料（1%）（Rokey，1993）。

（刘瑞征 翻译）

参考文献

- Dziejak, J . D . 1989 . Single-and twin screw extruders in food processing. Food Technol.,43(4):164-174 .
- Fondon, L . 1998. This fish farming business. Feed Management,49(1):6-9 .
- Harper, J. M. 1981. Extrusion of foods, Vol. I & II , CRC Press, Boca Raton, FL.
- Hauck, B.W and Huber, G. R. 1989. Single screw vs twin screw extrusion. Cereal Foods World , 34(11):930.
- Hayes, K. 1996. Aquaculture gets hooked on oilmeals. Online edition of Soya Bluebook . [Http://www.soyatech.com/Aquacultrue.html](http://www.soyatech.com/Aquacultrue.html).soyatech , Inc .
- Janssen, L. P. B. M. Twin screw extrusion. Elsevier Sci. Pub. , New York, NY.
- Kazemzadeh, M.N. 1986. Mechanical and structural evaluation of texturized soy proteins of varying protein content. Cereal Chem. 63:304.
- Li, M . H . and Robinson, E . H . 1994 . Catfish feed manufacture. Bulletin 1012. Mississippi Agricultural & Forestry Experiment Station, Mississippi State , MS.

- Linko, P., Colonna, P. and Mercier, C. 1981. High-temperature, short-time extrusion cooking. In Y. Pomeranz, ed., *Advances in Cereal Science and Technology*, Vol. IV, AACC, St. Paul, MN.
- Loveall, R. T. 1980. Practical fish diets. In: *Fish Feed Technology*. T. V. R. Pillay, Ed., FAO, Rome.
- Loveall, R.T. 1985. Fish food formulation and processing. In: *Feed Manufacturing Technology III*. R. R. McElhiney, Ed., American Feed Industry Association, Arlington, VA.
- Martelli, F. G. 1983. *Twin-screw extruders*. Van Nostrand Reinhold, New York, NY.
- Rokey, G. J. 1993. Petfood and fishfood extrusion. In: *The Technology of Extrusion Cooking*. N. D. Frame, Ed., Blackie Academic & Professional, New York.
- Rokey, G. J., Krehbiel, J. R., Matson, K. E. and Huber, G. R. 1985. Production of pet food. In: *Feed Manufacturing Technology III*. R. R. McElhiney, Ed., American Feed Industry Association, Arlington, VA.
- Robinson, E. H. and Li, M. H. 1996. A practical guide to nutrition, feeds, and feeding of catfish. . Bulletin 1041. Mississippi Agricultural & Forestry Experiment Station, Mississippi State, MS.
- Smith, O. B. 1985. Extrusion cooking system. In: *Feed Manufacturing Technology III*. R. R. McElhiney, Ed., American Feed Industry Association, Arlington, VA.