

挤压技术及其在饲料工业中的应用（1）

程宗佳博士

前言

挤压技术用于食品工业已有近百年历史。按韦氏字典的定义，挤压是“迫使原料通过一个特定设计的开口而形成，事先多将原料预热”。挤压熟化是综合了水、压力、温度和机械剪切的作用完成的。挤压熟化中，机膛内温度可达 90~200℃，挤压延续时间在 2~30s 范围。挤压产物会发生一系列物理、化学变化，诸如淀粉糊化、蛋白质变性、以及酶类、有毒成分和微生物的失活等。其结果通常会提高挤压饲料产品的养分消化率，降低一些抗营养因子含量（如大豆中的抗胰蛋白酶、棉籽中的棉酚），还会减少饲料携带细菌、霉菌和粉尘的数量，改善饲料的适口性，增进颗粒饲料的稳定性和耐藏性。从而使得饲养的动物，特别是幼年动物的生产性能和饲料效率都得以改进。

1 挤压机类型

市场上挤压机种类繁多，基本上可分为单螺杆挤压机和双螺杆挤压机。单螺杆挤压机又可分为干熟化挤压机、湿熟化挤压机、冷成形挤压机和膨胀机。干熟化挤压机不需添加水分，这种挤压机靠摩擦产生热、剪切力和压力，挤压后通常不需要烘干，但一般需要冷却。目前市上的干挤压机也可带一个预调制器，在必要时往干挤压机里注水。湿熟化挤压机都配备有预调制器，可将蒸汽或水注入加套筒的分节机头或机膛里面。湿挤压机的产量通常比干挤压机高，湿挤压后需要烘干和冷却。冷成形挤压机用来制造湿饲料，在冷成形挤压过程中，需要有小麦面筋或预糊化淀粉之类的黏结剂，以便使各种原料黏合在一起。双螺杆挤压机分为同向旋转挤压机和相对旋转挤压机。如其名所示，同向旋转意为两个螺杆同一方向旋转，相对旋转意为两个螺杆反向旋转。

蒸汽调制对单螺杆湿熟化挤压机是必要的，蒸汽可提供所需热量的一半，另一半取自机械能。单螺杆湿熟化挤压机机膛上刻有沟槽，以使物料能够顺利通过。但对双螺杆挤压机而言，机械能是主要的热量来源，机膛壁的套筒也能传递部分热量。双螺杆挤压机靠两个螺杆之间的高度啮合而具备自拭功能，这使得物料移动效率更高，因此比较受欢迎。

膨胀机（Expander）是另一个类型的挤压机，它与挤压机的基本功能是相似的。膨胀机利用热、水和摩擦使饲料原料熟化。圆锥形模头是在膨胀机内提供压力的特殊装置，它通过剪切和揉搓增加机械能投入。物料膨胀后约有 3% 的水分丢失。膨胀过的材料可以直接使用，也可输送到制粒厂进一步加工（制粒）。

2 挤压饲料产品的物理-化学变化

挤压饲料在挤压熟化过程中会发生物理和化学变化。一般地说，温和的挤压熟化条件可以增进植物蛋白的消化率（Hakansson 等，1987；Sri?鄢hara 和 Alexander，1984），这是由于蛋白变性或一些蛋白酶抑制因子（如大豆的抗胰蛋白酶）失活的缘故。但是，在激烈的挤压熟化条件下，蛋白质和氨基酸的消化率也可能下降，这是因为赖氨酸可与糖发生美拉德反应，也可与其他化学键发生

反应，降低氨基酸消化率。

挤压熟化通常使脂肪含量下降，因为脂肪可生成直链淀粉-脂肪复合物而使溶剂浸出效率下降。Nierle 等（1980）发现，玉米挤压后丢失 60%的脂肪。程宗佳和 Hardy（表 1，2003）对豆粕、大麦、玉米面筋粉和全麦粉进行过挤压与未挤压的比较，发现在一般挤压条件下只有很小的变化。

表 1 挤压熟化对豆粕、大麦、玉米面筋粉和小麦的养分和总能含量的影响(干基%)

	水分	蛋白质	脂类	纤维素	灰分	总能(kcal/kg)
豆粕	11.04	53.93	0.66	3.43	3.62	4 574.0
豆粕(挤压)	8.75	55.04	1.20	3.30	3.27	4 766.0
大麦	11.65	12.09	1.85	4.68	1.01	4 648.5
大麦(挤压)	13.97	12.00	0.51	4.58	0.96	4 759.5
玉米面筋粉	8.22	76.56	1.56	1.59	0.85	5 778.5
玉米面筋粉(挤压)	10.11	81.67	1.99	1.72	0.66	6 345.0
小麦	8.71	12.89	1.68	2.19	1.94	4 117.0
小麦(挤压)	9.76	19.14	0.31	2.03	1.50	4 536.5

资料来源：程宗佳和 Hardy, 2003。

挤压可以改变膳食纤维的含量、成分和生理效应。Bjorck 等(1984) 报道，将小麦粉挤压加工可使可溶性纤维从 40%增加到 50%~75%、改善纤维消化率和增加消化能。不过，膳食纤维总含量并未改变 (Sljeström 等, 1986; Schweizer 和 Reimann, 1986)。

挤压熟化对矿物质生物利用率的影响颇受关注。一般地说，植物性饲料中矿物质的生物利用率是受植酸含量影响的。Andersson 等 (1981) 发现，挤压熟化使一种麦麸增补制品的植酸含量减少约 20%。表 2 列出豆粕、大麦、玉米面筋粉和全麦粉在挤压加工前后的矿物质含量变化 (程宗佳和 Hardy, 2003)，数据表明，挤压熟化对上述 4 种饲料原料中的矿物质含量没有明显影响。

表 3 和表 4 列出挤压熟化对虹鳟鱼的豆粕、大麦、玉米面筋粉和小麦的表观养分消化率和矿物质利用率的影响 (程宗佳和 Hardy, 2003)。总的说，这 4 种饲料原料的矿物质利用率都因挤压加工而略有下降。鉴于矿物质利用率在挤压加工后略有下降，建议挤压加工的动物饲料添加的矿物预混料应当是普通添加量的 1.2 倍。显然，这方面还需要做更多的研究。

表 2 挤压熟化对豆粕、大麦、玉米面筋粉和小麦的
矿物质含量的影响

	Ca	K	Mg	S	总 P	Cu	Fe	Mn	Zn
	%					mg/kg			
豆粕	0.36	2.45	0.31	0.44	0.72	16.5	52.5	46.0	51.0
豆粕(挤压)	0.34	2.30	0.30	0.49	0.72	17.5	57.5	43.5	49.0
大麦	0.05	0.45	0.13	0.14	0.33	3.9	41.5	15.5	19.5
大麦(挤压)	0.05	0.40	0.12	0.13	0.29	3.7	35.5	16.0	18.5
玉米面筋粉	0.01	0.04	0.01	0.86	0.46	19.5	62.5	2.0	14.0
玉米面筋粉(挤压)	0.01	0.08	0.02	0.81	0.46	18.5	64.0	4.0	15.0
小麦	0.08	0.46	0.14	0.14	0.35	3.9	31.5	40.5	29.0
小麦(挤压)	0.07	0.42	0.12	0.21	0.35	5.3	37.0	33.0	27.0

资料来源:程宗佳和 Hardy, 2003。

表 3 挤压熟化对虹鳟鱼的豆粕、大麦、玉米面筋粉和
小麦表观养分消化率的影响

	%			
	干物质	蛋白质	脂类	总能
豆粕	75.35	98.10	73.01	79.05
豆粕(挤压)	78.38	98.08	86.13	81.85
大麦	43.60	95.58	72.57	48.53
大麦(挤压)	67.22	94.31	80.74	69.88
玉米面筋粉	74.24	87.39	75.68	78.95
玉米面筋粉(挤压)	86.03	75.45	76.04	88.89
小麦	46.74	95.56	77.25	54.05
小麦(挤压)	71.14	90.20	77.45	77.09

资料来源:程宗佳和 Hardy, 2003。

表 4 挤压熟化对虹鳟鱼的豆粕、大麦、玉米面筋粉
和小麦中矿物质利用率的影响 %

	Ca	K	Mg	S	总 P	Cu	Fe	Mn	Zn
豆粕	7.4	99.8	78.9	98.1	63.2	94.9	77.2	30.6	64.7
豆粕(挤压)	8.6	99.7	78.4	97.9	60.6	94.2	54.0	32.3	58.1
大麦	29.4	99.3	89.7	96.5	76.3	88.3	55.9	43.8	55.4
大麦(挤压)	24.4	99.4	89.4	96.4	70.6	81.7	53.4	42.7	48.0
玉米面筋粉	1.5	99.6	76.6	94.7	65.6	85.2	78.7	42.5	53.0
玉米面筋粉(挤压)	7.7	99.5	75.3	91.8	64.7	77.3	33.4	42.2	45.4
小麦	20.9	99.1	88.0	96.7	71.1	86.6	54.4	36.5	56.0
小麦(挤压)	19.8	99.5	85.9	94.8	67.1	79.4	47.5	26.9	40.9

资料来源:程宗佳和 Hardy, 2003。

挤压加工对维生素的影响也颇受关注。Mus-takas 等(1964)发现,全脂豆粉经挤压加工后,其 VB1、VB2 和烟酸的活性不受影响。但 Beetner 等(1974)报道,玉米渣经挤压熟化后,丢失了 46%的 VB1 和 8%的 VB2。Beetner 等(1976)还报道,挤压熟化破坏了小黑麦(Triticale)中 90%的 VB1 和 50%的 VB2。

DeMuelenaere 和 Buzzard(1969)报道,玉米、大豆和坚果碎粉的混合料经过挤压加工后,VA 损失 53%。Lee 等(1978)发现,挤压熟化破坏了 70%以上的 β -胡萝卜素、9%~48%的视黄酮棕榈酸酯、6%~17%的视黄醇(VA)和不到 10%的视黄醇乙酸酯。Hakansson 等(1987)也发现,小麦粉在挤压中,19%~21%的 VE、42%~58%的 VB1 和 20%的叶酸被破坏。表 5 列出挤压后维生素余留的情况。根据这些资料,动物营养学家建议,挤压加工的动物饲料,其维生素添加量应当为原配方中的 120%~150%,或使用如稳定化 VC 之类的耐热维生素。

表 5 挤压熟化对维生素稳定度的影响 %

维生素	稳定度
A	85~90
D ₃	80~90
E	80~95
K ₃	60~85
B ₁	93~98
B ₂	98~100
B ₆	90~100
B ₁₂	100
生物素	95~98
C	50~70
氯化胆碱	94~100
叶酸	98~100
烟酸	96~100
泛酸	100

资料来源: BASF。

表 6 挤压熟化对棉籽与去皮大豆混合料(50:50)中棉酚含量的影响

加水量 (mL/kg)	挤压量	棉酚/(ng/kg)		有效赖氨酸/%
		总量	游离	
0	0	5363	5417	4.8
	1	3990	678	4.7
	2	3346	404	4.6
	3	3048	379	4.7
	4	2783	311	4.7
33	0	3732	3517	4.3
	1	3475	538	4.2
	2	3313	346	4.6
	3	3282	332	4.6
	4	2801	283	4.7

资料来源: del Valle 等, 1986。

表 7 挤压熟化对菜籽-大豆混合料(1:1)中芥子甙总含量的影响 $\mu\text{mol/g}$

	低芥子甙菜籽-大豆混合料	高芥子甙菜籽-大豆混合料
未挤压	18.4	91.6
150°C挤压	13.4	73.7
3%碱液中	11.2	56.6
3%(NH ₄) ₂ SO ₄ 溶液中	11.1	-
3%甲酸溶液中	6.4	-
5%碱+1%Fe ₂ (SO ₄) ₃ 溶液中	-	14.9

资料来源: Fenwick 等, 1986。

挤压加工最令人兴奋的功能或许就是破坏抗营养因子, 诸如生大豆中的抗胰蛋白酶 (trypsin inhibitors, 简称 TI)、棉籽中的棉酚和菜籽中的芥子甙。TI 抑制蛋白质分解, 使消化道内未消化的蛋白质增加, 从而减少氨基酸生成, 抑制代谢能释放和脂肪代谢, 降低蛋白质消化率 (Harper, 1981)。挤压加工后, 大部分 TI 被破坏。挤压熟化的温度、水分、设备配置、滞留时间、模孔大小等因素都会影响 TI 破坏的程度。Mustakas 等 (1964) 报道, 用单螺杆挤压机破坏了全脂大豆中 95% 以上的 TI。Hayakawa 等 (1992) 报道, 用双螺杆挤压机处理全脂大豆之后, TI 活性完全丧失。图 1 显示了挤压温度对 TI 失活程度的影响 (Lorenz 等, 1980)。图 2 显示水分和温度对 TI 活性的影响 (根据 Hayakawa 等, 1992)。表 6 显示了一种棉籽和去皮大豆的 50:50 混合物, 经挤压熟化后棉酚减少的情况 (del Valle 等, 1986)。表 7 显示了菜籽-大豆混合料以及菜籽粕的芥子甙总含量在挤压熟化后的变化 (Fenwick 等, 1986)。

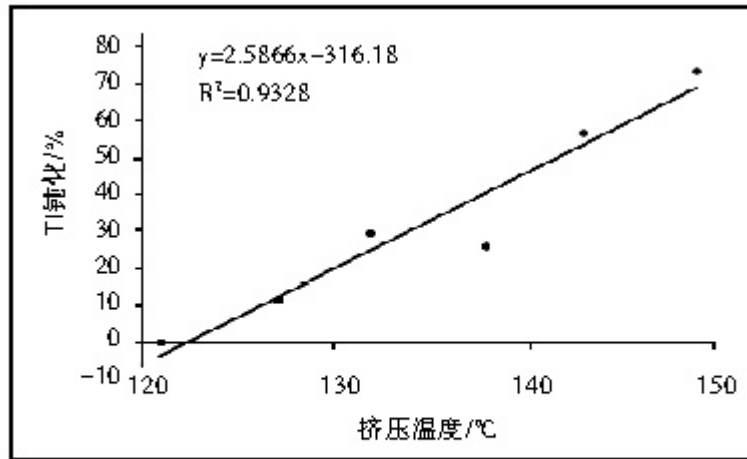


图 1 挤压温度对于抗胰蛋白酶(TI)钝化程度的影响
(根据 Lorenz 等,1980)

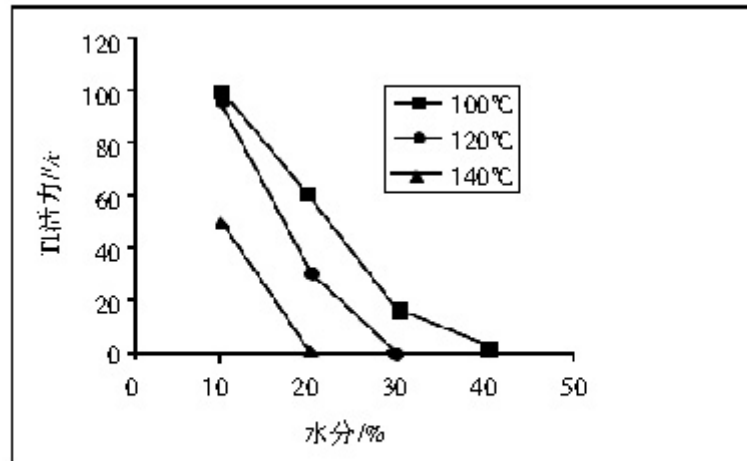


图 2 水分和温度对于抗胰蛋白酶(TI)活力的影响
(根据 Hayakawa 等,1992)