

挤压宠物饲料的加工程度

熊易强 博士 美国大豆协会

摘 要

在堪萨斯州立大学挤压实验室，两次试验性挤压制作了不同熟化度（以淀粉糊化度表示）的成年狗饲料，靠掌握预调制的蒸汽压、注水量和挤压机螺杆转速，获得熟化度 51%至 93%范围的若干样品，其相应的湿容重和干容重分别为 320–575g/L 和 288–559g/L。试验得出，熟化度与容重之间呈高度线性关系（从两次试验运行结果各自所得方程式的 r^2 在 0.92–0.96 范围）；湿容重与干容重之间也是线性关系（ $r^2=0.98$ ）。如果操作员熟练，可将湿容重作为质量控制的快速现场指标；干容重则可作为最终检测和核检指标。挤压产物的硬度与熟化度之间呈负相关（用全部测值计算， $r=0.69$ ；去掉一个极端值计算， $r=0.96$ ）。胃蛋白酶体外消化结果与熟化度之间相关性很差。用 10 只狗对 5 批挤压物（熟化度在 54%–93%范围）进行了体内消化试验，采用 $5 \times 5 \times 5$ 拉丁方格试验设计。不同熟化度处理之间，只有蛋白消化率有统计差异。几项消化率指标与熟化度之间呈线性关系，直线回归斜率分别为：干物质 0.04(方程式 $r^2=0.54$)，能量 0.04 ($r^2=0.61$)，粗脂肪 0.02 ($r^2=0.62$)，蛋白质 0.14 ($r^2=0.70$)。粪便干物质在 35%–39%范围，与熟化度呈正相关 ($r=0.90$)。各个处理（熟化度）均未出现稀软粪便。9 次食料喜好试验一致表明，狗喜好熟化度较低的食料，与熟化度较高的食料相比，平均喜好程度为 79 对 21 ($P<0.001$)。本文就试验结果简要讨论了挤压工艺控制问题。

前 言

淀粉糊化度一直是表示挤压宠物饲料加工程度的一个指标，宠物饲料行业一般的看法是，糊化度等于或大于 80–85%，营养价值最高且最为宠物接受。公认在一定的日粮配方/加工条件下容重与糊化度应是相关的，所以一直以容重（g/L）测量挤压程度。一家美国饲料公司还初步制定了其宠物饲料容重标准。在食品行业，食品质地一直被普遍看作食品整体品质的一个重要因素。在这方面不断有人研究品尝结果与仪器定量分析之间的相关性；但关于宠物饲料的质地，几乎未见文献资料。

本项研究目标是：1) 考查以糊化度测定的加工程度对成年狗饲料消化率和接受性的影响；2) 考查糊化度与容重的相关性；3) 在宠物饲料质地及其与加工程度和饲料适口性的关系方面获取初步数据资料。

材料和方法

挤压原料制备

本试验以一家美国饲料公司生产的成年狗饲料（配方见表 1）作样本，在一家美国公司的宠物饲料厂以生产条件制作了 3 批供挤压的粉料。粒度分析得出批-1、批-2、批-3 的粉料平均粒度分别为 374μ 、 378μ 、 367μ ，粒度标准差分别为 1.60、1.63、1.61。3 批粉料的水分分别为 10.2%、10.4%、9.7%。随后在该公司的研究开发农场用水平搅拌机依次进行了油脂和增味剂的外喷涂。

表 1 试验用成年狗饲料配方

原 料	含 量 %
玉米	52.90
豆粕, 44%	9.30
面筋粉, 21%	5.00
碎豆皮	2.50
甜菜渣	2.50
#60 家禽下脚粉	2.50
肉骨粉	17.65
食盐	0.50
酵母培养料	0.50
宠物微量元素混料	0.125
宠物维生素混料	0.125
氯化胆碱, 60%	0.10
脂肪(牛油)	3.80
宠物饲料香味物	2.50
总和	100.00

挤 压

3 批试验材料的挤压熟化是在堪萨斯州立大学(以下简称 K 大学)挤压实验室进行的,用一台 Wenger X-20 单螺杆挤压机分 3 天(3 次运行)完成。本试验始终采用同样的螺杆结构和压模尺寸、形状(附录 1)。固定的加工参数有:喂料(干)速度(3.45kg/min)、预调制器转速(135rpm,注:第一次运行 133-136rpm)、挤压机注入蒸汽速度(零)和注水速度(0.17kg/min)。挤压机机镗套筒条件以及烘干条件。受控参数有:预调制器注水速度(以下称“水”)、预调制器蒸汽注入速度(以下称“蒸汽”)、挤压机螺杆转速(以下称“rpm”)。主要的测定结果有:淀粉糊化度(或熟化度)、湿挤压物容重和干挤压物容重(g/L)。记录的其它参数有:预调制器出料的温度和水分、挤压机的电机负荷(%)、挤压机的比机械能输入(kwh/ton)、压模温度和压力、第七节套筒内压力、挤压物水分以及挤压机产率(kg/min)。作为实例,在 K 大学所作试验报告中关于运行-3 的挤压机加工条件列入了附录 2。为了了解挤压作业能够达到多大范围的糊化度和容重,进行了 11 批记录 3 个受控参数(水、蒸汽、rpm)的挤压作业,然后将这 3 个受控参数作为自变量,以糊化度和容重作为因变量或反应值进行多变量回归分析。进行这 11 批挤压时,逐个依最佳方程式设计下一批作业,以获得所期望的熟化度。第二次运行时,发现混在喂入料中的 1 颗钉子卡在模孔内,这多少影响了挤压物外形。因此,本试验只用运行-1 和运行-3 的数据整理报告。

动物试验

在研究开发农场用 10 只狗对运行-1 的 5 批(5 个处理)熟化度和容重不同的挤压物进行了消化试验,采用重复两次的 5×5×5 拉丁方格试验设计。这些挤压物按成年狗饲料配方逐个进行了

脂肪和香味物外涂。还以同样的处理（有和/或没有脂肪/香味物外涂）进行了双盘自由选择试验，考查狗的采食喜好。另外还以运行-1的几个处理（未作脂肪/香味物外涂）进行了采食喜好试验。所有动物试验都按该研究开发农场的标准规程进行。

实验室分析

在 K 大学的谷物化学实验室测定淀粉糊化度，在挤压实验室现场进行运行-3 的全部湿容重和干容重测定。运行-1 的干容重是后来在研究开发农场进行的。运行-3 挤压物硬度测定是在动物试验之后用冷冻保存（-24°C）的样品进行的，在 K 大学的烘焙实验室，用一个 Instron 压力测定仪加一个倒 V 形厚 0.8 mm 的装置以 10 cm/min 速度测定挤压物破碎的峰值力。蛋白质的胃蛋白酶体外消化率（以酸溶液稀释的胃蛋白酶作空白）和其它营养素分析是在该公司的饲料实验室进行的。

统计分析

按需要进行了回归分析（单/多因子的线性/非线性分析）和方差分析。

结果和讨论

熟化度与容重

运行-1 所得制品的淀粉糊化度（作为熟化度的指标）和干、湿容重，连同 3 个工艺参数列入表 2。用运行-1 数据得出最佳方程式预测的产品指标（糊化度和湿容重）与运行-3 实测数据列入表 3。尽管预测值比实测值相去甚远，但本项挤压试验的主要目标，即制作较宽范围熟化度或糊化度的产品，是达到了。从工艺参数预测熟化度是一个工艺控制问题，作者将在本文后段谈及这个问题。

表 2 运行-1 成年狗饲料的糊化度和容重数据

批次	监测参数			糊化度 %	容重	
	rpm	蒸汽 kg/cm ²	水 kg/min		湿	干
					g/L	
1	215	3.5	0.225	86.91	329	289
2	315	3.5	0.225	75.70	428	409
3	265	2.8	0.225	88.92	339	304
4	215	2.8	0.090	89.05	320	299
5	315	2.8	0.090	59.85	537	502
6	315	2.8	0.338	87.79	380	340
7	215	2.8	0.338	91.51	348	312
8	215	4.2	0.225	89.44	321	299
9	315	4.2	0.225	84.06	355	315
10	315	1.4	0.225	59.38	526	470
11	215	1.4	0.225	86.39	339	320

表3 运行-3 成年狗饲料的糊化度和容重数据

批 次	工艺参数			产品实测			产品预测*	
	rpm	蒸汽	水	糊化度	容重		糊化度	容重
		kg/cm ²	kg/min		%	湿		
				%	g/L		%	g/L
1	295	1.8	0.225	53.7	569	556	74.0	438
2	295	1.8	0.272	51.9	559	551	79.5	400
3	215	4.2	0.315	89.3	368	344	94.9	292
4	215	1.8	0.225	74.4	447	431	84.9	361
5	265	2.8	0.315	84.6	382	355	99.0	264
6	265	2.8	0.272	82.1	385	360	95.1	291
7	315	4.2	0.315	87.4	412	382	100.3	254
8	315	4.2	0.225	85.1	400	358	85.5	358
9	295	2.8	0.315	86.1	400	369	92.5	308
10	215	3.5	0.225	93.0	376	336	85.4	358
11	265	2.8	0.225	89.0	414	382	99.0	264

*根据从运行-1 数据得出的预测方程式

两次运行在熟化度（糊化度）与容重之间都呈高度线性关系（表4）。这证实了工业界流行的一种说法，即：在一定工艺条件下所得制品的容重可以用来估计制品的熟化度或糊化度。两次运行各自所得方程式的同一性检验表明，两个湿容重方程式的斜率有差异（P=0.03），两个湿容重方程式和两个干容重方程式的截距也都有差异（P=0.0005），这暗示有其它因素介入。原料构成不同

表4 从容重(g/L)推算熟化度的回归参数

运行号	自变量	截距	斜率	r ²	n
1	湿容重	162.2	-3.08	0.93	11
	干容重	149.6	-2.78	0.95	11
3	湿容重	136.7	-2.29	0.94	11
	干容重	133.9	-2.38	0.92	11

可能是这些差异的一个主要原因。这说明以容重预测熟化度是有局限性的，蒸汽压片时也发现同样情况。不过，从市场角度来看，容重可能更重要的是一个质量指标。一个包装袋充满度对产品外观至关重要，要实现这一点，除了恰当选择包装袋尺寸以外，关键是要有恒定的容重。从这一层来说，干、湿容重之间的高度相关（r²=0.98,n=21）的重要意义在于：在宠物饲料厂生产现场，可以在测定干容重之前40分钟（烘干时间）预测出干容重。表5数据表明，从实用来说，将成年狗饲料的湿容重减32即可相当准确地预测其干容重。这里要强调两点：第一，操作员必须训练有素，因为用小容器测湿容重的结果与操作者关系很大；第二，仍然必须进行干容重的核查和最终测定。

硬度与熟化度

以挤压物破碎峰值力与熟化度作图（图1），用全部测值(n=11)计算，相关系数 r 为 -

0.69(P<0.02)；去掉一个极端值计算，相关系数 r 提高到 -0.96(n=10, P<0.0001)。

表 5 从成年狗饲料的湿容重预测其干容重

湿容重	预测的干容量	差异
	g/L	
385	352	33
400	368	32
415	384	32
430	400	30
446	415	31
460	431	29

*干容重=1.046 × 湿容重-3.167 (lb/ft³ ; r² = 0.98, n=21)

(译注: 以上干/湿容重换算系数是指以“lb/ft³”为容重单位得出的系数。)

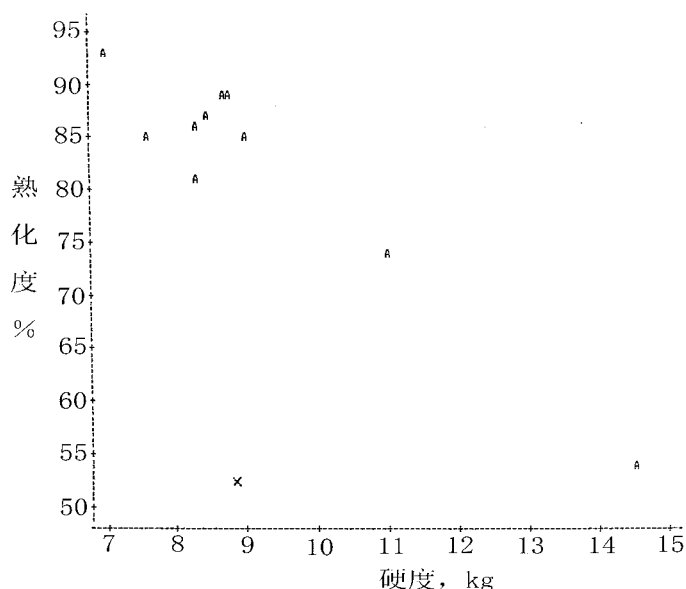


图 1 成年狗饲料的挤压物硬度与熟化度的关系

体外胃蛋白酶消化率

运行-3 的 11 个样品的体外胃蛋白酶消化率结果列入表 6。熟化度与胃蛋白酶消化率之间的相关性很差 (线性方程, P>0.48; 二次方程, P>0.17)。

体内消化率

表 7 所列是用运行-3 的 5 个挤压熟化批次进行的动物消化试验结果, 包括粪便数据。变异分析揭示, 各处理 (批次或熟化度) 之间, 只有蛋白消化率和粪便水分有异。熟化度与所有消化参数和粪便参数之间呈明显线性关系 (表 8)。用来推测干物消化系数、能量消化系数和粗脂肪消化系数的方程式, 斜率都低。在熟化度 50%至 90%范围, 干物和能量消化的推测结果差异为 1.6 个百分点, 脂肪消化 0.8 个百分点, 蛋白消化 5.6 个百分点。体内蛋白消化与熟化度之间的高度线性关系(表 8)和体外数据(表 6)形成鲜明对比。总的说, 从试验数据来看, 当熟化达到 74-75% 时, 所有测定参数的消化系数都达到了“可接受”水平。

表 6 不同熟化度的成年狗饲料的蛋白质体外（胃蛋白酶）消化率

批次	熟化度，%	胃蛋白酶消化率，%
1	53.7	84.0
2	51.9	87.2
3	89.3	85.8
4	74.4	89.6
5	84.6	86.1
6	82.1	91.2
7	87.4	87.1
8	85.1	86.6
9	86.1	88.5
10	93.0	87.0
11	89.0	87.4

表 7 成年狗饲料的熟化度对几项消化率、粪便干物和打分的影响

批次	熟化度	消化率				粪 便	
		干物	能量	蛋白质	脂肪	干物	打分*
-----%-----							
1	53.7	71.4	78.7	72.5 ^c	86.7	34.8 ^c	1.17
4	74.4	72.1	79.2	75.5 ^b	87.1	37.3 ^b	1.03
5	84.6	72.4	79.7	76.5 ^{ab}	87.2	36.7 ^b	1.10
7	87.4	72.4	79.9	77.5 ^{ab}	87.7	38.9 ^a	1.03
10	93.0	73.6	80.7	78.4 ^a	87.7	37.8 ^{ab}	1.00

a,b,c,P < 0.05

* 粪便从成形到变稀打分为 1, 2, 3, 4。

表 8 从熟化度估测消化率、粪便干物和打分的线性回归参数

因变量	截距	斜率	r ²	SE	P
消化率，%					
干物	69.1	0.04	0.54	2.68	0.0054
能量	76.4	0.04	0.61	2.16	0.0005
蛋白质	65.1	0.14	0.70	2.66	0.0001
脂肪	85.6	0.02	0.62	1.52	0.0004
粪便参数					
干物，%	30.5	0.08	0.83	1.80	0.0001
打分*	1.35	-0.004	0.53	0.181	0.0060

* 粪便从成形到变稀打分为 1, 2, 3, 4。

粪便的打分数据表明，尽管粪便干物随熟化度提高而直线增加，所有处理都排泄成形的粪便（表 7、8）。干物 30% 以上的粪便通常都保持成形状态。熟化度 53.7% 的处理，粪便干物最低，为 34.8%（表 7）。狗的淀粉消化能力较低，一般将稀粪便问题归因于饲料熟化不够。但以上数据并不支持这种认为熟化较差或淀粉糊化较低（比如，50-60%）直接导致粪便稀的看法。

采食喜好 (适口性)

表 9 列出本项研究关于狗的采食喜好的主要结果。这 9 个试验中有 8 个都表明,狗明显喜好熟化度低的食料,无论食料有无脂肪/香味物外涂。其余 1 个试验(试验 4)也显示同样趋势,只是不明显。这些结果与该公司过去两个试验的结果是矛盾的,过去试验中,狗都喜好容重较低的食料。然而,也有人观查到动物喜好熟化及加工程度较低的饲料(与密苏里大学谢富弘博士的交谈,2002)。

表 9 以双盘食料选择试验比较熟化度对狗采食喜好的影响结果

试验号	熟化度 %	食料喜好度 %	P	脂肪 / 香味物外涂
1	53.7	87.5	0.0001	有
	93.0	12.5		
2	53.7	96.2	0.0001	无
	93.0	3.8		
3	84.6	69.4	0.0001	有
	87.4	30.6		
4	87.4	51.2	0.8879	有
	93.0	48.8		
5	74.4	72.3	0.0002	无
	84.6	27.7		
6	51.9	89.3	0.0001	无
	86.1	10.8		
7	59.6	86.6	0.0001	无
	86.9	13.4		
8	88.9	79.4	0.0001	无
	91.5	20.6		
9	75.7	81.9	0.0001	无
	86.9	18.1		
汇 总	较低熟化	79.3	0.0001	
	较高熟化	20.7		

要说清楚挤压制作狗饲料的适宜加工程度(或适宜范围),现有资料是不够的,不足以得出结论,还需要用不同熟化度/容重/硬度的制品作动物试验。

工艺控制

本项研究不是针对工艺控制的,但根据所得数据讨论一下工艺控制问题,还是颇有趣味。

用运行-1 数据得出的方程式进行预测时成绩很差,这可以作如下解释:

1) 挤压试验设计不是按曲面效应分析(RSM)设计的。据以往挤压经验,各工艺参数之间的交互显著,要令一个二次方程包含所有参数交互,至少应有 15 个观察值。但这项研究每次运行只有 11 个观察值,而且从运行-1 没有得出蒸汽×水交互斜率所需的重复。运行-1 的两个预测方程式中,4 个斜率以及截距都是有偏估计的(附录 3)。运行-3 得到了 9 个斜率,但自由度降为 1,得到的是不显著模型(附录 4)。斜率同一性检验表明,这两次运行得出的斜率差异显著(附录 5),说明将这两次运行的数据以及 3 个所涉自变量以外的因子合并分析是不恰当的。

2) 可能有一个不在控制之中的因子,即原料构成的差异。运行-3 的物料是在运行-1 后 47 天制

备（并挤压）的，有些原料取自不同批次的卡车卸料。Wenger 公司开发了一种挤压工艺自动控制系统，该系统能够重复并自动控制以往试验确定的“最佳”工艺参数。但由于一些非控制因子，仍需对工艺参数作些许调整，这些非控制因子中就有原料的变动。

K 大学实验室设定的工艺参数与宠物饲料厂的生产情况不同。例如，在 K 大学实验室，喂料速度保持稳定而挤压机 rpm 时而变化，这样形成不同的滞留时间和不同的挤压室充满度；在商业性宠物饲料厂，挤压机 rpm 是固定的，而喂料速度可能不固定。所以说，将工艺参数连同试验结果直接外推到生产条件，是没有多大用处的。

要将小型实验室挤压机的结果按比例放大，首先应找出基本指标，就是指得以产生所期望的工艺结果（不论工艺过程的最终规模大小）的一个或一套工艺参数。如果最终找到所“期望”的工艺结果是某（或某范围）熟化度（糊化程度）或容重，那么，比能输入（每单位产品的能量输入）当然就是一个基本指标。比能输入由两部分组成，即机械能输入和直接热能输入。本研究在挤压机没有注入蒸汽，注入的水也是冷的（也可以认为与预调制的温度基本一样）。因此可以认为，热能全都在预调制阶段输入了，可以从产品温度和水分变化推算出来。用了一个适合的模型（附录 6），估算出了运行-1 和运行-3 的每个加工批次的直接热能输入，连同所记录的比机械能输入列入表 10。用这些数据代入从比机械能输入预测熟化度的二次方程，其统计结果，运行-1 和运行-3

表 10 工艺条件、能量输入与熟化度

批次	工艺参数			预调制		能量输入			熟化度 %
	rpm	蒸汽 kg/cm ²	水 kg/min	温度	水分 %	热能	机械能	总和	
-----运行-1-----									
1	215	3.5	0.23	89	21.4	42.1	51.1	93.2	86.9
2	315	3.5	0.23	87	21.4	40.9	39.1	80.0	75.7
3	265	2.8	0.23	89	22.2	42.9	48.1	91.0	88.9
4	215	2.8	0.09	88	17.5	37.4	51.1	88.5	89.1
5	315	2.8	0.09	87	18.1	37.4	36.1	73.5	59.9
6	315	2.8	0.34	83	22.6	29.6	49.6	79.2	87.8
7	215	2.8	0.34	81	21.5	37.6	54.1	91.7	91.5
8	215	4.2	0.23	94	23.0	46.8	51.1	97.9	89.4
9	215	3.5	0.23	94	22.0	45.5	43.6	89.2	84.1
10	315	1.4	0.23	68	19.6	28.7	39.1	67.8	59.4
11	215	1.4	0.23	68	19.0	28.2	49.6	77.8	86.4
-----运行-3-----									
1	295	1.8	0.23	64	18.8	26.2	40.6	66.8	53.7
2	295	1.8	0.27	64	19.8	26.9	40.6	67.5	51.9
3	215	4.2	0.32	91	21.0	43.2	46.6	89.8	89.3
4	215	1.8	0.23	64	19.0	26.3	43.6	69.9	74.4
5	265	2.8	0.32	78	20.9	35.7	46.6	82.3	84.6
6	265	2.8	0.27	77	20.7	34.9	48.1	83.0	82.1
7	315	4.2	0.32	92	21.1	44.0	45.1	89.1	87.4
8	315	4.2	0.23	94	20.6	44.5	43.6	88.1	85.1
9	295	2.8	0.32	78	21.0	35.8	46.6	82.4	86.1
10	215	3.5	0.23	87	20.2	40.0	49.6	89.6	93.0
11	265	2.8	0.23	81	19.7	36.2	43.6	79.8	89.0

分别是 $r^2=0.88$ 和 0.85 (图 2,图 3); 代入从比总热量输入预测熟化度的二次方程, 运行-1 和运行-3 分别是 $r^2=0.77$ 和 0.89 (图 4,图 5)。斜率同一性检验也表明两次运行之间有差异, 可能由于原料变动所致。比直接热能输入和比机械能输入都作为挤压放大的候选基本指标作过研究, 机械能输入更受重视, 因为它可以作为工艺自动控制的一个灵敏指标瞬间测定。

根据制粒和蒸汽压片的情况来看, 短暂的预调制时间里发生的糊化作用或许很有限, 但这并不意味着热能输入或预调制对糊化不起作用。预调制时较高的热能输入使得物料或“面团”更粘。根据定义, 粘度显然与剪切速度和剪切阻力有关, 在喂入速度和压模大小/结构固定时与机械能输入有关。这就是为什么在 K 大学试验的高 rpm 条件下糊化度或容重对蒸汽/水反应更为灵敏的缘故。

在宠物饲料行业有一种说法, 认为更多地靠热能(与更多地靠机械能相比)达到同样的熟化度, 前者产品的适口性更好。这需要通过动物试验来证实。

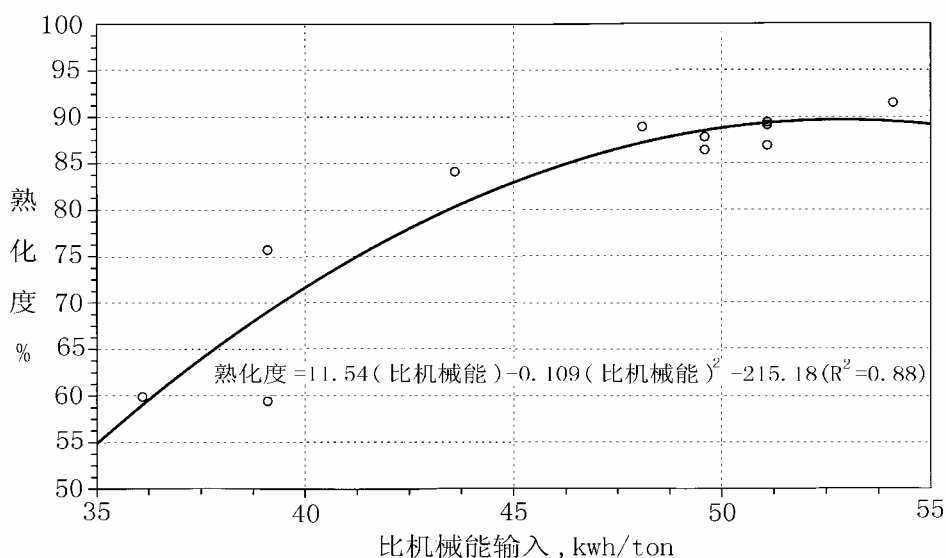


图 2 运行 - 1 的比机械能输入实测值与熟化度的关系 (注: 去掉 1 个极端值), 以及所得到的预测方程式

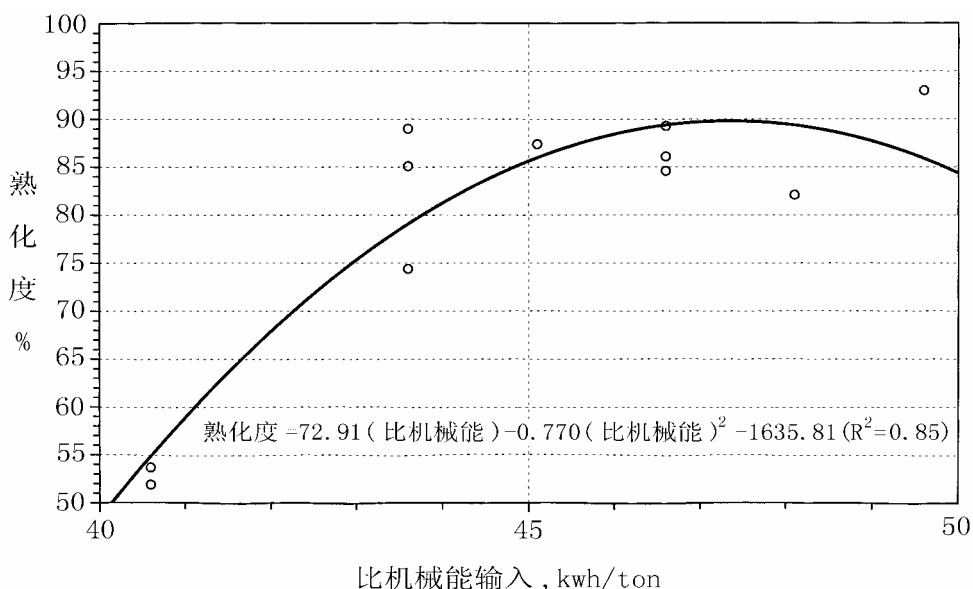


图 3 运行 - 3 的比机械能输入实测值与熟化度的关系, 以及所得到的预测方程式

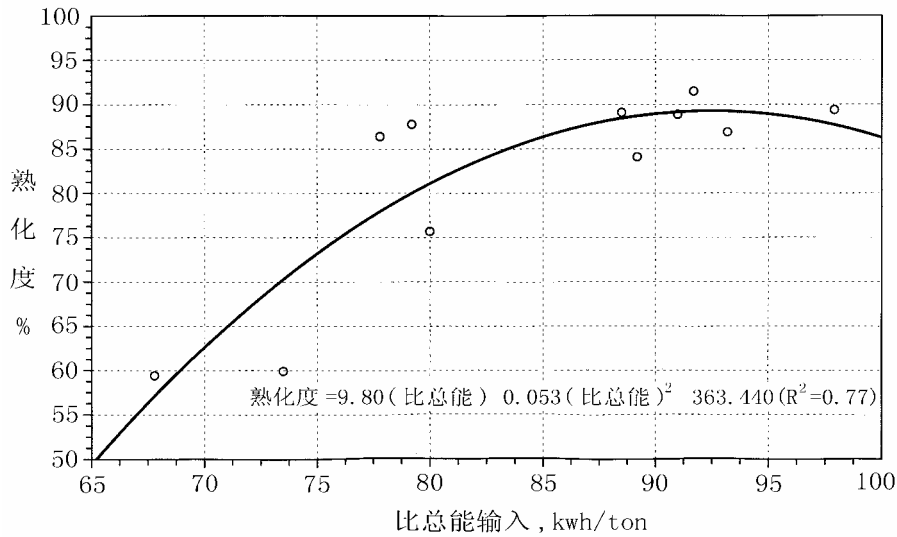


图 4 运行 - 1 的比总能输入与熟化度的关系，以及所得到的预测方程式

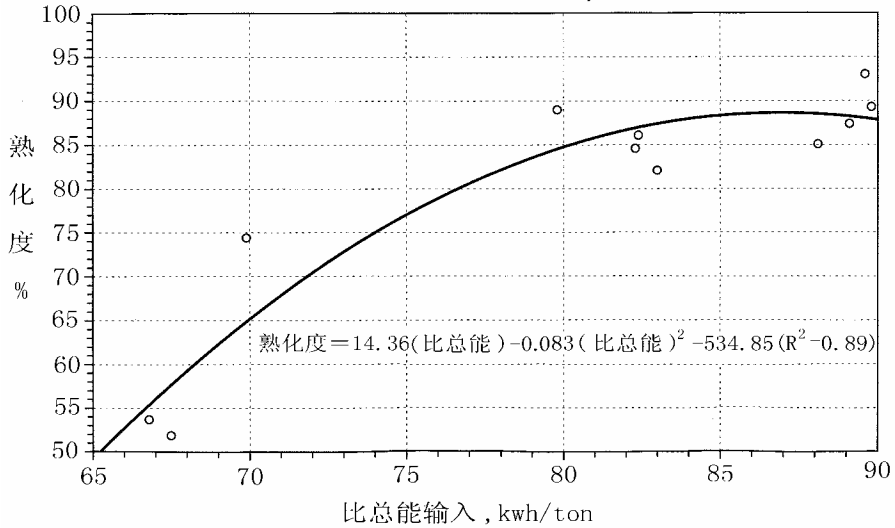


图 5 运行 - 3 的比总能输入与熟化度的关系，以及所得到的预测方程式

附录 1

WENGER X-20 单螺杆挤压机配置

螺杆元件	WENGER 部件号	蒸汽锁直径 cm	WENGER 部件号	节段位置	WENGER 部件号	机镗面
轴承螺杆	68638-005	-----		进料口	68714-001	螺旋沟
SLF*喂料	68327-001	7.47	68364-001	2 节	68372-001	螺旋沟
SLF*喂料	68327-001	7.47	68364-001	3 节	68372-001	螺旋沟
SLF*喂料	68327-001	7.47	68364-001	4 节	68318-001	直沟
OLF*揉合	68326-001	7.85	68324-001	5 节	68318-001	直沟
OLF*揉合	68326-001	7.85	68324-001	6 节	68318-001	直沟
OLF*揉合	68326-001	7.85	68324-001	7 节	68372-001	螺旋沟
OL/CF 锥体	68321-001	-----		8 节	68350-001	螺旋沟

* SLF: 单螺片, 螺距 4.77 cmcm

OLF: 双螺片, 螺距 3.18 cmcm

OL/CF 锥体: 带缺口的双螺片, 末端锥形螺杆区段, 螺距 3.18 cmcm

预调制机筒

浆叶配置: S—直形, T—浆叶尖端垂直, F—前倾, N—居中, R—后倾

喂料口——

卸料口——

浆叶类型	S	S	S	S	T	T	T	T	T	T	S	S	S	S	T	T	T	T
浆叶角度	45	45	45	45	90	90	90	90	90	90	45	45	45	45	45	45	45	45
浆叶方向	F	F	F	F	N	N	N	N	N	N	R	R	R	R	F	F	F	R

附 录 2

挤压机工艺条件

制品: 21%蛋白狗饲料

挤压机: X-20				
运行号	921215-1	921215-2	921215-3	921215-4
螺杆转速 rpm	295	295	215	215
蒸汽压 kg/cm ²	1.8	1.8	4.2	1.8
注水量 kg/min	0.225	0.270	0.315	0.225
原料:				
水分 %	9.7	9.7	9.7	9.7
喂料速度 kg/min	3.42	3.42	3.42	3.42
喂料螺旋转速 rpm	20.5	20.5	20.5	20.5
预调制:				
机筒转速 rpm	135.0	135.0	135.0	135.0
蒸汽压 kg/cm ²	1.8	1.8	4.2	1.8
注水量 kg/min	0.225	0.270	0.315	0.225
卸料温度	64.0	64.0	91.0	64.0
卸料水分 %	18.83	19.77	20.96	18.98
挤压:				
轴转速 rpm	295	295	215	215
电机负荷 %	18.5	18.5	20.5	19.5
比机械能 kwh/ton	40.6	40.6	46.6	43.6
注蒸汽量 kg/min	0.00	0.00	0.00	0.00
注水量 kg/min	0.171	0.171	0.171	0.171
机膛套筒条件 (热交换介质)				
第 2 节	冷水	冷水	冷水	冷水
第 3 节	冷水	冷水	冷水	冷水
第 4 节	冷水	冷水	冷水	冷水
第 5 节	冷水	冷水	冷水	冷水

第6节	无	无	无	无
第7节	无	无	无	无
第8节	无	无	无	无
压模温度	132	129	115	117
压力 kg/cm ²				
第7节	8.75	10.50	15.75	22.75
压模	<7	<7	<7	<7
切刀驱动转速 %	41	41	41	41
挤压物水分 %	22.88	20.75	24.44	22.77
挤压料速kg/min	4.05	3.96	4.05	3.87
湿容重 g/L	568	552	368	392
烘干条件：				
热风温度	107.0	107.0	107.0	107.0
滞留时间 min				
上层输送带	6.0	6.0	6.0	6.0
底层输送带	9.2	9.2	9.2	9.2
冷却输送带	4.8	4.8	4.8	4.8

附录 3

运行-1 多变量回归分析

因变量: 糊化度

来源	自由度	平方和	均方	F 值	Pr>F
模型	8	1365.01867624	170.62733453	508.92	0.0020
机误	2	0.67054194	0.33527097		
校正总和	10	1365.68921818			
R-平方	C.V.	标准差	平均糊化度		
0.999509	0.708486	0.57902588	81.72727273		
参数	估计值	T 值	Pr> T	估计值标准误	
截距	-81.5627075B	-3.98	0.0577	20.48457789	
Rpm	1.8861815	10.75	0.0085	0.17551952	
蒸汽	-1.5931519B	-10.32	0.0093	0.15431976	
水	-165.0525644B	-16.49	0.0037	10.01169386	
rpm×蒸汽	0.0053287	19.30	0.0027	0.00027605	
rpm×水	0.4612837B	21.96	0.0021	0.02100426	
蒸汽×水	0.0000000B				
rpm×rpm	-0.0046963	-14.24	0.0049	0.00032981	
蒸汽×蒸汽	0.0065958	3.79	0.0631	0.00173976	
水×水	74.1565657	8.49	0.0136		

因变量: 湿容重

来源	自由度	平方和	均方	F 值	Pr>F
模型	8	244.87384027	30.60923003	67.83	0.0146
机误	2	0.90252336	0.45126168		
校正总和	10	245.77636364			
R-平方	C.V.	标准差	平均湿容重		
0.996328	2.796832	0.67176014	24.01818182		
参数	估计值	T 值	Pr> T	估计值标准误	
截距	72.58346984B	3.05	0.0926	23.76529840	
Rpm	-0.64924237	-3.19	0.0859	0.20362996	
蒸汽	0.73871059B	4.13	0.0540	0.17903493	
水	60.13264986B	5.18	0.0353	11.61512300	
rpm×蒸汽	-0.00226243	-7.06	0.0195	0.00032026	
rpm×水	-0.21061682B	-8.64	0.0131	0.02436821	
蒸汽×水	0.00000000B				
rpm×rpm	0.00173333	4.53	0.0454	0.00038263	
蒸汽×蒸汽	-0.00358333	-1.78	0.2178	0.00201839	
水×水	-12.20202020	-1.20	0.3517	10.13284655	

估计值后有 B 为有偏估计，故非该参数的唯一估计值。

附录 4

运行-3 多变量回归分析

普通线性模型程序

因变量: 糊化度

来源	自由度	平方和	均方	F 值	Pr>F
模型	9	1965.21552712	218.35728079	8.26	0.2641
机误	1	26.43356379	26.43356379		
校正总和	10	1991.64909091			
R-平方	C.V.	标准差	平均糊化度		
0.986728	6.451624	5.14135817	79.69090909		

普通线性模型程序

因变量: 湿容重

来源	自由度	平方和	均方	F 值	Pr>F
模型	9	193.44000000	21.49333333	10.75	0.2327
机误	1	2.00000000	2.00000000		
校正总和	10	195.44000000			
R-平方	C.V.	标准差	平均湿容重		
0.989767	5.276916	1.41421356	26.80000000		

附录 5

两次运行的斜率同一性检验

因变量: 糊化度

来源	自由度	平方和	均方	F 值	Pr>F
模型	17	3349.49952518	197.02938383	25.72	0.0032
机误	4	30.64605664	7.66151416		
校正总和	21	3380.14558182			
R-平方		C.V.	标准差	平均糊化度	
0.990934		3.429532	2.76794403	80.70909091	

来源	自由度	平方和	均方	F 值	Pr>F
运行	1	32.72935249	32.72935249	4.27	0.1076
rpm	1	7.75453000	7.75453000	1.01	0.3713
蒸汽	1	6.34167204	6.34167204	0.83	0.4144
水	1	30.51729650	30.51729650	3.98	0.1167
rpm × 蒸汽	1	177.99665907	177.99665907	23.23	0.0085
rpm × 水	1	10.16167973	10.16167973	1.33	0.3136
rpm × rpm	1	17.96933303	17.96933303	2.35	0.2004
蒸汽 × 蒸汽	1	35.89659323	35.89659323	4.69	0.0964
水 × 水	1	31.33809469	31.33809469	4.09	0.1132
rpm × 运行	1	18.13064706	18.13064706	2.37	0.1988
蒸汽 × 运行	1	73.24165000	73.24165000	9.56	0.0365
水 × 运行	1	8.87445565	8.87445565	1.16	0.3424
rpm × 蒸汽 × 运行	1	1.03385200	1.03385200	0.13	0.7320
rpm × 水 × 运行	1	5.87056537	5.87056537	0.77	0.4308
rpm × rpm × 运行	1	17.22185619	17.22185619	2.25	0.2082
蒸汽 × 蒸汽 × 运行	1	64.31435261	64.31435261	8.39	0.0442
水 × 水 × 运行	1	16.16418101	16.16418101	2.11	0.2200

因变量: 湿容重

来源	自由度	平方和	均方	F 值	Pr>F
模型	17	482.57760404	28.38691788	94.58	0.0002
机误	4	1.20057778	0.30014444		
校正总和	21	483.77818182			
R-平方		C.V.	标准差	平均湿容重	
0.997518		2.156135	0.54785440	25.40909091	

来源	自由度	平方和	均方	F 值	Pr>F
运行	1	0.92681046	0.92681046	3.09	0.1537
rpm	1	0.00679559	0.00679559	0.02	0.8877
蒸汽	1	0.55340853	0.55340853	1.84	0.2461
水	1	0.71554511	0.71554511	2.38	0.1975
rpm × 蒸汽	1	40.16719725	40.16719725	133.83	0.0003
rpm × 水	1	0.64851478	0.64851478	2.16	0.2155
rpm × rpm	1	0.24486470	0.24486470	0.82	0.4175
蒸汽 × 蒸汽	1	7.82980535	7.82980535	26.09	0.0069
水 × 水	1	0.21021789	0.21021789	0.70	0.4497
rpm × 运行	1	5.48371639	5.48371639	18.27	0.0129
蒸汽 × 运行	1	12.56327825	12.56327825	41.86	0.0029
水 × 运行	1	3.14421341	3.14421341	10.48	0.0318
rpm × 蒸汽 × 运行	1	1.22102823	1.22102823	4.07	0.1139
rpm × 水 × 运行	1	11.33714992	11.33714992	37.77	0.0036
rpm × rpm × 运行	1	6.76714488	6.76714488	22.55	0.0090
蒸汽 × 蒸汽 × 运行	1	15.21053786	15.21053786	50.68	0.0021
水 × 水 × 运行	1	0.51563252	0.51563252	1.72	0.2601

附录 6

K 大学挤压实验室进行挤压熟化中的估计热能输入

既设，

T1=预调制前的物料温度，假定为 15.6 ；

T2=预调制后的物料温度（卸料口）；

T3=水温，假定为 15.6 ；

M1=预调制前物料水分，%；

M2=预调制后的物料水分（卸料口），%；

假定，

预调制前的物料比热=1674.7J/(kg · K)；

传输到预调制后物料中的热能[J/(kg · K)]：

$$Q1=[1674.7(T2 - T1)(1 - M2)] + (T2 - T3)[1 - (1 - M2)/(1 - M1)]$$

传输到预调制前物料中的热能(kwh/ton)：

$$Q2=[(2000Q1)(1 - M1)/(1 - M2)]/3411.3*$$

*从 Btu（英制热单位）换算为 kwh 的系数