

饲料加工技术的最新进展及其对动物性能的影响

作者Steven L. Traylor 美国肯塔基大学动物科学系

Keith Behnke 美国堪萨斯州立大学谷物科学和工业系

Joe D. Hancock 美国堪萨斯州立大学动物科学和工业系

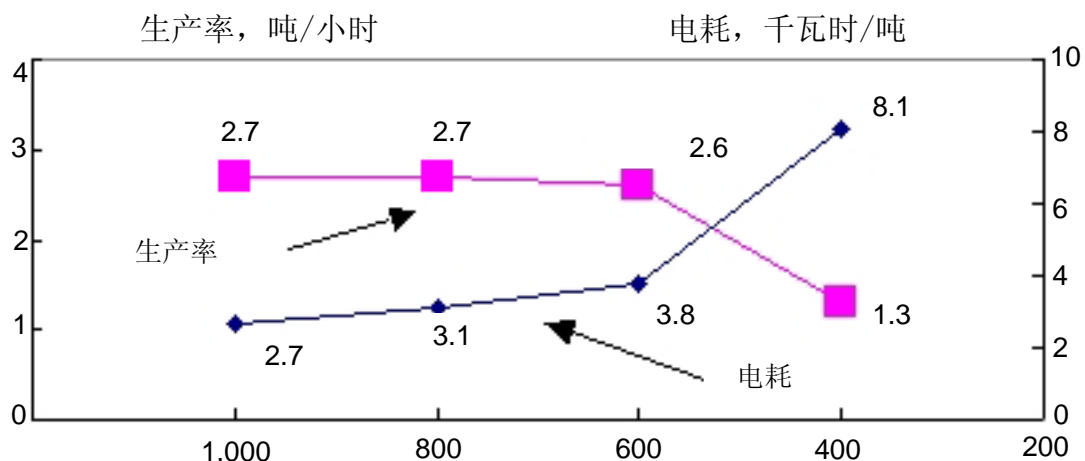
前言

畜禽饲养业在近20年来发生了显著的变化，这主要是由于动物的健康、遗传和管理等方面得到了改善，从而使动物提高了其性能水平；这样就进而要求有较高的营养需要量以支持这一较高的性能。当今的饲料加工商和营养师处在持续不断的压力下，他们被要求生产营养平衡的优质日粮以满足这一要求。令人惊奇的是，很少有人研究基本的饲料加工过程对动物性能的影响。本文的目的就是综述当前有关饲料加工对猪、禽生产性能影响的研究，尤其是美国堪萨斯州立大学进行的研究。

粉碎

无论使用的是玉米、高粱、小麦、大麦或是其它的能量饲料，日粮制备的第一步一般都是对所用的饲料原料进行粉碎以减小其粒子的粒度。Fraps (1932) 的报告表明了人们早期对粒度（粉碎程度）重要性的了解。他报告，高粱经粉碎后，其消化率高于整粒高粱的消化率。基于对这一试验及以后一些试验的兴趣，产生了一直持续至今的一个研究领域：测定猪在各个生产阶段中所要求的最佳饲料粒子粒度。

饲料粉碎的成本，在很大程度上取决于两个因素：1) 粉碎一定量的谷物所耗能源的多少；2) 粉碎时每小时每马力的生产率。美国堪萨斯州立大学Wondra等(1995a)的研究中，用锤磨机将玉米粉碎到平均粒度分别为1000、800、600、和400微米，发现粉碎时的能源消耗随粉碎程度的增高（粒子粒度由1000微米减小到600微米）而略有增加（从每吨2.7千瓦时增加到每吨3.8千瓦时），图1显示了这一变化情况。然而，若将饲料粒子再减小200微米（即减小到几何平均粒度为400微米），则需要的能源将两倍于粉碎到600微米时消耗的能源。饲料粒子由1000微米减小到600微米时生产率的降低较小，而若将饲料粉碎到400微米则生产率的降低也显著得多。这些数据清楚地表明，提



颗粒细度，微米

图1 用锤磨机粉碎玉米时的能源消耗和生产率 (Wondra等, 1995a)

高玉米的粉碎程度（提高粉碎后饲料粒度减小的程度）会增加能源消耗和降低生产率。在另一项试验中，Healy (1994) 用三层球磨机 (three-high roller mill) 将玉米和两种高粱（硬胚乳高粱和软胚乳高粱）分别粉碎到平均粒度为900、700和500微米。结果表明，不同谷物的粉碎特性各不相同：玉米粉碎时的能源消耗，高于对两种高粱进行粉碎时的能耗而生产率。则低于高粱粉碎时的生产率将高粱粉碎到500微米时所消耗的能源少于将玉米粉碎到900微米时的能源消耗。Baker (1960) 发现粉碎高粱比粉碎玉米更容易，而玉米的粉碎又比燕麦的粉碎容易。

Healy将McElhinery (1986) 提出的粉碎成本分析法应用于自己的数据分析，他分析了可变成本（耗电）以及各项固定成本（折旧、利息、税收、保险、保养、维修、劳力）。总的粉碎成本为，硬胚乳高粱粉碎到平均粒度900微米时每吨0.64美元，玉米粉碎到平均粒度500微米时每吨5.98美元。两种高粱粉碎到500微米时的成本都低于玉米粉碎到900微米时的成本。为了测定饲料粒度的减小对饲料营养价值的影响，对日粮中的谷物进行等重替换而用培育期仔猪进行了试验，试验为期35天，使用仔猪240头。试验期间的成本分析结果表明，饲料粒度由900微米减小到500微米，日粮的成本因粉碎成本的增高而增高。然而，日粮成本的变化大于增重效率的提高而产生的补偿，以至于猪在喂以3种谷物时每100千克增重的成本都随饲料粒度的减小而降低。所以，在最终决定如何通过谷物粉碎来最大限度增加利润时，都应考虑到谷物粉碎过程耗去的成本量和动物性能预期改进量之间的差别。

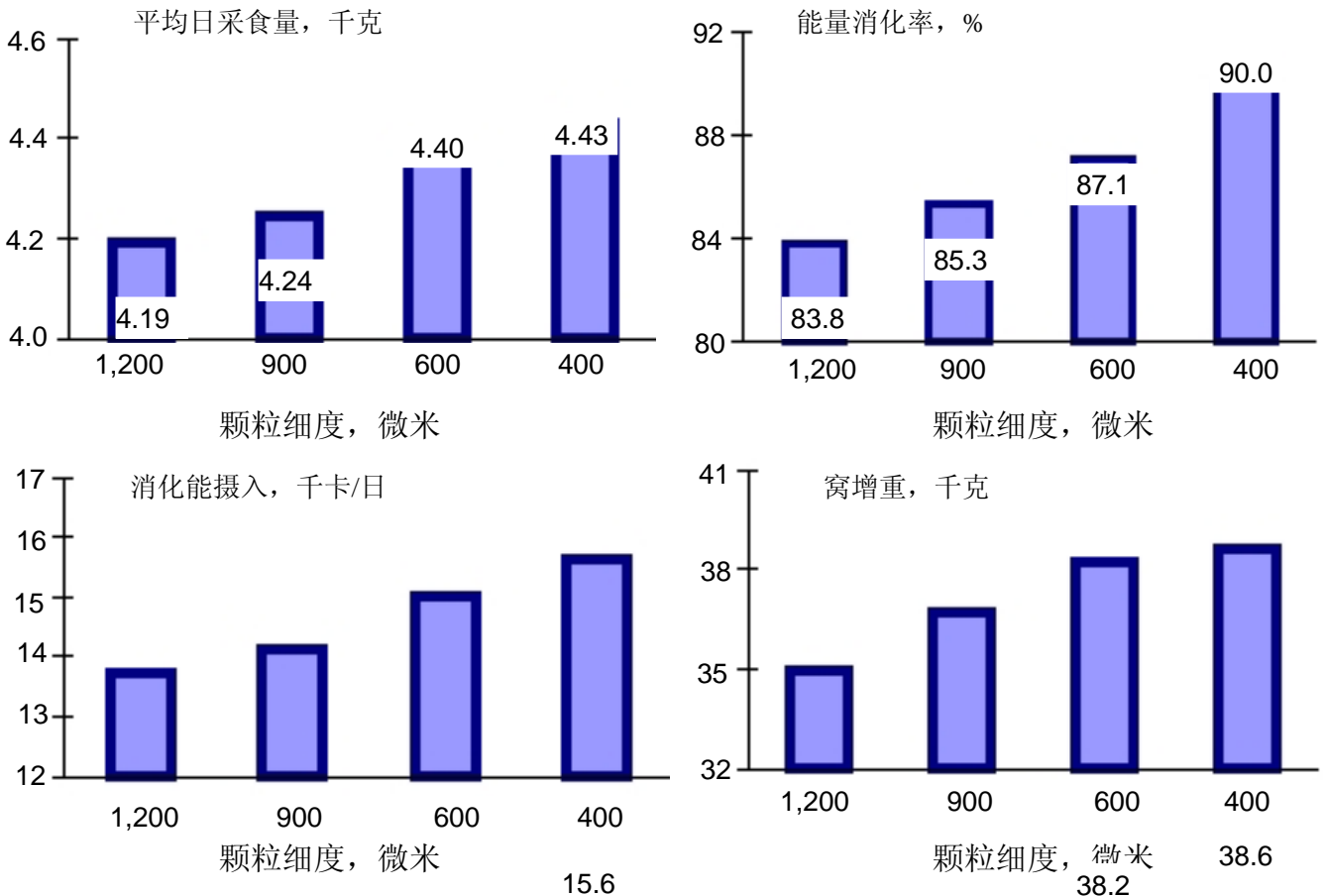


图2 日 13.7 E米粉 14.1 寸经产 15.0 乳性能以及表观消化率 34.9 量摄) 36.7 影响 (Wondra 等,

1995c)

动物性能的提高虽然不是先进加工技术唯一可能的好处，但却是明显可见的，也是最容易测得的，并且还是成品日粮终端用户（即畜禽饲养者）最感兴趣的。有些试验的结果显示饲料粒度的减小虽然提高了动物的增重率，但动物增重效率的提高才是更为典型的效果。Wondra等（1995a）报告，将玉米粉的粒度由1000微米减小到400微米，使增重效率改善了8%。此外，他们查阅了若干试验的全部数据之后认为，生长猪日粮中玉米粉平均粒度在1200微米到400微米之间时，玉米粉平均粒度每减小100微米则饲料效率改善1.3%。因此，注意进行适度的粉碎，是确保生长猪最高性能的有效方法。

极为重要的是，适度粉碎的好处在母猪也是显而易见的。一般认为，传统的营养方案不能满足高产母猪的营养需要量。业已证明，母猪较高的养分摄入量可以提高其性能。最常用以提高母猪养分摄入量的方法，是向日粮中添加更多的蛋白质和（或者）脂肪（这样会增高日粮的成本），从而提高日粮养分的浓度。另一种方法是使母猪保持舒适从而提高其采食量，即在天气炎热时采用滴水法或喷雾法进行防暑降温。采用这些方法可以提高采食量，但遗憾的是，这也会增加粪中的养分排出量。令人奇怪的是，没有多少人考虑到第三种可能性，即提高日粮中现有养分的消化率。

Wondra等（1995c）用100头母猪进行了一个泌乳试验，所用四种日粮中的玉米粉粒度分别为1200、900、600和400微米。学者们说，他们原来担心玉米磨细后适口性会比较差，但事实不是这样，采食量事实上随玉米粉粒度的减小而增加（见图2）。采食量的增加以及养分消化率的提高，使得消化能摄入量增加了14%，并使窝增重提高了11%。最后，由于玉米粉粒度减小导致的养分消化率提高，使得粪中的干物质排出量减少了21%，使粪中的氮排出量减少了31%。养分经粪排出量的减少，明显而直接地减轻了猪场粪便处理的负担。

为了测定谷物粒度的减小对泌乳期养分代谢的影响，Wondra等（1995d）用38头二胎母猪进行了一项代谢试验。试验所用的日粮以玉米-豆粕为基础，玉米粉的粒度分别为1200、900、600和400微米。结果表明，干物质、氮和消化能的消化率随着玉米粉粒度由1200微米减小到400微米而增高（表1）。的确，日粮的代谢能浓度随玉米粉粒度由1200微米减小到400微米而从3399千卡/千克增高到3745千卡/千克。若要以日粮配合的方法使日粮的能量浓度增高相同的量，可能需要向日粮中

表1 玉米粉粒度对二胎母猪养分代谢的影响^a

项 目	日粮中玉米粉的粒度（微米）			
	1200	900	600	400
干物质消化率(%) ^b	82.2	85.2	85.6	88.1
氮消化率(%) ^c	80.7	85.6	86.9	88.5
生物学价值(%)	55.0	62.7	62.0	57.0
氮潴留率(克/天) ^c	50.9	63.0	63.3	56.7
总能消化率(%) ^b	81.9	85.5	86.3	86.7
总能潴留率(兆卡/天) ^b	13.2	14.1	14.4	14.3
消化能(千卡/千克日粮) ^b	3513	3668	3705	3857

代谢能(千卡/千克日粮) ^b	3399	3572	3601	3745
---------------------------	------	------	------	------

注：a. 摘自Wondra等(1995d)全部数值均为表观值；

b. 玉米粉粒度减小的线性效应 ($P < 0.02$)；

c. 玉米粉粒度减小的二次效应 ($P < 0.04$)。

添加9%的大豆油。日粮的生物学价值以及氮的滞留率随玉米粉粒度从1200微米减小到600微米而增高。但是，日粮的生物学价值以及氮的滞留率却因玉米粉粒度进一步减小到400微米而下降，这可能是由于玉米蛋白质的氨基酸组成所致。玉米蛋白质中缺乏赖氨酸、苏氨酸、色氨酸和缬氨酸，但其它氨基酸（比如，亮氨酸）的含量却超过了机体的需要量。豆粕中蛋白质的氨基酸组成可非常好地补充玉米蛋白质中氨基酸的不足。然而，如果仅仅提高玉米的消化率，可使日粮含有较高的可消化非必需氨基酸。过量氨基酸中的氮会经尿排出，从而降低日粮的生物学价值和氮的存留率。

饲料粒度的均匀度

为了测定饲料粒度的均匀度对动物生长性能和养分消化率的影响，Wondra等(1995b)进行了一系列试验。在试验1，日粮处理为：1) 以40:60的比率混合粗磨和细磨玉米粉，玉米粉平均粒度的标准差较大，为2.7 (sgw)；2) 锤磨玉米粉，标准差为2.3；3) 球磨玉米粉，标准差为2.0。所有各处理的玉米粉平均粒度均为850微米。结果表明，干物质、氮和总能的消化率在标准差较小时则较高（图3），但未见生长性能有任何差异。

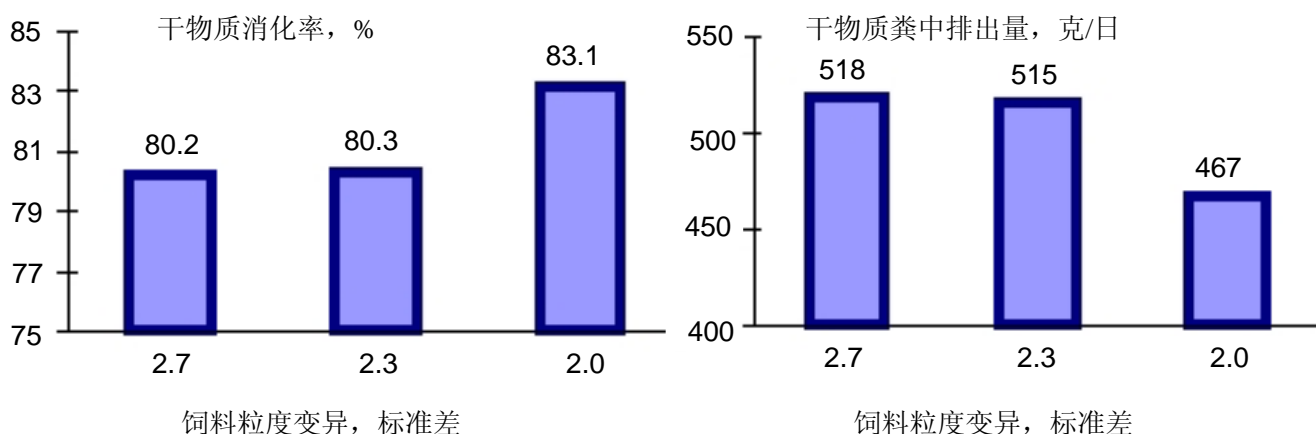


图3 玉米粉粒度的均匀度对日粮干物质消化率和干物质的粪中排出率的影响 (Wondra 等, 1995b)

在试验2，不同的处理为，用锤磨机或者辊磨机将玉米磨碎至800微米或者400微米。两种不同粒度（800微米和400微米）锤磨玉米粉的平均粒度标准差分别为2.5和1.7，而两种粒度球磨玉米粉的平均粒度标准差分别为2.0和1.9。结果表明，猪采食球磨玉米粉时的养分消化率高于采食锤磨玉米粉时，从而球磨玉米粉日粮的干物质和氮的经粪排出率分别比锤磨玉米粉日粮低19%和12%（表2）。令人惊奇的是，在玉米粉粒度为400微米时，虽然锤磨玉米粉的平均粒度标准差略低于球磨玉米粉，但仍以球磨玉米粉日粮的消化率较高。这一现象表明了，还存在着一种非标准差效应的粉碎机类型效应。Reece等(1985)报告，锤磨玉米粉的形，状比球磨玉米粉更像球形其边缘也更为齐整。球形使其不易受到消化酶的作用，因而锤磨玉米粉中养分的消化率较低。这一解释很难得到确证，但粒子形状影响谷物营养价值的可能性是非常令人感兴趣的。同样有趣的是较少见到报告的结果：辊磨玉米粉为大小较为均匀一致的颗粒，因而其流动

性好于粒子大小均一度较差的锤磨玉米粉，且其处理特性也较好。此外，辊磨谷物看来可（略微）减少发生胃部病变的可能性。因此，提高粒子大小的均一度（使用球磨机）就改善了养分的消化率，但遗憾的是这一效应并不一定伴随着动物性能的改善。

因此，在用培育期仔猪肥育猪和泌乳母猪进行的试验中所得的数据表明，谷物的最佳粒子粒度为600微米或再低一些。此外，看来，如果说辊磨机有什么优点，那主要就在于其粉碎成本较低，而非在于其对猪生长性能大而持续的影响。因此，比较慎重的做法是集中注意与日粮平均粒度减小相伴的猪性能不断改善，而非一味注重由较高的粒度均一度带来的微小变化。

表2 粉碎机类型和饲料粒度对谷物特性和养分利用率的影响^a

项 目	锤磨玉米粉		球磨玉米粉	
	800微米	400微米	800微米	400微米
谷物特性				
平均粒度（微米）	826	419	793	415
粒度标准差	2.5	1.7	2.0	1.9
生长性能				
日均增重（千克）	0.93	0.96	0.96	0.92
增重/耗料	0.284	0.308	0.291	0.305
表观消化率（%）				
干物质 ^{bc}	82.5	86.0	86.6	87.3
氮 ^{bc}	72.1	80.1	76.0	82.6
总能 ^{bc}	81.2	86.7	85.9	87.7
粪中的养分排出率（克/天）				
干物质 ^{bc}	517	396	397	347
氮 ^{bc}	18.4	12.6	16.3	10.9

注：a. 摘自Wondra等（1995b），全部数据均为表观值；

b. 锤磨对球磨（ $P < 0.03$ ）；

c. 800微米对400微米（ $P < 0.001$ ）。

搅拌均匀度的度量

最终饲料产品的质量可受很多因素的影响，比如，向搅拌机中的加料量超过了搅拌机的额定容量，设备磨损或改变，搅拌机设计不良，不同物料的添加顺序不当，以前残留原料积聚，出料口和液体添加系统泄漏，原料的成分和质量变异，称量误差，搅拌后物料分离，等等（Pfoest等，1974；McElhinery和Olentine，1982；Wilcox和Balding，1986；Wicker和Poole，1991）。不过，据认为，搅拌不足是日粮均匀度不足的主要原因，而日粮均匀度不足则会造成动物性能下降，并且这样的日粮是不符合饲料法规的规定的（同一批饲料内抗生素分布不均匀）。从饲料加工者的观点来看，最佳的搅拌步骤必须是时间、电力和人工等的投入最少的。因此，必须制定一个标准以规定充足的（不过是最低限度的）搅拌均匀度。这一标准通常就是饲料内所含某种养分或标记物浓度的变异系数（coefficient of variation, CV），而Beumer（1991）、Lindley（1991）和Wicker和Poole（1991）提出最高为10%的变异系数是一个“魔数”，它表示一批饲料得到了充

分的搅拌。

无论你选择什么样的变异系数来表示均匀的搅拌在确定搅拌，均匀度时最为需要的是既能为饲料业接受又能为立法部门接受的可靠的测试方法。目前还没有一种“标准”的测试方法，它既具有符合要求的精确度因而可为立法部门所接受，同时又能仅花费较低的成本并且有较快的测试速度和较高度的实用性从而可为饲料业所接受。对单一来源的某种原料、养分或者药物进行测试的方法，可能是比较好的，因为，据认为，若能使该成分均匀分布于全部被搅拌的物料中就能保证所有各种原料都能均匀分布于该物料中。食盐即被认为是以玉米-豆粕为基础的普通日粮中首选的单一来源成分，蛋白质、钙和磷都不适用，因为多种原料中都含有这些物质（即它们都不是单一来源）。现将一些比较常用的测试法介绍如下：

对药物、维生素、结晶氨基酸、矿物质等的化学测试法：对药物、维生素和氨基酸的测试通常都很费时间，成本也很高昂，且较难获得精确的结果。矿物质的测定结果比较精确。向一批接受搅拌的饲料中加入氧化铬丸后测定铬在该批饲料中的分布情况，是学者们多年来一直用以度量饲料搅拌均匀度的测试法。然而，矿物质测试法（包括对铬浓度的测定）往往非常复杂，也很费时间，有时候其成本也很高昂。因此，只能定期地进行测试以确保药物、维生素和重要矿物质在饲料中的存在，但以这样的测试作为搅拌均匀度的度量就有问题了。

钠离子浓度测试法（Omnion[®] assay）：一方法与氯离子测试法相似，只不过在一台类似于pH计的仪器中使用了一个钠离子电极。McCoy等（1994）提出，这一技术没有氯离子测试法那样精确，测试结果没有那么稳定（见下文）。采用这种方法时，试剂比较便宜，但开始时在设备上的投资比较大。

氯离子浓度测试法（Quantab[®] assay）：采用这种方法时，要用热水将饲料样品中的食盐提取出来。采用内有毛细柱（其中注满了重铬酸银）的层压塑料带来测定饲料与水的混合物中的氯离子浓度氯离子会与重铬酸银发生反应而使毛细柱的颜色发生变化（由褐色变为白色）。然后计算氯离子的浓度。并算出其数值与预期浓度值的差异以测定搅拌机的性能。这一方法的速度较快（仅需10~15分钟），可在饲料厂中现场进行而无需复杂的设备；只需要热水、滤纸、一个刻度量筒以及一些纸杯。此法的成本为每次测试50美分。然而，如果日粮中的食盐有着一个以上的来源（比如，来自乳清、血粉、血浆制品，等等），那么这一测试法就不令人满意了，因为多种来源的食盐会使结果的解释发生混乱。此外，还有若干种无机矿物质也会与毛细柱中的重铬酸银发生反应而使得对结果的解释发生混乱。所以，在测定比较复杂的培育期仔猪日粮的混合均匀度时，这种方法并不特别有用。

有色铁粒子法（Microtracer[™] procedure）：采用这种方法时，将有色铁粒子（用一种水溶性染料对其染色）添加入饲料之中，使每份日粮样品中至少有16个铁粒子饲料搅拌后用磁铁将铁粒子。由饲料中分离出来并将其置于滤纸上。用水喷洒滤纸，然后计数滤纸上的色点数滤纸上色点数。与预期值的差异即可反映搅拌机的性能。这种方法应用广泛，但它也有缺点。比如，色点总数的计数是极为主观的，并且还很难区别由不同粒子造成的色点。现在已成为常用做法的是将两份各带不同颜色的铁粒子分别加入搅拌机相对的两端，然后比较最终混合物中这两种铁粒子数目的差异，从而加强这一测试法的客观性。尽管这一测试法有着这样的缺点，但它仍然是度量搅拌均匀度的常用方法，尤其在测定幼猪日粮时更是常用这一方法，因为幼猪日粮中多种原料都含有食盐。

总而言之，现有多种技术都适用于测定成品饲料的混合均匀度。如前所述，所有这些技术都各有其优点和缺点，但是，有着一些方法可供应用总比没有任何方法好一些。然而，仍然存在这样一个问题：用这些测试法实际上能以多高的精确度测定成品饲料营养价值的差别呢？

日粮的均匀度和动物的性能

Wicker和Poole (1991) 报告了对商用搅拌机的一项调查数据。据此报告，在用蛋氨酸和赖氨酸作为追踪剂时，一半以上搅拌机搅拌结果的变异系数大于10%。Stark等 (1991) 在猪场检查现场搅拌机时也报告了类似的结果。在他们的试验中，仅42%受检日粮中食盐浓度的变异系数低于10%，47%的变异系数在10%和20%之间，11%的变异系数大于20%。然而，没有多少人研究搅拌时间、日粮均匀度及日粮成分的分离对动物性能的影响。Duncun (1973) 研究了原料中养分含量的变异对动物性能的影响。他发现，雏鸡的性能受到日粮中粗蛋白含量分布不均的危害。看来，搅拌不良造成的日粮养分分布不均，很可能对其它动物的生长也会产生同样的危害。然而，Holden (1988) 认为，仅仅一批饲料搅拌不当很少会对生长猪产生严重的影响，因为一批饲料很快就会被猪吃完。

美国堪萨斯州立大学McCoy等 (1994) 进行了一系列试验，研究了搅拌机转数（搅拌时间）对日粮均匀度和肉鸡生长性能的影响。对一种以玉米-豆粕为基础的日粮分别搅拌不同的时间，各代表高、中、差三种均匀度。日粮中主要养分（粗蛋白、赖氨酸、蛋氨酸、钙和磷）的含量均为NRC (1984) 标准的80%，旨在研究日粮均匀度对生长性能的影响。对日粮进行分析的结果表明，日粮的均匀度随搅拌机转数的增加而提高（表3）。这一改进大部分见于搅拌机转数由5增加到20期间，将搅拌机转数进一步增加到80，日粮均匀度的改善较小。然而，日粮均匀度的变异系数因分析方法的不同可受到相当大的影响；例如，高均匀度处理中食盐浓度钠和浓度的变异系数分别为9.7%和22.8%。

在肉鸡雏的生长性能方面，观察了平均日增重、平均日采食和增重/耗料比的二次效应。生长性能随搅拌均匀度从“差”变为“中”而改善，但未随搅拌均匀度从“中”变为“高”而进一步改善。可见，变异系数为12%至23%（具体取决于所用的标记物）时生长率最高，这与当前饲料业关于变异系数不应高于10%的建议相反。因此，日粮均匀度不良确实危害了肉鸡雏的性能，但为获得最佳性能所要求的变异系数则高度依赖于为测定该变异系数所用的标记物。

表3 搅拌时间对日粮均匀度和肉鸡性能的影响¹

项 目	转数			标准误	线性效应 ²	二次效应 ³
	5	20	80			
食盐浓度变异系数 (%) ^{4, 5}	40.5	12.1	9.7	3.4	0.001	0.001
红色颗粒变异系数 (%) ^{4, 6}	53.4	16.6	11.3	4.0	0.001	0.001
蓝色颗粒变异系数 (%) ^{4, 7}	53.9	17.0	10.6	3.5	0.001	0.001
钠浓度变异系数 (%) ^{4, 8}	44.5	23.2	22.8	3.1	0.001	0.001
平均日增重 (克)	23.6	30.0	30.3	1.7	0.05	0.04
平均日采食 (克)	43.1	51.5	52.7	2.9	0.07	0.10

增重（克）/耗料（千克）	548	583	575	18	0.17	0.06
死亡率（%）	12.0	0	0	5.8	0.28	0.22

- 注：1.每个处理7笼，每笼5只鸡；所有处理平均初重37克（McCoy等，1994）；
2.搅拌机线性效应的显著性；
3.搅拌机转数二次效应的显著性；
4.变异系数根据每笼10袋的分析结果算得，然后用每笼的变异系数进行统计分析，表中的平均数来自每个处理的10次笼观察结果；
5.食盐浓度的变异系数（Quantab®分析法）；
6.红色铁粒子的变异系数（Microtracer™分析法）；
7.蓝色铁粒子的变异系数（Microtracer™分析法）；
8.钠的变异系数（Omnion®分析法）；

Traylor等（1994）进行了类似的试验，测定了搅拌时间对日粮均匀度和培育期仔猪和肥育猪生长性能的影响。在培育期仔猪试验中，使用了120头断奶仔猪，平均初重5.5千克，试验为期27天。对所有的仔猪都在断奶后饲喂7天同样的颗粒料，然后，从第7天到第27天饲喂不同的日粮处理（均为粉料）。不同的处理分别为0、0.5、2和4分钟不同的搅拌时间，使用容量为454千克的双螺旋搅拌机。在第二个试验中，使用了128头肥育猪平均初重56千克饲喂至118千克的屠宰体重，使用相同的一种以玉米-豆粕为基础的日粮，采用的试验处理是与培育期仔猪试验中相同的四种不同搅拌时间。

在培育期仔猪的试验中，将搅拌时间从0分钟增加到0.5分钟，使铬（即用于测定搅拌均匀度的标记物）浓度的变异系数从106.5%降低到28.4%（图4）。日粮均匀度随搅拌时间增加到4分钟而得到进一步提高（变异系数达到12.3%）。在搅拌均匀度对猪生长性能的影响方面，平均日增重随搅拌时间从0分钟增加到4分钟增加了49%，增重/耗料比也随之改善了19%。然而，平均日增重和增重/耗料比的改善在搅拌时间由0分钟增加到0.5分钟之间最为明显，而在搅拌时间进一步增加到4分钟时则改善的程度较小（即二次效应）。不过，我们的数据表明，培育期仔猪为获得最大生长所需要的变异系数不高于12%。

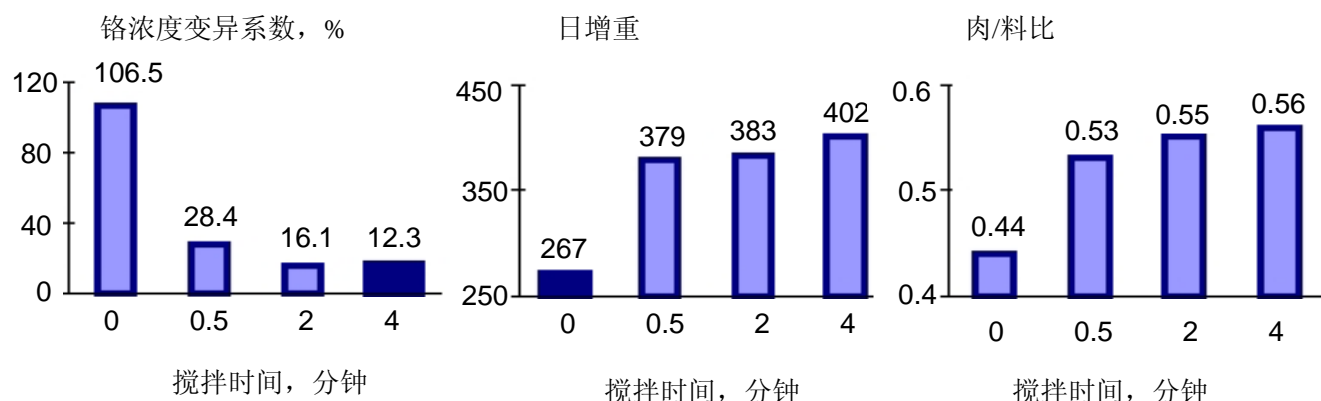


图4 搅拌时间对日粮均匀度和培育期仔猪生长性能的影响（Traylor等，1994）

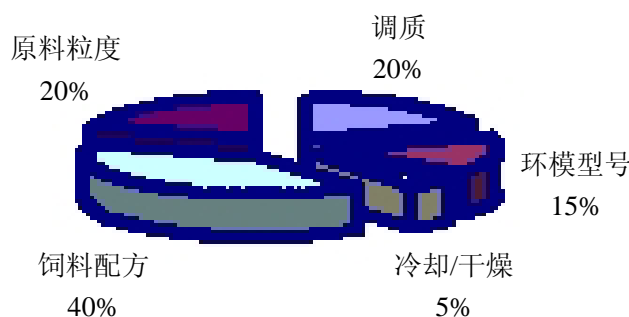


图5 搅拌时间对肥育猪日粮均匀度、生长性能和骨断裂强度的影响 (Traylor等, 1994)

在肥育猪试验中(图5), 生长性能未受($P>0.15$)日粮均匀度(将日粮变异系数从将近54%减低到10%下)的影响。然而, 0分钟处理猪的生长性能最差, 增重效率也最差(尽管差异不显著)。胴体背膘厚随搅拌时间0分钟增加到0.5分钟而降低, 但却未随搅拌时间进一步增加到分钟而有进一步的改善。骨的强度未受不同处理的影响。这些数据表明, 肥育猪的生长性能未因高达54%的日粮均匀度变异系数而受危害。因此, 这两个试验的结果表明, 增加搅拌时间改善了日粮均匀度和培育期仔猪的性能, 但肥育猪对日粮均匀度的敏感性则低得多, 其生长性能仅受轻微影响。培育期仔猪和肥育猪对日粮均匀度的反应程度之所以有此差异, 很可能是因为培育期仔猪日粮搅拌不匀, 因而其中的特种成分(乳清、血粉和结晶氨基酸)分布不匀, 从而日粮的适口性降低了的缘故。此外, 培育期仔猪的每日采食量(683克)比肥育猪的每日采食量(2.92千克)低得多, 所以减低了断奶猪从搅拌较差的日粮中满足自身主要营养需要的可能性。

总而言之, 生长期动物对日粮均匀度很可能没有一度认为的那样敏感。对于肉鸡雏和培育期仔猪来说, 12%的变异系数(Quantab和铬浓度分析)就足够了; 对于肥育猪来说, 最低15%的变异系数(也许还可以高一些)就足够了。然而, 商品饲料加工商还是应该精心生产搅拌均匀的日粮, 从而使日粮中所含任何受管制添加剂的效价符合规定。此外, 美国多数州的饲料法规都规定, 任何饲料商品若经随机抽样检查证实其中成分不符合其标签所示的保证量即应被视为换假。

颗粒料的颗粒大小和质量

饲料开支占养猪生产总成本的60~70%。Behnke(1994)提出, 饲料开支是畜禽饲养业中如此巨大的一项投入, 所以人们将持续不断地努力改进可降低饲料成本并可提高其对目标动物营养价值的饲料加工技术。然而, 各种各样的加工技术是非常多的, 对于加工成本的任何增加都应针对动物性能的提高而对其进行仔细的权衡。将日粮制成颗粒料可从许多方面影响动物的性能。据认为, 颗粒料有助于提高性能的因素包括减少饲料浪费、减少日粮成分的分离、减少加工过程的时间和能源消耗、提高日粮的适口性、消灭病原微生物以及通过加热而改善淀粉和蛋白质的消化率。此外, 进行制粒就可应用更多种类的原料而不会显著改变日粮的外观。这样就常可使日粮的成本得到降低而又无害于动物的性能, 并且也不会因为日粮外观改变而遭到饲养者的投诉。

环模和压辊被认为是制粒成本中的两大主要项目。因此, 如果饲料加工商可延长环模的使用寿命或者在保证生产质量的条件下减少所需环模的数量, 那么就可降低总的生产成本。此外, 如果可保持最低的环境使用量, 那么最终就可减少为更换环模而耗费的时间从而增加每天所产成品饲料的总量。Bohl(1959)进行了一项成本对比研究。据他报告, 环模的使用寿命在2200吨至5000吨之间。他还报告, 环模直径从3/16英寸增加到3/4英寸, 生产成本就从每吨26美分降低到了每吨21美分。

颗粒料的“质量”是饲料业常用的一个主观的词。为撰写此文，特将“质量”定义“为颗粒料耐受反复处理而无过度破碎从而产生细粉的能力”。Reimer (1992) 指出，许多因素都可影响颗粒料的质量，影响最大的因素存在于粉料进入制粒机调质器之前的阶段（日粮的配合以及日粮的粒度大小）（图6）。

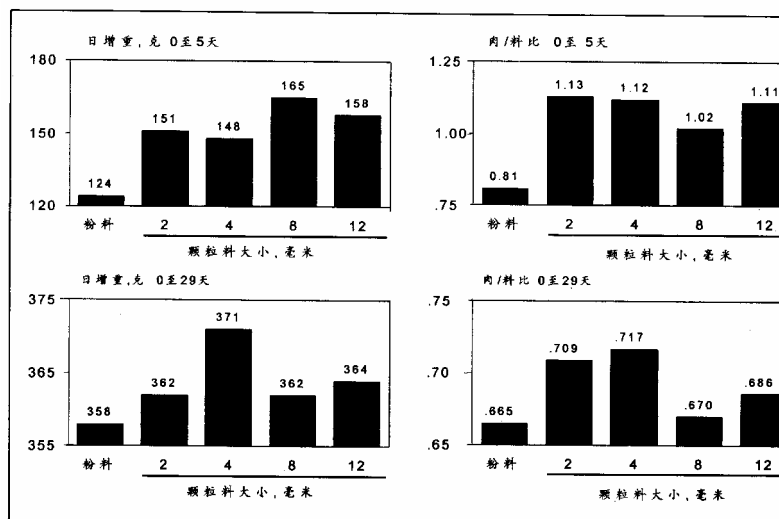


图6 影响颗粒料耐久力的因素 (Reimer, 1992)

颗粒料的质量一直以间接法进行测定,比如,应用“Stoke氏片剂硬度测试仪(Stoke's Tablet Hardness Tester®, 这是专为片剂制作而设计的), 这是首次用来测试颗粒料质量的方法之一 (McCormic和Shellenberger, 1960)。若采用这样的测试法, 饲料加工商就可在颗粒料刚一离开制粒机后立即对其质量进行预测, 从而就可及时进行必要的调整。此外, Young (1960) 发明了“翻斗盒测试法”(tumbling box test), 此法现已成了用以测试颗粒料质量的行业标准。利用这一方法 (ASAE, 1987) 可测出因机械处理而产生的细粉量。最近, 学者们改进了这一方法, 他们在翻斗盒内加入了若干轴承滚珠或者六角螺帽以便更逼真地模拟现代饲料机械对饲料进行处理时产生的破碎作用。McEllhinery (1988) 评价了Holman氏颗粒料测试法 (Holman Pellet Test), 试验中应用了高速气流将颗粒料通过管道进行传送, 从而模拟了现场条件下对饲料进行的处理。他报告, Holman测试法的结果比较稳定, 但测得的数值低于以翻斗盒测试法测得的数值。

因此, 饲料加工商和营养师在讨论颗粒料的颗粒大小和质量时要考虑到所用的是哪一种测试方法。无论采用的是哪一种测试法, 任何一个测定值真正的重要性在于客户对其是否满意以及动物性能受到何种影响。

颗粒料的颗粒大小和质量对动物性能的影响

很少见到有关颗粒料的颗粒大小对动物性能影响的数据。Lavorel (1984) 报告, 培育期仔猪 (28日龄断奶) 采食2毫米大小的颗粒料时, 采食量大于采食5毫米大小的颗粒料。Harris等 (1979) 在德克萨斯理工大学“养猪日论文集”(Swine Day Proceedings) 中提出, 肥育猪喂以4.6毫米大小的颗粒料时, 饲料效率优于采食6.4毫米大小的颗粒料。然而, Tribble等 (1979) 在同一文集中报告, 肥育猪喂以4.6~12毫米大小不等的颗粒料时, 生长率和饲料效率都相近。因此, 在不多的几篇有关颗粒料颗粒大小的报告中, 关于颗粒料颗粒大小对猪生长性能的实际影响没有多少一致意见。

Traylor (1996) 进行了一系列试验，测定了颗粒料大小（直径）对培育期仔猪生长性能和养分消化率的影响以及对肥育猪生长性能、胴体特性、养分消化率和胃部形态学等的影响。在培育期仔猪试验中，使用210头断奶猪，平均初重5.4千克，试验为期29天，所用日粮为以玉米-豆粕为基础的复杂日粮，试验分为0~5、5~15以及15~29天共三个阶段。日粮处理为粉料对照处理以及直径分别为2、4、8和12毫米共三种不同大小的颗粒料处理。在肥育猪试验中使用了80头阉公猪，平均初重58千克，在体重55千克至88千克之间以及从88千克直至屠宰期间，喂以不同的两种玉米~豆粕日粮。日粮处理与培育期仔猪试验中的相同。

在0~5天期间，采食颗粒料者的平均日增重提高了25%，饲料效率改善了36%（图7）。然而，

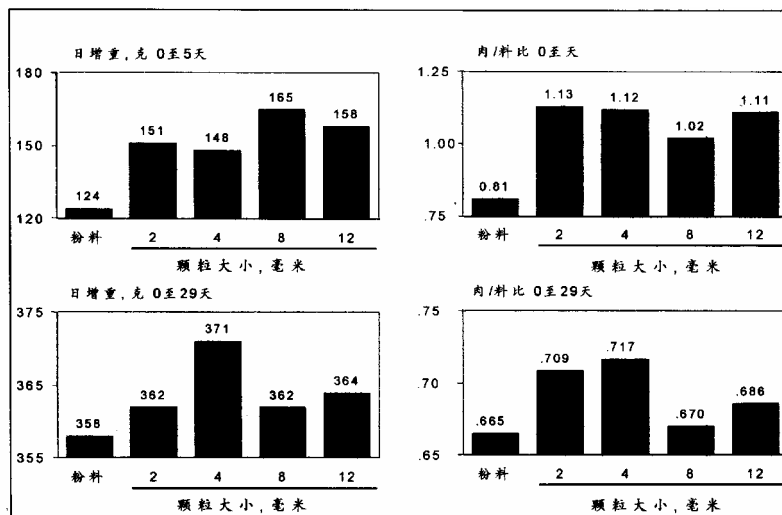


图7 颗粒料大小对培育期仔猪生长性能的影响 (Traylor等, 1996)

颗粒料的颗粒大小没有影响生长性能 ($P>0.12$)。在0~29天期间，采食颗粒料者的饲料效率比采食粉料者改善了4% ($P<0.04$)，但饲料效率随颗粒料大小由2毫米增大到12毫米而变差（三次效应， $P<0.04$ ）。在颗粒料大小2毫米和4毫米之间，饲料效率没有什么差别。饲料效率的变差主要见于颗粒料大小由4毫米增大到8毫米时。

在肥育猪试验中，生长率（图8）未因采食颗粒料而受影响。然而，采食颗粒料者的采食量较小 ($P<0.02$)，而饲料效率表现稍优 ($P<0.08$)。颗粒料大小由2毫米增大到12毫米，平均日增重 ($P<0.01$) 和平均日采食 ($P<0.01$) 增大，但饲料效率表现稍差 ($P>0.08$)。胴体特性未受日粮形态或颗粒料大小的影响 ($P>0.25$)。采用颗粒料时，胃内的角质化程度稍大 ($P>0.10$)，胃部病变的发生率和严重程度较高 ($P<0.005$)。此外，胃部病变的严重程度随颗粒料大小由2毫米增大到12毫米而增高 ($P<0.04$)，但颗粒料大小对角质化程度没有多大影响 ($P>0.37$)。

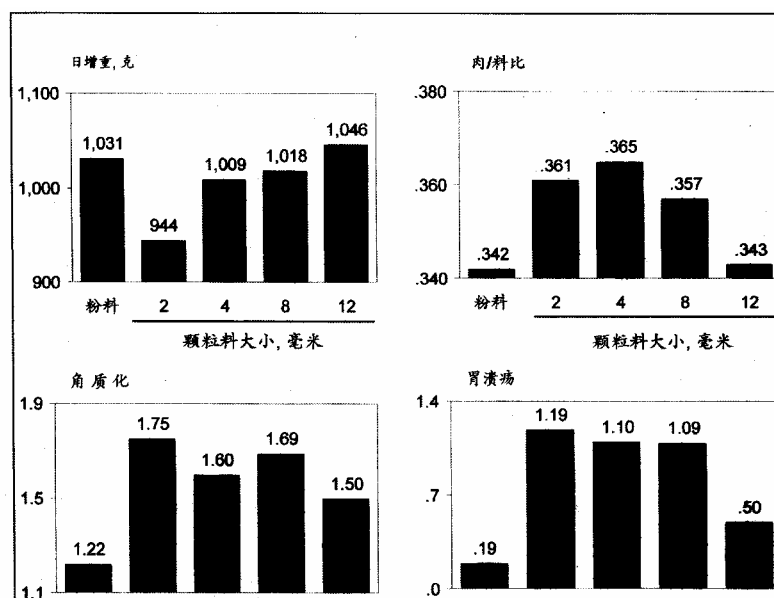


图8 颗粒料大小对肥育猪生长性能和胃部形态学的影响 (Traylor等, 1996)

肉鸡和火鸡的日粮几乎都是颗粒料。一般都一致认为, 采用颗粒料时平均日增重和饲料效率都优于采用粉料 (Hussar和Robblee, 1962; Hull等, 1968; Runnels等, 1976; Proudfoot和Sefton, 1978; Choi等, 1986)。然而, 肉鸡业最近的兴趣集中在颗粒料质量和颗粒料细粉对肉鸡性能的影响方面。Scheideler (1991) 发现, 肉鸡喂以75%颗粒料加25%细粉时, 饲料效率大大优于 (2.4%) 喂以25%颗粒料加75%颗粒料细粉的肉鸡。试验期间见到肉鸡有选择性采食的行为, 并且养分摄入量也因选择性采食而发生变化。火鸡看来对颗粒料质量和颗粒料细粉比肉鸡雏更敏感。若干试验的结果表明, 颗粒料细粉会降低火鸡的性能 (Proudfoot和Hulan, 1982; Salmon, 1985; Moran, 1989; Waibel等, 1992)。Moran (1989) 证明, 饲喂磨碎的颗粒料时生长性能低于饲喂整粒颗粒料时。Proudfoot和Hulan (1982) 发现, 颗粒料细粉的含量由0增加到60%, 火鸡的性能下降。研究证明, 培育期仔猪日粮制成颗粒料, 可使平均日增重和饲料效率改善9~10% (Braid等, 1973; Skoch等, 1983; Walker等, 1989; Hancock等, 1992)。将生长-肥育猪日粮制成颗粒料后, 平均日增重和饲料效率分别改善了3~5%和7~10% (Hanke等, 1972; Tribble等, 1979; Harris等, 1979; Skoch等, 1983; Walker等, 1989; Wondra等, 1995)。然而, 这些试验都没有测定颗粒料质量对生长性能的影响。

现已普遍承认颗粒料可改善动物的性能, 但关于颗粒料的质量和/或日粮中的细粉含量对动物性能的影响则还懂得很少。Stark等 (1994) 进行了一系列试验, 测定了粉料和颗粒料以及颗粒料细粉对猪性能的影响。在培育期仔猪试验中, 使用了126头断奶猪, 平均初重4千克, 试验为期40天。用相同的第一阶段颗粒料日粮饲喂12天, 然后改喂第二阶段试验日粮至40天; 日粮处理为: 1) 粉料; 2) 过筛的颗粒料 (筛去了细粉); 3) 过筛的颗粒料加入25%细粉。在肥育猪试验中, 使用80头小母猪, 平均初重54千克, 采用相同的肥育日粮, 不同的处理为: 1) 粉料; 2) 过筛的颗粒料; 3) 颗粒料加20%细粉; 4) 颗粒料加40%细粉; 5) 颗粒料加60%细粉。

在培育期仔猪试验中, 饲喂颗粒料日粮时, 平均日增重 ($P < 0.06$) 和增重效率 ($P < 0.01$) 比饲喂粉料的对照猪分别改善了8%和15% (图9)。喂以过筛颗粒料时, 增重效率比喂以含15%或30%细粉的日粮时高4.5%; 当饲喂含细粉的日粮时, 饲槽中细粉的每天积聚量增高2.3倍。喂以颗粒日粮时, 干物质和氮的表观消化率高于喂粉料的对照猪 ($P < 0.01$), 但细粉的含量未影响养分的消化率。

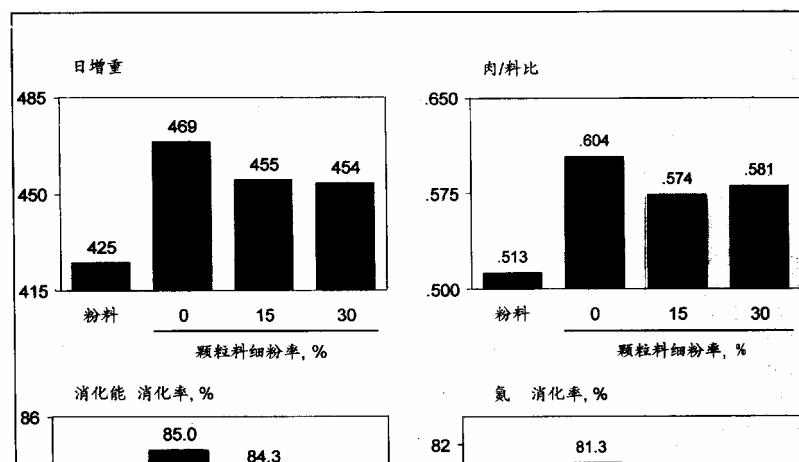


图9 颗粒料细粉对培育期仔猪养分消化率和生长性能的影响 (Stark 等, 1994)

在肥育试验中, 喂以过筛的颗粒料时, 平均日增重和饲料效率与喂粉料者相比分别改善了3%和5% (图10)。添加细粉未影响平均日增重, 但在饲喂颗粒料的猪中增重效率随细粉添加量的增加而变差。在喂以颗粒料日粮者, 干物质消化率高于饲喂粉料者 ($P < 0.01$), 但氮的消化率和胴体特性未因日粮形态的不同或细粉的添加与否而受影响 ($P > 0.10$)。

这些试验证明了, 培育期仔猪和肥育猪的生长性能因饲喂颗粒料日粮以及颗粒料制粒环模的选择而得到了改善。但是, 如果制粒加工进行不当而造成细粉量过多则制粒产生的收益就可被不同程度地抵消。幼年动物看来比成年动物对颗粒料细粉和颗粒料的大小更为敏感, 因而在幼年动物的饲养中更要加强对饲槽的管理。还需要进行进一步的研究以便确定猪可耐受的细粉量, 但当前的数据表明, 低达15~20%的细粉也会显著抵消颗粒料在断奶猪和肥育猪产生的收益。此外, 无论在培育期仔猪, 还是在肥育猪生长率和饲料效率的改善会因颗粒料的大小由4毫米增大到8毫米而被显著地抵消。

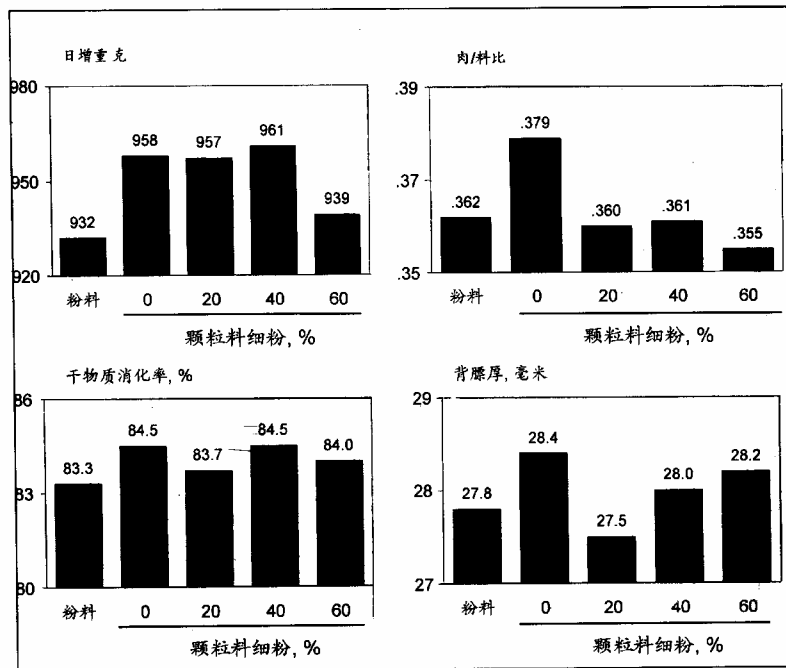


图10 颗粒料细粉对肥育猪养分消化率、生长性能和胴体特性的影响 (Stark 等, 1994)
热加工法

当今饲料业中最常用的热加工法有颗粒料制作、挤压膨化、焙烤、微波化和蒸气压片、焙烤和微波化常用于制作全脂大豆制品（焙烤大豆），但未在谷物加工中广泛应用。蒸气压片被常规用于加工高粱籽粒供肥育牛食用而不用于猪、禽日粮的加工。挤压膨化是加工整粒大豆的最好方法，但一般认为其成本太高因而不能用于商品猪、禽日粮的制作（但也许可用于断奶仔猪和泌乳母猪日粮的制作）。

从饲料加工商的观点来看，颗粒料的好处在于减少混合饲料中不同成分的分，减小饲料所占体积，减少粉尘以及改善饲料的处理特性。此外，畜禽饲养者经常抱怨，用磨得很细的玉米粉（粒度小于600微米）配制日粮时，日粮在储料罐和饲槽中的流动性不好。将日粮制成颗粒料就可排除其搭桥现象，从而减少使用细磨原料配制日粮时产生的问题。然而，有些营养师提出了这样一个问题：制粒过程中饲料粒子的集块作用是否会抵消掉减小饲料粒子粒度带来的好处？Wondra等（1995a）用肥育猪进行了一个试验测，定了在日粮中玉米粉粒度为1000微米（粗磨粉）和400微米（细磨粉）时将日粮制粒产生的后果。制粒改善了平均日增重和饲料效率，而细磨则使得日粮形态无论是粉料还是颗粒料都改善了猪的饲料效率。Kim等（1995）在后来的一项培育期仔猪试验中，使用了一种简单日粮（以玉米-豆粕-乳清为基础）或者一种复杂日粮（以玉米-豆粕-乳清为基础，其中还添加了血浆蛋白质、小麦面筋、血粉和乳糖）日粮中玉米粉的粒度分为1000微米和500微米两种，将所有的日粮都制成颗粒料。无论在简单日粮还是在复杂日粮，生长率和/或增重效率都随玉米粉粒度的减小而改善。因此，无论是制粒还是配制复杂日粮，都没有抵消日粮中细磨玉米粉给培育期仔猪和肥育猪带来的有益作用。

挤压膨化（extrusion）和膨化（expansion）

膨化机（expander）和挤压膨化机（extruder）的运作原理没有多大区别，它们都是高温而短时间的加工方法。高温短时加工法的好处是，可提高颗粒料的质量，增加配方中可用原料的种类，减轻制粒机环模的磨损，能够处理比较大量的液体。具有了这些优点，动物的性能和日粮中养分的消化率就会由于淀粉发生糊化以及热敏感蛋白酶抑制因子被破坏而得到改善。膨化技术发源自欧洲最近引起了美国饲料加工商的极大兴趣。然而，没有多少发表的资料涉及膨化技术对日粮特性和动物性能的影响。在现有不多的资料中，普及性出版物中的文章和报告关于日粮配制和膨化加工条件的说法非常含混不清。因此，美国的饲料加工商对于这项技术的高投资抱着一种怀疑的态度，因为他们不知道采用这项技术会对加工成本和动物性能产生什么样的影响。

虽然挤压膨化技术和膨化技术是相似的，但两者的成本不同。Hancock（1992）在关于挤压膨化加工的简述中报告，挤压膨化机的安装成本随机器的复杂程度和容量的不同而异。Coelho（1994）简述了挤压膨化机和膨化机的区别（表4），膨化机实际上是一台简化的低成本挤压膨化机，饲料在其中被迫通过一个环形缝隙，不同于其在挤压膨化机中通过一个模具孔。与挤压膨化机相比，膨化系统的膨化缸体较大，需要较高的马力，消耗的能源较少，生产能力较高。Peisker（1996）说，大多数公司的膨化系统安装成本在25~30万美元之间（表5）。然而，完整的膨化系统（即，膨化机、团块破碎机和控制系统）的总成本则取决于整个系统的预期生产能力。

表4 膨化机和挤压膨化机的运转条件

项 目	膨化机	挤压膨化机
-----	-----	-------

湿度水平 (%)	15~25	20~35
饲料温度 (°C)	93~127	110~160
滞留时间 (秒)	10~30	50~120
螺杆直径 (厘米)	10~25	25~50
发动机马力	500~1000	75~250
能源消耗 (千瓦时/吨)	5~15	50~300
生产率 (吨/小时)	20~60	2~10

注：摘自Coelho (1994)

表5 膨化系统的安装成本

预期生产率 (吨/小时)	发动机马力	系统价格 (×1000美元)
10	200~250	145~185
25	200~400	150~205
45	500~600	165~240
60	800~1000	
205~305		

注：摘自Peisker (1996)。

保养成本取决于加工饲料的类型、日粮原料的种类以及能源消耗 (表6)。Peisker发现,膨化机的能耗由8千瓦时/吨增加到25千瓦时/吨,则保养成本由每吨0.12美元增加到每吨1美元,具体取决于加工日粮的配方。

挤压膨化和膨化对动物性能的影响

采用挤压膨化技术和膨化技术需要较大的投资和大量的人员培训。然而,在这方面增加的成本开支产生的结果必然是使产品质量的提高以及/或者动物性能的改善所花的代价得到降低。挤压膨化和膨化可糊化谷物中的淀粉,从而可使其对酶的水解作用更为敏感。挤压膨化和膨化的其它好处是,可对饲料灭菌,可使蛋白质变性,提高脂肪的稳定性,以及降低抗营养因子的活性 (Hancock, 1992; Peisker, 1994b)。

表6 膨化机的保养成本

日粮类型	能源消耗 (千瓦时/吨)	保养成本 (美元/吨)
肉鸡日粮	8~10	0.12~0.15
火鸡日粮	9~12	0.15~0.20
猪日粮	8~12	0.15~0.20
奶牛日粮	15~18	0.50~0.95
水产动物日粮	18~25	0.75~1.00

注：摘自Peisker (1996)

对肉鸡雏饲喂膨化 (干燥挤压膨化) 谷物的早期研究 (Deyoe等, 1967; Sloan等, 1971) 未能显著改善肉鸡的生长性能。相反, Sloan (1971) 报告, 对雏鸡饲喂挤压膨化的玉米日粮和高粱日粮, 结果表明体增重和饲料效率都趋向于改善。后来, Smith等 (1995) 报告, 肉鸡雏喂以膨化日粮和颗粒料日粮时, 生长率和饲料效率都优于采用以蒸气调质的颗粒料日粮; 他们还

报告，颗粒料耐久指数随着调质水平由标准颗粒料调质改为膨化机调质而从55.4%提高到80.3%。Behnke (1996) 在有关膨化机和调质技术的综述中报告了Rollins进行的工作。Rollins比较了常规调质、蒸气能量(vapor energy)调质、蒸气增强(steam enhancer)调质和膨化机(expander)调质的效果。同常规调质相比，蒸气能量调质、蒸气增强调质和膨化机调质分别使鸡的活重增加了1%、1%和5%，分别使饲料效率改善了4%、3%和3%。虽然上述改善的量很小，但其总的经济收益却非常大，尤其在大型综合性养鸡企业中则更是这样。

已发表的少量研究结果，报告了膨化加工条件对猪日粮养分消化率和猪性能的影响。Hancock等(1992a)报告，对玉米、高粱、小麦和大麦进行了挤压膨化，改善了其在肥育猪日粮中的消化率和饲喂价值。Skoch(1983)进行了一项研究，比较了制粒前是否经过蒸气调质以及膨化后进行蒸气调质和制粒对于以玉米-小麦粗粉为基础的日粮产生的影响。据他报告，制粒和挤压膨化改善了能量的消化率和饲料效率，但平均日增重未受影响。Peisker(1994a)报告，在培育期仔猪试验中使用了含30%膨化小麦麸的日粮和全膨化日粮，以未处理的日粮作为对照，结果表明两个试验组仔猪的增重率得到了改善。相反，Hongtrakul(1996)报告，早期隔离断奶的仔猪分别喂以简单膨化日粮，和复杂膨化日粮结果平均日增重降低而增重效率得到了改善。

Traylor(1997)为了测定膨化日粮中养分的消化率，用肥育猪作了一系列试验，使用以玉米为基础的日粮和以小麦粗粉为基础的日粮，研究了膨化机工作条件(锥体压力)对日粮加工特性和养分消化率的影响(表7、表8)。无论在以玉米为基础的日粮还是以小麦粗粉为基础的日粮，能量摄入量、颗粒料耐久力以及淀粉糊化程度都随膨化机锥体压力的增大而提高。在以玉米为基础的日粮中，干物质、总能和氮的消化率都随锥体压力的增大而提高，这一提高主要发生在锥体压力由增加到24.4千克/平方厘米期间。相应的，在以小麦粗粉为基础的膨化日粮，养分消化率的提高主要发生在锥体压力由0增加到35.2千克/平方厘米期间。Traylor(1997)还研究了以高粱为基础的膨化日粮和以小麦为基础的膨化日粮。据他报告，对以高粱为基础的日粮进行膨化，养分消化率随锥体压力增大而提高，但在以小麦为基础的日粮中养分消化率则未因锥体压力增大而改善。这些数据可能表明，在分别以玉米、高粱和小麦粗粉为基础的日粮、养分的消化率可因膨化加工而得到提高，但在以小麦为基础的日粮中养分的消化率则不因膨化而改善。然而，在以小麦粗粉为基础的日粮中总能消化率的提高大于以玉米为基础的日粮(分别提高10%和5%)。玉米日粮和小麦粗粉日粮中总能消化率的提高分别使该两种日粮中的消化能提高了89千卡/千克和331千卡/千克。因此，情况看来是粗纤维含量高于玉米的原料(比如小麦粗粉)或者饲喂价值低于玉米的原料(比如高粱)经膨化加工后营养价值提高的程度大于玉米。

为了研究膨化加工对生长性能的影响，Johnston(1997)进行了一系列试验，测定了对培育期仔猪日粮和肥育日粮进行膨化加工的效果。在第一个培育期仔猪试验中使用了180头断奶仔猪，仔猪平均初重6.4千克。对仔猪喂以一种复杂日粮(日粮以玉米-豆粕为基础，另添加了血浆蛋白质、小麦面筋、血粉和乳糖)作为粉料对照，另分别喂以标准调质粉料，标准调质颗粒料，膨化机调质粉料以及膨化机调质颗粒料，试验为22析因设计，另加对照处理。在第二个培育期仔猪试验中，使用180头平均初重10.4千克的36日龄的仔猪，试验为期28天。各日粮处理均与第一个培育期仔猪试验相同。

表7 膨化机锥体压力对于以玉米为基础的日粮产生的影响^a

项 目	锥体压力(千克/平方厘米)	标准误	显著性(P<)
-----	---------------	-----	---------

	0	11.7	24.4	35.2		线性	二次	三次
特定能耗 (千瓦时/吨)	0.5	10.7	36.3	64.6	1.4	0.001	0.001	0.09
颗粒料耐久力 (%)	68.5	90.7	93.3	95.5	0.3	0.001	0.001	0.001
平均日采食 (克)	3245	2714	2825	2807	117	0.07	0.08	- ^b
干物质消化率 (%)	81.4	84.3	86.5	85.9	0.8	0.005	0.07	-
氮消化率 (%)	77.5	81.1	83.8	82.8	0.5	0.001	0.003	-
总能消化率 (%)	82.5	85.3	87.2	86.5	0.9	0.02	0.10	-
日粮消化能 (千卡/千克)	3236	3267	3392	3325	34	0.04	-	0.11
淀粉糊化率 (%)	32.0	44.3	48.9	49.9	-	-	-	-

注：a. 试验用猪36头（每圈8头，平均初重72千克），每个处理设3个重复；

b. 短划表示 $P>0.15$ 。

表8 膨化机锥体压力对高纤维日粮养分消化率的影响^a

项 目	锥体压力 (千克/平方厘米)				标准误	显著性 ($P<$)		
	0	11.7	24.4	35.2		线性	二次	三次
特定能耗 (千瓦时/吨)	0.3	9.4	20.2	37.5	2.4	0.001	0.14	- ^b
颗粒料耐久力 (%)	84.2	89.1	87.0	89.2	1.1	0.05	-	0.09
平均日采食 (克)	2814	2583	3204	2541	225	-	-	0.08
干物质消化率 (%)	70.0	72.6	72.4	75.6	1.2	0.02	-	-
氮消化率 (%)	69.2	74.5	77.1	78.3	1.2			
总能消化率 (%)	69.8	73.8	74.5	77.0	0.9	0.002	-	-
日粮消化能 (千卡/千克)	2789	2968	2990	3120	37	0.01	-	-
淀粉糊化率 (%)	33.8	51.7	51.9	69.9	-	-	-	-

注：a. 试验用猪36头（每圈8头，平均初重72千克），每个处理设3个重复；

b. 短划表示 $P>0.15$

试验1的结果表明，平均日增重、平均日采食和增重效率的测定值，在粉料对照的数值和所有各调质处理的平均值之间未见差异 ($P>0.30$) (表9)。这一现象的主要原因在于膨化处理中猪的生长性能太差而不是由于采食标准调质粉料和标准调质颗粒料的仔猪性能差。在膨化调质处理的仔猪，平均日增重、平均日采食和饲料效率（增重/耗料）分别比采食标准调质日粮的仔猪低39%、25%和21%。颗粒料日粮处理和粉料处理之间在平均日增重 ($P>0.50$) 或平均日采食 ($P>0.10$) 方面无显著差异；然而，将粉料制成颗粒料后，饲料效率得到了改善 ($P<0.02$)。

表9 标准调质和膨化机调质对断奶猪性能的影响^a

项 目	粉料对照	标准调质		膨化机调质		标准误
		粉料	颗粒料	粉料	颗粒料	
平均日增重(克) ^b	210	241	253	149	154	15
平均日采食(克) ^{b, c}	236	282	201	176	186	17
增重/耗料 ^{b, c, d}	0.89	0.86	1.26	0.85	0.83	68
淀粉糊化率 (%)	46.9	48.6	52.9	48.6	68.6	

注：a. 使用了180头仔猪，平均初重6.4千克（Johnston，1997）；

b. 标准调质对膨化机调质（ $P < 0.001$ ）；

c. 粉料对颗粒料 × 标准调质对膨化调质（ $P < 0.02$ ）；

d. 粉料对颗粒料（ $P < 0.02$ ）。

在第二个试验中，Johnston报告说，所有调质处理仔猪的采食量都低于（ $P < 0.03$ ）采食未调质对照粉料的仔猪（表10）在调质日粮处理中，仔猪的增重率有降低的趋向（ $P < 0.09$ ）：与对照相比，标准调质处理的平均日增重降低4%，膨化机调质处理的平均日增重降低6%。在标准调质日粮处理中，采食量有高于膨化机调质日粮的趋向（ $P < 0.09$ ）。然而，猪采食膨化机调质日粮时的生长性能与采食标准调质日粮的猪没有差异（ $P > 0.24$ ）。猪采食颗粒料日粮时增重效率优于采食调质粉料的猪（ $P < 0.001$ ）。将调质日粮制成颗粒料提高了干物质和总能的表现消化率（ $P < 0.05$ ），然而，氮的消化率未受影响（ $P > 0.14$ ）。膨化机调质日粮的养分消化率高于标准调质日粮的养分消化率（ $P < 0.05$ ）。

表10 标准调质和膨化机调质对第三期培育期仔猪生长性能和养分消化率的影响^a

项 目	粉料对照	标准调质		膨化机调质		标准误
		粉料	颗粒料	粉料	颗粒料	
平均日增重(克)	563	526	560	521	540	13
平均日采食(克) ^b	905	897	848	830	786	22
增重/耗料 ^c	0.622	0.586	0.660	0.628	0.687	0.16
养分表现消化率(%)						
总能 ^{c, d, e}	87.2	86.0	88.4	89.1	90.2	0.82
氮 ^d	85.2	83.8	85.1	86.6	88.2	0.94
干物质 ^{c, d, e}	86.3	85.7	87.5	88.1	89.0	0.57
日粮消化能(千卡/千克) ^{c, d, e}	3362	3572	3672	3670	3746	34
淀粉糊化率(%)	26.1	25.0	34.9	41.9	40.5	

注：a. 使用了180头仔猪，平均初重10.4千克（Johnston，1997）；

b. 粉料对照对其它处理（ $P < 0.05$ ）；

c. 粉料对颗粒料（ $P < 0.05$ ）；

d. 标准调质对膨化机调质（ $P < 0.05$ ）；

e. 粉料对颗粒料 × 标准调质对膨化调质（ $P < 0.05$ ）。

Traylor等（1997）在上述试验的基础上又进行了一项试验，测定了日粮复杂程度和加工方法对培育期仔猪生长性能和日粮养分消化率的影响。试验为期28天，使用了150头断奶后10天的仔猪，试验猪的平均初重10.3千克。试验日粮为以玉米为基础的简单日粮（含1.5%鱼粉）和复杂日粮（含3%鱼粉和20%乳清），饲料的形态为粉料、标准调质颗粒料以及膨化机调质颗粒料。制粒改善了平均日增重（ $P < 0.08$ ）和饲料效率（ $P < 0.001$ ）（表11）。然而，由结果可见，存在着若干相互作用：简单日粮仔猪的平均日增重因采用膨化加工而增高，而在饲喂复杂日粮的仔猪则平均日增重因采用膨化加工而下降（简单日粮对复杂日粮粉料对颗粒料的相互作用； $P < 0.02$ ）。采食膨化颗粒料者的增重率表现最低（ $P < 0.07$ ），但干物质、氮和总能的消化率则高于采食标准调质颗粒料的猪。一般来说，将日粮制成颗粒料提高了增重效率，而膨化机调质

仅在采用简单日粮的情况下才表现有益作用。

表11 日粮复杂程度和加工方法对培育期仔猪生长性能和日粮养分消化率的影响^a

项 目	简单日粮			复杂日粮			标准误
	粉料	标准调质	膨化调质	粉料	标准调质	膨化调质	
平均日增重 (克)	560	627	616	632	625	591	11
增重/耗料	0.682	0.736	0.782	0.681	0.756	0.778	17
养分消化率 (第16天)							
干物质 (%)	81.8	83.3	86.1	84.5	86.9	87.2	0.5
氮 (%)	78.5	79.3	82.8	79.2	81.5	83.0	0.6
总能 (%)	81.9	83.5	87.6	83.9	87.4	88.4	0.5
日粮消化能 (千卡/千克)	3312	3397	3580	3344	3529	3566	10

注：a. 使用了150头培育期仔猪，平均初重10.3千克 (Traylor等, 1997)。

为了研究调质方法对肥育猪生长性能和日粮养分消化率的影响，Johnston (1997) 进行了一个试验，使用了平均初重54千克的70头阉公猪，采用以玉米-豆粕为基础的日粮。试验采用2×3析因设计的日粮处理，设一个粉料对照，两种日粮形态（粉料和颗粒料）以及三种调质方法（常规调质，滞留时间10秒；长时间调质，滞留时间160秒；膨化调质）。

试验结果表明，膨化调质者的颗粒料耐久力最高，长时间调质者的次之，常规调质者的颗粒料耐久力最低（表12）。日粮经热调质后平均日增重有高于未调质粉料对照猪的趋向。长时间调质和膨化调质未使增重效率优于标准调质处理（ $P>0.14$ ）。采食标准颗粒日粮者的饲料效率与采食膨化日粮者相同，而采食长时间调质日粮者的饲料效率差于采食膨化日粮的猪（ $P<0.03$ ）。在采食颗粒料的猪，饲料效率都优于采食调质粉料的猪（ $P<0.04$ ）。然而，这一优势在标准调质颗粒日粮中更为显著；在采食标准调质颗粒料的猪，增重效率优于采食标准调质粉料者15%；在采食长时间调质颗粒日粮的猪，增重效率优于采食长时间调质粉料者2%；采食膨化调质颗粒日粮者的增重效率则与采食膨化粉料者的相同。

表12 饲料调质方法对肥育猪生长性能和日粮养分消化率的影响^a

项 目	粉料对照	标准调质		长时间调质		膨化调质	
		粉料	颗粒料	粉料	颗粒料	粉料	颗粒料
平均日增重 (克)	905	913	999	931	994	985	962
平均日采食 (克)	2742	2974	2830	2847	2976	2782	2718
增重/耗料	0.330	0.307	0.352	0.327	0.334	0.354	0.354
养分表观消化率 (%)							
总能 ^c	89.2	87.5	92.7	90.0	91.3	92.0	94.0
氮 ^d	89.7	87.9	92.1	90.0	90.7	90.9	93.0
干物质 ^c	87.8	84.3	89.9	87.3	88.4	88.7	91.4
日粮消化能 ^c (千卡/千克)	3572	3505	3714	3607	3656	3686	3767

淀粉糊化率 (%)	19.4	24.2	28.1	25.4	34.1	39.1	43.8
颗粒料耐久力 (%)	-	-	68.1	-	73.3	-	91.2

注：a. 总共使用了70头仔猪，平均初重54千克，每圈2头猪，每个处理设5个重复；

b. 粉料对颗粒料；长时间对膨化；调质粉料对颗粒料 × 常规调质对深度调质 (P<0.05)；

c. 粉料对照对热加工；粉料对颗粒料；常规调质对深度调质；长时间调质对膨化调质；调质粉料对颗粒料 × 常规调质对深度调质 (P<0.05)；

d. 粉料对颗粒料；常规调质对深度调质；长时间调质对膨化调质；调质粉料对颗粒料 × 常规调质对深度调质 (P<0.05)。

从饲料加工商和动物营养师的观点来看，湿热加工的好处是非常令人鼓舞的。只要膨化机的容量足够，减少了制粒所需的能耗就可增加饲料厂总的生产能力；加上还有提高颗粒料质量和改进饲料卫生程度的好处（业已证明这能改善畜禽的健康状况），所以采用膨化技术就可使营养师具有更大的灵活性从而可选用更多种类的原料来进行日粮配合。然而，生长率或养分消化率任何可能的提高都必须抵消为采用膨化技术而增加的加工成本和初始投资才行。

结 论

还需要从若干方面进行更多的研究以求更为充分地了解饲料加工技术对动物性能的影响。除了需要进一步研究日粮搅拌均匀度和颗粒料质量的影响之外，还需要研究一些过去较少研究的领域，比如，两次制粒、优化调质和冷却、挤压膨化和膨化、饲料厂高度自动化对质量控制的影响，等等。这些都是极为重要的因为畜禽饲养者和饲料加工商面对着竞争性日益强烈的经济环境。我们作为农业的一个部门确实处在动态的发展时代，为了加强生存能力，我们就必须考虑采用每一项新的和改进的技术。

（秦崇德 译）

参考文献

- ASAE.1987.**Wafers, pellets, crumbles-definitions and methods for determining density, durability, and moisture content.ASAE Standard S269.3, Agricultural Engineers Yearbook ofStandards. p 318.American Society of Agricultural Engineers, St.Joseph, MI.
- Baird, D.M. 1973.** Influence of pelleting diets swine diets on metabolizable energy, growth, and carcass characteristics. J.Anim. Sci.36:516.
- Baker, R.J., 1960.** Factors that affect the granulation and capacity in grinding corn, oats, and sorghum grain with a hammermill. M.S.Thesis.Kansas State Univ., Manhattan.
- Behnke, K.C.1994b.**Feed manufacturing technology: Its impact on animal performance.p 41. Proc.10th Annual Carolina Swine Nutrition Conference, Carolina Feed Industry Assn., Raleigh, NC.
- Behnke, K.C., 1996.**Effect of hydrothermal processing on growth explored. Feedstuffs, 68 (54) :11.
- Beumer, I.H. 1991.**Quality assurance as a tool to reduce losses in animal feed production. Adv.Feed Technol. 6:6.
- Bohl, A.J. 1959.** Pelleting cost study.p 54.In: Pelleting and Related Subjects.Feed Production School, Kansas City, MO.
- Choi, J.H., B.S.So, K.S.Ryu, and S.L. Kang. 1986.** Effects of pelleted or crumbled diets on the performance and the development of the digestive organs of broilers. Poult.Sci.65: 594.
- Coelho, M., 1994.**Vitamin stability in expanders.Feed Management.45 (8) :10.Deyoe, C.W., P.E.Sanford, and D.H.Waggle. 1967. Feeding expanded corn and grain sorghum in broiler diets. Poutl. Sci. 46:1252 (Abstr.) .
- Duncan, M.S. 1973.** Nutrient variation: Effect on quality control and animal performance. Ph.D. Dissertation.

Kansas State Univ., Manhattan.

Frap, G.S., 1932. Digestibility and production coefficients of pig feeds. Texas Agr. Exp. Sta. Bull. 454.

Hancock, J.D., 1992. Extrusion cooking of dietary ingredients for animal feeding. p 33 Proc. Distillers Feed Conf., Cincinnati, OH.

Hancock, J.D., D.Y.C. Fung, J.A. Swanson, B.J. Healy, R.A. Hart, and T.H. Reddi. 1992. Effect of fermentation products on growth performance of nursery, growing, and finishing pigs fed diets with reduced lysine concentration. J. Anim. Sci. 70 (Suppl.1) :62.

Hancock, J.D., R.H. Hines, B.T. Richert, and T.L. Gugle. 1992 Extruded corn, sorghum, wheat, and barley for finishing pigs. p 130. Kansas Agric. Exp. Sta. Rep. Prog. No. 667. Kansas State Univ., Manhattan.

Hanke, H.E., J.W. Rust, R.J. Meade, and L.E. Hanson. 1972. Influence of source of soybean protein and of pelleting on rate of gain and gain/feed of growing swine. J. Anim. Sci. 25:958.

Harris, D.D., L.F. Tribble, and D.E. Orr, Jr. 1979. The effect of meal versus different size pelleted forms of sorghum-soybean meal diets for finishing swine. Proc. 27th Annual Swine Short Course. p 57. Texas Tech Univ. Lubbock.

Healy, B.J., J.D. Hancock, G.A. Kennedy, P.J. Bramel-Cox, K.C. Behnke, and R.H. Hines. 1994. Optimum particle size of corn and hard and soft endosperm sorghum for nursery pigs. J. Anim. Sci. 72:2227.

Holden, P.J. 1988. Diagnosing feed mixing problems in swine herds. Agri-Practice 9 (4) :3.

Hongtrakul, K., J.R. Bergstrom, R.D. Goodband, K.C. Behnke, I.H. Kim, W.B. Nessmith, M.D. Tokach, and J.L. Nelssen. 1996. The effect of ingredients processing and diet complexity on growth performance of the segregated early-weaned pig. p 43. Kansas Agric. Exp. Sta. Rep. Prog. SRP 772. Kansas State Univ., Manhattan.

Hull, S.J., P.W. Waldruop, and E.L. Stephenson. 1968. Utilization of unextracted soybeans by broiler chicks. II. Influence of pelleting and regrinding on diets with infra-red cooked and extruded soybeans. Poult. Sci. 47:1115.

Hussar, N., and A.R. Robblee. 1962. Effect of pelleting on the utilization of feed by the growing chicken. Poult. Sci. 41:1489.

Johnston, S.L., 1997. Effects of expander processing on performance of nursery and finishing pigs and lactating sows. M.S. Thesis. Kansas State Univ., Manhattan.

Kim, I.H., J.D. Hancock, M.R. Cabrera, R.H. Hines, M.M. Rantanes, and K.C. Behnke. 1995. Particle size (1,000 vs 500 μ m) affects nutritional value of simple and complex diets for weanling pigs and broiler chicks. Kansas Agric. Exp. Sta. Rep. Of Prog. 746:84.

Lavorel, O., J. Fekete, and M. Leuillet. A comparative study concerning the utilization of pellets of different diameters by the weaned piglet. 14th French Swine Research Days. P 36. Institut National de la Recherche Agronomique. Paris.

Lindley, J.A. 1991. Mixing processes for agricultural and food materials: I. Fundamentals of mixing. Agric. Eng. Res. 48:153.

McCormick, F.J., and J.A. Shellenberger. 1960. Test to determine pellet hardness. Feedstuffs. 32 (11) :54.

McCoy, R.A., K.C. Behnke, J.D. Hancock, and R.R. McElhiney. 1994. Effect of mixing uniformity on broiler chick performance. Poult. Sci. 73:443.

McElhiney, R.R. 1988. Mill management feedback. Feed Management 39 (6) :37.

McElhiney, R.R., 1986. The cost of grain processing. Feed Management. 37:30.

McElhiney, R.R., and C. Olentine. 1982. Problems with mixing. Feed International 3 (5) :34.

Moran, E.T. 1989. Effect of pellet quality on the performance of meat birds. Recent Advances in Animal Nutrition, Butterworths, London.

- NRC.1984.**Nutrient Requirements of Poultry. (8th Ed.) . National Academy Press, Washington, DC.
- Peisker, M.1994a.** An expander's affect on wheat bran in piglet rations. Extrusion Communique. 7 (2) :18.
- Peisker, M.1994b.** Influence of expansion on feed components. Feed Mix. 2 (3) :26.
- Peisker, M.1994c.** Annular gap expansion technology and its effect on animal performance. p 53.In: Proc. 10th Annual Carolina Swine Nutr. Conf., Raleigh, NC.
- Peisker, M., 1996.** Expanders in the feed industry and economics of using them. American Feed Industry Assoc. Nutrition Symposium. St. Louis, MO
- Pfost H. B., M. S. Duncan, and R. A. Waller. 1974.** Determining the value of feed uniformity. Feedstuffs 46 (12) :41.
- Proudfoot F.G., and H.W. Hulan. 1982.** Feed texture effects on the performance of turkey broilers. Poult. Sci. 61:408.
- Proudfoot, F.G., and A.E. Sefton. 1978.** Feed texture and light treatment on the performance of chicken broilers. Poult. Sci. 57:408.
- Reece, F.N., B.D. Lott, and J.W. Deaton. 1985.** The effects of feed form, grinding method, energy level, and gender on broiler performance in a moderate (21 (C) environment. Poult. Sci. 64:1834.
- Reimer, L. 1992.** Conditioning. Proc. Northern Crops Institute Feed Mill Management and Feed Manufacturing Technol. Short Course. p 7. California Pellet Mill Co. Crawfordsville, IN.
- Runnels, T.D., G.W. Malone, and S. Klopp. 1976.** The influence of feed texture on broiler performance. Poult. Sci. 55:1958.
- Salmon, R.E. 1985.** Effects of pelleting, added sodium bentonite and fat in a wheat based diet on performance and carcass characteristics of small white turkeys. Anim. Feed Sci. Tech. 12:223.
- Scheideler, S.E. 1991.** Pelleting is important for broilers. Proc. Carolina Poultry Nutr. Conf., Carolina Feed Industry Assn., Sanford, NC.
- Skoch, E.R., S.F. Binder, C.W. Deyoe, G.L. Allee, and K.C. Behnke. 1983.** Effects of pelleting conditions on performance of pigs fed a corn-soybean meal diet. J. Anim. Sci. 57:922.
- Sloan, D.R., T.E. Bowen, and P.W. Waldroup. 1971.** Expansion-extrusion processing of corn, milo, and raw soybeans before and after incorporation in broiler diets. Poult. Sci. 50:257.
- Smith, P.A., J.D. Firman, and N. Dale. 1995.** Effects of feed processed in an annular gap expander on subsequent broiler performance. Poult. Sci., (Suppl. 1) 74:145 (Abstr.) .
- Stark, C.R., 1994.** Pellet quality I. Pellet quality and its effect on swine performance II. Functional characteristics of ingredients in the formulation of quality pellets. Ph.D. Dissertation, Kansas State Univ., Manhattan.
- Stark, C.R., K.C. Behnke, R.D. Goodband, and J.A. Hansen. 1991.** On-farm feed uniformity Survey. p 144. Kansas State Univ. Swine Day Rep., Manhattan.
- Traylor, S.L. 1997.** Effects of feed processing on diet characteristics and animal performance. M.S. Thesis, Kansas State Univ., Manhattan.
- Traylor, S.L., J.D. Hancock, K.C. Behnke, C.R. Stark, and R.H. Hines. 1994.** Mix time affects diet uniformity and growth performance of nursery and finishing pigs. p 171. Kansas State Univ. Swine Day Rep Manhattan.
- Traylor, S.L., K.C. Behnke, J.D. Hancock, P. Sorrell, and R.H. Hines. 1996.** Effects of pellet size on growth performance and nursery pigs. J. Anim . Sci., 74 (Suppl.1) :67.
- Traylor, S.L., S.L. Johnston, K.C. Behnke, J.D. Hancock, P. Sorrell, J.R. Froetschner, F.J. Fairchild, and R.H. Hines.1997.**Diet complexity and conditioning method affect growth performance and nutrient digestibility innursery pigs. J. Anim. Sci., 75 (Suppl. 1.) :72.
- Tribble, L.F., D.D. Harris, and D.E. Orr, Jr. 1979.** Effect of pellet size (diameter) on performance of finishing

swine. p 59. Proc. 27th Annual Swine Short Course, Texas Tech Univ., Lubbock.

Waibel, P.E., S.L. Noll, S. Hoffbeck, Z.M. Vickers, and R.E. Salmon. 1992. Canola meal in diets for market turkeys. *Poult. Sci.* 71:1059.

Walker, W.R., R.O. Myer, J.H. Brendemuhl, and R.M. DeGregorio. 1989. The use of pelleted or meal type prestarter diets for sow or milk replacer rearer pigs. Florida Swine Field Day, Res. Rep. MA-1989-5.

Wicker, D. L., and D. R. Poole. 1991. How is your mixer performing? *Feed Management* 42 (9) :40.

Wilcox, R.A., and J.L. Balding. 1986. Feed manufacturing problems: Incomplete mixing and segregation. Bulletin C-555 (Revised) . Kansas State Univ. Extension Service, Manhattan.

Wondra, K.J., J.D. Hancock, K.C. Behnke, R.H. Hines, and C.R. Stark. 1995a. Effects of particle size and pelleting on growth performance, nutrient digestibility, and stomach morphology in finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 73:757.

Wondra, K.J., J.D. Hancock, K.C. Behnke, R.H. Hines, and C.R. Stark. 1995b. Effects of mill type and particle size uniformity on growth performance, nutrient digestibility, and stomach morphology in finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 73:2564.

Wondra, K.J., J.D. Hancock, G.A. Kennedy, , R.H. Hines, and K.C. Behnke.1995c. Reducing particle size of corn in lactation diets from 1, 200 to 400 microns improves sow and litter performance. *J. Anim. Sci.* 73:427.

Wondra, K.J., J.D. Hancock, G.A. Kennedy, K.C. Behnke, and K.R. Wondra. 1995d. Effects of reducing particle size of corn in lactation diets on energy and nitrogen in second-parity sows. *J. Anim. Sci.* 73:427.

Young, L.R. 1970. Mechanical durability of feed pellets. M.S. Thesis. Kansas State Univ., Manhattan.