

# 制粒作业的蒸汽调制（1）

熊易强

## 前言

关于颗粒饲料的优越性已经充分阐述过了，颗粒饲料使动物（包括肉鸡、猪、牛、蛋鸡等）的生产效能总体提高 5%~10%。颗粒饲料加工成本在美国是 4~15 美元/t 范围不等，因饲料种类、加工设备及生产管理而异，在中国可能略低一些。鱼类饲料，特别是虾饲料，颗粒饲料加工成本更高，但它带来的效益也更高，不论对水产养殖本身和环境保护制粒都成了“必要”手段。在美国为了更好地控制污染、节省劳力，从 20 世纪 80~90 年代的 10 年间，制粒加工的鱼类饲料几乎全被挤压加工的鱼饲料代替。然而在中国，仍然以制粒加工的鱼类饲料为主，鱼类饲料从制粒加工转为挤压加工可能要花长得多的时间；关于虾饲料的制粒与挤压的优劣比较问题，现在难以得出结论，制粒的虾饲料在市场上更为普遍。

尽管燃料价格一直在上涨，但颗粒饲料的市场份额 30 年间在美国仍从 50% 提高到了 80% (Behnke, 1999)，在中国从几乎为零提高到 30% 以上 (Xiong, 2000)，这是因为颗粒饲料的好处超过了燃料价格上涨的影响。

Cheng (2004) 综合评述了颗粒饲料对不同种动物的饲养结果，得出结论是动物生产效能的提高程度与以颗粒持久性 (pellet durability index, PDI) 表示的颗粒饲料质量密切相关，而且高 PDI-低含粉量更有利于饲料搬运。据生产方面的经验，制粒之前的因素如配方、原料、粉碎等，对颗粒饲料质量的影响占 60%。但是，从制粒作业本身来看，影响颗粒饲料质量的主要因素是蒸汽调制 (Behnke, 1999)。根据作者的经验，蒸汽系统调节得好，往往可以显著改善颗粒饲料质量，使产量和能效提高 20% 以上也是很平常的事；并且，由于减少了摩擦，环模的使用寿命可以延长 1~2 倍。本文将从原理和实际应用两方面讨论制粒作业中的蒸汽调制。

## 1 制粒的蒸汽调制机理

谈到蒸汽调制机理，或者说蒸汽调制是如何改善制粒作业的，可能需要一个概念转移。如多数教科书所讲，传统看法都强调淀粉糊化的影响。但是，在传统

或常规作业条件下（调制时间不到 15s，物料温度不超过 80℃，物料水分不超过 16%），据笔者多次进行的现场测定结果，很少能发生可测出的淀粉糊化；另一方面，用高蛋白质浓缩料和粉碎的饲草（如苜蓿）制成的颗粒饲料（用饲草制粒时有时不用蒸汽）几乎不含淀粉。Wilson（1987）表示，如果以提高调制物料的温度和水分来表示提高调制程度，则提高调制程度反倒降低糊化程度（表 1）。减少蒸汽量使得制粒温度（出模时的颗粒温度）提高，这是由于颗粒被推出压模时加大摩擦而产生的热所造成的。

淀粉糊化也随制粒温度提高而加强，但这种方式造成的淀粉糊化大部分发生在颗粒表面（表 1），根本不能改善颗粒饲料的质量，反而更糟。而且，摩擦产生的热量还使维生素、氨基酸等营养成分遭到破坏。在湿润的状态下，高温、长时间滞留的蒸汽调制可使得部分淀粉粒水合、膨胀、丧失双折射现象，也就是所谓糊化显现的经典陈述。这有助于饲料颗粒黏结一起，加强颗粒持久性，同样，小麦面筋或其他功能性蛋白质，在蒸汽调制过程中也会水合，起到“胶”的作用，加强颗粒的持久性。这就是不含淀粉的高蛋白质浓缩料之所以可以制成良好颗粒饲料的缘故。人工颗粒黏合剂如磺酸木质素和某些黏土也可以起这种作用。将饲草（如苜蓿）制粒时，经过软化湿润的饲草碎粒在通过压模时被压在一起，饲草的纤维组分将饲草碎粒联结一起形成颗粒，保持良好的持久性。基于以上讨论，可以对蒸汽调制的作用或机理做出更广泛的描述：蒸汽调制过程中，热交换和水凝结使物料碎粒软化，还可使物料碎粒中的淀粉糊化和/或使面筋之类的功能性蛋白水合，从而使得物料碎粒在通过压模时压紧而黏结一起。正确的蒸汽调制在提高 PDI、减少含粉量的同时，还降低了电耗，提高了产量，延长了压模寿命，并使因磨擦产生过热引起的营养物损失减少到最小程度。

表 1 调制温度对制粒温度升幅和淀粉糊化的影响（Wilson, 1987）

物料温度/℃	水份升幅/%	制粒温度/℃	淀粉糊化/%	
			整粒	颗粒外部
23	0	46	41.9	58.3
43	1.3	33	37.1	-

63	2.1	19	33.5	-
80	3.2	4	28.0	25.9

## 2 蒸汽质量

蒸汽质量对进行成功的蒸汽调制至关重要。广义地说，高质量蒸汽应是在使用时能按正确的量、在正确的温度和压力下获得的蒸汽，其中没有空气，清洁而干燥。

下面讨论在饲料厂蒸汽调制中常见的蒸汽质量问题。

### 2.1 湿蒸汽

湿蒸汽一般指的是混有悬浮水滴的蒸汽。水滴往往来自锅炉（如果未安装有效的蒸汽分离器或没有进一步加热）。蒸汽到达调制器之前，中途也会凝结水滴。水滴使蒸汽的热能减少，因为水不含潜热，而潜热占蒸汽能量的一大部分。假定蒸汽中有 10%（重量）水滴，在 1kg/cm<sup>2</sup> 蒸汽压时总能量就会从 646kcal/kg 降到 593kcal/kg。湿蒸汽含热能较少，还导致物料水分分布不均，使物料容易打滑、堵塞环压模，造成塞机。水滴还会腐蚀管道和蒸汽系统的相应部件。系统中凝结过多水滴会积聚起来被高速流动的蒸汽推动变成所谓的“水锤”，会严重损坏调制系统的阀门和其他部件。出现水锤的信号是有撞击声，蒸汽管道发生颤动。为了防止出现过多水滴，必须令整个蒸汽管线良好隔热；为了将水滴从蒸汽中分离排出，必须沿蒸汽管线安装相应的硬件设施（后详）。

蒸汽质量指标（Steam Quality Index, SQI）是饲料工业用来表示饱和蒸汽干燥程度的用语，其定义是蒸汽混合物中“真蒸汽”或气态 H<sub>2</sub>O 百分率。

饲料工业中说的“湿蒸汽”往往是指含相当多水滴的蒸汽（SQI 不到 90%），这样的蒸汽使蒸汽调制和制粒效果明显恶化。如果，物料温度达不到预期水平，注入的蒸汽稍微多一点制粒机即堵塞，这种情况即表明是湿蒸汽。

### 2.2 过热蒸汽

蒸汽温度高于饱和蒸汽表格中一定蒸汽压力下的蒸汽温度（表 2）时，这样的蒸汽称作过热蒸汽。将锅炉蒸汽经热交换器加热可以产生过热蒸汽。

过热蒸汽有其用途，例如用于发电厂的涡轮发电，利用过热蒸汽的动能使涡轮的转子转动发电。在这样的能量转移过程中，过热蒸汽的温度相应下降，但出

涡轮时仍高于饱和蒸汽。这种情况下如用的是饱和蒸汽，就会发生凝结，水的凝结会产生水锤，水滴会使涡轮内部严重腐蚀；而且能效也远低于过热蒸汽，因为释放的潜热根本不能推动转子，完全是一种浪费。过热蒸汽实际上是不饱和蒸汽，当一种过热蒸汽的温度降到其饱和点或“露点”时，就变成了饱和蒸汽，并可能开始凝结。这就是为什么发电厂必须用过热蒸汽注进涡轮的入口，出涡轮机时蒸汽温度必须略高于饱和蒸汽的缘故。

表 2 简化的蒸汽表（饱和蒸汽）

蒸汽表压力/ (kg/cm <sup>2</sup> )	温度/°C	显热/ (Kcal/kg)	潜热, hfg/ (Kcal/kg)	总热量/ (Kcal/kg)
0.5	112	112	531	643
1	120	120	526	646
2	134	134	517	651
4	151	152	504	656
6	164	166	494	660
8	175	177	485	662

然而，大多数热交换作业，如饲料厂的蒸汽调制，不适合用过热蒸汽。这是因为过热蒸汽需要过多的热交换空间，凝结释放潜热（蒸汽调制中是主要热源）也要更长时间，尽管在同样蒸汽压力下过热蒸汽比饱和蒸汽含有的能量（显热）略多。

当发现蒸汽温度高于所观察的蒸汽压力下的列表蒸汽温度时，这就是过热蒸汽。在饲料厂出现蒸汽压力骤降，而压力下降前蒸汽质量已经很高（SQI=99%）的情况时，可能发现过热蒸汽。另一方面，在蒸汽较湿的情况下，蒸汽压力下降有助于水滴转回成蒸汽。下面事例量化解释以上的讨论。

例：饱和蒸汽在 6kg/cm<sup>2</sup> 蒸汽压力时的蒸汽温度为 164°C，显热是 166kcal/kg（表 2），SQI=99.5%，其潜热和总热量分别是 492kcal/kg（494×0.995）和 658kcal/kg（166+492）（表 2）。当蒸汽压力从 6kg/cm<sup>2</sup> 降到 1kg/cm<sup>2</sup> 时，对于 100%干燥的饱和蒸汽而言，其饱和蒸汽温度、显热、潜热和总热量分别变成

120℃、120kcal/kg、526kcal/kg 和 646kcal/kg; 这多出的 12kcal/kg “总热量” (或比焓) 将使蒸汽温度提高大约 12℃, 实际的蒸汽温度将变成 132℃。过热温度为 12℃ 的过热蒸汽就这样产生了。对于蒸汽调制这样的热交换作业来说, 10℃ 以上的过热温度是不可取的, 会降低作业效果。蒸汽调制中, 相当一部分过热蒸汽会径直通过调制器逸散到空气中; 另一方面, 物料温度和水分达不到预期水平, 因为没有足够的空间和时间让蒸汽凝结实现热交换。纠正这种情况的一个办法是减少压力下降幅度。

### 2.3 蒸汽中的空气

蒸汽系统从一开始就有空气, 即使上次作业过程在系统中充满的是纯蒸汽, 在作业停机时蒸汽会凝结而形成真空, 空气就会被吸入。下次作业一开始, 蒸汽即进入系统, 迫使空气移向系统的排水点或系统的远端。必须在这些部位安装合适的设备 (例如排气孔) 让空气释放。

蒸汽可能因为某种紊流而混入空气。这时, 表压 (蒸汽表压力, 下同) 实则是蒸汽分压与空气分压之和, 因此, 真实或有效的蒸汽压 (蒸汽分压) 低于表压。

$$\text{有效蒸汽压} = [\text{蒸汽份额 (容积)}] \times \text{表压}$$

当发现蒸汽温度低于蒸汽表格所列一定蒸汽压时的温度时, 说明蒸汽中有空气。蒸汽有空气混入不仅降低蒸汽能量, 还会对系统造成其他损害。空气中的氧和二氧化碳可以溶解到凝结水中, 腐蚀系统中的锅炉、管道及其他金属部件。

### 2.4 粉尘或固体颗粒

可能由于生锈或使用硬水时碳酸盐沉积, 管壁会有一层层的铁鳞, 还可能发现其他污垢, 如焊渣及附着很紧的金属等。这些固体污垢会加速系统部件的腐蚀, 必须从蒸汽流中清除, 以保证蒸汽清洁。正确的水处理可以将系统中的碳酸盐积累减少到最小限度。

总之, 理想的蒸汽是 100% 饱和的 “纯” 或 “净” (没有空气和固体物) 蒸汽。过热或不饱和蒸汽对制粒作业的蒸汽调制一般是不适合的。纯而干的饱和蒸汽必须以正确的数量和正确的压力输送到使用位置。

(未完待续)