

通风发酵搅拌技术的研究

朱雪琴

(机械工程系)

摘要 针对通风发酵搅拌过程的特点,分析了涡轮搅拌器的特点及其局限性;引入了先进的、具有高效节能特点的翼型轴流搅拌器,并对其流体动力学的性能进行了研究。

主题词 搅拌;流体力学;通风发酵;流场

中图分类号 TQ920.62

0 前 言

发酵产品成本中,动力费用很大,约占 40%~50%^[1,2],其中压缩空气系统约占 1/3,冷却水占 1/3,搅拌动力约占 1/6,其它占 1/6^[2]。虽然搅拌能量只占 1/6,但其它各种能耗都直接与搅拌效果有关。因此,搅拌在发酵过程中起着十分关键的作用。

多年来,国内主要采用径向流型的涡轮式搅拌器。80 年代以来,国际上发达国家已开始研究轴流搅拌器,并取得了成功。结果表明:在发酵过程的搅拌中,轴流浆的搅拌效果优于涡轮浆。为了推广应用这种先进的搅拌技术,有必要从机理上对其进行研究。本文针对发酵过程的搅拌特点,从流体动力学角度分析采用翼型轴流浆后罐内的流场以及传氧、功耗及剪切性能等,为工业化推广应用奠定了基础。

1 通风发酵搅拌过程的特点

通风发酵中的搅拌涉及气液固三相系统,有气、液传质过程,液、液混合过程,固体悬浮过程和传热过程等,是一个较为复杂的搅拌系统。由于发酵产量常常受到溶氧的限制,而气、液搅拌的均匀程度将直接影响传氧能力,因此,通风发酵中的搅拌可以认为是一个典型的气、液过程搅拌。但发酵过程中由于微生物的参与,因而应考虑微生物对高剪切的敏感性。此外,还应考虑到发酵醪是高粘度的物料。因此,在保证通过搅拌达到气液均匀分散的要求时,应选择剪切力较小的搅拌方式,即低剪切、高流动的搅拌器。

收稿日期:1994-04-12

2 现有搅拌方式及其特点

我国发酵工业中使用的搅拌桨多为径向流式的圆盘涡轮桨(即 Rushton Turbine),差异仅在于叶片的形状,即平叶式、弯叶式和箭叶式^[3],如图1,2,3所示。这种涡轮搅拌器由于圆盘的存在,可以防止气体沿中心轴短路,有利于气体分散,使气、液两相接触,保持发酵罐

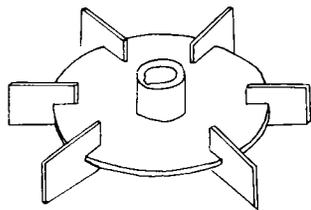


图1 圆盘平直叶涡轮

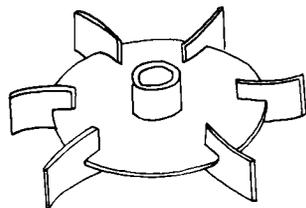


图2 圆盘弯叶涡轮

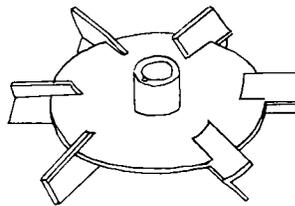


图3 圆盘箭叶涡轮

内必要的氧传递。因此,自40年代中期涡轮桨用于青霉素生产以来一直沿用至今。由于圆盘的存在,使罐内分成了以圆盘为界的上下两个循环区,且受桨叶附近的高剪切作用,促使气体分散,形成富氧区;而远离桨叶的区域,气、液传质受到限制,出现贫氧区,不利于全罐内气、液均匀混合。而且叶轮附近的高剪切可能会对微生物产生伤害作用。

从罐内的流动情况来看,采用这种型式的搅拌桨搅拌时,当转速较低时,只是桨叶附近的液体有局部流动,达不到全罐内气液分散的目的。当转速提高时,桨叶附近的液体会变成湍流,而外围仍为层流状态。即使转速更高,流动变成湍流,这时在搅拌轴附近会形成一个所谓的“圆柱状回转区”。在这个区域内液体没有相对运动,所以混合不好,属于搅拌盲区。因此,为了消除“圆柱状回转区”,常常采用几块纵向挡板来削弱水平环流,在挡板的作用下也可获得较强的轴向流动,即从径向流型桨叶端部排出的液流(径向流)携带周围的液体在槽内挡板的帮助下形成上、下循环流。因此,为了达到较好的气液混合效果,现有的发酵罐中常常是装有挡板的。其流图如图4所示。

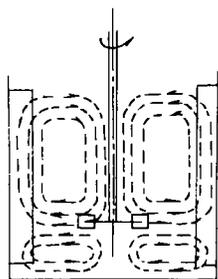


图4 涡轮桨流图

发酵液粘度往往较大,属于高粘稠非牛顿流体。设置挡板后,显著增大了搅拌叶周围液体的剪切作用,不利于微生物的生长,从而影响发酵产量。另一方面,罐内装设挡板后,增加了罐内死角,对罐的灭菌带来不利因素。因此,设置挡板并不是提高发酵效率的好办法。

综上所述,涡轮搅拌器设或不设挡板,对发酵过程都产生不利影响。为了适应发酵过程低剪切、高流动的搅拌要求,出现了新一代的翼型轴流搅拌器。

综上所述,涡轮搅拌器设或不设挡板,对发酵过程都产生不利影响。为了适应发酵过程低剪切、高流动的搅拌要求,出现了新一代的翼型轴流搅拌器。

3 翼型轴流桨的特点及其流体动力学性能

3.1 特点

为了满足低剪切、高流动的搅拌要求,80年代以来,美国等国已开始研究轴流式搅拌器

(Axial Flow Turbines), 且取得了较大进展, 主要有 Prochem Maxflo T 型、LIGHTNIN A315 型以及 Intermig 型等几种轴流浆产品^[4,5]。这种轴向流新型搅拌器叶径比传统的涡轮浆略大, 约为罐内径的 47%~60% (涡轮浆为 20%~50%), 而搅拌功率准数仅为原来 6 叶涡轮浆的 1/6~1/20^[5]。从剪切作用看, LIGHTNIN A315 与涡轮搅拌器 R100 相比, A315 的剪切作用仅为 R100 的 1/4^[4], 大大降低了搅拌对微生物生长的影响, 对于剪切敏感的微生物发酵过程尤为有利。

轴流式叶轮一般产生较大的流动和较低的剪切作用, 具有较大的 Q/H 值 (Q 为排量, H 为剪切率)。径流式叶轮产生较高的剪切作用和较低的流动作用, 即 Q/H 值较小。发酵过程的搅拌特点应满足高流动、低剪切的要求。因此, 选用轴流式搅拌器是改善发酵过程搅拌技术的前提。

翼型轴流搅拌器是基于近代流体力学的理论基础上借助于边界层分离、机翼理论及船用螺旋桨理论等而出现的一种新型轴流搅拌器, 如图 5 所示。它的叶片采用机翼断面, 叶型参数如拱度比、沿直径方向的螺距、弦长、厚度等是变化的, 叶片一般为 4~6 片, 且较宽, 其投影覆盖率近 90%。它不同于传统的推进式叶轮, 推进式叶轮其叶片沿直径方向是等厚度的, 一般只用 3 片桨叶, 且叶片宽度较窄, 投影覆盖率约只有 5%, 因此, 对气体的控制能力差, 容易造成液泛, 因而仅适用于低粘度互溶液体的混合, 不适用于大型通风发酵罐。

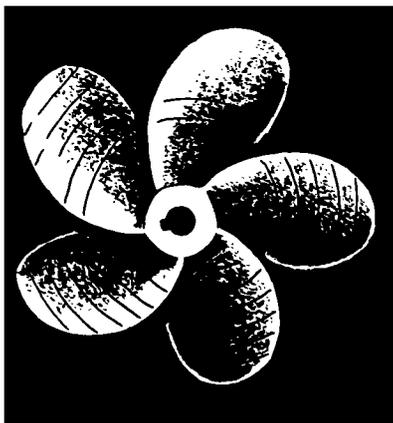


图 5 翼型轴流桨示意图

3.2 流体动力学性能

3.2.1 循环性能及溶氧性能 从罐内流动情况来看, 采用翼型轴流搅拌浆时, 轴向的流动起控制作用, 液体的循环良好。

在轴向有很大的排出流量, 自桨叶排出的高速轴向流对周围的低速流具有吸引挟带的作用, 把来自桨叶的能量传递到搅拌槽内各处, 同时将槽内各处的液体顺次循环到具有强烈搅拌作用的桨叶近旁, 形成很强的上下循环流。其流态如图 6 所示。这种流态属于典型的高流动流型, 适合于发酵过程的搅拌操作。从溶氧情况看, 增加气液接触时间和接触界面, 延长气体的滞留时间等都是提高溶氧的措施, 搅拌的作用也正是如此。即溶氧率是与搅拌器的性能以及搅拌所产生的流场密切相关的。对采用了轴流浆的发酵罐, 当气体从罐底喷嘴喷入时, 首先分散成小气泡, 由于最下层轴流浆的推进作用, 使大量含有空气泡的液体被压回到罐底, 以增加气体与液体的接触时间, 使氧气能充分地溶于液体中。那些未被最下层浆压回到罐底的含气液体在通过上面各层浆时被压回, 形成上下循环流。这种流态由于不断循环, 增加了气液接触时间和接触面积, 延长了气体的滞留时间, 因此比涡轮浆更有利于溶氧。

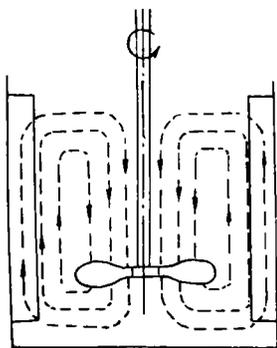


图 6 翼型轴流浆流图

3.2.2 混合性能 从全罐的混合情况来看,由于轴流浆产生的是轴向流动,当螺距设计合理时,可使不同直径处的液体产生相等的轴向运动,因而可保证均匀的流速,在很短的时间内达到均匀的流场,大大提高了全罐的均匀混合性能,有利于增加发酵产量,这是涡轮浆望尘莫及的。

如果采用多层翼型浆,各桨叶产生的流动互相发生干涉,加剧了液体的流动,故将更有利于全罐的混合。但涡轮浆的桨距如果设计不合理则易出现搅拌盲区。

3.2.3 功率消耗 搅拌功率与搅拌桨一定半径上的断面阻力系数成正比。从流体力学的理论分析可知,涡轮直叶浆断面的阻力系数远远大于翼型断面的阻力系数。图7为涡轮直叶浆某半径处的流图,其流动在垂直平板后方发生分离并产生一流动死区。根据阻力系数的定义

$$C_D = \frac{dD}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 \cdot h dr}$$

式中 dD ——微元体上的阻力; ρ ——液体密度; h ——桨高度

V_∞ ——无穷远处的来流速度,在此应等于桨叶的切向线速度,即 $V_\infty = 2\pi nr$

其中 n 为转速, r 为半径。

理论研究表明,此时的阻力系数为

$$C_D = \frac{dD}{\frac{1}{2}\rho(2\pi nr)^2 \cdot h dr} \approx 2.0^{[6]}$$

同样,可根据翼型轴流浆某半径处的剖面流图(见图8)求解其阻力系数。由流体力学机

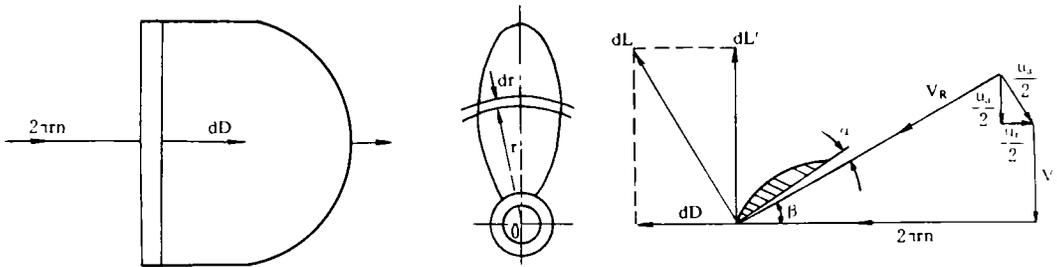


图7 涡轮直叶浆某半径处的流图

图8 翼型轴流浆某半径处的流图

翼理论举力与阻力的基本关系式

$$dD = dL \cdot \sin\beta \tag{1}$$

$$dL = \frac{1}{2}\rho(2\pi nr)^2 \cdot C_L \cdot h dr \tag{2}$$

$$C_L = 2\pi\alpha \tag{3}$$

式中

dD 为微元体上的阻力; dL 为微元体上的举力; C_L 为举力系数; β 为翼型螺距角; α 为翼型攻角。

此时的阻力系数为

$$C_D = \frac{dD}{\frac{1}{2}\rho(2\pi nr)^2 \cdot h dr} \tag{4}$$

3.2.2 混合性能 从全罐的混合情况来看,由于轴流浆产生的是轴向流动,当螺距设计合理时,可使不同直径处的液体产生相等的轴向运动,因而可保证均匀的流速,在很短的时间内达到均匀的流场,大大提高了全罐的均匀混合性能,有利于增加发酵产量,这是涡轮浆望尘莫及的。

如果采用多层翼型浆,各桨叶产生的流动互相发生干涉,加剧了液体的流动,故将更有利于全罐的混合。但涡轮浆的桨距如果设计不合理则易出现搅拌盲区。

3.2.3 功率消耗 搅拌功率与搅拌桨一定半径上的断面阻力系数成正比。从流体力学的理论分析可知,涡轮直叶浆断面的阻力系数远远大于翼型断面的阻力系数。图7为涡轮直叶浆某半径处的流图,其流动在垂直平板后方发生分离并产生一流动死区。根据阻力系数的定义

$$C_D = \frac{dD}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 \cdot h dr}$$

式中 dD ——微元体上的阻力; ρ ——液体密度; h ——桨高度

V_∞ ——无穷远处的来流速度,在此应等于桨叶的切向线速度,即 $V_\infty = 2\pi nr$

其中 n 为转速, r 为半径。

理论研究表明,此时的阻力系数为

$$C_D = \frac{dD}{\frac{1}{2}\rho(2\pi nr)^2 \cdot h dr} \approx 2.0^{[6]}$$

同样,可根据翼型轴流浆某半径处的剖面流图(见图8)求解其阻力系数。由流体力学机

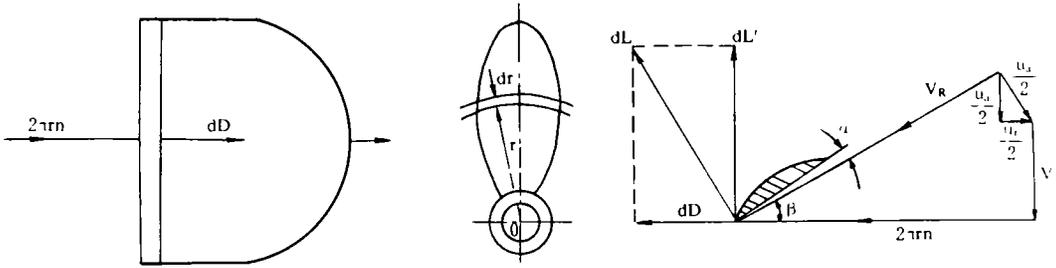


图7 涡轮直叶浆某半径处的流图

图8 翼型轴流浆某半径处的流图

翼理论举力与阻力的基本关系式

$$dD = dL \cdot \sin\beta \quad (1)$$

$$dL = \frac{1}{2}\rho(2\pi nr)^2 \cdot C_L \cdot h dr \quad (2)$$

$$C_L = 2\pi\alpha \quad (3)$$

式中

dD 为微元体上的阻力; dL 为微元体上的举力; C_L 为举力系数; β 为翼型螺距角; α 为翼型攻角。

此时的阻力系数为

$$C_D = \frac{dD}{\frac{1}{2}\rho(2\pi nr)^2 \cdot h dr} \quad (4)$$