

第七章 发酵工业中氧的供需

学时：2

教学内容：

1. 细胞对氧的需求(为什么要供氧? 为什么要控制溶氧?)
2. 发酵过程中氧的传递(如何实现供氧? 如何控制溶氧?)
3. 影响氧传递的因素
4. 摄氧率、溶解氧、 K_{La} 的测定

教学目标：

1. 了解微生物对氧的需求并掌握其中的基本概念
2. 掌握发酵过程中氧的传递方程及其参数的测定
3. 深入理解 K_{La} 的意义, 掌握影响氧传递的因素
4. 了解溶解氧相关参数的测定

教学重点及难点：

1. 发酵过程中氧的传递方程及影响供氧和耗氧的因素
2. K_{La} 的意义

教学准备：

发酵罐英文说明书、电极实物

教学方法：读书指导法、讨论法、实物教学法

板书设计：见文中标识

课程进展流程：

一、细胞对氧的需求

(一)、氧在微生物发酵中的作用(好气)

- 呼吸作用
- 直接参与一些生物合成反应

(二)、可利用氧的特征

- 只有溶解状态的氧才能被微生物利用。

(三)、微生物的耗氧特征

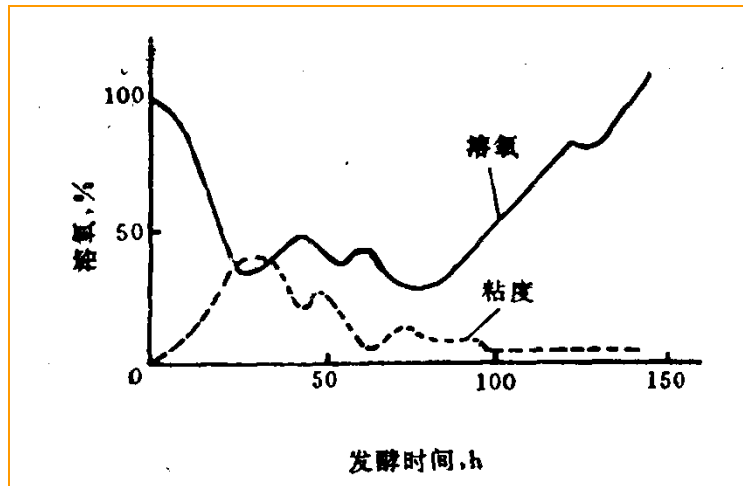
(1) 描述微生物需氧的物理量主要有比耗氧速率(或称为呼吸强度)及摄氧率。

比耗氧速率或呼吸强度(Q_{O_2})(板书): 单位时间内单位重量的细胞所消耗的氧气量, $\text{mmol O}_2 \cdot \text{g 菌}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

摄氧率(r): 单位体积的发酵液单位时间内的耗氧量。 $\text{mmol O}_2 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

$$r = Q_{O_2} \cdot X$$

(2) 培养过程中细胞耗氧的一般规律



(3) 影响微生物耗氧的因素 (板书)

- ◇ 微生物本身遗传特征的影响
- ◇ 培养基的成分和浓度
 - 碳源种类
耗氧速率: 油脂或烃类 > 葡萄糖 > 蔗糖 > 乳糖
 - 培养基浓度
浓度大, $Q_{O_2} \uparrow$; 浓度小, $Q_{O_2} \downarrow$
- ◇ 菌龄的影响: 一般幼龄菌 Q_{O_2} 大, 晚龄菌 Q_{O_2} 小
- ◇ 发酵条件的影响
 - pH 值 → 通过酶活来影响耗氧特征;
 - 温度 → 通过酶活及溶氧来影响耗氧特征: $T \uparrow, DO_2 \downarrow$
- ◇ 代谢类型(发酵类型)的影响
 - 若产物通过 TCA 循环获取, 则 Q_{O_2} 高, 耗氧量大
 - 若产物通过 EMP 途径获取, 则 Q_{O_2} 低, 耗氧量小

(四)、溶解氧控制的意义

氧传递速率已成为许多好气性发酵产量的限制因素

二、发酵过程中氧的传递

(一)、供氧的实现形式

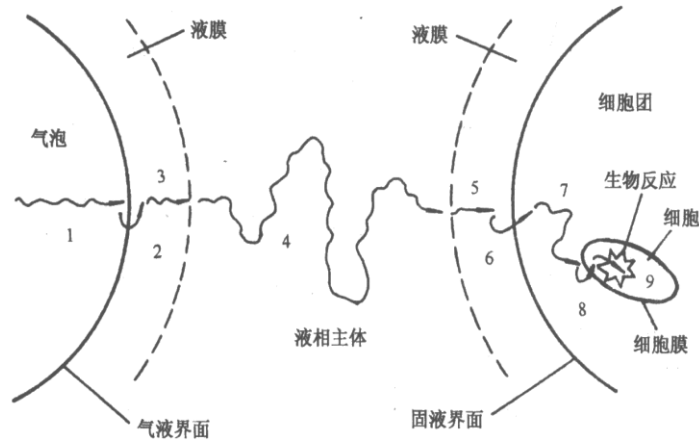


■ 实验室阶段——摇床的转动 (板书)

■ 中试及生产规模——通入无菌空气+搅拌（板书）

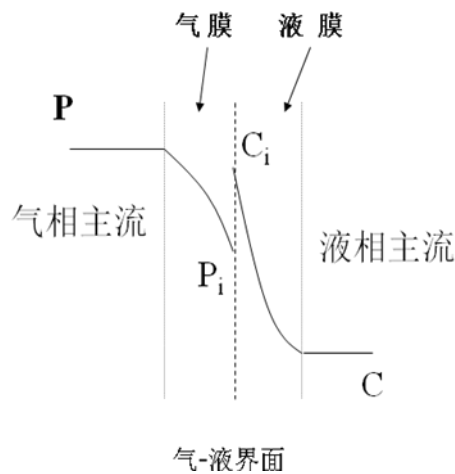
(二)、发酵过程中氧的传递（板书）

1. 氧的传递途径与传质阻力



氧从气泡到细胞的传递过程示意图

2. 气体溶解过程的双膜理论



双膜理论

3. 氧传递方程

- 在气液传质过程中，通常将 K_{La} 作为一项处理，称为体积溶氧系数或体积传质系数。
- 在单位体积培养液中，氧的传质速率（气液传质的基本方程式）为

$$OTR = K_L a (C^* - C_L) = K_G a (P - P^*) = K_L a \cdot \frac{1}{H} (P - P^*)$$

OTR—单位体积培养液中氧的传递速率， $\text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$

$K_L a$ —以浓度差为推动力的体积溶氧系数， $\text{h}^{-1}, \text{s}^{-1}$

$K_G a$ —以分压差为推动力的体积溶氧系数， $\text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{h} \cdot \text{MPa})$

4. 发酵过程耗氧与供氧的动态关系

◇ 细胞呼吸的本征要求: $\gamma = x \cdot Q_{O_2}$

◇ 氧传递特征 (发酵罐传递性能)

- 若需氧量 > 供氧量, 则生产能力受设备限制, 需进一步提高传递能力;
- 若需氧量 < 供氧量, 则生产能力受微生物限制, 需筛选高产菌: 呼吸强, 生长快, 代谢旺盛。
- 供氧与耗氧至少必须平衡, 此时可用下式表示:

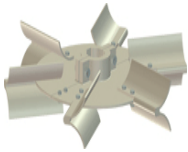
$$OTR = K_L a (C^* - C_L) = Q_{O_2} \cdot x = (Q_{O_2})_m \frac{C_L x}{K_o + C_L}$$

三、影响氧传递的因素 (板书)

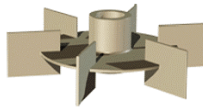
影响氧传递速率的因素 (即影响供氧的因素) 有:

- 影响推动力 $C^* - C_L$ 的因素
温度
溶质
溶剂
氧分压
- $k_L a$ 的影响因素
① 设备参数: 发酵罐的形状, 结构 (几何参数)
搅拌器, 空气分布器 (几何参数)

搅拌器形状



平叶



箭叶



弯叶

- ② 操作条件 通气: 表观线速度 W_s
搅拌: 转速 N , 搅拌功率 P_G
发酵液体积 V , 液柱高度 H_L
- ② 发酵液的性质: 如影响发酵液性质的表面活性剂、离子强度、菌体量

四、摄氧率、溶解氧、 $K_L a$ 的测定 (板书)

(一)、溶解氧 C_L 的测定原理与方法

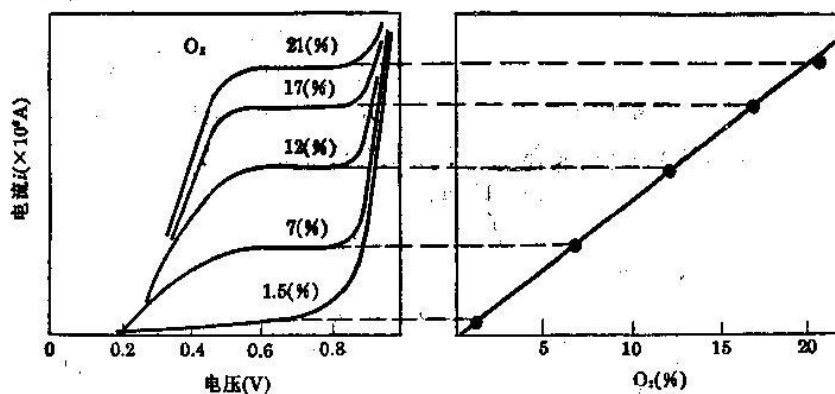
◇ 化学法

原理: 在样品中加入硫酸锰和碱性 KI 溶液, 生成氢氧化锰沉淀, 与溶解氧反应生成锰酸锰, 再在反应液中加入 H_2SO_4 , 释放出游离的碘, 然后用标准 $Na_2S_2O_3$ 液滴定。

- 优点: 测定较准确, 且能得到氧的浓度值。
- 缺点: 当样品中存在氧化还原性物质, 测定结果会有偏差; 当样品带有颜色时, 会影响测定终点的判断, 故不适合测定发酵液的溶解氧浓度。

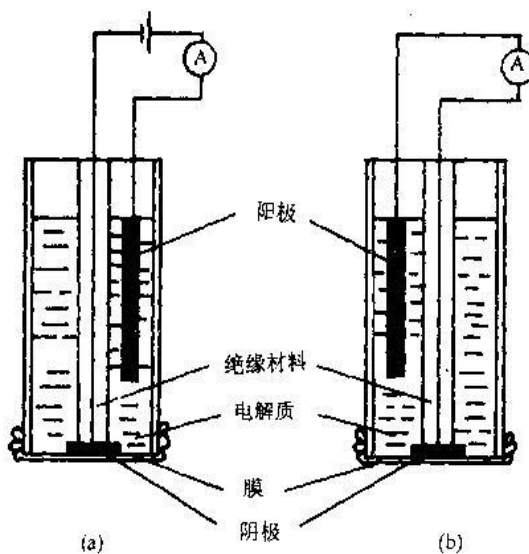
◇ 极谱法

原理：给浸在待测液体中的贵金属阴极和参考电极（阳极）加上直流电压，当电解电压固定在 0.8V 左右时，与阴极接触的液体中的溶解氧发生氧化还原反应而被消耗，



氧浓度与扩散电流的关系

◇ 复膜氧电极法

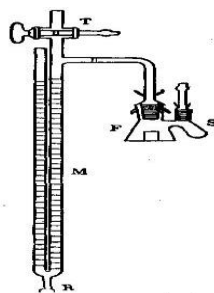


复膜氧电极示意图

(a) 极谱型 (b) 原电池型

(二)、摄氧率 γ 的测定原理与方法

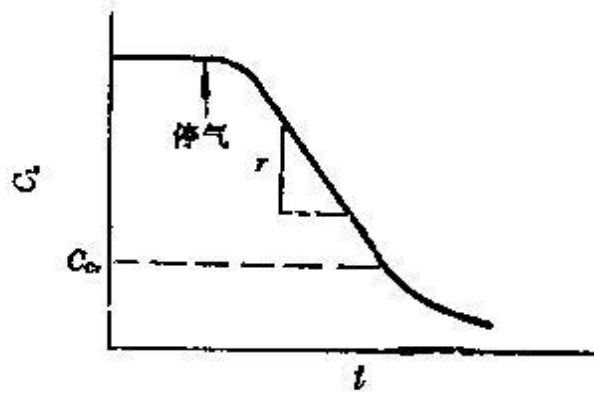
◇ 瓦氏呼吸仪法



通过测压计测定密闭三角瓶的压力变化速率即氧的消耗速率，根据培养液体积计算摄氧率。

✧ 物料衡算法
$$\gamma = Q_{O_2} X = \frac{1}{V_L} \left(\frac{Q_i P_i}{RT_i} - \frac{Q_o P_o}{RT_o} \right)$$

✧ 氧电极法



如果在某一时刻停止向发酵液通气，而维持原来的搅拌转速，则

$$\frac{dC_L}{dt} = -Q_{O_2} X = -\gamma$$

$$(C_L > C_{cr})$$

(三)、 $K_L a$ 的测定原理与方法

- 亚硫酸盐氧化法
- 取样极谱法
- 物料衡算法
- 动态法
- 排气法
- 复膜电极法

五、课上英文口译

溶氧电极（发酵罐英文说明书中的一部分）

通过这部分训练，不仅可以提高学生专业英语水平，而且还训让学生更好地将所学理论知识与实际应用结合起来。增强知识运用的灵活性。

六、课后思考题

1. 影响微生物需氧的因素有哪些？如何调节摇瓶发酵的供氧水平？如何调节通气搅拌发酵罐的供氧水平？
2. 写出发酵液中的体积氧传递方程？指出其中 $K_L a$ 的物理意义。
3. 溶氧电极能够测定液体中溶氧浓度的原理是什么？影响溶氧电极测定的灵敏度和准确性的因素有哪些？