

文章编号: 1009-038X(2000)06-0560-05

生物过程模型化与控制中空气湿度的测量

徐亲民

(河北科技大学生物工程与食品科学学院, 河北石家庄 050018)

摘 要: 在好氧发酵等生物过程中通入的空气, 其水分含量即湿度对氧的传递速率、微生物细胞的呼吸和生长、发酵液体积以及补料稀释率都将产生很大的影响, 并进而影响发酵过程产率. 对发酵过程进行模拟和对不可测变量进行间接计算(即所谓软测量)时, 如果忽视空气的湿度, 计算和模拟结果将产生很大的偏差. 因此, 对好氧发酵过程来说, 必须高度重视空气湿度的测量和控制.

关键词: 空气湿度; 生物过程; 发酵; 模型化; 控制

中图分类号: TP202

文献标识码: A

Measurement of Air Humidity for Modeling and Control of Biological Process

XU Qin-min

(College of Bioengineering and Food Science, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018)

Abstract: The humidity of air ventilated into the aerobic fermentation, a biological process, has significant effects on the oxygen transfer rate, the respiration and growth of microbial cells, the volume of fermentation broth, and the dilute rate of fed batch culture. Also, it influences fermentation yield ultimately. When modeling the biological process, calculating immeasurable variables, and carrying out automatic control for aerobic fermentation, the measurement and control of air humidity must be taken into account since a big deviation will be got if the air humidity is ignored.

Key words: air humidity; biological process; fermentation; modeling; control

好氧发酵过程中大量使用压缩空气, 但空气湿度这一化学工程上频繁使用的术语, 在发酵类生物过程的控制中却往往被忽略. 其实, 它不仅影响化学工程的干燥过程, 也与生物过程的许多方面有着密切的联系. 如发酵液体积、氧的传递、细胞呼吸和生物质的生长, 都与通入压缩空气的湿度有关, 并直接或间接地影响着发酵产率. 作者从理论上推导空气湿度对发酵过程间接测量的变量的影响, 并给出一些计算实例说明空气湿度的测量在发酵过程

模型化和控制中的重要性.

1 空气湿度对空气中氧分压的影响

空气的总压力等于各组成气体的分压之和. 地球海平面处的空气折干后各组成气体的分压比即体积分数以及质量分数见表 1^[1]. 很明显, 如果水蒸汽占据了一定的分压, 其他气体包括氧气的分压就必然下降. 为了给出量的概念, 由不同温度下水的

收稿日期: 2000-01-20; 修订日期: 2000-09-14.

作者简介: 徐亲民(1943-), 男, 江西南丰人, 高级工程师.

饱和蒸汽压数据^[3] 计算出不同温度下空气饱和水蒸汽的分压比列于表 2. 根据表 2 中的数据, 可以按式(1)计算不同温度和不同相对湿度下的氧分压比:

$$n_{o_2} = n_{o_2}^* (1 - \psi n_w^*) \tag{1}$$

式中, n_{o_2} 为湿空气中氧的体积分数(分压比, 摩尔分数); $n_{o_2}^*$ 为干空气中氧的体积分数(分压比, 摩尔分数); ψ 为空气相对湿度; n_w^* 为空气中饱和水蒸汽的体积分数(分压比, 摩尔分数).

表 1 海平面处大气的组成

Tab. 1 Composition of atmosphere at the sea level			
组成	分子式	体积分数/ %	质量分数/ %
氮	N ₂	78. 08	75. 50
氧	O ₂	20. 95	23. 14
氩	Ar	0. 93	1. 30
二氧化碳	CO ₂	0. 03	0. 05
氪	Kr	0. 0001	0. 028
氙	Xe	0. 00001	0. 005
氖	Ne	0. 0018	0. 0086
氦	He	0. 0005	0. 000056

注: 表中数据为折干值.

表 2 不同温度下空气的饱和水蒸汽体积分数和饱和含水量

Tab. 2 Saturated water vapour volume fraction (n_w^*) and saturated water content (H^*) in air at various temperature(t)		
$t/^\circ\text{C}$	$H^*/(\text{kg 水}/\text{kg 干空气})$	$n_w^*/\%$
- 5	0. 0025	0. 40
0	0. 0038	0. 60
5	0. 0054	0. 86
10	0. 0076	1. 21
15	0. 0106	1. 67
20	0. 0145	2. 29
25	0. 0200	3. 13
30	0. 0271	4. 19
35	0. 0365	5. 55
40	0. 0487	7. 28

由表 2 可知, 气温越低, 空气越干燥. 在冬天 0 $^\circ\text{C}$ 气温下, 即使相对湿度达到 100%, 空气中的水蒸汽含量也只有 0. 6%; 而在夏天 40 $^\circ\text{C}$ 高温下, 50% 的相对湿度就可使空气中的水蒸汽含量达到 3. 64%. 实际上, 我国南方夏天的相对湿度常常达到 90%, 也就是说空气中的水蒸汽含量可达 6. 52%. 因此根据式(1)及表 2 的数据计算出在某些气温和相对湿度下的氧分压比(摩尔分数或体积分数), 如表 3 所示.

由表 3 数据可知, 当空气湿度过高的时候, 空

气中氧分压显著下降. 经验告诉我们, 这时候感觉很闷, 也就是呼吸不畅, 可能诱发一些呼吸道疾病. 既然人都感到不舒服, 那么高湿度、低氧分压的通气也必然会对微生物的生长和代谢产生影响.

表 3 不同气温和不同相对湿度下的氧分压比

Tab. 3 Ratio of oxygen partial pressure at various temperature and relative humidity in air

气温/ $^\circ\text{C}$	相对湿度/ %			
	30	50	70	90
0	20. 91	20. 89	20. 86	20. 84
10	20. 87	20. 82	20. 77	20. 72
20	20. 81	20. 71	20. 61	20. 52
30	20. 69	20. 51	20. 34	20. 16
40	20. 49	20. 19	19. 88	19. 58

2 空气湿度对发酵过程氧传递速率的影响

发酵过程氧自气相至液相的传递速率, 可由下式表达:

$$v_{OTR} = k_{La} (C_{o_2}^* - C_{o_2}) \tag{2}$$

式中, v_{OTR} 为氧传递速率 $\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$; k_{La} 为氧传递系数 h^{-1} ; $C_{o_2}^*$ 为与气相氧分压平衡的饱和溶解氧浓度 mol/m^3 ; C_{o_2} 为溶解氧浓度 mol/m^3 .

其中氧传递系数 k_{La} 正比于单位发酵液体积的输入功率和通气线速度, 反比于生物质浓度或发酵液粘度. 同一发酵过程的这些参数, 无论空气湿度的高低, 控制点都是相同的, 因而可以假定氧传递系数 k_{La} 在不同的空气湿度下能够保持不变. 根据亨利定律, 在一定温度下的饱和溶解氧浓度 $C_{o_2}^*$ 与气相氧分压成正比; 当通入的空气湿度升高、氧分压下降时, $C_{o_2}^*$ 也相应下降. 溶解氧浓度是发酵过程中必须控制的一个重要参数, 无论空气湿度的高低, 都应保持一致. 这样, 随着空气湿度的升高, 传质推动力 $(C_{o_2}^* - C_{o_2})$ 下降, 氧传递速率 v_{OTR} 也随之下降. 假设氧传递系数 k_{La} 为 200 h^{-1} , 溶解氧浓度 C_{o_2} 控制为 $0. 1 \text{ mol}/\text{m}^3$, 那么可根据式(2)和表 3 的数据, 计算出几种不同温、湿度下的氧传递速率 v_{OTR} , 见表 4. 可知, 空气的温、湿度分别由 10 $^\circ\text{C}$ 、30% 变化为 30 $^\circ\text{C}$ 、90%, 氧传递速率下降 5. 67%.

氧传递速率的下降, 使发酵过程中可被微生物利用的溶解氧减少, 而为了保持一定的溶解氧浓度(即保持供、需氧的平衡), 就必须降低耗氧速率(即呼吸速率).

表 4 空气湿度对氧传递速率的影响

Tab. 4 Effect of the air humidity on oxygen transfer rate

温度/℃	相对湿度 $\psi/\%$	氧分压比 $n_{O_2}/\%$	饱和溶氧浓度 $C_{O_2}^*/(\text{mol}/\text{m}^3)$	氧传递推动力 $(C_{O_2}^*-C_{O_2})/(\text{mol}/\text{m}^3)$	氧传递速率 $v_{OTR}/(\text{mol}/(\text{m}^3\cdot\text{h}))$
10	30	20.87	0.2516	0.1516	30.32
20	60	20.66	0.2490	0.1490	29.80
30	90	20.16	0.2430	0.1430	28.60

注: 设 $k_{La}=200\text{ h}^{-1}$, $C_{O_2}=0.1\text{ mol}/\text{m}^3$, 发酵平均总压力为 0.2 MPa , 发酵液的亨利常数为 $0.1659\text{ MPa}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$.

3 空气湿度对微生物细胞呼吸的影响

氧消耗率、二氧化碳生成率和呼吸商, 代表微生物细胞在发酵过程中的呼吸活性, 也反映了细胞利用碳(能)源进行能量代谢的状况.

3.1 氧消耗率

以单位时间、单位发酵液体积内细胞消耗的氧量来表示的氧消耗率, 可以根据氧的动态质量平衡进行计算. 在发酵过程中, 氧既连续进入系统, 又连续排出系统. 对补料分批发酵过程来说, 氧的动态平衡可以描述为: 氧在系统内的变化率, 等于氧进入系统的速率减去氧排出系统的速率和氧在系统内消耗的速率. 用数学式表示为:

$$\frac{d(C_{O_2}V)}{dt} = \frac{n_{O_2,i}F_{a,i} - n_{O_2,o}F_{a,o}}{0.0224} - R_{O_2}V \quad (3)$$

式中, C_{O_2} 为发酵液中的溶解氧浓度 mol/m^3 ; V 为发酵液体积 m^3 ; $F_{a,i}$ 为进入发酵液的空气在标准状态下的体积流速 m^3/h , $F_{a,o}$ 为排出发酵液的尾气在标准状态下的体积流量 m^3/h ; $n_{O_2,i}$ 为进入发酵液的空气中氧的体积分数; $n_{O_2,o}$ 为排出发酵液的尾气中氧的体积分数; R_{O_2} 为氧消耗率 $\text{mol}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$.

将式(3)左边展开, 对 R_{O_2} 求解, 得氧消耗率的计算式:

$$R_{O_2} = \frac{n_{O_2,i}F_{a,i} - n_{O_2,o}F_{a,o}}{0.0224V} - \frac{dC_{O_2}}{dt} - \frac{C_{O_2}F}{V} \quad (4)$$

这里必须注意的是, 由于通气—排气过程中发生气体的交换(氧的溶解, 二氧化碳的生成, 发酵液水分的蒸发), 因而尾气的流量绝对不会等于进气的流量. 目前, 各种发酵过程一般只测量进入发酵液的空气体积流速, 而不测量排出发酵液的尾气体积流速. 后者以发酵过程中不发生变化(不溶解, 也不消耗或增加)的空气中的惰性气体(除氧、二氧化碳和水蒸汽以外的所有组成气体, 主要是氮气)为参比气进行估计, 即

$$F_{a,o} = \frac{n_{k,i}}{n_{k,o}}F_{a,i} \quad (5)$$

式中, $n_{k,i}$ 为进入发酵液的空气中惰性气体的体积分数, $n_{k,o}$ 为排出发酵液的尾气中惰性气体的体积分数. 它们可分别由式(6)和式(7)进行计算:

$$n_{k,i} = n_{i,i}^*(1 - n_{w,i}) \quad (6)$$

$$n_{k,o} = 1 - n_{O_2,o} - n_{CO_2,o} - n_{w,o} \quad (7)$$

式中, $n_{i,i}^*$ 为进入发酵液的干空气中惰性气体的体积分数(按表 1 数据可取作 79.02%), $n_{w,i}$ 为进入发酵液的湿空气中水分(水蒸汽)的体积分数, $n_{CO_2,o}$ 为排出发酵液的尾气中二氧化碳的体积分数, $n_{w,o}$ 为排出发酵液的尾气中水分(水蒸汽)的体积分数.

这里, 排出发酵液的尾气可以认为被水饱和, 即 $n_{w,o}$ 等于发酵温度下的空气饱和和水蒸汽体积分数, 见表 2.

因此, 可将式(4)转化为:

$$R_{O_2} = \frac{F_{a,i}}{0.0224V} \left(n_{O_2,i} - \frac{n_{k,i}}{n_{k,o}} n_{O_2,o} \right) - \frac{dC_{O_2}}{dt} - \frac{C_{O_2}F}{V} \quad (8)$$

式(8)右边后两项很小, 可以忽略不计, 于是简化为:

$$R_{O_2} = \frac{F_{a,i}}{0.0224V} \left(n_{O_2,i} - \frac{n_{k,i}}{n_{k,o}} n_{O_2,o} \right) \quad (9)$$

当发酵过程搅拌功率和通气率不变, 即传质阻力也不变时, 为了保持不同湿度下溶解氧浓度的一致, 必须使对应于平均溶解氧浓度的进气氧分压和尾气氧分压的平均值相等. 于是, 可按式(8)计算得两种不同温度和不同空气湿度下的氧消耗率, 结果见表 5.

由表 5 数据可知, 在保持一定溶解氧浓度的前提下, 空气湿度显著影响微生物细胞的呼吸: 当空气的绝对湿含量由 $0.0032\text{ kg 水}/\text{kg 干空气}$ (对应于水蒸汽体积分数 0.005) 上升为 $0.0181\text{ kg 水}/\text{kg 干空气}$ (对应于水蒸汽体积分数 0.0282) 时, 在相同平均溶解氧浓度下的氧消耗率下降 39% . 这还不是极端低湿度(像我国北方的冬天)和极端高湿度(像我国南方的夏天)的差异. 通过这一计算, 就解决了为什么在相同动力消耗即相同搅拌功率和相同通

气率的条件下, 同一生产品种在气候干燥的北方的发酵水平要高于气候潮湿的南方; 而在同一地区的同一厂家, 干燥的冬天的发酵水平要高于潮湿的夏天。

表 5 空气湿度对微生物细胞发酵过程中呼吸活性的影响

Tab. 5 Effect of the air humidity on respiratory activity of microbial cell in biological process

温度/℃	相对湿度	$n_{w,i}$	$n_{w,o}$	$n_{o_2,i}$	$n_{o_2,o}$	$n_{w_2,o}$	$n_{i,i}$	$n_{i,o}$	R_{O_2}	R_{CO_2}	RQ
15	30%	0.0050	0.0313	0.2085	0.1905	0.0125	0.7862	0.7657	34.55	34.38	0.9951
25	90%	0.0282	0.0313	0.2036	0.1952	0.0078	0.7679	0.7657	21.00	20.95	0.9978

注: 假设 1) 发酵温度为 25℃; 2) 比通气率即 $F_{a,i}/V=1.0\text{ L}/(\text{L}\cdot\text{min})$; 3) 尾气二氧化碳体积分数以过程空气作为参比气进行测量, 即进气二氧化碳体积分数为零。

3.2 二氧化碳生成率

在单位时间、单位发酵液体积内细胞释放的二氧化碳量, 就叫做二氧化碳生成率. 它可以由系统内二氧化碳的动态质量平衡进行计算. 这一平衡的描述为: 二氧化碳在系统内的变化率等于二氧化碳在系统内生成的速率加上二氧化碳进入系统的速率减去二氧化碳排出系统的速率. 对补料分批发酵过程来说, 即

$$\frac{d(C_{w_2}V)}{dt}=R_{w_2}V+\frac{n_{co_2,i}F_{a,i}-n_{w_2,o}F_{a,o}}{0.0224}$$

(10)

由此得出二氧化碳生成率的计算式:

$$R_{w_2}=\frac{n_{w_3,o}F_{a,o}-n_{w_2,i}F_{a,i}}{0.0224V}+\frac{d(C_{co_2})}{dt}+\frac{C_{co_2}F}{V}$$

(11)

或

$$R_{w_2}=\frac{F_{a,i}}{0.0224V}\left[\frac{n_{i,i}}{n_{i,o}}\frac{n_{co_2,o}-n_{co_2,i}}{n_{co_2,i}}\right]+\frac{d(C_{w_2})}{dt}+\frac{C_{w_2}F}{V}$$

(12)

式中 C_{w_2} 为发酵液中的溶解二氧化碳浓度 mol/m^3 , $n_{co_2,i}$ 为进入发酵液的空气中二氧化碳的体积分数, $n_{co_2,o}$ 为排出发酵液的尾气中二氧化碳的体积分数, R_{w_2} 为二氧化碳生成率 $\text{mol}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$.

同样, 式 (12) 右边后两项可以忽略不计, 故简化为:

$$R_{w_2}=\frac{F_{a,i}}{0.0224V}\left[\frac{n_{i,i}}{n_{i,o}}\frac{n_{co_2,o}-n_{w_2,i}}{n_{co_2,i}}\right]$$

(13)

在保持呼吸商 $RQ=\frac{R_{w_2}}{R_{O_2}}$ 不变的前提下, 对不同空气湿度下微生物发酵过程的发酵二氧化碳生成率按式 (13) 进行计算, 结果也列于表 5 中, 由这一结果可知, 湿度对二氧化碳生成率和氧消耗率的影响是相同的。

4 空气湿度对发酵液体积的影响

由于大量空气的连续通入与排出, 在气液两相之间必然发生水分的交换. 它不仅影响发酵液体积, 而且造成补料毛稀释率与实际净稀释率之间的差异, 使补料分批发酵过程中十分重要的控制变量衡释率的控制发生偏差. 由气流干燥原理可知, 这种水分的交换速率, 取决于空气流量、空气温湿度和物料温度 (在发酵过程中为发酵液温度). 当排出的空气中绝对湿含量大于通入的空气中的绝对湿含量时, 水分至发酵液中流失 (称为蒸发), 发酵液体积和净稀释率下降; 反之, 则使发酵液中水分增加, 发酵液体积和净稀释率上升^[3].

4.1 水分蒸发率

发酵过程中水分的蒸发率可由以下质量平衡式给出: 蒸发的水分等于由排出空气带出的水分减去由通入空气带入的水分, 即:

$$D_e=\frac{\rho_s(F_{a,o}n_{w,o}-F_{a,i}n_{w,i})}{\rho_wV}$$

(14)

式中, D_e 为发酵过程的水分蒸发率 h^{-1} , ρ_s 为标准状态下水蒸汽的密度 (kg/m^3), ρ_w 为标准状态下水的密度 (kg/m^3).

这里, $\rho_s=18/22.4\approx0.8$, $\rho_w\approx1000$, 于是, 式 (14) 变为:

$$D_e=8\times10^{-4}\frac{(F_{a,o}n_{w,o}-F_{a,i}n_{w,i})}{V}$$

(15)

将式 (5) 代入式 (15) 得

$$D_e=8\times10^{-4}\frac{F_{a,i}}{V}\left[\frac{n_{i,i}n_{w,o}-n_{w,i}}{n_{i,o}}\right]$$

(16)

其中 $n_{i,i}=0.7902\times(1-n_{w,i})$, $n_{i,o}\approx0.7902\times(1-n_{w,o})$. 代入式 (16) 得:

$$D_e=8\times10^{-4}\frac{F_{a,i}}{V}\left[\frac{(1-n_{w,i})n_{w,o}}{1-n_{w,o}}-n_{w,i}\right]$$

(17)

假设发酵温度为 25℃, 计算不同空气温度和湿度下的水分蒸发率, 结果见表 6.

由计算可知, 在 25℃ 的发酵温度下, 当气温为

34℃、空气相对湿度达 60% 以上时,或气温 27℃,空气相对湿度达 90% 以上时,此时不但没有水分的蒸发,而且将对发酵液造成稀释.

表 6 不同湿度的空气对发酵过程通气所造成的水分蒸发率的影响

Tab. 6 Dependency of the water evaporation rate on ventilated air humidity in biological process

空气温度/℃	空气相对湿度/%		
	30	60	90
0	0.00146	0.00137	0.00128
10	0.00137	0.00119	0.00101
20	0.00121	0.00087	0.00053
30	0.00093	0.00031	−0.00032
40	0.00047	−0.00061	−0.00169

注:假定发酵温度为 25℃,发酵尾气为水蒸气所饱和,由此计算得 $n_{w,o}=0.0313$

4.2 稀释率与发酵液体积

在补料分批发酵过程中,由于补料而使发酵液体积不断变化.一般把补料体积速率与发酵液体积之比称为稀释率,即

$$D=\frac{F}{V}$$

(18)

式中 D 为补料稀释率 h^{-1} ; F 为补料体积速率 m^3/h .

当 $D>D_e$ 时,发酵液体积呈增加的趋势; $D=D_e$ 时,发酵液体积不变; $D<D_e$ 时,发酵液体积减少.发酵液体积与稀释率和蒸发率的关系可用下式表达:

$$V=V_0e^{(D-D_e)(t-t_0)}$$

(19)

式中 V_0 为补料前的发酵液体积 m^3 ; t 为发酵

时间 h , t_0 为补料开始时间 h ; e 为自然对数的底.

补料稀释率是补料分批发酵过程一个极其重要的参数,它涉及到发酵液体积和生物质浓度的控制,也与发酵产率和原料转化得率密切相关.但在许多工业生产过程中,人们往往忽略了蒸发率,而当空气湿度发生较大的变化时,控制也相应出现较大的偏差.如在冬天造成发酵液体积偏小,生物质浓度偏高,而夏天发酵液体积偏大,生物质浓度偏低,这也是使冬、夏发酵产率差异较大的一个重要原因.

5 讨 论

由以上计算结果可知,发酵过程中通入的空气的湿度对微生物细胞的耗氧率产生显著影响.这种影响,归根结底是因为湿度的升高降低了氧在空气中的分压,造成微生物可利用的溶解氧浓度的下降以及随之而来的生物质浓度的下降,实际生产过程的监测证明了这一点.然而,在假定溶解氧浓度不变的前提下,由进气氧分压和对应的饱和溶解氧浓度的下降计算得到的耗氧率(等于氧传递速率)的下降,与由溶解氧浓度对应的平均氧分压计算得到的耗氧率的下降,两者之间呈现较大的差异.这一差异,可能与假定氧传递系数不随湿度的变化而改变有关,而实际上通入的空气湿度对氧传递系数也要产生一定的影响.总而言之,空气的湿度对好氧发酵过程的影响是不可忽视的,必须在实际生产特别是过程模型化和控制中予以足够的重视,否则将使模型化和控制的结果与实际过程产生较大的偏差.

参考文献

[1] ISAACS DAINTITH J, MARTIN E. Concise Science Dictionary[M]. Oxford: Oxford University Press 1984. 218
[2] A G 金兹布尔格著. 食品干燥原理与技术基础[M]. 高奎元译, 北京: 中国轻工业出版社, 1986.
[3] 徐亲民. 抗生素发酵过程中发酵液体积的计算[J]. 抗生素, 1983, 8(4): 214.

(责任编辑: 李春丽)