静态螺旋切割装置制备富氧水及工艺优化

程 坤，蒋建忠*，崔政伟，于 鹏
（江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室，江苏 无锡 214122）

摘要：为了满足制备富氧水对低成本、含氧高、稳定性好的要求，采用静态螺旋切割技术，设计了富氧水制备装置。研究了氧气流量、氧气压力、水的流量、水的压力4个关键参数与富氧水含氧量的动态变化关系，并设计正交试验进行工艺优化，对直径DN25静态螺旋切割装置，得到最佳参数组合为氧气流量为0.90 L/min，氧气压力为0.20 MPa，水的流量为0.70 m^3/h，水的压力为0.40 MPa。在常温20 ℃、一个标准大气压下，利用最佳参数组合制备的富氧水含氧量可达45.12 mg/L，较优化前提高了32.40%，保存60 d以后，其溶氧量仍然可以保持在25 mg/L以上。结果表明：本装置制备的富氧水含氧量高、稳定性好，可实现大规模工业生产。

关键词：富氧水；螺旋切割技术；工艺优化；溶氧量；稳定性
中图分类号：TB 47　**文章编号：**1673-1689(2019)07-0147-07　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2019.07.021

Preparation of Oxygen-Enriched Water by a Static Spiral Cutting Rig and its Technology Optimization

CHENG Kun，*JIANG Jianzhong**，*CUI Zhengwei*，*YU Peng*
（Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology，Jiangnan University，Wuxi 214122，China）

Abstract：In order to prepare oxygen-rich drinking water in high oxygen content contained，good stability and low cost，static spiral cutter and the sets of equipment are specially designed to make oxygen bubbles much fine. The best process parameters the four key parameters-oxygen pressure，water flow rate，the pressure of the water，oxygen flow rate are obtained. For preparation of oxygen-enriched water by dividing the level of experimental factors and the orthogonal experimental arranged. By use of the static spiral cutting device for diameter DN25，the optimized parametes combination are as follows：the oxygen flow rate，0.90 L/min；oxygen pressure，0.20 MPa；the water flow rate，0.70 m^3/h；the pressure of the water，0.40 MPa respectively. Further several tests repeated under this combination of these parameters，the value of oxygen contest of the prepared oxygen-enriched water is up to 45.12 mg/L，the proportion increases by 32.40%. Also，the dissolved oxygen can keep in more than 25 mg/L when it is last for 60 days. Therefore，the preparation of oxygen-rich water by current rig or machine will be in high dissolved oxygen content，good stability，

收稿日期：2016-05-26
* **通信作者：**蒋建忠(1972—)，男，博士，副教授，硕士研究生导师，主要从事食品与化工过程强化技术及先进制造技术方面的研究。
E-mail：1400680847@qq.com
引用本文：程坤，蒋建忠，崔政伟，等. 静态螺旋切割装置制备富氧水及工艺优化[J]. 食品与生物技术学报，2019，38(07)：147-153.

and which can used in large-scale industrial production with a broad application prospect.
Keywords: oxygen-enriched water,spiral cutting technology,process optimization,dissolved oxygen,stability

富氧水是指通过专门的设备和工艺,在生产或生活用水中加入氧的成分,使水中的含氧量达到 20 mg/L 以上[1]。在生物发酵、医学、水污染治理等领域,水体溶氧都是一项非常重要的指标[2]。然而在常温常压下,氧气在纯水中的溶解度只有 8 mg/L 左右。

水体增氧的途径可分为曝气增氧[3]和膜法增氧[4]。但曝气增氧存在着增氧效果差,水电能耗大,导致生产成本高的缺点。膜法增氧虽然在工业生产中得到应用[5-6],但富氧膜维护困难,容易堵塞,使用寿命短。

研究发现,水中的微纳米气泡具有很强的滞留性,同时内压较大,在缓慢上升的过程中由于自降压效应,能够爆裂溶解于液体中,较高的溶解能力可为水体提供高含量的溶解氧[7]。作者研制了一种快速生成微纳米气泡制备富氧水的装置,生产过程绿色环保、能耗低、成本远低于使用曝气增氧和富氧膜技术[8-9]。分析不同因素对该装置制备富氧水含氧量的动态影响,并设计多因素正交试验进行工艺优化。

1 材料与方法

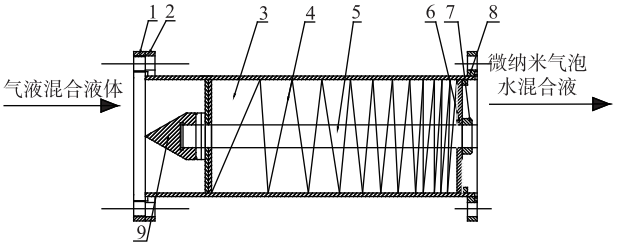
1.1 螺旋切割装置

图 1 为静态螺旋切割器结构简图,主要有外管道和腔芯两部分组成,腔芯由厚度为 0.08 mm 的切割叶片按照螺旋线方程通过轴一片片串起叠加形成,腔芯采用变螺距设计,即由流体入口的大螺距过渡为流体出口的小螺距(见图 2),形成空间螺旋面。螺旋面函数表达式为

$$\begin{cases} X=R\cos\theta \\ Y=R\sin\theta \\ Z=(L\theta)^m \end{cases} \quad (1)$$

式中:X、Y、Z 为空间螺旋面上任意点的坐标值;R 为螺旋切割片半径;θ 为螺旋旋转角度;L 为螺旋面长度;m 为变螺距系数,取值范围 0~1。螺旋表面由于切割叶片的叠加呈阶梯状,由于变螺距螺旋机构的特点,气液混合溶液从导流锥一侧流入,在一定的压力下流经切割器,当流经空间螺旋面时,使得两相流中的氧气泡在流经阶梯状螺旋表面时,在空间 X、Y、Z 3 个方向均受到剪切力,可实现气泡的切割细化,氧气大气泡可切割成微纳米气泡,流场边界即为切割叶片螺旋形成的阶梯状切割刃。

所述的螺旋切割器之所以又称之为静态螺旋切割器,是因为它无需额外的旋转动力装置,为了保证切割效果,试验中管道内的气水混合溶液在一定的压力(≥0.10 MPa)条件下通过螺旋切割腔,因为切割腔体是由离散化切割叶片叠加旋转形成的,表面呈阶梯状, 气液两相流在受到剪切力的同时,在腔体内部也会形成旋流场[10],形成马格纳斯力,同时气液两相流在切割腔内螺旋流动,使得气液两相流能够充分与切割腔表面接触,即可实现气体和水的微纳米量级的切割细化和混合,消耗能量极少。



1、2.连接法兰;3.腔体;4. 空间螺旋切割面;5.轴;6.压块;7.锁紧螺母;8.连接法兰;9.导流锥

图 1 螺旋切割器结构简图

Fig. 1 Sketch map of the spiral cutting device

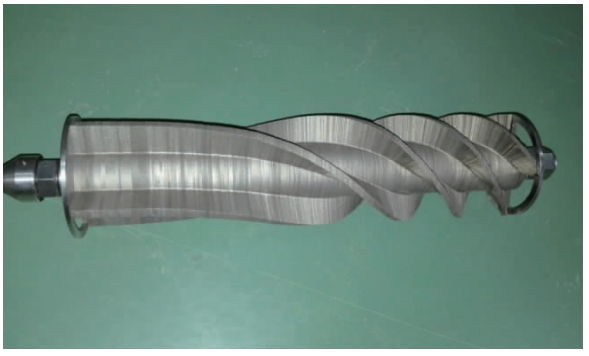
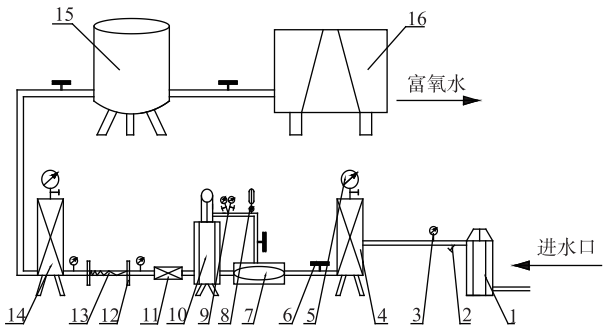


图 2 腔芯

Fig. 2 Cavity core

1.2 工艺设备组成

实验室搭建的富氧水制备装置,见图 3。



1.电动隔膜泵;2.Y 型过滤器;3.液体流量计;4.粗过滤装置;5.液体压力表;6.控制阀;7.轴向加气装置;8.气体流量计;9.双头压力表;10.氧气瓶;11.SJZ 紫外线杀菌器;12.连接法兰;13.静态螺旋切割器;14.超精过滤装置;15.储水罐;16.GZ 系列微电脑液体灌装机

图 3 富氧水制备装置结构简图

Fig. 3 Sketch map of a device in producing oxygen-enriched water

其中,静态螺旋切割器(主要技术参数见表 1):自制;DBY-10 电动隔膜泵:上海开隶泵业有限公司;WFL 不锈钢精密过滤器:无锡市凡宇水处理机械制造有限公司;SJZ 紫外线杀菌器:无锡市凡宇水处理机械制造有限公司;GZ 系列微电脑液体灌装机:温州市申阳电泵制造有限公司;溶解氧分析仪 HI4421(测量精度为 0.01 mg/L):意大利哈纳水质分析仪器(北京)公司。

表 1 静态螺旋切割器主要技术参数

Table 1 Main structural parameters of static spiral cutting device

主要技术参数	指标
外管道尺寸(口径)/mm	DN25
壁厚/mm	2
长度/mm	550
流量/(m^3/h)	0.4~2
螺旋面长度 L/mm	500
变螺距系数 m	0.5

1.3 试验方法与过程

采用图 3 所示富氧水制备装置,试验过程中管路液体压力由 0.1 级的精密压力表读出;管路液体流量由手持式超声流量计 DTFX1020(精度为±1.0%,上海迪纳声科技有限公司)测出;氧气压力由精度为±1.5%FS 的气体压力表测出;氧气流量由精度为 2.5 级的气体流量计测出;富氧水含氧量由 HI4421 溶解氧分析仪测出。

试验以医用氧和地下水(经测定含氧量为 8.69 mg/L)为试验原料,使用搭建的试验装置进行富氧水的制备试验。试验中水的压力变动范围控制在 0.10~0.40 MPa,由液体压力表及控制阀控制。水的流量调节通过控制阀及超声波流量计测定,为保证水量满足试验要求,试验中水的流量变动范围控制在 0.40~0.80 m^3/h。装置中管道布置均为水平管,且管口为大气压,考虑到静态螺旋切割器内部特殊的变螺距结构的特点,为了得出其是否对管道中液体流速产生影响,根据伯努利方程和流体力学公式进行试验验证。

$$P_{进}+\rho g h_{进}+\frac{\rho v_{进}^2}{2}=P_{出}+\rho g h_{出}+\frac{\rho v_{出}^2}{2}=C \quad (2)$$

$$Q_{进}=v_{进}\cdot A \quad (3)$$

$$Q_{出}=v_{出}\cdot A \quad (4)$$

式中:P、ρ、v 分别为流体的压强、密度和线性速度;h 为铅垂高度;g 为重力加速度;C 为常量,Q 为体积流量;v 为平均流速;A 为有效管道截面积(按内径计算)。计算得到 DN25 的管道有效横截面积近似为 0.000 615 m^2,试验中液体压力 P 通过静态螺旋切割器进水端和出水端的液体压力表读出。由于试验中管路是水平布置,所以式(2)中 $h_{进}=h_{出}$。

静态螺旋切割器管径没有变化,A 不变,装置管路都是水平布置,故 h 没有变化,且 $Q_{进}=Q_{出}$,通过分析式(3)和式(4)不难得出,理论上 $v_{进}=v_{出}$。代入式(2),P 与表 2 中数值平均偏差可根据式(5)计算。

$$e=\frac{P_{进}-P_{出}}{P_{进}}\times 100\% \quad (5)$$

计算得出 3 次试验的平均偏差 e=4.733%<5.0%,在试验设计的允许偏差之内,得出实际测量的 P 值与理论情况吻合,即验证了静态螺旋切割器的设计对于管道内液体的流速变化基本没有影响,液体压强损失不超过 5.0%。

表 2 压力表测定值

Table 2 Value of pressure gauge

水压力设定/MPa	$P_{进}$/MPa	$P_{出}$/MPa
0.2	0.2	0.19
0.3	0.3	0.28
0.4	0.4	0.39

该装置可实现气液体微纳米化切割细化。在混合溶液流经切割腔的过程中,可以将氧气泡切割成微纳米量级小气泡,且微纳米气泡具有特殊性质[11]。比如微纳米量级气泡具有良好的渗透性和溶解性,

能够强化气液之间传质过程[12],使氧气能够较好地溶解于水中。

为保证良好的试验效果,在试验过程中分析发现,氧气压力、氧气流量、水的压力、水的流量这 4 种因素对制备富氧水的含氧量影响最大,是主要影响因素,所以在单因素试验过程中选择氧气压力,氧气流量,水的压力,水的流量作为试验研究的变量因素。并且根据本设备的生产能力,为了将能耗降到最低,优化试验对气和水的使用,确定氧气压力的试验范围为 0.15~0.25 MPa,氧气流量的试验范围是 0.6~1.20 L/min,水压的试验范围是 0.1~0.40 MPa,为保证水量满足试验要求,水的流量试验范围定为 0.40~0.80 m^3/h。

2 结果与分析

2.1 单因素试验分析及数据分析

2.1.1 氧气流量 V_0 及压力 P_0 与含氧量的关系 图 4(a)为氧气流量与含氧量的关系图,试验过程中恒定氧气压力为 0.25 MPa,水压为 0.40 MPa,水的流量为 0.80 m^3/h。可以看出富氧水含氧量随氧气流量的增加而增大,当氧气流量达到 0.60 L/min 以上时,由于气水比的不断增加到最大,富氧水中的含氧量随着氧气流量的增大缓慢增加,当氧气流量达到 0.90 L/min 时,在此条件下气液两相流的气液比基本达到峰值,管道内氧气溶解量基本达到上限,水体溶氧趋于饱和水平,富氧水含氧量基本趋于稳定状态。

图 4(b)是根据试验结果绘制的氧气压力与含氧量的关系图,试验过程中恒定氧气流量为 1.00 L/min,水压为 0.40 MPa,水的流量为 0.80 m^3/h。可以看出富氧水含氧量随氧气压力的增大含氧量先缓慢增加,当氧气压力达到 0.10 MPa 以上时,由于氧气快速摄入,富氧水中的含氧量随着氧气压力显著增大,当压力达到 0.25 MPa 以后,由于气压过大容易造成紊流,不利于气液的良好混合,液体溶氧会稍微降低。此后继续增加氧气压力,富氧水的含氧量不再有实质性的影响,含氧量基本保持在一个稳定状态。

2.1.2 水的流量 $V_水$ 及压力 $P_水$ 与含氧量的关系 图 5(a)是根据试验结果绘制水的流量与含氧量的关系,实验过程中恒定氧气流量为 1.00 L/min,氧气压力为 0.25 MPa,水的压力为 0.40 MPa。可以看出,水的流量对于制备的富氧水的含氧量也有着很大的影响,当水的流量达到 0.60 m^3/h 时,富氧水含氧量增速基本趋于平缓,达到 0.70 m^3/h。富氧水含氧量基本趋于饱和,此后随着水的流量的增加含氧量受到通入氧气量的限制,含氧量会降低。

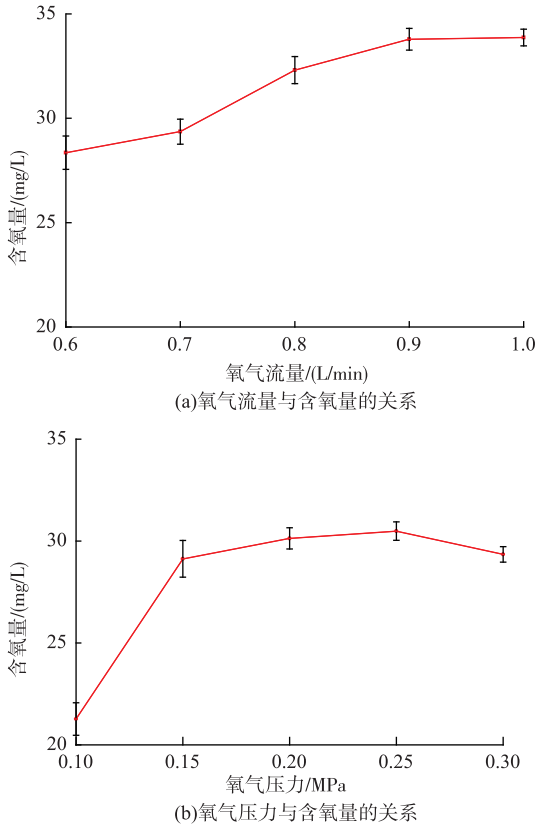


图 4 氧气流量及压力与含氧量的关系

Fig. 4 Relation between oxygen flow rates&pressure and oxygen content

图 5(b)图是根据试验结果绘制的水的压力与含氧量的关系图,实验过程中恒定氧气流量为 1.00 L/min,氧气压力为 0.25 MPa,水的流量为 0.80 m^3/h。可以看出,由于水压对静态螺旋切割装置切割气液混合溶液的效果有着很大的影响,当水的压力小于 0.10 MPa 的时候,气液两相流通过切割器的时候基本上不受到切割力,所以对于富氧水的含氧量影响很小,但是当水的压力达到 0.10 MPa 并持续增大的时候,由于气液两相流受到切割力的作用,富氧水含氧量快速增加,当水的压力达到 0.40 MPa 以上时,在此条件下虽然液体流速快,切割力增大,但是受到氧气通入量的局限,此后富氧水含氧量基本保持稳定状态。

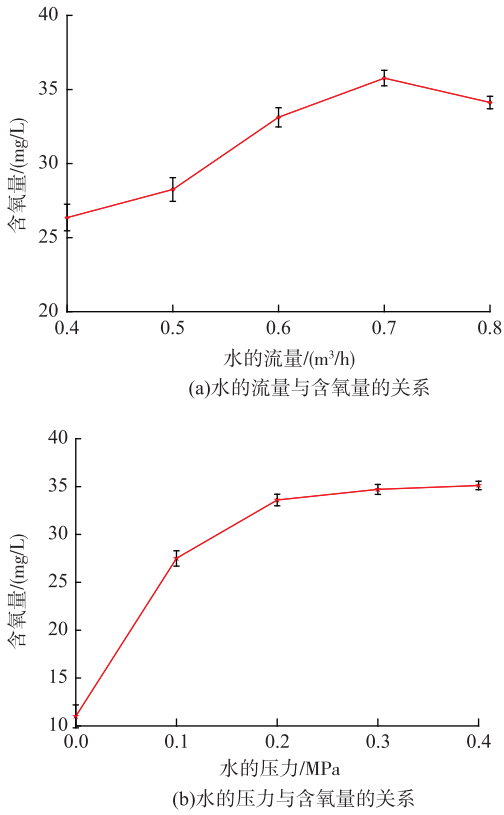


图 5 水的流量及压力与含氧量的关系

Fig. 5 Relation between water flow rates & pressure and oxygen content

2.2 正交试验

根据单因素试验结果,分别以氧气流量 A、氧气压力 B、水的流量 C、水的压力 D 为因素变量,假设各因素之间不存在交互作用。在各因素较好的取值范围内,每个因素取较好的 3 个水平进行三水平正交试验设计。根据因素及水平的划分,采用 4 因素 3 水平的正交试验矩阵,选用正交表 $L_9(3^4)$,并按照表 3 设置的工艺参数进行模拟试验,试验结果见表 3。分析这些参数对于溶氧率的影响规律,从而得出最佳工艺参数组合。

2.2.1 极差分析 通过比较极差(R)的大小可判别出试验因素的影响程度,极差值越大说明该因素对富氧水含氧量影响就越大,根据富氧水含氧量的测试结果以及对极差的分析来看,4 个富氧水制备的工艺参数对富氧率的影响程度的强弱排序依次是:$D>A>C>B$。

为便于从图形上更清晰的看出含氧量随各工艺参数变化的趋势关系,作出其对应的水平趋势,见图 6。$A_2B_2C_2D_3$ 称为全体水平组合中关于含氧量的可能好的水平组合。即选用氧气流量为 0.90 L/min,氧气压力为 0.20 MPa,水的流量为 0.70 m³/h,水的压力为 0.40 MPa。当氧气流量为 0.90 L/min,氧气压力为 0.20 MPa,水的流量为 0.70 m³/h 时,水的压力为 0.40 MPa,通过多次试验,此时制得的富氧水含氧量平均值为 45.12 mg/L,因此,$A_2B_2C_2D_3$ 可以作为使用本装置制备富氧水的最优工艺参数组合。

表 3 试验因素水平划分以及试验方案与结果

Table 3 Experimental factors levels division and experimental scheme and results

试验号	氧气流量 A/(L/min)	氧气压力 B/MPa	水的流量 C/(m³/h)	水的压力 D/MPa	氧气质量浓度/(mg/L)
1	1(0.80)	1(0.15)	2(0.70)	3(0.40)	30.18
2	2(0.90)	1	1(0.60)	1(0.20)	27.15
3	3(1.00)	1	3(0.80)	2(0.30)	43.60
4	1	2(0.20)	1	2	27.62
5	2	2	3	3	40.36
6	3	2	2	1	35.63
7	1	3(0.25)	3	1	35.68
8	2	3	2	2	39.19
9	3	3	1	3	27.30
K_1	93.48	100.93	98.46	82.07	—
K_2	106.70	103.61	110.41	105.00	—
K_3	106.53	102.17	97.84	119.64	—
R	13.22	2.68	12.57	37.57	—

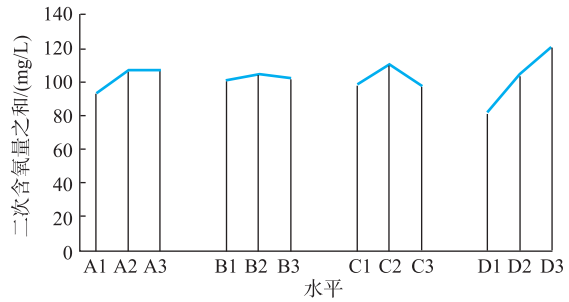


图 6　水平趋势图

Fig. 6　Horizontal trend chart

2.2.2　方差分析　利用 SAS 软件对上表试验进行方差分析,运行程序结果见表 4。由于每个因素自由度为 2，合计模型自由度 8,9-1-8=0 即误差自由度为 0,从而无法产生统计量 F 和相应概率值 P_r,但从平方和分解中可以看出因素效应大小的顺序,便看出因素 B 是不显著的，故可以去除因素 B 后进入 Statistic Factorial ANOVA 重新分析得到表 5。通过 SAS 运行程序结果可以看出 D(水的压力)对含氧量的影响是高度显著的(因为其 $P_r>F$ 值小于 0.01),A(氧气流量)、C(水的流量)对含氧量的影响是显著的(因为其 $P_r>F$ 值介于 0.01 和 0.05 之间),其影响程度从小到大依次为 $DACB$，这与极差分析的结果是一致的。

表 4　SAS 程序运行结果

Table 4　SAS program running results

因变量:Y						因变量:Y					
来源	自由度	平方和	平均平方和	F 统计量	$P_r>F$	来源	自由度	平方和	平均平方和	F 统计量	$P_r>F$
模型	8	315.922 288 9	39.4902861			模型	6	314.888 333 3	52.481 388 9	101.52	0.009 8
随机误差	0	0				随机误差	2	1.033 955 6	0.516 977 8		
总和	8	315.922 288 9				总和	8	315.922 288 9			
来源	自由度	类平方和	平均平方和	F 统计量	$P_r>F$	来源	自由度	类平方和	平均平方和	F 统计量	$P_r>F$
A	2	38.925 755 6	19.462 877 8			A	2	38.925 755 6	19.462 877 8	37.65	0.025 9
B	2	1.033 955 6	0.516 977 8			C	2	34.564 422 2	17.282 211 1	33.43	0.029 0
C	2	34.564 422 2	17.282 211 1			D	2	241.398 155 6	120.699 077 8	233.47	0.004 3
D	2	241.398 155 6	120.699 077 8								

表 5　方差分析表

Table 5　Analysis of variance table

指标	方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	$Pr>F$	显著性
含氧量	A	2	38.925 755 6	19.462 877 8	37.65	0.025 9	*
	C	2	34.564 422 2	17.282 211 1	33.43	0.029 0	*
	D	2	241.398 155 6	120.399 077 8	233.47	0.004 3	**

2.2.3　稳定性分析　按照最佳的参数组合,通过实验制备富氧水，用容量为 550 mL 的矿泉水瓶灌装 72 瓶,并用保鲜膜封装,在常温常压下保存作为样品。按照试验安排,从第 1 天开始,每天随机从保存的样品中取出 3 瓶,进行含氧量检测,然后取平均值作为检测结果。持续 15 d 之后,考虑到测量结果衰减变化的稳定性，此后同样的方法每隔 5 d 测量一次。通过 60 d 的测定,对富氧水的含氧量随时间变化的情况,数值统计见表 6。可以发现,富氧水含氧量会随着时间推移缓慢降低。当保存 60 d 以后,氧气含量依然保持在 25 mg/L 以上，仍然满足富氧水对于含氧量达到 20 mg/L 以上的要求。

表 6 含氧量衰减时间统计

Table 6 Statistical table on attenuation time of oxygen content

时间/d	含氧量/(mg/L)	时间/d	含氧量/(mg/L)
1	45.12±0.56	13	38.41±0.13
2	44.77±0.13	14	38.20±0.11
3	44.38±0.23	15	37.41±0.13
4	44.13±0.17	20	35.12±0.09
5	43.58±0.20	25	33.96±0.03
6	42.91±0.26	30	32.86±0.05
7	42.57±0.19	35	30.73±0.03
8	42.15±0.24	40	29.56±0.11
9	41.66±0.12	45	28.47±0.13
10	40.30±0.09	50	27.43±0.08
11	39.20±0.24	55	26.41±0.15
12	38.60±0.14	60	25.39±0.13

3 结 语

1)根据单因素试验分析研究发现,氧气流量、氧气压力、水的流量、水的压力各自对溶氧量的影响趋势基本一致,先逐渐增大,后趋于平缓。设计正交试验,通过极差分析发现其主要工艺参数对制备富氧水含氧量影响强弱排序依次是:水的压力>氧气流量>水的流量>氧气压力。对正交试验数据通过SAS软件进行方差分析,发现其影响因素强弱的结果和极差分析结果相吻合。

2)通过试验得到制备高含氧量富氧水的最优工艺参数组合为 $A_2B_2C_2D_3$。即选用氧气流量为0.9 L/min,氧气压力为0.2 MPa,水的流量为0.7 m^3/h,水的压力为0.4 MPa,利用最佳参数组合制备的富氧水含氧量可达45.12 mg/L,较优化前调高了32.40%。同时,本研究成果也为微纳米气泡的应用研究提供一定的基础。

参考文献:

[1] WEN Wu. Oxygen-enriched water[J]. **Pollution Control Technology**,2005,28(4):58.(in Chinese)

[2] ZHANG Zhi,TENG Tingting,WANG Miao,et al. Effects of dissolved oxygen on industrial fermentation[J]. **China Brewing**,2008,23(12):4-6.(in Chinese)

[3] CHENG Xiangju,XIE Jun,YU Deguang,et al. Calculated analysis of oxygen transfer from air bubble-water interface and turbulent water surface in microporous aeration systems[J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**,2013,29(13):190-199.(in Chinese)

[4] 李骏. 亲水型中空纤维膜式无泡充氧传递过程及其机理研究[D]. 杭州:浙江大学,2011.

[5] WANG Baoguo,YUAN Naiju. The present state and its future of membrane-based oxygen enrichment technology[J]. **Industry and Engineering Progress**,1995(2):19-23.(in Chinese)

[6] ZHOU J X,CORDIER M,MOUNAIM-ROUSSELLE C,FOUCHER F. Experimental estimate of the laminar burning velocity of iso-octane in oxygen-enriched and CO_2-diluted air[J]. **Combustion and Flame**,2011,158(12):2375-2383.

[7] LI Hengzhen,HU Liming,XIN Hongbo. Application of micro-nano bubble technology in remediation of polluted groundwater[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**,2015,37(S2):115-120.(in Chinese)

[8] YIN Zhaoxue,BI Xiaoyu,WU Jinhua,et al. Preparation of oxygenized water and its stability and toxicity on mice blood[J]. **Journal of Capital Medical University**,2007,28(6):756-759.(in Chinese)

[9] DENG Chao,YANG Li,CHEN Haijun,et al. Progresses in research and application of micro-nano bubble generating device[J]. **Petrochemical Technology**,2014,43(10):1206-1213.(in Chinese)

[10] CAO Zhongwen,YUAN Huixin. Study on relative motion characteristics of two phases in cyclone reactor[J]. **Mining Machinery**,2012,40(12):74-77.(in Chinese)