

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.02.008

基于螺旋切割装置的富氧水制备及其工艺优化

于 鹏, 蒋建忠, 程 坤

(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:为了实现制备富氧水对低能耗、高含氧、易操作的要求,采用静态螺旋切割细分子化技术自主开发设计了富氧水制备装置。通过实验研究了富氧水装置的氧气流量、氧气压力、水的流量和水的压力等4个关键参数对富氧水氧气的质量浓度的影响,并基于响应曲面法对其生产性能进行优化。试验结果表明,所测试的富氧水制备装置,其最优生产工艺参数组合为:氧气流量0.9 L/min,氧气压力0.25 MPa,水的流量0.6 m³/h,水的压力0.4 MPa。试验证明,优化后制备的富氧水氧气的质量浓度可高达47.12 mg/L,较优化前氧气的质量浓度提高了26.5%,富氧水制备装置的生产性能得到了较大改善。

关 键 词:富氧水;溶解氧;静态螺旋切割细分子化技术;响应曲面法;氧气流量

中图分类号:TH112.6 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2018)02-0041-07

Preparation of Oxygen-Enriched Water by Spiral Cutter and Its Process Optimization

YU Peng, JIANG Jianzhong, CHENG Kun

(Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: In order to prepare oxygen-enriched water with low energy consumption, high oxygen content and easy operation, a static spiral cutter and a set of equipment for oxygen-enriched water preparation were designed. Four key parameters—the oxygen flow rate, oxygen pressure, the pressure of the water and the water flow rate of the preparation equipment, which affect the oxygen concentration of oxygen-enriched water was studied experimentally. The production performance was optimized based on the response surface methodology. The experimental results show that the optimal production process parameters are composed of 0.9 L/min of the oxygen flow, 0.25 MPa of the oxygen pressure, 0.6 m³/h of the water flow and 0.4 MPa of the water pressure. It is proved that the oxygen content of the prepared oxygen-enriched water can reach up to 47.12 mg/L under optimal condition, which is increased by 26.5 % before optimization. The production performance of oxygen-enriched water preparation device has been greatly improved.

Keywords: oxygen-enriched water; DO (dissolved oxygen); static spiral cut fine molecular technology; response surface methodology; oxygen flow rate

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,使水中的氧气的质量浓度达到20 mg/L以上^[1]。随着科技的进步,通过在水中溶入氧气来获取高氧气的质量浓度的富氧水,可广泛应用于污水处理,水产养殖,生物发酵及医疗保健等各个领域。

溶解氧(dissolved oxygen, DO)是指溶解在水中呈分子状态的氧。在一般条件下,氧气很难溶于水,在常

温常压下,空气中的氧气在纯水中的溶解度只有8 mg/L左右。然而在酿酒、生物发酵、水污染治理及医学等领域,水体溶解氧气的质量浓度都是一项重要的指标^[2]。目前水体增氧的方法主要有曝气增氧^[3]和微纳米小气泡增氧^[4]。曝气增氧法主要有高压溶氧法、电解法^[5-6]及增氧锥法^[7]。微纳米气泡增氧方法主要有富氧膜法^[8],应用比较广泛,受到国内外研究工作者的普遍重视。国外对于富氧膜法提高水体溶氧

收稿日期:2017-09-04;修回日期:2017-11-07

第一作者简介:于鹏(1993),男,江苏泰州人,硕士,主要研究方向为食品机械设计。E-mail:1147404761@qq.com

的研究,主要集中在对膜材料和膜种类等研究,技术已经相对成熟,已能在工业生产中普及应用^[9-10]。对比曝气增氧技术,膜法富氧技术具有清洁环保,充氧面积大,制得富氧水氧气的质量浓度高等优点,因此近些年膜法富氧技术在中国得到迅速发展,并且在工业领域也得到了初步应用^[11]。但是这种技术本身存在很多缺陷,例如富氧膜维护困难,容易堵塞且使用寿命短等。

目前应用较多的是制造微纳米气泡来提高液体溶解氧气的质量浓度。其原理是基于微纳米气泡具有很强的滞留性,同时内压较大,其较高的溶解能力可为水体提供高含量的溶解氧^[12]。微纳米量级的气泡可以强化气液传质,所以氧气的微纳米气泡对于提高水体溶氧有着相当显著的影响。在水中微纳米级气泡的溶解率可以超过 85%,并可使其溶氧量达到饱和度以上,并且未破裂溶解的微纳米氧气泡可以长时间存留在液体中,在缓慢上升的过程中会产生自增压爆裂溶解效应,随着溶解氧的流失而不断地向液体中补充活性氧^[13]。

依据微纳米气泡能够强化气液传质的特性,采用微纳米细分子化技术,课题组设计出一款制备富氧水的装置,可以以较低的能耗,快速产生微纳米气泡。在密闭的管道内,通过一定的压力(≥ 0.10 MPa),使气液两相流通过静态螺旋切割装置,气液两相流通过切割腔产生螺旋切割实现将氧气泡切割细化到微纳米量级气泡,从而促进气液传质,增加水体溶氧量。此方法绿色环保,能耗低,生产成本远低于曝气增氧技术和富氧膜技术^[14-15]。在研究制备富氧水的方法与工艺优化的过程中,以氧气流量、氧气压力、水的流量及水的压力为变量因素,分析不同变量对制备富氧水氧气的质量浓度的影响。课题组利用 Box-Behnken 设计法来进行富氧水制备相关的试验,富氧水制备装置的生产性能则基于响应曲面法来进行优化。与其他数据统计方法相比,响应曲面法对自变量之间的交互作用进行了考虑,不但提高了拟合精度,而且运用图形技术显示出二者间的函数关系,使得结果更加直观。从而为富氧水制备的最优化设计提供了新的方法。

1 材料与方法

1.1 材料

医用氧和地下水(经测定水中氧气的质量浓度为 8.69 mg/L)。

1.2 主要仪器设备

1.2.1 螺旋切割装置

螺旋切割装置^[16]又称为静态螺旋切割装置,无需

额外的旋转动力装置,切割腔采用变螺距设计,即由流体入口的大螺距过渡为流体出口的小螺距,芯腔是由切割叶片螺旋叠加形成,流场边界为切割叶片螺旋形成的阶梯状切割刃。切割叶片和腔芯如图 1~2 所示。



图 1 切割叶片

Figure 1 Cutting blade

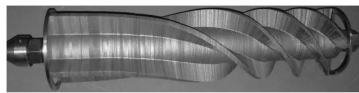


图 2 腔芯

Figure 2 Cavity core

螺旋切割装置内部腔芯由厚度为 0.08 mm 切割叶片按照螺旋线方程通过轴一片片串起叠加形成空间螺旋面,螺旋表面呈阶梯状。由于切割叶片形状类似十字型,因此又将整个腔体分成 4 个小的切割空间。

图 3 所示为静态螺旋切割装置,主要由外管道和芯腔两部分组成。在管道内,气液两相流在一定的压力作用下便有了流速,从导流锥一侧流入。当流经空间螺旋曲面时,两相流中的气泡便受到阶梯状表面的剪切力,由于是螺旋切割腔,混合在液体中的气泡在向前流动的过程中,受到一定的流动场和离心力的作用。气泡和水混合液受到阶梯状切割刃的剪切力,可实现气泡切割细化,氧气大气泡可切割成微纳米气泡。



图 3 螺旋切割装置

Figure 3 Spiral cutting device

由于变螺距螺旋切割装置的特点以及静态切割的原理,为了保证试验效果,试验中管道内的液体需在压力 $\geq 0.1\text{ MPa}$ 的条件下通过螺旋切割腔,使其具备一定的流速。切割腔体是由离散化切割叶片螺旋叠加而成的,表面呈阶梯状,气液两相流在一定流速下经过切割腔体时,表面会受到强力剪切,同时在切割腔里也会形成旋流场^[17],形成马格纳斯力,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。

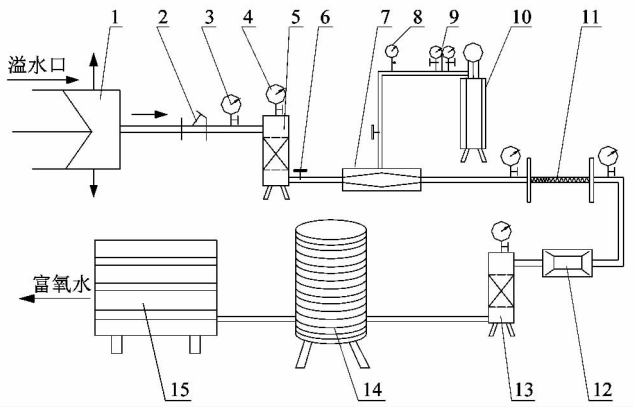
1.2.2 富氧水制备装置

图4所示为课题组自行设计的富氧水制备装置,装置结构图如图5所示。由其工作机理可知,存在很多影响富氧水氧气质量浓度的因素,主要包括氧气流量 A 、氧气压力 B 、水的流量 C 及水的压力 D 。由于装置中含有多种零部件,影响因素和氧气的质量浓度之间存在复杂的非线性映射关系,并且对于通过分析富氧水制备机理进行建模分析有一定的难度,因此,课题组利用响应曲面法通过进行试验来研究4个关键参数对制备富氧水氧气的质量浓度的影响。



图4 富氧水制备装置

Figure 4 Device for oxygen-enriched water production



1—电动隔膜泵;2—Y型过滤器;3—液体流量计;4—液体压力表;5—粗过滤装置;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—静态螺旋切割装置;12—SJZ紫外线杀菌器;13—超精过滤装置;14—储水罐 15—GZ系列微电脑液体灌装

图5 富氧水制备装置结构简图

Figure 5 Sketch map of oxygen-enriched water production device

装置中:静态螺旋切割装置(外径36 mm,壁厚3 mm,长度400 mm,流量 $\geq 0.3\text{ m}^3/\text{h}$),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;疏水性聚四氟乙烯膜烧结滤芯,苏州市明瑞精工器材有限公司;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,温州市申阳电泵制造有限公司;氧气瓶,无锡市中医院。

1.3 实验方法

1.3.1 影响因素的测定

在富氧水制备装置试验中,通过0.1级的精密压力表读出管路液体压力,由超声流量计 DTFX1020 测出管路液体流量,由精度为 $\pm 1.5\%$ FS 的气体压力表测出氧气压力,由精度为2.5级的气体流量计测出氧气流量,富氧水氧气的质量浓度是通过溶解氧分析仪 HI4421 测出的。在每组参数中,均采用多次取样取平均值的方法测量得到所制备的富氧水氧气的质量浓度,从而减少试验所带来的误差。

1.3.2 单因素实验

根据实验参数,进行单因素实验,考察各因素与氧气的质量浓度的关系。

1.3.3 Box-Benhknen 中心组合实验设计

通过对装置的工作机理及试验条件的分析,选择 A, B, C, D 共4个因素,考察试验参数对富氧水氧气的质量浓度的影响,分析单因素试验结果。同时先对每

个参数选出 3 个水平,采用 Box-Benhknen 设计法,其中

$$T_i = (X_i - X_0) / \Delta X_i.$$

式中: T_i 为自变量 X_i 的编码值; X_0 为自变量 X_i 在中心点的值; ΔX_i 为自变量变化步长^[18]。

选择评价指标即响应值为氧气质量浓度, Design Expert(Version8.0.6)作为试验设计辅助软件,各个因素及水平编码如表 1~2 所示。

表 1 Box-Benhknen 设计试验因素水平

Table 1 Box-Benhknen experimental factors levels

水平	氧气流量 A/ (L · min ⁻¹)	氧气压力 B/ MPa	水流量 C/ (m ³ · h ⁻¹)	水压力 D/ MPa
1	0.9	0.20	0.5	0.2
2	1.2	0.25	0.6	0.3
3	1.5	0.30	0.7	0.4

表 2 Box-Benhknen 设计试验因素编码

Table 2 Box-Benhknen experimental factors encoding

水平	编码			
	氧气流量 T_1	氧气压力 T_2	水流量 T_3	水压力 T_4
1	-1	-1	-1	-1
2	0	0	0	0
3	1	1	1	1

由表 1~2 可知: $T_1 = (X_1 - 1.2) / 0.5$; $T_2 = (X_2 - 0.25) / 0.5$; $T_3 = (X_3 - 0.6) / 0.5$; $T_4 = (X_4 - 0.3) / 0.5$ 。

1.3.4 数据处理与分析

采用 Origin8.0 进行制图,并利用 Design-Expert 软件进行方差分析,当 $P < 0.05$ 时,表明差异显著,当 $P < 0.01$ 时,表明差异极显著。

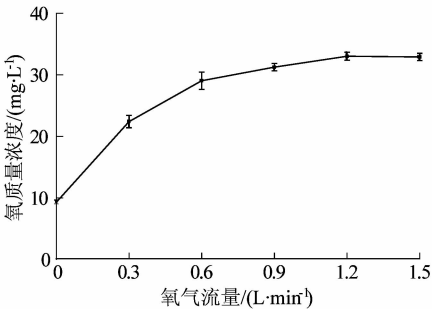
2 结果与分析

2.1 单因素实验

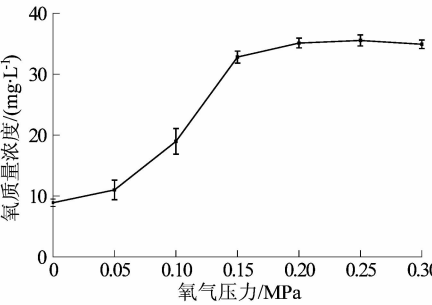
2.1.1 氧气压力及流量与氧气质量浓度的关系

图 6(a)所示为氧气压力为 0.25 MPa,水压为 0.40 MPa,水的流量为 0.70 m³/h 时,氧气流量与氧气质量浓度的关系图。由图可以看出,伴随着氧气流量的增大,水中氧气的质量浓度先明显增加;当氧气流量达到 0.60 L/min 以上时,因为气液比逐渐增大,水中的氧气的质量浓度随着氧气流量的增大而缓慢增加;当氧气流量达到 0.80 L/min 时,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最大,水体溶氧也趋于饱和水平,此时水的氧气的质量浓度基本趋于稳定。

图 6(b)所示为氧气流量为 1.00 L/min,水压为 0.40 MPa,水的流量为 0.70 m³/h 时,氧气压力与氧气的质量浓度的关系图。由图可以看出,随氧气压力的增大,试验水中氧气的质量浓度先缓慢增加,当氧气压力达到 0.10 MPa 以上时,由于氧气压力的增大,富氧水中的氧气的质量浓度显著增大;当压力达到 0.20 MPa 以后,气液比基本达到最大,液体溶氧趋于饱和,此后继续增加氧气压力,对富氧水的氧气的质量浓度不再有实质性的影响,氧气的质量浓度基本保持稳定状态。



(a) 氧气流量与氧气的质量浓度的关系



(b) 氧气压力与氧气的质量浓度的关系

图 6 氧气流量及压力与氧气的质量浓度的关系

Figure 6 Relationship between oxygen flow rates & pressure and oxygen content

2.1.2 水的流量及压力与氧气的质量浓度的关系

图 7(a)所示为氧气流量为 1.00 L/min,氧气压力为 0.25 MPa,水的压力为 0.40 MPa 时,流量与氧气的质量浓度的关系图。从图中可以看出,当水的流量达到 0.60 m³/h 时,富氧水氧气的质量浓度增长速度基本趋于平缓,此时富氧水氧气的质量浓度基本趋于饱和,此后随着水的流量的增加氧气的质量浓度基本处于稳定不变。

图 7(b)所示为氧气流量为 1.00 L/min,氧气压力为 0.25 MPa,水的流量为 0.70 m³/h 时,水的压力

与氧气的质量浓度的关系图。由图可以看出,当水的压力小于 0.10 MPa 的时候,由于气液两相流通过切割装置时,气液混合液基本上不受切割力作用,所以对于水中氧气的质量浓度变化较小;但是当水的压力达到 0.10 MPa 并持续增大的时候,气液两相流受到切割力的作用,富氧水氧气的质量浓度快速增加,但当水的压力达到 0.25 MPa 以上时,虽然液体流速快,切割力增大,但是又因为氧气通入量的局限,水中氧气的质量浓度基本保持稳定状态。

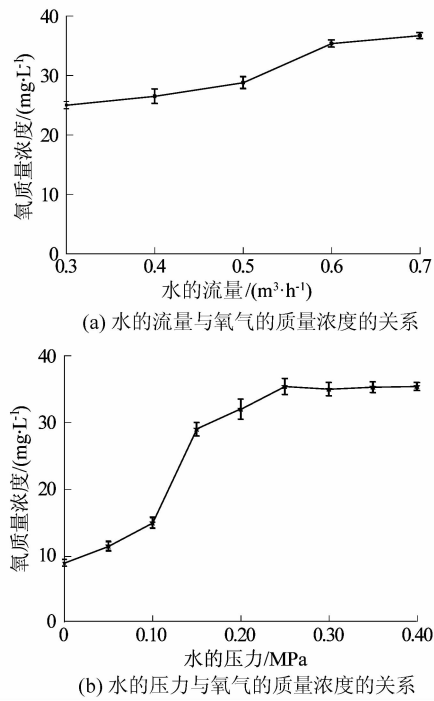


图7 水的流量及压力与氧气的质量浓度的关系

Figure 7 Relation between water flow rates & pressure and oxygen content

2.2 BBD 实验结果与数据分析

2.2.1 BBD 实验设计方案与结果

按照 Box-Benhnken 试验设计的统计学要求,进行 27 组试验,试验设计和结果如表 3 所示。

2.2.2 回归方程拟合及方差分析

运用 Design Expert 软件对 27 个试验点的响应值进行回归分析,得到回归模型方差分析如表 4 所示,对各因素回归拟合后,得到回归方程:

$$K = 37.32 + 3.08A + 1.11B + 3.79C + 5.68D + 0.14A \times B - 0.97A \times C + 1.07A \times D + 0.93B \times C - 0.56B \times D - 0.52C \times D + 0.73A^2 + 0.089B^2 - 0.59C^2 - 0.33D^2。$$

表3 中心组合试验方案与结果
Table 3 Central combination experimental plan and results

组别	编码				响应值
	T_1	T_2	T_3	T_4	氧气的质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
1	-1	1	0	0	38.56
2	-1	0	0	-1	30.52
3	0	0	-1	1	41.53
4	0	0	0	0	39.61
5	0	-1	0	1	43.42
6	1	0	-1	0	35.54
7	1	0	0	1	45.63
8	0	0	0	0	35.13
9	0	-1	1	0	36.65
10	-1	0	0	1	36.21
11	-1	0	-1	0	27.13
12	0	1	0	-1	31.15
13	0	1	-1	0	33.69
14	0	-1	0	-1	29.17
15	0	1	0	1	43.15
16	0	1	1	0	40.63
17	1	-1	0	0	39.64
18	0	0	0	0	37.23
19	1	1	0	0	43.61
20	1	0	0	-1	35.65
21	0	-1	-1	0	33.42
22	0	0	-1	-1	27.36
23	0	0	1	-1	34.53
24	0	0	1	1	45.61
25	1	0	1	0	45.14
26	-1	0	1	0	40.62
27	-1	-1	0	0	35.15

表4 回归模型方差分析
Table 4 Regression model variance analysis

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	711.10	14	50.79	8.13	0.004
失拟项	64.92	10	6.92	1.29	0.513
误差项	10.05	2	5.02		
总和	786.07	26			

由于 $P < 0.05$, 显著性为显著, $P < 0.01$ 显著性为极显著。由方差分析结果可知, 模型方程具有极显著性 ($P < 0.01$)。方程决定系数 $R^2 = 0.9576$, 而且各因子系数均有意义, 拟合程度 $> 90\%$, 证明模型是合适有效的, 具有一定的实践指导意义。

2.2.3 响应面分析与优化

响应面法是一种当存在多种因素影响实验条件时

进行的寻优方法,可以通过固定数量的实验次数并能够连续的分析实验因素,并且得到3D曲面图,以便于更直观地评价各因素间的相互作用^[19-20]。氧气的质量浓度是反映富氧水制备装置性能优越的重要指标,

制备的富氧水氧气的质量浓度越高,说明装置性能越好,生产性能也就越好。通过富氧水氧气的质量浓度的回归方程得到的响应面图如图8所示,由动态图可对试验因素与氧气的质量浓度的交互作用进行评价。

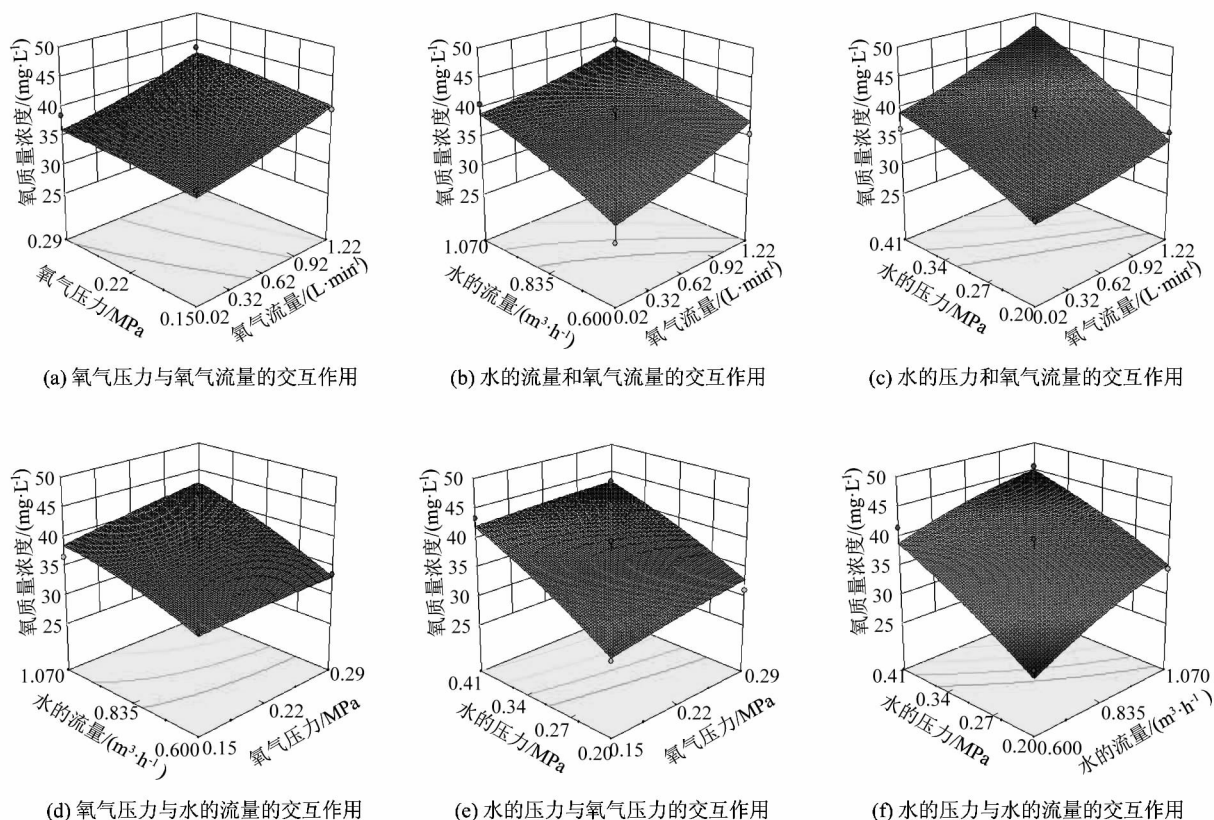


图8 响应面试验结果

Figure 8 Response surface experimental results

由图8(a)可以看出,氧气压力的曲面较平缓,氧气流量的曲面较陡,说明氧气流量对所制备富氧水氧气的质量浓度的影响比氧气压力的影响显著;图中等高线沿氧气流量轴向较氧气压力轴向密集,也说明氧气流量对响应值峰值的影响比氧气压力大。等高线为椭圆说明两因素交互作用强,所以对氧气的质量浓度的影响显著。

由图8(b)可以看出,氧气流量的曲面相对于水的流量较陡,说明氧气流量对于富氧水氧气的质量浓度的影响比水的流量显著。图中等高线沿氧气流量轴向较水的流量轴向密集,说明氧气流量对氧气的质量浓度的影响大。等高线为近似圆形,说明两因素的交互作用较弱。

由图8(c)可以看出,氧气流量的曲面相对于水的压力较平缓,说明水的压力对于富氧水氧气的质量浓度的影响比氧气流量显著。图中等高线沿水的压力轴

向较氧气流量轴向密集,说明水的压力对响应值峰值的影响比氧气流量大。等高线为椭圆形,说明两因素的交互作用较强,所以对氧气的质量浓度影响显著。

由图8(d)可以看出,氧气压力的曲面较平缓,水的流量的曲面较陡,说明水的流量对所制备富氧水氧气的质量浓度的影响比氧气压力的影响显著;图中等高线沿水的流量轴向较氧气压力轴向密集,也说明水的流量对响应值峰值的影响比氧气压力大。

由图8(e)可以看出,氧气压力的曲面较平缓,水的压力的曲面较陡,说明水的压力对所制备富氧水氧气的质量浓度的影响比氧气压力的影响显著;图中等高线沿水的压力轴向较氧气压力轴向密集,也说明水的压力对响应值峰值的影响比氧气压力大。

由图8(f)可以看出,水的流量的曲面较平缓,水的压力的曲面较陡,说明水的压力对所制备富氧水氧气的质量浓度的影响比水的流量的影响显著;图中等

高线沿水的压力轴向较水的流量轴向密集,也说明水的压力对响应值峰值的影响比水的流量大。等高线为椭圆说明两因素交互作用强,所以对氧气的质量浓度的影响比较显著。

利用 Design Expert 软件,对模型方程解逆矩阵,得出富氧水氧气的质量浓度最优生产工艺参数组合为氧气流量 0.9 L/min、氧气压力 0.25 MPa、水的流量 0.6 m³/h、水的压力 0.4 MPa。基于此优化后的参数,再做 3 次平行试验,实际测定的平均值为 47.12 mg/L,通过已求得富氧水氧气的质量浓度预测模型计算出氧气的质量浓度理论预测值为 45.10 mg/L。则相对误差

$$e = \frac{\text{实际值} - \text{预测值}}{\text{实际值}} \times 100\%。$$

可以计算出 3 次平行试验的相对误差平均值 $e = 4.286\,92\% < 10\%$,在误差允许范围之内,即上述最优回归方程(预测模型)是比较可靠的,验证了本优化方法的实用性和可行性。

3 结论

1) 根据回归方程以及响应曲面图及其等高线图对各因素进行分析可知,氧气流量 A 、氧气压力 B 、水的流量 C 及水的压力 D 对氧气的质量浓度的曲面效应皆显著,线性效应中影响氧气的质量浓度的强弱排序: $D > A > C > B$ 。

2) 采用响应曲面法研究了富氧水制备过程中氧气流量、氧气压力、水的流量、水的压力 4 个关键参数对所制备富氧水氧气的质量浓度影响的最佳水平,装置的最优工艺参数组合为氧气流量 0.9 L/min、氧气压力 0.25 MPa、水的流量 0.6 m³/h、水的压力 0.4 MPa,较优化前氧气的质量浓度提高了 26.5%,装置的生产性能得到了改善。

综上所述,虽然课题组设计的装置可以经济有效地制备出高氧气的质量浓度而且稳定的富氧水,但是否还有其他更加经济有效的方法仍需进一步探索。

参考文献:

- [1] 文武. 富氧水[J]. 污染防治技术,2005,28(4):58.
- [2] 张智,滕婷婷,王森,等. 工业发酵中溶氧因素的探讨[J]. 中国酿造,2008,23(12):5.
- [3] 程香菊,谢骏,余德光,等. 曝气增氧微气泡-水界面和水体表面的

氧传质的计算分析[J]. 农业工程学报,2013,29(13):190.

- [4] 杨丽,廖传华,朱跃钊,等. 微纳米气泡特性及在环境污染控制中的应用[J]. 化工进展,2012,31(6):1336.
- [5] Panasonic Electric Works Co Ltd. Oxygen-enriched water generating apparatus:JP2010144501[P]. 2015-01-12.
- [6] NITTOKU K K. Oxygen-enriched water preparation method and oxygen-enriched water preparing apparatus: JP2007244938 [P]. 2009-04-09.
- [7] 房燕. 工厂化水产养殖纯氧增氧锥优化设计与性能测试[D]. 上海:上海海洋大学,2013:14.
- [8] 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,2011:47.
- [9] 王保国,袁乃驹. 膜法富氧技术的现状与未来[J]. 化工进展,1995(2):19.
- [10] ZHOU Jianxi, CORDIER M, MOUNAIM - ROUSSELLE C, et al. Experimental estimate of the laminar burning velocity of iso-octane in oxygen-enriched and CO₂-diluted air[J]. Combustion and flame, 2011,158(12):2378.
- [11] 苏德胜,储明来,丁建林,等. 国内膜法富氧技术应用研究新进展[J]. 膜科学与技术,1999,19(1):16.
- [12] 马骏,杨昆,李江,等. 微纳米气泡技术特性及工业废水处理中的应用[C]//2011'第二届中国高难度工业污水处理及污泥处置技术研讨会,北京:中国环境保护产业协会,2011:78.
- [13] 邓超,杨丽,陈海军,等. 微纳米气泡发生装置及其应用的研究进展[J]. 石油化工,2014,43(10):1206.
- [14] 殷召雪,毕晓郁,吴金华,等. 富氧水的制备、稳定性及其对小鼠血液毒性的影响[J]. 首都医科大学学报,2007,28(6):756.
- [15] 陈颖,吕经烈,李雪梅,等. 膜法液体充气过程的应用研究[C]//中国蓝星(集团)总公司. 第二届中国膜科学与技术报告会论文集. 北京:中国蓝星(集团)总公司,2005:4.
- [16] 蒋建忠,杨传芳,程坤. 基于气液微纳米化切割细化的高氧水制备系统:201510970713.5[P]. 2016-03-02.
- [17] 曹仲文,袁惠新. 旋流反应器中两相相对运动特性研究[J]. 矿山机械,2012,40(12):76.
- [18] 刘春景,唐敦兵,郑加强,等. 滴灌梯形迷宫滴头流道水力性能的响应曲面法优化[J]. 农业工程学报,2011,27(2):47.
- [19] LIU C L, LIN T H, JUANG R S. Optimization of recombinant hexaoligochitin-producing chitinase production with response surface methodology[J]. International journal of biological macromolecules, 2013,62(10):518-522.
- [20] GHORBEL-BELLAAJ O,HAJJI S,YOUNES I,et al. Optimization of chitin extraction from shrimp waste with *Bacillus pumilus* A 1 using response surface methodology[J]. International journal of biological macromolecules,2013,61(2):243-250.