

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2022.02.017

基于理想气体状态方程和道尔顿分压定律的气调包装气体混配系统

Gas mixing system of modified atmosphere packaging based on ideal gas law and Dalton's law of partial pressure

张浩楠¹ 康宁波² 何建国^{2,3} 刘贵珊²

ZHANG Han-nan¹ KANG Ning-bo² HE Jian-guo^{2,3} LIU Gui-shan²

陈首涛¹ 孙有瑞² 陈亚鹏²

CHEN Shou-tao¹ SUN You-rui² CHEN Ya-peng²

(1. 宁夏大学物理与电子电气工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏大学食品与葡萄酒学院, 宁夏 银川 750021; 3. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021)

(1. College of Physical and Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2. College of Food and Wine, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 3. College of Civil and Water Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

摘要:目的:解决多元气体混配系统设备稳定性差、成本高和出气流量小的问题。方法:提出基于理想气体方程和道尔顿分压定律的三元气体混配系统,并通过设计的算法不断计算误差以及调整参数,且结构上采用气缸、传感器等的连接。结果:根据相对偏差进行调整混配后,CO₂和O₂的气体浓度平均相对偏差分别为0.86%和0.75%,气体浓度精度满足<1%的技术要求,可较好地实现三元气体高精度的气体混配。结论:该系统可实现三元气体快速、无极调节,以及高精度连续化混配。

关键词:气调包装;气体混配;理想气体方程;道尔顿分压定律

Abstract: Objective: In order to solve the problem of poor stability, high cost and small gas flow of ternary gas mixing equipment. **Methods:** A ternary gas mixing system based on the ideal gas law and Dalton's law of partial pressure was proposed, and the system calculated errors and adjusted parameters by the designed algorithm, and adopted the connection of cylinder, sensor and so on. **Results:** After adjusting the mixing according to the relative

deviation, the average relative deviation of the gas concentration of CO₂ and O₂ was 0.86% and 0.75% respectively, and the gas concentration accuracy met the technical requirements of <1%, and the high-precision gas mixing of the ternary gas can be better achieved. **Conclusion:** The system can realize rapid and stepless regulation of ternary gas, and high-precision continuous mixing.

Keywords: modified atmosphere packaging; gas mixing; ideal gas law; Dalton's law of partial pressure

气调包装技术又称 MAP、CAP、置换气体包装、充气包装,通常是根据不同食品的保鲜特性,将一定比例的O₂、CO₂、N₂混合气体充入具有气体阻隔性能的包装材料的包装容器,减缓食品在贮藏期间的物理、化学、生物变化,从而延长食品保鲜期与货架期^[1-3]。

通常情况下,气体混配系统是将保鲜气体(O₂、CO₂、N₂)按一定的比例进行混配,除了应用于食品保鲜,还可以应用于焊接、表面处理、医药等领域^[4-7]。刘晓波等^[8]设计了一套三元气体自动配气装置,在控制配比误差的同时可以使气体混合均匀。李麒等^[9]设计了一种基于S7-200系列PLC的气调保鲜智能比例混配仪,通过质量流量法控制各保鲜气体的配给,以调制出相应比例的混合保鲜气体。袁士豪等^[10]发明了一种通过将测量用电子天平分别放置于平衡气原料钢瓶和组分气充装钢瓶来实现高精度、低不确定度二元标准气体的混配装置。Malkova等^[11]发明了一种动态混合气体装置,用于制备

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划重大专项(编号:2018BCF01001);宁夏回族自治区青年科技人才托举工程项目第四批

作者简介:张浩楠,女,宁夏大学在读硕士研究生。

通信作者:康宁波(1984—),男,宁夏大学高级实验师,博士。

E-mail: 109438847@qq.com

收稿日期:2021-05-28

含有轻微浓度的某些腐蚀性气体(氮氧化物、二氧化硫、硫化氢、氯和微量氧气浓度)的特定成分的气体混合物。Dominicus 等^[12]利用三维 CFD 模型优化了合成气发动机机瓦氏管气体混合器,实现了压力损失小且混合质量好。Lepeshinsky 等^[13]设计了一种新型气体动态封闭式

混合器,该气体混合器凝结相的质量浓度高,使用效果良好。

目前,常见的气体混配系统的混配方法可分为压力法、质量流量法、体积法、节流法与时间法,各方法的混配原理、混配条件、所形成的混配特点见表 1。

表 1 各种气体混配系统混配方法对比^[14-15]

Table 1 Comparison of the mixing methods of various gas mixing systems

混配方法	混配原理	混配条件	混配比	混配特点
压力法	道尔顿分压定理 $PV=nRT$	将混合气体的各组分气体视作理想气体, T 一定, 控制气体分压力	$\frac{P_{1,2,3,\dots}}{P} = \frac{n_{1,2,3,\dots}}{n} = N_{1,2,3,\dots}$	混配结果较准确
质量流量法	$q_m = \rho v A$ $q_m = \rho q_v$	p, T 一定	$n_1 : n_2 : n_3 = q_{m_1} : q_{m_2} : q_{m_3}$	混配结果较准确, 但采用电子器件多, 有一定的误差
体积法	$PV=nRT$	将混合气体的各组分气体视作理想气体, T, V 一定, 电磁阀控制 P_1, P_2, P_3	$n_1 : n_2 : n_3 = P_1 : P_2 : P_3$	混配结果准确, 工作可靠性高, 调压更容易实现
节流法	$PV=nRT$ $V=Qt$	T 一定, $P_1 = P_2 = P_3$ $t_1 = t_2 = t_3$	$n_1 : n_2 : n_3 = Q_1 : Q_2 : Q_3$	结构较简单, 但混合精度不高
时间法	$PV=nRT$ $V=Qt$	T 一定, $P_1 = P_2 = P_3$ $t_1 = t_2 = t_3$	$n_1 : n_2 : n_3 = t_1 : t_2 : t_3$	装置最简单, 但混配准确度较差

气体混配系统应实现对保鲜气体的精准混配控制、稳定性高以及成本相对低廉^[16-18]。目前常用的气体混配系统虽能实现高精度的配置混合气体, 但主要存在成本高、体积大不方便携带同时占用的场地大、内部结构复杂、易造成气源浪费等问题。理想气体状态方程可对处于平衡态时的理想气体的压强、体积、温度间的关系进行描述, 而道尔顿分压定律则概括了气体混合物的总压强等于其中各气体分压之和, 两者结合可以充分对气体状态进行描述以及进行一些应用性的推导。研究拟提出一种基于理想气体状态方程和道尔顿分压定律的气体混配仪设计方案, 通过设计的算法不断计算误差以及调整参数, 以期提高混配精度及稳定性; 结构上采用气缸、传感器等成本较低部件的简单连接, 旨在实现三元气体的快速、无极调节, 以及高精度连续化混配, 为高精度多元气体混配系统的设计提供依据。

1 总体设计方案

1.1 技术要求

气体混配仪适用于食品气调包装内的气体混配, 该混配仪的气源包括 CO_2, O_2, N_2 , 气体混配精度要求优于 $\pm 1\%$, 进气压力要求 $0.45 \sim 0.60$ MPa。

1.2 系统结构和工作原理

根据技术要求设计基于理想气体状态方程和道尔顿分压定律的三元气体混配设备, 在基于调压法进行气体混配的基础上, 利用设计的算法实现了更精准的气体压

力调节。该系统的主要结构包括氧气气罐、氮气气罐、二氧化碳、减压阀 YQB-370、电气比例阀 ITV2030-312L、电磁阀 4V210-08、单向阀 C-AKH08-00、PLC 控制器 S7-200、混合气罐、气调包装机, 其整体结构示意图见图 1。

道尔顿分压定律, 即

$$\frac{PV}{T} = \frac{P_1 V_1}{T_1} + \frac{P_2 V_2}{T_2} + \frac{P_3 V_3}{T_3} + \dots + \frac{P_n V_n}{T_n} \quad (1)$$

在任何容器内的气体混合物中, 如果各组分之间不发生化学反应, 则每一种气体都均匀地分布在整个容器内, 其所产生的压强和单独占有整个容器时所产生的压强相同^[19]。

理想气体状态方程, 当理想气体处于平衡态时:

$$PV=nRT, \quad (2)$$

式中:

p ——理想气体的压强, Pa;

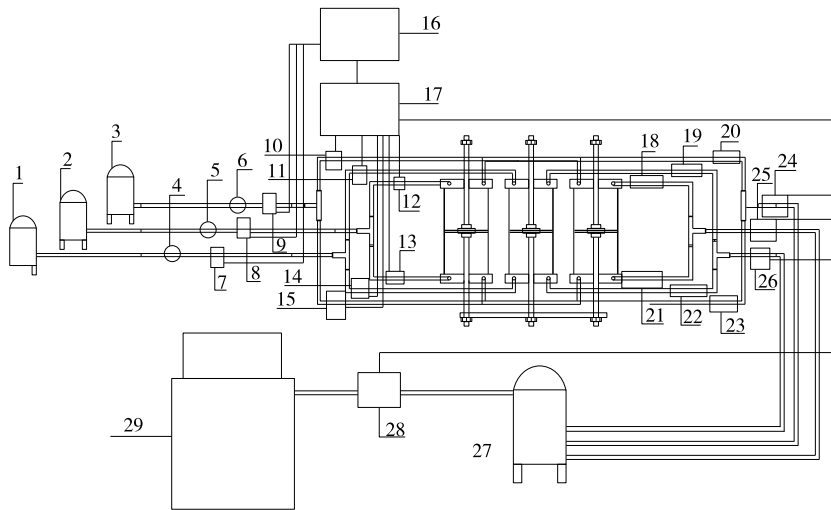
V ——理想气体的体积, m^3 ;

n ——气体物质的量, mol;

T ——理想气体的热力学温度, K;

R ——理想气体常数^[20], $J/(mol \cdot K)$ 。

CO_2, O_2, N_2 3 种气体从高压钢瓶中排出经减压阀控制在 $0.40 \sim 0.50$ MPa, 根据软件控制系统设定的各气体压力由电气比例阀控制充入 3 个对应的等容气缸中; 等容气缸由气密性活塞分为两个动态腔体, 采用并联的方式用气管将气缸和高压混气罐连接, 由 3 组电磁阀和逆



1. 氮气罐 2. 氧气罐 3. 二氧化碳气体罐 4~6. 减压阀 7~9. 电气比例阀 10~15, 24~27. 电磁阀 16. 控制系统 17. PLC 18~23. 逆止阀 28. 混合气罐 29. 气调包装机

图1 系统整体结构示意图

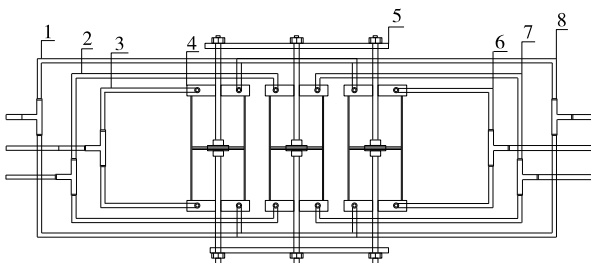
Figure 1 Schematic diagram of the overall structure of the system

止阀控制气路形成逻辑通断关系,实现等容气缸交替连续式的充气、混配过程,再将混好的气体充入高压混气罐备用;混气罐装置有压力、温度传感器和气体浓度传感器将混配气体信息不断反馈到软件控制系统中,通过设计的算法计算误差和调整电气比例阀的压力,实现三元气体高精度的气体混配。

2 关键机构与设计

2.1 等容气缸设计

采用3个等容充气缸 SC100-400(图2)通过联动杆与气管并联,其进出气孔为20 mm,大小为589 mm×112 mm×112 mm,压力为0.10~1.00 MPa,分别对应CO₂、O₂、N₂3种气体,根据道尔顿分压定律可知,某一气体在气体混合物中产生的分压等于相同温度下其单独占有整个容器时所产生的压力,而气体混合物的总压强等于其中各气体分压之和。每个等容气缸由气密性活塞分



1. 二氧化碳进气管 2. 氧气进气管 3. 氮气进气管 4. 等容气缸 5. 联动杆 6. 氮气出气管 7. 氧气出气管 8. 二氧化碳出气管

图2 等容气缸

Figure 2 Equivalent gas cylinder

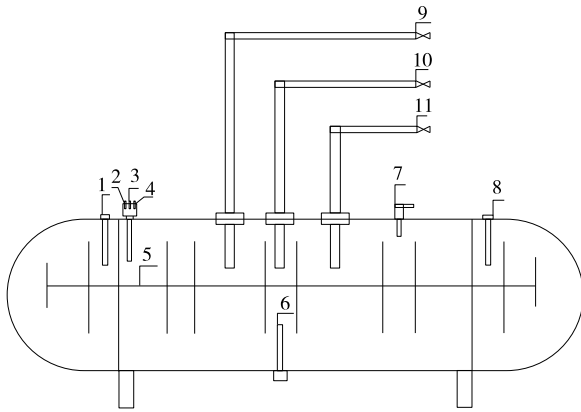
为上、下两个动态腔体,通过电气比例阀控制不同压力的3种气体,先分别进入3个等容气缸上半部分进行混合,当3个等容气缸上半部分内部压力达到按气体比例计算得到的分压压力时,控制电磁阀打开将混合气体充入高压混气罐。与此同时,通过控制电磁阀组的开关顺序,让3种气源分别进入3个等容气缸的下半部分开始新的混配,混配后的气体充入高压混气罐,重复上述步骤,实现等容气缸交替连续式的充气、混配过程。

2.2 混配罐体设计

气体混配罐体主要是用作三元气体混合后的气体储存容器,并完成气体信息反馈。在等容气缸内混合后的气体进入混气罐内备用,与此同时,混配罐内的压力、气体浓度、温度传感器对混配气体进行实时检测,得到的混配气体信息会被不断反馈到软件控制系统中。混合罐体(图3)的主要结构包括混合气罐、进气结构、浓度检测结构、温度检测结构、压力检测结构、温度均衡结构。其中进气结构由3个电磁式进气阀构成;浓度检测结构由二氧化碳浓度检测传感器 ZG09,氧气浓度检测传感器 RS485,氮气浓度检测传感器 S100 构成;温度检测结构由温度传感器 STC-200 构成;压力检测结构由高精度压力传感器 QBE2003-P16 构成;温度均衡结构由热传导金属丝构成,罐体直径250 mm,大小为250 mm×250 mm×850 mm。

2.3 气路控制系统设计

气路控制系统(图4)由减压阀、电气比例阀、比例阀控制器、电磁阀、气体逆止阀、气管构成。采用并联的方式用气管将气缸和高压混气管连接,由3组电磁阀和逆止阀控制气路形成逻辑通断关系,通过比例阀控制器控



1、6、8. 温度传感器 2. 氧气气体浓度检测传感器 3. 氮气气体浓度检测传感器 4. 二氧化碳气体浓度检测传感器 5. 热传导金属丝 7. 高精度压力传感器 9. 氧气入口 10. 氮气入口 11. 二氧化碳入口

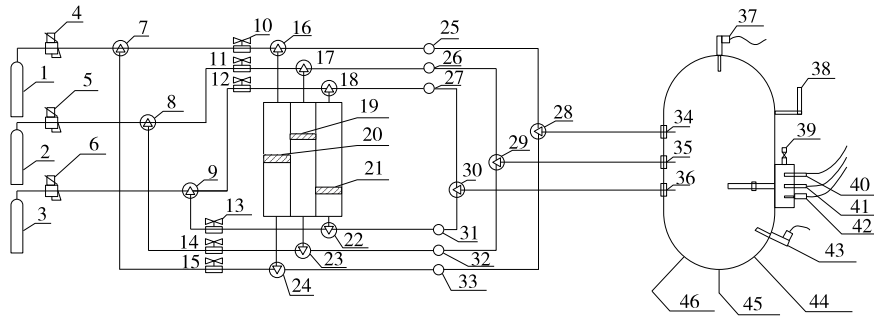
图 3 高压混气罐示意图

Figure 3 Schematic diagram of high pressure mixing tank

制不同分压压力的 3 种气体, 分别进入 3 个等容气缸, 开启 1 组电磁阀控制气缸连通使得气体瞬间混配, 混配后的气体进入高压混气罐, 使用止逆阀防止气体回充; 混配后, 关闭运行的电磁阀, 开启另 1 组电磁阀, 混气过程交替运行实现等容气缸交替连续式的充气、混配过程。

2.4 系统控制设计

采用软件控制系统结合 PLC 进行系统控制, 其中软件控制系统设计有友好的 GUI 操作界面, 通过 GUI 初始设置三元气体混配浓度目标值, 在气体混配过程中实时采集混气罐气体的压力、温度和不同气体浓度, 利用软件算法判断 3 种气体浓度实际比例值与目标值的偏差, 软件控制系统直接控制电气比例阀进行压力值调整。压力值调整后, 软件控制系统对 PLC 下达命令执行三元气体混配充气动作, 再进行混配气体实时信息的反馈和电气比例阀压力调整控制, 形成信息反馈闭环控制过程, 达到高精度气体混配目的。



1. 氮气罐 2. 氧气罐 3. 二氧化碳气体罐 4~6. 电气比例阀 7~9、16~18、22~24、28~30. 三通阀 10~15. 电磁控制阀 19~21. 活塞 25~27、31~33. 气体止逆阀 34~36. 气体进口 37、43. 温度传感器 38. 气体出口 40~42. 气体浓度传感器 44~46. 固定支架

图 4 气路控制系统

Figure 4 Airway control system

2.4.1 软件控制算法 该三元气体混配系统采用自动信息反馈闭环控制, 软件控制系统需实时采集混配气体浓度、压力和温度, 利用理想气体方程和道尔顿分压定律算法进行三元气体实际体积浓度比例和目标值的偏差计算和判别。

为了方便, 设定混配的氮气、二氧化碳和氧气 3 种气体浓度比例为 $n_1 : n_2 : n_3 = 91 : 7 : 2$, 已知储气罐体积 V , 单气缸体积 V_0 , 初始设定第 1 种气体分压力为 p_1 , 以此压力为基准, 利用道尔顿分压定律计算第 2、3 种气体的分压值。

(1) 第 1 阶段: 实时检测动态温度 \tilde{T}_3 和动态总压力 p_{123} :

$$p_{123}V = (n_1 + n_2 + n_3)R\tilde{T}_3, \quad (3)$$

$$p_{123} = p'_1 + p'_2 + p'_3, \quad (4)$$

$$p''_1V = n_1R\tilde{T}_3, \quad (5)$$

$$p''_2V = n_2R\tilde{T}_3, \quad (6)$$

$$p''_3V = n_3R\tilde{T}_3. \quad (7)$$

根据式(3)~式(7)可计算出第 3 种气体浓度 n_3 、第 1 种气体动态压力 p''_1 、第 2 种气体动态压力 p''_2 和第 3 种气体动态压力 p''_3 。压力比值为:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{p''_1}{p''_2} = \frac{n_1}{n_2}. \quad (8)$$

$$p_3 = p''_3 \frac{p_{123}V - n_1 - n_2}{R\tilde{T}_3}$$

根据式(8)可得 $p_1 : p_2 : p_3 = 91 : 7 : 2$ 。

利用第 1 种气体分压力初始设定值, 计算第 2、3 种气体分压力, 按电气比例阀进行分压值设定。启动气缸充气混配动作, 实时监测混合气体的体积浓度、压力和温度。

(2) 第 2 阶段: 反馈各气体浓度进行修正增补, 计算

反馈的浓度比值:

$$n_1 : n_2 : n_3 = x : y : z。 \quad (9)$$

假设第 1 种气体浓度 x 超量最多,以 x 为分母对比值进行归一:

$$n_1 : n_2 : n_3 = 1 : \frac{y}{x} : \frac{z}{x}。 \quad (10)$$

相应的第 2,3 种气体缺量,进行补充。

① 第 2 种气体分压力调整设定,实时检测混合气罐气体动态温度 T_2 ,计算理论动态下第 2 种气体补充的物质的量 Δn_2 :

$$\Delta n_2 = \left(\frac{7}{92} - \frac{y}{x}\right)n_1。 \quad (11)$$

混合气罐实际摩尔体积增加 $\Delta n'_2$ 为:

$$\Delta n'_2 = \Delta n_2 V。 \quad (12)$$

根据理想气体方程可得:

$$\Delta P_{O_2} V_0 = \Delta P_2 V = \Delta n_2 V R T_2, \quad (13)$$

式中:

ΔP_{O_2} —— 第 2 种气体的单缸压力增加量,Pa;

ΔP_2 —— 第 2 种气体的压力增加量,Pa。

则

$$\Delta P_{O_2} = \frac{V}{V_0} \Delta n_2 R T_2 = \frac{V}{V_0} \left(\frac{7}{92} - \frac{y}{x}\right)n_1 R T_2。 \quad (14)$$

第 2 种气体压力控制设定值为:

$$P_{O_2} = P_2 + \Delta P_2, \quad (15)$$

式中:

P_{O_2} —— 第 2 种气体的单缸压力,Pa。

则

$$P_{O_2} = P_2 + \frac{V}{V_0} \left(\frac{7}{92} - \frac{y}{x}\right)n_1 R T_2。 \quad (16)$$

② 第 3 种气体压力调整:压力控制公式原理为

$$P_{O_3} = P_3 + \frac{V}{V_0} \left(\frac{2}{92} - \frac{z}{x}\right)n_1 R T_2, \quad (17)$$

式中:

P_{O_3} —— 第 3 种气体的单缸压力,Pa。

通过上述算法,软件控制电气比例阀 3 种气体分压值一次循环调整程序完成,之后启动 PLC 控制新一次的气体混配动作。

2.4.2 PLC 逻辑控制设计 如图 5 所示,先设定所需气调比例,对混气罐进行气压检测,利用第 1 种气体分压力初始设定值,通过软件计算出第 2,3 种气体分压力,控制电气比例阀进行分压值设定。开启电磁阀组 13~15,关闭 10~12,24~26,启动气缸充气混配动作,随后开启电磁阀组 24~26,关闭 10~15,将气体充入混合气罐,实时检测混合气体浓度,开启电磁阀组 10~12,关闭 13~15、24~26,向气缸中充气,随后开启电磁阀组 24~26,关闭 10~15,将气体充入混合气罐,实时检测混合气体的浓度。

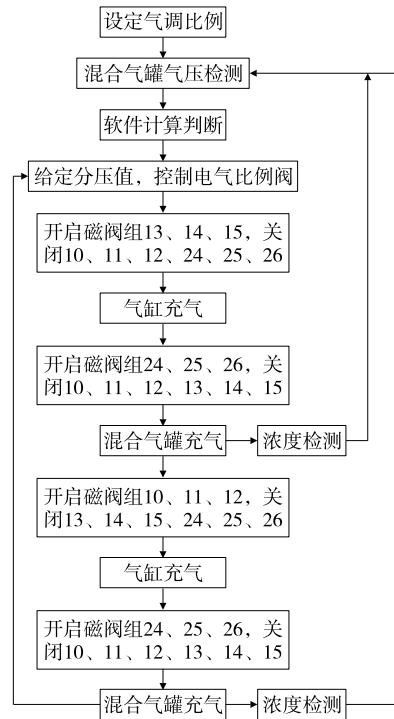


图 5 PLC 逻辑控制机流程图

Figure 5 PLC flowchart of the logic controller

3 试验及性能分析

3.1 试验方法

根据绝大部分果蔬 CO_2 、 O_2 、 N_2 三元气体混配气调保鲜技术要求, CO_2 气体体积浓度比例为 $0\% \sim 30\%$, O_2 气体体积浓度比例为 $5\% \sim 30\%$ 。在上述气体浓度比例范围内,设计 8 组不同浓度梯度的三元气体混配目标比例值,对应不同的气体压力设定值。由于气体顶空分析仪只检测 CO_2 和 O_2 体积浓度,同时为了便于计算,固定 N_2 分压的初始设定值,不断调整 CO_2 和 O_2 气体分压设定值来实现混配浓度的精度控制。实时检测每组混配后不同气体的浓度,计算每种气体实际浓度值与目标值的相对偏差,通过信息反馈重新调整软件气体分压的设定进行第 2 次混配,同理进行第 3 次混配,计算 3 次混配后每种气体的相对偏差,并对三元气体混配装置性能进行分析,并按式(18)计算气体混配浓度的相对偏差。

$$\rho = \frac{|\alpha - \beta|}{\beta} \times 100\%, \quad (18)$$

式中:

ρ —— 相对偏差率, %;

α —— 气体实测浓度;

β —— 气体目标浓度。

3.2 结果与分析

由表 2~表 4 可知,混配后的 CO_2 和 O_2 的气体浓度

平均相对偏差分别为 2.83%, 2.99%; 第 2 次混配后 CO₂ 和 O₂ 的气体浓度平均相对偏差分别为 1.49%, 1.72%, 相对于初始混配精度均提高了 1.34%, 1.27%; 第 3 次混配

后 CO₂ 和 O₂ 的气体浓度平均相对偏差分别为 0.86%, 0.75%, 满足 <1% 的技术要求。混配精度不断提高, 说明该系统适用于食品气调包装内的气体调配。

表 2 初始充气混配压力设定和实际检测试验结果

Table 2 Table of initial inflatable mixer pressure setting and actual test results

体积浓度设定/%			气体分压设定/kPa			实测体积浓度/%		相对偏差/%	
CO ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂	O ₂
2	5	97	10	25	485	1.91	4.73	4.5	5.4
5	10	85	30	60	510	4.82	9.77	3.6	2.3
10	15	75	50	75	375	9.88	14.35	1.2	4.3
15	15	70	100	100	470	14.76	14.91	1.6	0.6
20	15	65	200	150	650	21.10	14.75	5.5	1.6
20	20	60	200	200	600	20.76	19.12	2.8	4.4
30	20	50	300	200	500	30.56	20.78	1.8	3.9
30	30	40	300	300	400	30.48	29.56	1.6	1.4
平均值								2.83	2.99

表 3 基于初始混配试验数据偏差进行压力调整后二次混配试验结果

Table 3 Table of results of secondary mixing test after pressure adjustment based on data deviation of initial mixing test

体积浓度设定/%			气体分压设定/kPa			实测体积浓度/%		相对偏差/%	
CO ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂	O ₂
2	5	97	10.45	26.35	485	1.96	4.89	1.5	2.2
5	10	85	31.08	61.38	510	4.91	9.88	1.8	1.2
10	15	75	50.60	78.23	375	9.90	14.75	1.0	1.6
15	15	70	101.60	100.60	470	14.84	14.88	1.1	0.8
20	15	65	189.00	152.40	650	20.43	14.81	2.1	1.3
20	20	60	194.40	208.80	600	20.37	19.57	1.8	2.1
30	20	50	294.60	192.20	500	30.28	20.39	1.8	3.9
30	30	40	295.20	304.20	400	30.25	30.23	0.8	0.7
平均值								1.49	1.72

表 4 基于二次气体混配试验数据偏差进行压力调整后三次混配试验结果

Table 4 Table of results of three mixing tests after pressure adjustment based on deviation of secondary gas mixing test data

体积浓度设定/%			气体分压设定/kPa			实测体积浓度/%		相对偏差/%	
CO ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	O ₂	N ₂	CO ₂	O ₂	CO ₂	O ₂
2	5	97	10.61	26.93	485	2.03	5.08	1.5	1.6
5	10	85	31.64	62.12	510	5.03	9.95	0.6	0.5
10	15	75	51.11	79.48	375	9.92	14.85	0.8	1.0
15	15	70	102.71	101.40	470	15.12	14.89	0.8	0.7
20	15	65	185.03	154.38	650	19.87	15.10	0.9	0.7
20	20	60	190.90	213.18	600	20.18	19.91	0.9	0.5
30	20	50	289.29	184.70	500	30.26	19.87	0.8	0.6
30	30	40	292.83	302.07	400	30.19	29.88	0.6	0.4
平均值								0.86	0.75

4 结论

基于理想气体状态方程和道尔顿分压定律的气调包装气体混配系统,其中,硬件控制系统通过并联的方式用气管将气缸和高压混气管连接,由3组电磁阀和逆止阀控制气路形成逻辑通断关系,实现等容气缸交替连续式的充气、混配的过程;并利用软件算法进行气体压力值判断、调整,软件控制系统对PLC下达命令,执行三元气体混配充气动作,混配气体实时信息的反馈和电气比例阀压力调整控制形成信息反馈闭环控制过程,达到高精度气体混配目的。结果表明,该系统可以较好地提高气体浓度精度,满足气调保鲜的需求。目前,该系统已基本实现高精度气体混配,以此为基础在后续的改进中实现气体更高精度的混配以及提升运行速度。

参考文献

- [1] 徐春蕾, 王佳, 李长洪, 等. 气调包装对混合鲜切果蔬保鲜效果的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(7): 131-135.
XU Chun-lei, WANG Jia, LI Chang-hong, et al. Effect of air conditioning packaging on mixed fresh cut fruits and vegetables[J]. Food & Machinery, 2020, 36(7): 131-135.
- [2] 何伟. 果蔬气调保鲜技术及其在冷链物流中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2020, 36(9): 228-232.
HE Wei. Research progress of fruit and vegetable gas technology and its application in cold chain logistics[J]. Food & Machinery, 2020, 36(9): 228-232.
- [3] KSHANAPRAVA D, SUKHDEV M, LALIT M B. Modified atmosphere packaging for mango and tomato: An appraisal to improve shelf life[J]. Journal of Packaging Technology and Research, 2017 (3): 127-133.
- [4] 李中元. 一种气调包装用气体混配器: CN103894101A[P]. 2014-07-02.
LI Zhong-yuan. A gas mixer for gas regulating packaging: CN103894101A[P]. 2014-07-02.
- [5] 李慧敏, 凌泽民, 何建. 混合气体保护焊接过程电弧特性分析[J]. 热加工工艺, 2016, 45(11): 232-235, 241.
LI Hui-ming, LING Ze-min, HE Jian. Analysis of arc characteristics during welding of mixed gas protection welding[J]. Thermal Processing Process, 2016, 45(11): 232-235, 241.
- [6] 陈雨, 李艳, 周子妍, 等. 基于混合气体法的 H_9C_2 心肌细胞缺氧/复氧模型建立及优化研究[J]. 中药新药与临床药理, 2020, 31(9): 1 123-1 127.
CHEN Yu, LI Yan, ZHOU Zi-yan, et al. Establishment and optimization of hypoxia / reoxygenation model in H_9C_2 cardiomyocytes based on mixed gas method[J]. New Medicine and Clinical Pharmacology of Traditional Chinese Medicine, 2020, 31(9): 1 123-1 127.
- [7] 洪景娥. 不同表面处理的 T91 钢在含 SO_2 混合气体中的高温腐蚀行为研究[J]. 腐蚀与防护, 2005(2): 54-56, 77.
HONG Jing-e. Study on high temperature corrosion behavior of T91 steel in SO_2 mixed gas with different surfaces[J]. Corrosion and Protection, 2005(2): 54-56, 77.
- [8] 刘晓波, 杨敏, 哈迅, 等. 三元气体自动配气装置[J]. 煤矿安全, 2000(8): 51-52.
LIU Xiao-bo, YANG Ming, HA Xun, et al. Ternary gas automatic distribution device[J]. Coal Mine Safety, 2000(8): 51-52.
- [9] 李麒, 赵寒涛, 田力. 基于 S7200 系列 PLC 的一种气调保鲜智能比例混配仪的设计[J]. 自动化技术与应用, 2017, 36(4): 148-150.
LI Qi, ZHAO Han-tao, TIAN Li. The design of a pneumatic and fresh intelligent scale mixer based on S7200 series PLC[J]. Automation Technology and Application, 2017, 36(4): 148-150.
- [10] 袁士豪, 何晖, 李冬锋, 等. 一种高精度标准气体动态混配系统及配比精度控制方法: CN107597016B[P]. 2020-03-31.
YUAN Shi-hao, HE Hui, LI Dong-feng, et al. A high-precision standard gas dynamic mixing system and the ratio precision control method: CN107597016B[P]. 2020-03-31.
- [11] MALKOVA E M, TEPLUKHOVA G A. A portable dynamic gas mixer[J]. Measurement Techniques, 1971, 13(9): 1 420-1 421.
- [12] DOMINICUS D, KI-SEONG K, SUN-YOUP L, et al. Optimization the design of venturi gas mixer for syngas engine using three-dimensional CFD modeling[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25(9): 2 285.
- [13] LEPESHINSKY I A, RESHETNIKOV V A, ZARANKEVICH I A. Experimental research of the closed-type gas dynamic mixer[J]. Aerospace Engineering, Technology and Mechanical Engineering, 2016, 15(3): 70-81.
- [14] 傅小华. 气调包装气体比例混合与检测系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2011: 12-16.
FU Xiao-hua. Study on mixing and detection of gas ratio system[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2011: 12-16.
- [15] 雷立雨. 盒式连续气调包装机的研究设计[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2016: 33-42.
LEI Li-yu. Research and design of box continuous gas control packaging machine[D]. Beijing: China Academy of Agricultural Mechanization Science, 2016: 33-42.
- [16] 赵永刚, 章勇, 张蓓蓓. 一种快速、高效配制混合标准气体的方法和设备[J]. 化学工程与装备, 2014(3): 177-179.
ZHAO Yong-gang, ZHANG Yong, ZHANG Bei-bei. A fast and efficient formulation of mixed standard gas[J]. Chemical Engineering and Equipment, 2014(3): 177-179.
- [17] 姚尧, 毕晓彤, 熊凤娇, 等. 不同气体组分气调包装对冷鲜鸡肉贮藏品质的影响[J]. 肉类研究, 2018, 32(8): 51-56.
YAO Yao, BI Xiao-tong, XIONG Feng-jiao, et al. Influence of different gas component regulating packaging on storage quality of chilled chicken[J]. Meat Research, 2018, 32(8): 51-56.
- [18] 张晨, 杨诗奇, 李超, 等. 气调包装与其他技术结合在食品保鲜中的研究进展[J]. 食品工业, 2020, 41(5): 287-290.
ZHANG Chen, YANG Shi-qi, LI Chao, et al. Progress of gas regulating packaging and other technologies in food preservation[J]. Food Industry, 2020, 41(5): 287-290.
- [19] JONATHAN B, DAVID C. Physics of gases[J]. Anaesthesia & Intensive Care Medicine, 2015, 16(3): 111-113.
- [20] ANDREA I W. How is the ideal gas law explanatory[J]. Science & Education, 2013, 22(7): 1 563-1 568.