

灌装参数对活塞式灌装系统灌装效果影响的试验研究

李长坤, 吴波, 牛灿, 苟利军, 王杜

(武汉理工大学, 武汉 430070)

摘要: 采用自行设计的活塞式液体灌装试验系统, 利用正交试验方法, 考察了灌装速度、液位跟踪距离、喷嘴内径和喷嘴出液口形状对灌装过程中滴漏和起泡现象的影响, 确定了该活塞式液体灌装系统的最佳灌装参数。通过试验, 确定了影响滴漏现象的主要因素为低速段速度和出液口形状, 影响系统起泡现象的主要因素为喷嘴内径和液位跟踪距离, 可以为活塞式液体灌装系统设计研发以及调试过程中的参数选择提供一定的指导。

关键词: 活塞式灌装系统; 正交试验; 起泡; 滴漏

中图分类号: TS206.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)17-0125-04

Influence of Filling Parameters on Filling Effect of Piston Liquid Filling System

LI Chang-kun, WU Bo, NIU Can, GOU Li-jun, WANG Du

(Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The effect of filling speed, tracking range of liquid level, nozzle diameter and the shape of nozzle on dripping and foaming during filling process was studied using orthogonal test method. The best operation parameters of the liquid filling system were determined. The result showed that the main influencing factors on drip phenomenon are speed in low speed period and shape of the nozzle; the main influencing factors on foaming phenomenon is nozzle diameter and tracking range of liquid level. The purpose was to provide guidance for piston liquid filling system design and parameters selection.

Key words: piston liquid filling system; orthogonal test; dripping; foaming

随着饮料产业的迅猛发展, 2006 年上半年全球非碳酸饮料灌装产量为 3600 亿升, 消费总额为 2070 亿美元^[1]。市场对液体灌装系统需求量逐渐增大, 且要求更高的灌装效率。如何保证较好的灌装效果则显得尤为重要, 衡量灌装效果的重要指标为滴漏和飞溅。国外对液体灌装系统进行了大量研究, 自动化程度高, 灌装效果好^[2]。国内液体灌装系统起步较晚, 在液体灌装过程中大多存在滴漏和起泡现象。滴漏现象容易对灌装容器和机器造成污染, 影响产品的清洁度。起泡现象则会影响产品外观^[3]。

基于此, 通过在自行设计的活塞式液体灌装试验系统上进行正交试验, 研究灌装系统的灌装工艺参数和灌装头结构参数等对灌装效果的影响, 最终获得了最佳液体灌装参数组合。该试验研究对于优化灌装

系统的灌装效果, 指导灌装系统设计开发有一定的参考意义^[4]。

1 试验方案

1.1 试验装置

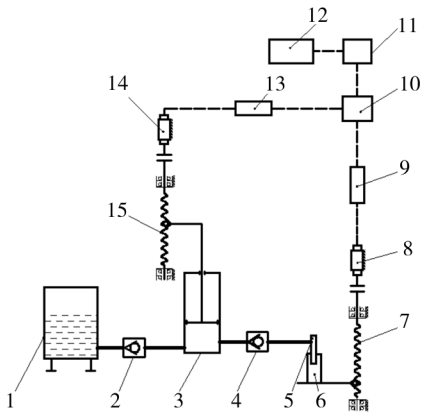
在工业生产中, 液体灌装系统多为庞大的灌装生产线, 结构十分复杂, 如果直接在灌装生产线上进行灌装试验, 不仅工作量很大, 而且不易得出灌装参数与灌装效果之间的关系。为了简化灌装系统结构, 突出灌装主要参数对灌装效果的影响关系, 自行设计了液体灌装试验系统, 其原理见图 1。

该液体灌装试验系统依据生产上应用广泛的活塞式压力灌装原理进行设计。系统采用模块化设计

收稿日期: 2013-02-28

基金项目: 国家大学生创新创业训练计划项目(20121049704010); 大学生自主创新研究基金资助项目(126604002)

作者简介: 李长坤(1992-), 男, 河南人, 武汉理工大学本科生, 主要研究方向为灌装机械结构优化设计。



1-储液箱;2-进口口单向阀;3-活塞泵;4-出口口单向阀;
5-灌装喷嘴;6-灌装瓶;7-滚珠丝杠 1;8-步进电机;
9-步进电机驱动器;10-PLC;11-人机交互界面;
12-PC 机;13-伺服电机驱动器;14-伺服电机;15-滚珠丝杠 2

图 1 活塞式液体灌装试验机工作原理

Fig. 1 Principle fig of the piston liquid filling machine

思路^[5],依据设计和装配过程的模块化原则^[6],将试验装置分为吸灌液模块、液位跟踪模块、灌装喷嘴模块和自动控制模块。吸灌液模块是液体灌装的核心,采用伺服电机驱动滚珠丝杠,进而带动活塞式计量泵实现,灌装过程中脉动小,液流稳定。灌装喷嘴为三段式结构,由灌装头母体、子体和头部组成。其中,母体和子体结构相同,头部结构为试验研究因素,该设计方法降低了加工成本。为保证液位跟踪精度,该系统采用步进电机驱动滚珠丝杠实现,在容器液面上升时,控制放置容器的托盘同步下降,从而保证喷嘴到液面距离恒定。自动控制模块采用 PLC 作为控制器来控制伺服电机驱动器和步进电机驱动器,从而实现两电机的协调工作。为了简化操作,便于试验参数调整,设计人机交互界面^[7]。

1.2 试验条件

试验灌装对象为 ALKAQUA 优质饮用天然水。试验过程中,灌装条件参数如下:灌装容量为 550 mL;试验温度为室温(18 ℃);灌装物料粘度值为 1.14 mPa·s;灌装喷嘴内壁粗糙度 $Ra=3.2$ 。

1.3 试验研究参数

试验研究的灌装参数主要包括灌装速度、液位跟踪距离,以及灌装喷嘴结构参数。

1) 低速段速度。灌装过程中采用变速灌装,初始时采用高速灌装,以保证灌装效率。在物料即将填满容器时,采用低速灌装,此时灌装速度对灌装效果有较大影响,故在试验研究中,选取低速段速度作为

试验因素。

2) 液位跟踪距离。在高速灌装环境下,液体物料从喷嘴高速流出时,易造成起泡和滴漏现象。故需要保证出液口到液面距离恒定^[8]。对于不同物料,最佳液位跟踪距离不同,需要通过灌装试验确定。

3) 灌装喷嘴结构。在实际灌装生产过程中,灌装喷嘴结构对灌装效果有较大影响。其中,灌装喷嘴口径和喷嘴出液口形状对灌装效果影响较为显著。故设计了一批灌装喷嘴,研究灌装喷嘴结构特性对灌装效果的影响。

综上所述,实验为 4 因素 4 水平正交实验,选择灌液低速段速度(A)、喷嘴内径(B)、液位跟踪距离(C)和喷嘴出液口形状(D)为影响因素,每因素设 4 个水平,数据表选用 $L_{16}(4^4)^{[9]}$ 正交表,因素与水平见表 1。

表 1 正交实验因素水平

Tab. 1 Factor levels of orthogonal experiment

水 平	灌液低速段速度 /(mL·min ⁻¹)	喷嘴内径 B/mm	液位跟踪距离 C/cm	喷嘴出液口 形状 D
1	110	4	-4	直口
2	82.5	6	-2	内缩
3	55	8	0	外张
4	27.5	8	2	斜口

1.4 试验分析方法

试验研究的指标为灌装效果,通过分析灌装过程中的滴漏及起泡现象来评定灌装效果。对于滴漏现象,计量灌装完成后 10 s 内从喷嘴滴下的滴数,取试验的平均值为该次试验滴漏滴数。对于起泡现象,采用照相机拍摄灌装容器中特征区域,然后计量起泡数目,取试验的气泡数目的平均值为气泡数值。

2 试验结果与讨论

2.1 试验结果

每组试验重复 8 次,去除粗大误差,记录试验结果,见表 2。

2.2 极差分析

极差分析法可以直观地获得试验因素对正交试验结果的影响^[10]。用各列因素的极差 R 的大小确定指标影响的主次顺序,选择每个因素同一水平的结果之和 T_i 的最大值作为该因素的最佳水平,从而得出可能的最优灌装参数。极差分析见表 3。

表 2 L16(4⁵) 正交试验结果
Tab.2 L16(4⁵) orthogonal test results

序号	A	B	C	D	灌装效果	
					滴漏	起泡
1	1	1	1	1	2.625	24
2	1	2	2	2	1.875	16
3	1	3	3	3	5.375	7.7
4	1	4	4	4	6.375	13
5	2	1	2	3	4.5	23.3
6	2	2	1	4	6	11
7	2	3	4	1	7.875	13
8	2	4	3	2	6.625	9.125
9	3	1	3	4	8.125	19
10	3	2	4	3	6.75	20.3
11	3	3	1	2	5.875	13
12	3	4	2	1	5.25	4.3
13	4	1	4	2	5.125	25.5
14	4	2	3	1	7.25	13
15	4	3	2	4	6	8
16	4	4	1	3	4.125	3.2

表 3 正交实验结果的极差分析
Tab.3 Range analysis of the orthogonal experiment results

参数	滴漏				起泡			
	A	B	C	D	A	B	C	D
T_1	-16.25	-17.72	-18.63	-20.75	-60.7	-91.8	-51.2	-54.3
T_2	-25	-19.63	-17.64	-16.84	-56.43	-60.3	-51.6	-63.6
T_3	-26	-25.13	-25.13	-20.75	-56.6	-41.7	-48.83	-54.5
T_4	-17.59	-22.38	-23.47	-26.5	-49.7	-29.63	-71.8	-51
R	9.75	7.41	7.5	9.66	11	62.12	22.98	12.63

2.2.1 滴漏

4 个因素对灌装滴漏现象的影响的主次顺序为：低速段速度(A)、喷嘴出液口形状(D)、喷嘴内径(C)、液位跟踪距离(B)。由动量定理： $P=\Delta mv$ 知，在液体灌装过程中，灌装速度 v 越大，液滴动量越大，从而克服喷嘴管壁对其的粘滞力而流出，因而灌装结束后残留在喷嘴上的液体越少，滴漏下来的物料也越少。对于出液口形状，在管径相同的情况下，液体流过内缩口喷嘴时，形成液滴的曲率半径越小，从而产生较大的表面张力^[11]，故可以有效减少液体滴漏。

2.2.2 起泡

4 个因素对灌装滴漏现象的影响的主次顺序为：喷嘴内径(B)、液位跟踪距离(C)、喷嘴出液口形状(D)、低速段速度(A)。分析原因：灌装喷嘴处，往往

发生过流面积变化，形成节流口，在高速压力灌装条件下，依据空化原理^[12]，易产生气穴现象^[13]，使溶解在液体中气体分离出来，而且当喷嘴管道口径过细时，容易使管道内压力低于工作温度下的空气分离压，形成大量气泡^[14]。由此灌装喷嘴的口径越小，起气泡现象越严重。液位跟踪距离也对起泡现象有一定的影响，而且液位跟踪距离越小，即喷嘴淹没在液面以下距离越大，产生的气泡数量越少。因为在淹没条件下，淹没越深，喷嘴出口处液压越大，溶解在液体中的气体越不容易分离出来，故气泡数目就越少。

分析每个因素 4 个水平 T_i 的大小，得出每个因素最大的 T_i 水平，作为最佳水平。得到的最佳水平组合条件见表 4。

表 4 最佳水平组合条件
Tab.4 Best level combination conditions

灌装效果	A	B	C	D
	/(mL · min ⁻¹)	/ mm	/ cm	
滴漏	110	4	-2	内缩
起泡	27.5	8	0	斜口

3 结论

低速段速度是影响滴漏的首要因素,同时出液口形状也对滴漏现象有重要影响。即在保证其他条件相同的前提下,保持较高的低速段速度,可以减少滴漏;出液口形状采用内缩的形式可以减少滴漏滴数。灌装喷嘴口径和液位跟踪距离对滴漏的影响较弱。

对起泡现象影响最大的因素为喷嘴内径,喷嘴内径越大,灌装过程中产生的气泡越少。同时液位跟踪距离也有一定的影响,液位跟踪距离越小,即喷嘴淹没在液面以下距离越大,起气泡量越少。灌装速度和出液口形状对起泡现象的影响较小。

在后续工作中,将研究各个因素的交互作用对灌装效果的影响,为研究活塞式液体灌装系统提供进一步的指导。

参考文献:

[1] 程志军. 西得乐机械公司大中国区发展战略规划[D]. 上海:上海交通大学,2011.
CHEN Zhi-jun. The Research on Developing Strategy of SIDEL Machinery Company in Great China[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University,2011.

[2] 陶熠. 灌装输送线数字化设计平台研究与开发[D]. 杭州:浙江大学,2010.
TAO Yi. Research and Development of Digital Design Platform for Filling Conveyor Line[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2010.

[3] 黄小兰. 基于 PLC 的旋转灌装机控制系统研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.
HUANG Xiao-lan. Research on the Control System of Rotary Filling Machine Based on PLC[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2012.

[4] WU Bo, WANG Zhe, ZHENG Jun-yi. Reliability Models and Application in the Process of Production Scheduling of Mechanical Products[J]. International Conference on Mechanical Automation and Control Engineering,2010:280-284.

[5] 王利民. 包装机模块化参数化设计方法研究[D]. 天津:

天津大学,2008.
WANG Li-min. Research on Modular and Parametric Design Method of Packing Machine[D]. Tianjin: Tianjin University,2008.

[6] 孟令立. 模块化包装机械的设计仿真与优化研究[D]. 天津:天津大学,2011.
MENG Ling-li. Resear on the Theory of Modular Simulation and Optimal Design for Packaging Machinery[D]. Tianjing: Tianjing University,2008.

[7] 周亮,李珍. 基于 PLC 的液体袋装包装机控制系统的设计[J]. 包装工程,2013,34(1):88-91.
ZHOU Liang, LI Zhen. Design of Control System of Liquid Bag Packing Machine Based on PLC[J]. Packing Engineering,2013,34(1):88-91.

[8] 李玉琳. 灌装机控制系统及关键技术研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2010.
LI Yu-lin. The Control System of Filler and The Research of Key Technology[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2010.

[9] 方开泰,马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京:科学出版社,2001.
FANG Kai-tai, MA Chang-xing. The Design of Orthogonal and Uniform Test[M]. Beijing: Science Press,2001.

[10] 郑少华,姜奉华. 试验设计与数据处理[M]. 北京:中国建材工业出版社,2003.
ZHENG Shao-hua, JIANG Heng-hua. Experimental Design and Data Processing[M]. Beijing: China Building Materials Press,2003.

[11] 洪振宇. 悬垂液滴研究及表面张力和润湿角测定[J]. 物理实验,2006,26(7):10-12.
HONG Zhen-yu. The Research of Hanging Droplet and Determination of Surface Tension and Wetting Angle[J]. Physics Experimentation,2006,26(7):10-12.

[12] 李子丰. 空化射流形成的判据和冲蚀机理[J]. 工程力学,2007,24(3):185-188.
LI Zi-feng. Criterion and Erosion Mechanism Cavitating Jet[J]. Engineering Mechanics,2007,24(3):185-188.

[13] 王守城,容一鸣. 液压传动[M]. 北京:北京大学出版社,2006.
WANG Shou-cheng, RONG Yi-min. Hydraulic Transmission[M]. Beijing: Beijing University Press,2006.

[14] TANG Li-guo, WU Zhao-jun, LIU Sheng-xing. Three-dimensional Analytical Solution for Transient Guided Wave Propagation in Liquid-filled Pipe Systems[J]. IEEE E Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control,2012.