



## 实验室低真空-冷却水循环系统的研制

杜俊平, 张鲜放, 陈风华, 方少明, 张华林, 韩光鲁

(郑州轻工业大学 材料与化学工程学院, 郑州 450001)

**摘要:** 结合低真空和冷却水装置的特点及存在的问题, 研制了一种低真空-冷却水循环系统。通过合理的安装排布和巧妙的设备选型, 仅通过一个流体输送设备, 采用基于伯努利方程原理的真空瓶, 实现了低真空和冷却水循环双重功能, 提高了设备性能, 降低了设备使用成本(约 40%)和占用面积, 有效增加了基础实验室操作安全性, 从根源上降低了设备使用风险; 利用水循环系统, 达到了节能减排的目的。

**关键词:** 实验室; 低真空; 冷却水循环系统; 研制

中图分类号: O6339; G642.0

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230060

## Research and Development of a Low Vacuum-cooling Water Circulation System for Laboratory

DU Junping, ZHANG Xianfang, CHEN Fenghua, FANG Shaoming, ZHANG Hualin, HAN Guanglu

(College of Material and Chemical Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** A laboratory low vacuum-cooling water circulation system has been developed combined with the characteristics and existing problems of low vacuum and cooling water devices. Through reasonable installation arrangement and ingenious equipment selection, the dual functions of low vacuum and cooling water circulation have been realized with one fluid transporting equipment and the vacuum ejector based on Bernoulli equation principle. The equipment performance has been further improved. The equipment operation cost (about 40%) and occupied area have been reduced effectively. The operation safety of the basic laboratory has been improved effectively. The equipment operation risk has been reduced from the root, the operation safety has been improved, and the water recycling has achieved the goal of energy saving and emission reduction.

**Key words:** laboratory; low vacuum; cooling water circulation system; development

基础实验室是进行实验教学的场所, 由于其承担的实验范围广、设备多且杂, 因此, 如何在保障设备功能的前提下, 降低设备成本、节约设备占用面积、提高设备可操作性和安全性、节能减排成为亟待解决的问题。特别在绿色化学的倡导下, 新型实验设备的研制势在必行。

低真空装置主要用于过滤<sup>[1-3]</sup>、去除溶剂<sup>[4]</sup>等操作中, 是基础实验室常用设备之一。循环水真空泵是常用的低真空装置, 其最大真空度为 0.1 MPa, 水为工作介质, 水循环可大大节约水资源; 真空表、开关、抽气口集成在泵上, 移动方便; 双表

双抽结构适宜基础实验室两组实验的同时操作。但为了操作和读数, 必须置于实验操作台面上, 占用较大的空间, 增大了安全风险; 经过泵做功后的高能水直接在水箱内循环, 会对泵本身造成强烈的冲击, 严重降低其使用寿命, 同时造成能量浪费。冷却水装置主要用于冷凝<sup>[5-6]</sup>、蒸馏<sup>[7-8]</sup>、结晶<sup>[9-10]</sup>等操作中。通常直接采用自来水作为冷却水, 但自来水水压不稳, 存在较大的安全隐患; 另外, 载热后的清洁水排到下水道中会造成水资源浪费, 同时增加废水排放和处理压力。为解决冷却水装置存在的问题, 文献 [11] 报道了一

收稿日期: 2023-02-09; 修回日期: 2023-10-07

基金项目: 教育部第二批新工科研究与实践项目(E-CL20201927); 河南省新工科研究与实践项目(2020JGLX049); 河南省高等教育教学改革研究与实践项目(2021SJGLX202, 2021SJGLX198)。

作者简介: 杜俊平(1981-), 女, 博士, 讲师, 主要从事实验教学设备的研发工作。E-mail: dujunping@zzuli.edu.cn

种预警式冷却水装置, 解决了突发状况导致水资源浪费和意外事故的问题。文献 [12] 发明了一种内部独立的水循环系统, 有效地节约了水资源。我们设计了一种冷却水循环系统<sup>[13]</sup>, 对于提高实验安全和节能减排效果显著。但流体输送设备的使用, 增加了设备和操作费用, 降低了有效使用空间, 增大了安全风险。

结合目前低真空和冷却水装置的特点及存在的问题, 研制了一种低真空-冷却水循环系统。采用基于伯努利方程原理的真空瓶, 仅通过一个流体输送设备, 实现了低真空和冷却水循环双重功能。在保障设备功能的前提下, 极大地降低了设备成本, 节约了设备占用空间, 提高了设备操作的安全性, 且节能减排效果显著, 基础实验室也达到了绿色的要求。

## 1 设备选型、结构、安装排布

由于该系统的设备型号及组合连接方式均具有多样性和灵活性, 并与通风橱的结构相关, 本文以学院自主研发的一款通风橱为例, 描述低真空-冷却水循环系统的选型、结构、安装排布, 确保设备的可操作性与数据的准确性。

### 1.1 设备选型

根据通风橱尺寸, 选用 122 cm×30 cm×30 cm 底部安装有 4 个万向轮的不锈钢储水槽, 储水槽方便移动, 利于检修和清洁通风橱所处地面; 储水槽上端配盖体和固定架, 盖体防止固体落入, 造成水污染, 盖体与固定架间留缺口, 利于检修和调控水温, 方便观察装置内部结构。流体输送设备选用浸入式水泵(SHZ-DIII, 巩义市瑞德仪器设备有限公司), 性价比高、体积小, 方便竖直安装于储水槽内, 空间占用率小; 低真空设备选用基于伯努利方程原理的真空瓶(真空射流器, 聚乙烯材质, 价格区间在 60~100 元/个), 体积小、质优价廉、使用寿命长、易安装, 可直接连泵的出水口, 装于储水槽内, 不占用操作空间。真空管和水管采用真空橡胶管和橡胶管(8 mm×6 mm 或 11 mm×8 mm, 据设备尺寸, 折中选用), 质优价廉、柔软、便于安装排布和更换; 真空表(Y-60B, 上海自动化仪表四厂)选用机械式压力表, 性价比高、机械强度高、使用安全、易于更换; 吸收瓶直接选用抽滤瓶, 橡胶塞密封连接, 易于打孔实现与外界物质交换; 水龙头可根据性价比任意选择。吸收瓶、水龙头、喉箍等直接购买,

取中间价。

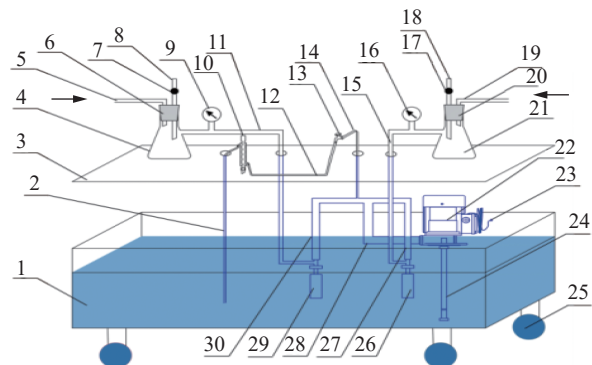
### 1.2 结构

低真空-冷却水循环系统结构如图 1 所示, 包括储水系统、流体输送系统、低真空系统、冷却水循环系统。

1) 流体输送系统包括泵(22)、固定架(未画出)、进水管路(24)、总出水管路(28)和出水支路 1(27)、出水支路 2(14)、出水支路 3(30)。

2) 低真空系统包括真空瓶(26, 29)、真空管(5, 11, 15, 19)、真空表(9, 16)、真空保护装置吸收瓶(4, 21)。

3) 冷却水循环系统包括用于输送水的管路(2, 12), 控制水流量水龙头(13)。



1—储水槽; 2—冷却水回水管; 3—操作台; 4, 21—吸收瓶; 5, 11, 15, 19—真空管; 6, 20—橡胶瓶塞; 7, 17—旋塞; 8, 18—放气口; 9, 16—真空表; 10—换热器; 12—冷却水进水管; 13—水龙头; 14—出水支路 2; 22—泵; 23—泵电源线; 24—泵进水管路; 25—万向轮; 26, 29—真空瓶; 27—出水支路 1; 28—总出水管路; 30—出水支路 3。

图 1 低真空-冷却水循环系统结构示意图

### 1.3 安装与排布

根据中国成年人人体尺寸标准(GB 10000—1988)中人体舒适操作深度、通风橱结构和尺寸及设备结构, 储水槽排布于通风橱底柜内, 不占用适宜工作区, 如图 2 所示。

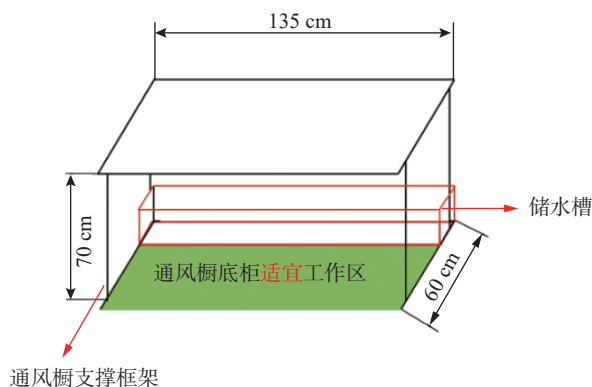


图 2 储水槽的排布图

泵用固定架固定，进水管路(24)深入到水槽底部，电机位于固定架上方，电源线连接到通风橱底柜侧面上端的电源插座上，避免水花溅出引起灾患。出水支路 2(14)通过水管连接，穿过通风橱操作台面上的钻孔连接水龙头，经换热设备后返回储水槽内，实现冷却水循环。出水支路 1(27)和出水支路 3(30)连接真空瓶，水流经真空瓶回到储水槽内；真空瓶上的真空口连接真空管，真空管穿过操作台面上的钻孔依次连接真空表、吸收瓶和待抽真空装置。所有管路连接处均以喉箍固定，避免管路崩开，引起操作失灵或水患。具体排布如图 3 所示。

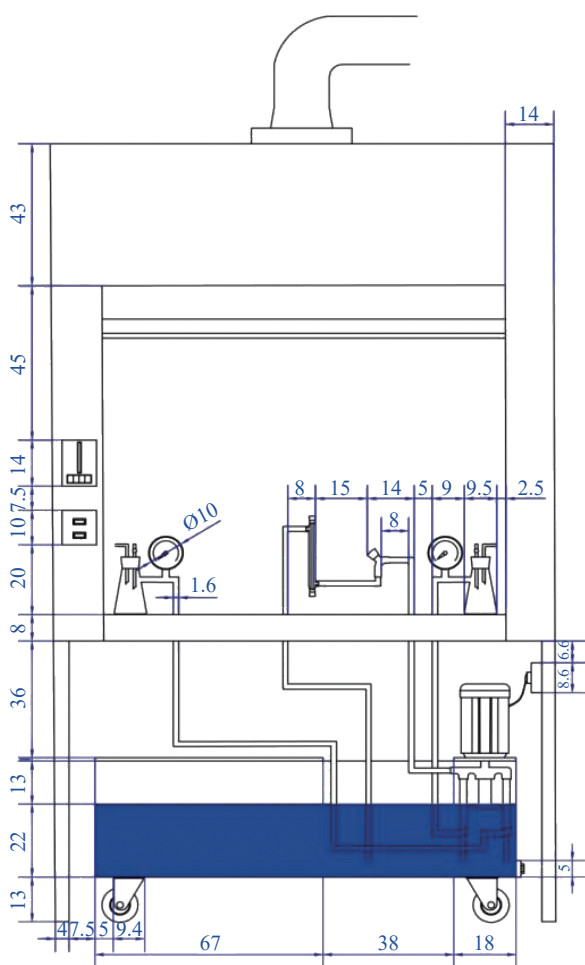


图 3 低真空-冷却水循环系统的排布图(单位: cm)

## 2 设备性能

### 2.1 低真空性能

系统两个真空接口所能达到的最大真空度均为 0.1 MPa，与循环水真空泵所能达到的最大真空度相同；据表 1 计算出系统和循环水真空泵达到

最大真空度平均用时分别为 2.20 s 和 2.65 s，与循环水真空泵相比，系统平均用时更短(少 0.45 s)，说明其具有优异的低真空性能。

表 1 达到最大真空度用时 单位: s

组别	循环水真空泵	系统
1	2.65	2.04
2	2.49	2.39
3	2.43	2.35
4	2.60	2.05
5	2.87	2.31
6	2.84	2.01
标准差	0.179	0.176

### 2.2 冷却水性能

运用量筒和秒表记录水龙头全开下不同时段内水的体积如表 2 所示，据  $q_m = \frac{\rho V_{\Delta t}}{\Delta t}$  计算水的流量，以第一组数据为例，可得：

$$q_{m1} = \frac{\rho V_{\Delta t_1}}{\Delta t_1} = \frac{1\,000 \times \frac{512.30}{1\,000}}{4.88/3\,600} = 377.93 \text{ (kg/h)} \quad (1)$$

式中： $V_{\Delta t}$ 为  $\Delta t$ 内的水体积，单位  $m^3$ ； $\rho$ 为水的密度，取  $1\,000 \text{ kg/m}^3$ 。

平均水流量：

$$\bar{q}_m = \frac{q_{m1} + q_{m2} + q_{m3}}{3} = \frac{377.93 + 364.02 + 377.60}{3} = 373.18 \text{ (kg/h)} \quad (2)$$

水流量标准差：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N-1}} = 7.94 \quad (3)$$

表 2 水龙头全开下的水流量

水量/mL	时间/s	水流量/( $kg \cdot h^{-1}$ )
512.30	4.88	377.93
498.50	4.93	364.02
515.00	4.91	377.60

文献 [13] 中的冷却水循环装置单开一个水龙头的水流量为  $213 \text{ kg/h}$ ， $373.18 \text{ kg/h} \gg 213 \text{ kg/h}$ ，说明系统冷却效果更好。若将系统一个水龙头换成并联的 4 个，亦可满足基础实验 4 组同时操作。

按最高储水位为  $2/3$  储水槽高度计算，则储水量为： $1.22 \times 0.3 \times 0.3 \times \frac{2}{3} \times 1\,000 = 73.2 \text{ (kg)}$ ；文献 [13] 中装置的冷却水最大储水量为  $53.2 \text{ kg}$ ，

4个换热器全开工作 225 min,水温升高 7.1 ℃, 73.2 kg > 53.2 kg,说明系统若在同等条件下工作相同的时间,水温升高将更低,进一步表明系统具有更好的冷却效果。

### 2.3 独立运行性

同时将两个真空接口连接到待抽真空系统,水龙头全开连接到换热器,两个真空表读数均达到 0.1 MPa,水龙头流量平均值为 373.18 kg/h,断开一个真空连接和/或关闭水龙头切断冷却水循环,剩余真空接口的真空性能不变,冷却水流量也不发生变化,说明该系统的真空性能和冷却水性能具有独立运行性,互不干扰。

### 2.4 节能减排性

该系统的冷却水功能部分采用与文献相同的原理,运用储水槽、水泵,实现冷却水循环,保障水压稳定的同时,明显达到了节能减排的目的。

## 3 经济、占用面积和风险评估

### 3.1 经济评估

系统的经济评估包括设备费、操作费和对分析 3 部分。

#### 3.1.1 设备费用

构成该系统的各构件费用明细如表 3 所示。

表 3 构件费用明细表

构件	单价	数量	价格/元
储水箱	150元/个	1个	150
真空瓶	80元/个	2个	160
泵	188元/个	1个	188
盖体	30元/个	1个	30
真空表	25元/个	2个	50
锥形瓶	20元/个	1个	20
水龙头	20元/个	4个	80
真空管	3元/个	20米	60
水管	2元/个	20米	40
喉箍	2元/个	20个	40
橡胶塞	3元/个	5个	15
玻璃管	2元/个	5个	10
胶带	0.2元/米	10米	2

设备总费用为 1145 元,设备使用年限按 15 年算,预留设备耗材费及水龙头扩增费 100 元/年,则每年设备费为 176.33 元。若按每年 10 个月,每月使用时长 100 h 计算,则设备损耗费为:

$$(1145/15 + 100) \div 10 \div 100 = 0.1763 \text{ (元/h)} \quad (4)$$

### 3.1.2 操作费用

泵输入功率为 180 W,电费按 0.6 元/(kW·h)计算,则电费为  $180 \div 1000 \times 0.6 = 0.1080 \text{ (元/h)}$ ;储水箱储水量为 73.2 kg,每年换 10 次水,每年用水量 732 kg,水费 4 元/吨,则水费为:

$$732 \div 1000 \div 10 \div 100 \times 4 = 0.002928 \text{ (元/h)} \quad (5)$$

操作费用为:

$$0.1080 + 0.002928 = 0.1109 \text{ (元/h)} \quad (6)$$

实际使用过程中更换下来的水可用于玻璃仪器清洗等,系统的实际操作费用低于 0.1109 (元/h)。

### 3.1.3 对比分析

由设备费用和操作费用可知,系统的设备成本为:  $0.1763 \text{ 元/h} + 0.1109 \text{ 元/h} = 0.2872 \text{ 元/h}$ 。同功率同功能的循环水真空泵的价格和水箱容积分别为 1000 元和 15 kg,按相同的方法计算,真空装置的设备成本为 0.2753 元/h;冷却水装置的设备成本为 0.2037 元/h<sup>[13]</sup>,则实现低真空和冷却水双重功能的总设备成本为 0.4790 元/h。与原装置相比,系统成本降低 0.1918 元/h,降幅约 40%,表明系统在保障功能的前提下,能明显降低设备成本。

### 3.2 面积占用评估

系统的吸收瓶和真空表排布于操作台面上,循环水真空泵为了保护真空管路,亦需要配备吸收瓶,均需置于操作台面上,系统的操作台面面积占用明显更低;系统的真空泵固定于储水槽上方,冷却水循环系统的泵排布于储水槽侧面<sup>[13]</sup>,相同储水槽大小下,系统的通风橱底柜面积占用也明显更低;较小的设备面积占用对提高实验室操作安全性有利,说明在相同功能下,系统的实验室操作安全性更高。

### 3.3 风险评估

对低真空-冷却水循环系统可能存在的风险评估显示,该装置在实用过程中主要存在用电和漏水两种风险。

#### 3.3.1 用电风险

系统的用电风险来自水泵。水泵安装在储水槽内,置于通风橱支撑框架内(见图 2),水泵的电源线插在通风橱底柜侧面上端一定高度处,并安装防水插座,有效地拉开了水电的距离,降低了用电风险。通风橱底柜位于通风橱支撑框架的外侧,拉开了用电设备与实验人员之间的距离,并

且关闭柜门,对外部学生活动空间没有影响,说明该系统能从根源上降低用电风险。

### 3.3.2 用水风险

系统存在的漏水隐患来自储水槽漏水、管路连接处漏水、储水槽内水花溅出造成的漏水。该系统采用一体成型式不锈钢储水槽,较好地避免了储水槽漏水。各输水管道接口处采用喉箍固定,避免水管接口处冲开引起漏水,降低输送系统的漏水风险;回水管出水端固定在储水槽底部,避免其从储水槽内飞出;出水从下往上流动,避免水面上水花飞溅;储水槽上端加盖,进一步避免水花飞出,降低漏水风险,说明该系统从根源上降低了漏水风险。

## 4 结束语

本文研制了一种低真空-冷却水循环系统,完成了设备选型与安装排布,研究了系统的性能,并对其进行了经济评估、面积占用评估和风险评估。结果表明:通过合理的安装排布和巧妙的设备选型,仅通过一个流体输送设备,成功实现了低真空和冷却水循环双重功能,并且进一步提高了设备的性能,降低了设备使用成本(降幅约40%)和设备占用面积,有效地提高了基础实验室操作安全性,从根源上降低了设备使用风险,提高了设备操作安全性;同时,储水槽的使用和水的循环利用,达到了节能减排的目的。

### 参考文献

- [1] 卢天宇. 对初中化学学生实验中过滤装置的改进[J]. 化学教育(中英文), 2017, 38(11): 67-68.
- [2] 刘琼琼, 陈华堂. 抽滤装置的2点改进[J]. 化学教育(中英文), 2004, 25(2): 40-41.
- [3] LEE S, SEONG D G, JU Y, et al. Revealing the flame retardancy mechanism of highly transparent cellulose nanopapers fabricated by vacuum filtration assisted layer-by-layer deposition[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 246: 116628.
- [4] 李嘉. 乙酸乙酯制备实验的微型化改进[J]. 化学教育(中英文), 2018, 39(15): 76-77.
- [5] 杜俊平, 秦鹏举, 绪连彩, 等. 基于4, 7-二噻吩苯并噻二唑和异靛单元的受体-受体共轭聚合物的合成与光伏性质[J]. 有机化学, 2020, 40(1): 194-200.
- [6] YAO L P, LIAO H L, RAVVA M K, et al. Metal-free polymerization: Synthesis and properties of fused Benzo[1,2-b:4,5-b']bis[b]benzothiophene (BBBT) polymers[J]. Polymer Chemistry, 2020, 11(22): 3695-3700.
- [7] 杨守祥, 刘春生. 自制高效简易消化蒸馏装置[J]. 实验技术与管理, 1998, 15(6): 3-5.
- [8] 何节玉, 裴志胜, 黄宇志, 等. 三合一实验装置在酯化反应中的应用[J]. 实验技术与管理, 2015, 32(11): 69-72.
- [9] 段建利, 杨志刚. 格式试剂制备十九酸[J]. 实验技术与管理, 2016, 33(11): 202-204.
- [10] ZHANG Z B, SONG P, FAN Y T. Experimental investigation on the geometric structure with perforated baffle for thermal stratification of the water tank[J]. Solar Energy, 2020, 203: 197-209.
- [11] 张安平, 孙建强, 马仟慧, 等. 用于实验室的预警式冷却水循环装置: CN106984249[P]. 2018-04-12.
- [12] 唐紫超, 任文峰, 张世宇. 一种实验室冷却水循环系统: CN203303974[P]. 2013-04-23.
- [13] 杜俊平, 魏少龙, 丁国庆, 等. 一种实验教学用通风橱冷却水循环系统: CN202021192570.2[P]. 2020-06-25.

编辑 张俊