尿基复合肥生产装置尾气洗涤系统液位显示虚高的原因分析及控制措施

刘　伟，曾　贞

（湖北大峪口化工有限责任公司，湖北 荆门　433009）

［摘　要］尿基复合肥生产装置中尾气洗涤塔吹气式液位计长时间显示液位为100%，不能准确显示真实液位。为便于优化工艺控制，依据吹气式液位计的工作原理分析液位显示虚高的原因，并根据尿基复合肥生产的特点提出改进措施。通过分析总结，造成液位显示虚高的主要原因为单吹气式液位计在带压容器液位测量上的局限性，当塔内压力远远高于大气压力时，无法满足测量要求。尿基复合肥生产时，对于带压容器采用两组吹气管路便可准确地检测出塔内液体的密度和液位，再在原装置基础上增加三组减压器和一台压力变送器，便可实现密度及液位的精确在线显示和监控；对旋风除尘器的旋灰器进行改造，提高除尘效率，保证洗涤工序平稳运行。

［关键词］尿基复合肥；尾气洗涤系统；吹气式液位计；液位高；密度

［中图分类号］TQ444　　［文献标志码］B　　［文章编号］2097-4566（2025）03-0041-05

Analysis of reasons and improvement measures for high liquid level in washing system of tail gas in urea-based compound fertilizer production plant

LIU Wei, ZENG Zhen

(*Hubei Dayukou Chemical Co., Ltd., Jingmen* 433009, *China*)

Abstract: The blowing type liquid level gauge in the tail gas washing tower of the urea-based compound fertilizer production device displays a liquid level of 100% for a long time, which cannot accurately display the true liquid level. To facilitate the optimization of process control, the reasons for the false high liquid level display are analyzed based on the working principle of the blowing type liquid level gauge, and improvement measures are proposed according to the characteristics of urea-based compound fertilizer production. Through analysis and summary, the main reason for the high liquid level is the limitation of the single blowing type liquid level gauge in measuring the liquid level of pressurized containers. When the pressure inside the tower is much higher than atmospheric pressure, it cannot meet the measurement requirements. When producing urea-based compound fertilizer, two sets of blowing pipelines can be used to accurately detect the density and liquid level of the liquid in the tower for pressurized containers. In addition, three sets of pressure reducers and one pressure transmitter can be added to the original device to achieve accurate online display and monitoring of density and liquid level. The ash unloader of the cyclone dust collection is revamped to improve the dust removal efficiency and ensure the smooth operation of the washing process.

Key words: urea-based compound fertilizer; washing system of tail gas; blowing type liquid level gauge; high liquid level; density

0　引言

在磷复肥生产系统中，尾气洗涤系统作为造粒、干燥、除尘、冷却尾气的回收利用系统，其运行情况直接影响液氨、钾盐等原料的利用率，尾气的排放指标，以及洗涤液的回收再利用效果。NPK复合肥生产装置洗涤系统配备有造粒（D3831、D3840）、干燥（D3835）、除尘冷却（D3882）尾气洗涤塔。在生产尿基复合肥期间，D3840、D3882尾气洗涤塔液位计长时间显示100%，不能准确显示真实液位，笔者依据装置使用的吹气式液位计的测量原理以及尿基复合肥生产的特点，就显示液位的真实性、可靠性进行分析，并提出改进措施，以便于优化工艺控制。从旋风除尘器设计、操作维护

［收稿日期］2024-01-16；　［修回日期］2024-12-10

［作者简介］刘　伟(1982-)，男，安徽淮南人，主要从事磷复肥生产管理工作。

方面，对旋风除尘器的旋灰器进行改造，提高除尘效率，保证洗涤工序平稳运行，避免洗涤系统因负荷过高，造成设备故障；避免因洗涤效率降低，造成排放尾气粉尘超标的环保责任事故。

1 吹气式液位计测量原理

吹气式液位计测量的原理：在敞口或密闭容器中插入一根吹气管，作为气源的仪表空气经过滤减压阀减压至某一恒定值（恒定压力的大小根据被测液位高度而定）后[1]，再经浮子流量计、恒流阀和吹气管路吹入被测液体中，吹气流量由浮子流量计指示，流量大小由浮子流量计上的流量调节阀控制，恒定流量的气体从插入液体的吹气管下端口逸出，鼓泡并通过液体进入塔内。当吹气管下端有微量气泡（约为 150 个/min）排出时（因气泡微量且气体流速较低，可忽略空气在吹气管中的沿程损失，这样吹气管内的气压几乎与液位静压相等），由差压变送器指示的压力值即可反映出液位高度。过滤减压阀定压设置是为了防止压力过高造成仪表空气浪费，使压力变送器产生虚假测量压力；又避免压力过低时，测量管在液位较高的情况下不能克服静压，不能在测量管底部产生气泡，造成液位计抗干扰能力减弱[2-5]。

吹气式液位计结构如图 1 所示。

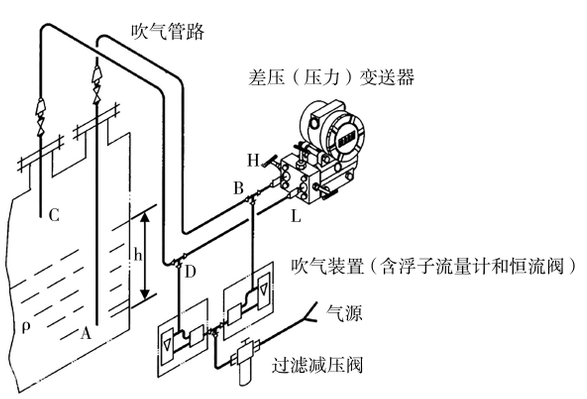


图 1 吹气式液位计结构

Fig. 1 Structure of blowing type liquid level gauge

根据吹气式液位计的测量原理，对 A、B 段流体应用流体静力学基本方程[6-7]有：

$$p'_A = p'_B。 \tag{1}$$

以塔内流体为研究对象，取高为 h 的流体段，由流体静力学基本方程有：

$$p_A = p_C + \rho g h。 \tag{2}$$

点 A 处由于表压与绝对压强之间的关系有：

$$p_A = p'_A + p_0 = p'_B + p_0。 \tag{3}$$

结合公式（1）、（2）、（3），可得出液位高度：

$$h=\frac{p'_B+p_0-p_C}{\rho g}。 \tag{4}$$

对于敞口容器，由于 $p_C=p_0$，所以有：

$$h=\frac{p'_B}{\rho g}。 \tag{5}$$

其中，p 为绝对压强，kPa；p' 为表压或真空度，kPa；p_0 为大气压强，kPa。

2 实际应用中液位显示高的原因分析及控制措施

2.1 尾气洗涤塔液位显示高的原因分析

由公式（4）可知，塔内液位高度不仅与吹气式液位计的吹气压力 p'_B 有关，还与大气压强、被测塔内压强和塔内液体密度有关。所以，液位计的准确性主要取决于塔内压强 p_C 和液体密度 ρ。装置所采用的吹气式液位计为单吹式液位计，其使用场合一般为敞口容器。但实际生产中，由于尿基复合肥生产要求低温、大风量，干燥尾气风机出口风压约为 300 kPa，造粒尾气风机出口风压约为 200 kPa，造成干燥尾气洗涤塔、造粒尾气旋流洗涤塔、除尘冷却尾气洗涤塔内为正压，也即 $p_C \gg p_0$。

所以尾气洗涤系统采用单吹式液位计，利用公式（5）进行液位测定，必定造成液位显示偏高。

另外，由于尿基复合肥生产过程中，管式反应器回收使用的洗涤液用量相比高磷 DAP 等肥料生产时过低，造成洗涤塔内液体密度 ρ 逐渐增加[8]，若液位计依旧按照初始设置的定值进行液位测定必定造成显示偏高。

2.2 实际问题分析

2.2.1 D3831 液位波动分析

造粒尾气洗涤塔 D3831 设置在地面上，为密闭型，设备尺寸为 ϕ4 000 mm × 5 185 mm（锥形底），有效容积为 25 m³，总容积 46 m³。内设 1 台洗涤液循环泵、2 台洗涤液输送泵（一备一用，用于管式反应器输送洗涤液）；生产尿基复合肥时塔内温度为 55 ℃。设置了 1 套吹气式液位测量仪表，采用蒸汽间歇吹扫吹气管以防堵塞。

实际生产过程中，管式反应器投料前后 D3831 液位变化明显。原因是投料后造粒尾气风机变频提升，造成造粒尾气洗涤塔内压强 p_C 小于大气压 p_0，仍用公式（5）计算，投料后造粒尾气洗涤塔内液位显示偏低。而根据公式（4），当造粒尾气洗涤塔内液体密度 ρ 越低时，由塔内压力变化引起的液位波动越剧烈，为 5% ~ 10%。

2.2.2 D3840、D3882 液位高异常分析

实际生产中 D3840、D3882 液位异常有以下几种情况：（1）正常生产期间，液位一直显示

100%；（2）系统全线停车后D3840、D3882液位会出现小于100%的显示；（3）D3882液位排空后补加工艺水，液位长时间显示偏低。在正常生产过程中，D3840、D3882塔内压力p_C远大于p_0；另外，根据吹气式液位计实际应用和估算，对于塔高19 230 mm的除尘、冷却尾气洗涤塔D3882，定压按最大静压值的2倍设置，考虑到测量盲区和实际最高液位按塔高2/3计，塔内液体密度按1 000～1 200 kg/m^{3}算，可知减压器的定压低限为0.256 4 MPa，定压高限为0.307 7 MPa，而现场各塔减压器后仪表压力均为0.200 0 MPa。这便造成与塔内液位高造成的静压能高一样，测量管出气口无法克服液位上的静压，在测量管底部不能产生气泡，所以液位一直显示100%。另外，当系统全线停车后，干燥尾气风机、除尘及冷却尾气风机等均停止运行，塔内压力p_C下降至p_0，此时，吹气式液位计出口处静压能下降，当液位高度为全塔高度的1/3时，定压高限为0.153 8 MPa，减压器后仪表压力设为0.200 0 MPa，便可正常测量和显示塔内液位。当D3882排空后，系统恢复开车，补加工艺水密度约为1 000 kg/m^3，塔内压力为p_0。而液位计显示与静压强成线性关系，所以D3882和D3840液位增长缓慢。

2.3　整改措施

2.3.1　消除塔内液体密度变化对液位测量的影响

当介质密度发生变化，或因温度变化而引起密度变化时，可增加两根伸入液面以下长度相差Δh的吹气管，检测介质密度，从而修正液位的数值。由公式（4），容易得出两根吹气管之间的压差为：

$$\Delta p_1=\rho g\Delta h; \tag{6}$$

$$\rho=\frac{\Delta p_1}{g\Delta h}。 \tag{7}$$

式中：Δp_1为两根吹气管线之间的压差，可通过差压变送器进行检测；Δh为两根吹气管线伸入液面以下的长度差；ρ为两根吹气管线间液体的密度，将公式（7）代入公式（4）便可精确测量塔内液位：

$$h=\frac{(p_B'+p_0-p_C)\ \Delta h}{\Delta p_1}。 \tag{8}$$

2.3.2　消除塔内压强变化对液位测量的影响

采用吹气式液位计进行容器内液位测量时[9]，当测量有压设备的液位时，需要设置两根吹气管，一根短管在设备顶部液面上方，一根长管伸入设备底部，再分别设置两路吹气装置，以便消除塔内压强变化对测量的影响。通过差压变送器检测出两根吹气管线，也即B、C之间的压差Δp_2，那么由公式（8）得出：

$$h=\frac{\Delta p_2\Delta h}{\Delta p_1}。 \tag{9}$$

综上所述，通过两组吹气管路便可准确地检测出塔内液体的密度和液位，清除塔内压强、液体密度变化对液位测定的影响。根据公式（9），当Δh增加，可减少Δp_2的测量范围，提高液位的测量精度；但当Δh增加，会增加长管出口处的压力及仪表空气用气量，造成仪表空气用量增加。塔内液位低时，短管未浸入液体内部，造成液体密度无法正常测量。另外，Δh增加也会造成密度测量波动加剧；最佳处理方式是密度测量管设置于液位测量管附近、长短管可略短于液位测量管，以便提高密度测量的准确性，Δh设为1 000 mm到2 000 mm。其次，根据公式（7）、（9），通过两台压力变送器可实现塔内密度和液位远程在线显示和监控。

3　D3835塔液位计显示不降的原因及控制措施

利用公式（7），对D3835塔进行分析，其液位不降等价于：

$$\mathrm{d}p'_B\geqslant 0。 \tag{10}$$

也即p'_B随时间的变化率不小于零。那么由式（10）可得：

$$dp'_B=d(\rho gh-p_0+p_C)=gh\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t}+\rho g\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t}\geqslant 0。 \tag{11}$$

取特殊情况进行讨论，当等号成立时，可得分离变量的微分方程[10]：

$$h\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t}+\rho\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t}=0; \tag{12}$$

$$q_V=-\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}=-S\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t}。 \tag{13}$$

其中，q_V为体积流量，m^3/h；S为塔截面积，m^2。

求解方程（12），可得其通解为：

$$\ln\rho\ (t)+\ln h\ (t)=C_0。 \tag{14}$$

去掉对数，并记$C=\pm e^{C_0}$表示任意常数，则可得通积分为[9, 11]：

$$q_V=\frac{Se^{C_0}}{\rho(t)}\frac{\mathrm{d}\rho(t)}{\mathrm{d}t}。 \tag{15}$$

通过代入初始值，计算可知q_V=3.96 m^3/h。而尿基复合肥生产时，洗涤液使用量q_V为3.0～3.8 m^3/h，使用量相比于高磷DAP等肥料量较少，造成塔内密度成指数上升至平衡，而洗涤液的用量却基本稳定，所以造成液位计显示不降。

由公式（10）、（12）可知，控制的关键在于$\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t}$，复合肥生产尾气经旋风除尘器干法除湿后，送入洗涤系统进行湿法洗涤，$\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t}$主要取决于旋风除尘

器的使用效果[12]。

旋风除尘器在复合肥行业中有着广泛的应用，为提高原料的收率、减少原料损失、改善现场环境，复合肥生产过程采用旋风除尘器+尾气洗涤的二级除尘配置，如物料干燥、冷却过程使用旋风除尘器作为第一级除尘，把引风机带出的物料回收并返回系统；针对原料输送、筛分、破碎等易产生粉尘的部位，采取收尘罩收集，在引风机负压下收集至旋风除尘器再返回系统，大大提高了收率，减轻了体力劳动，改善了操作环境，使用旋风除尘器的效果显著。但当卸料口漏风时其净化效率急剧下降。当漏风率为5%时，除尘效率由90%降到80%；漏风率达到15%时，除尘效率则下降为零。

目前，装置所配置的旋风除尘器均只在排灰口设置一级橡胶卸灰装置，现有旋风除尘器的除尘效率受橡胶卸灰器易老化、密封不严的影响，效率低下。为了解决上述技术问题，实现旋风除尘器自动锁气卸灰功能，保证旋风除尘器的严密、不漏风，同时能方便地自动卸料，先后对卸灰器进行了改造。

在橡胶卸灰器使用过程中，受橡胶老化，密封不严的问题影响，对卸灰装置进行换型（见图2）。旋风除尘器内的负压使橡胶板与卸料导管密封面贴合，物料在此积存，靠物料自身重力将橡胶板打开，完成卸料后橡胶板重新闭合，卸料导管内设置支撑点，防止橡胶板被吸瘪。

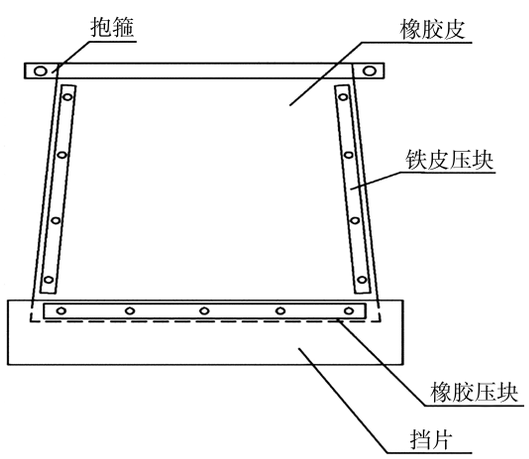


图2　换型卸灰器

Fig. 2　Type change ash unloader

其特征在于：两块梯形橡胶皮两侧缘分别通过铁皮压块密闭压紧，形成两侧封闭；排灰通道上下两端敞口，两块梯形橡胶皮的上端设有环状的抱箍，并形成圆形的口套接积灰斗，梯形橡胶皮下端分别设有柔性挡片，该柔性挡片通过橡胶压块与梯形橡胶皮连接，能够在旋风分离器的负压作用下贴合，并封闭该排灰通道下端敞口。对橡胶卸灰器进行再加工，如图3所示。

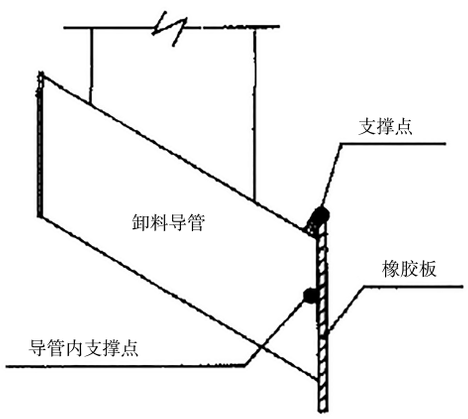
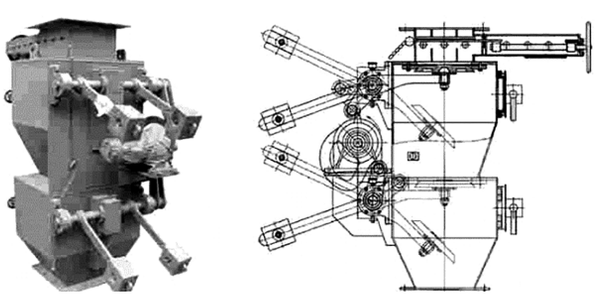


图3　再加工后的卸灰器

Fig. 3　Ash unloader after reprocessing

另外，通过查阅多方技术文件和文章，最终将锁气与卸灰异步进行，采用双层阀卸灰器。卸灰器由电机减速机转动带动上、下曲柄连杆及主轴交互摆动，从而实现上、下阀门交互开启，通过配备的杠杆、重锤系统，保证阀门可靠复位。同时，由于受重锤的作用，附着在阀板表面的肥料颗粒在形似刀口的接口处彻底粉碎，从而有效解决接口片由于颗粒物料而不能密封锁气的问题。双重锤卸灰器如图4所示。



a. 实物　　b. 剖面

图4　双重锤卸灰器

Fig. 4　Double hammer ash unloader

通过从旋风除尘器设计及操作维护等方面，对旋风除尘器存在的除尘效果差的问题进行分析，查找设计和操作维护要点，并针对使用过程中的卸灰器进行多次调速，提高除尘效率，提高原料的利用率，减少原料损失，改善现场环境；保证旋风除尘后续洗涤工序平稳运行，避免洗涤系统因负荷过高，造成设备故障；避免因旋风除尘器效率降低，造成排放尾气粉尘超标的环保责任事故。

4　总结

通过分析总结，可知造成装置洗涤系统液位高的主要原因为：单吹气式液位计在带压容器液位测量上的局限性，当塔内压力远远高于大气压力时，减压器压力高限设为0.200 0 MPa，无法满足测量要求；另外，尿基复合肥生产时，洗涤液使用量少（为3～5 m^3/h），洗涤塔内液体密度逐渐升高。对于带压容器，采用两组吹气管路便可准确检测出塔内液体的密度和液位，在原装置基础上增加三组减压器和一台压力变送器，便可实现密度及液位的精确在线显示和监控。对生产的指导：（1）使各塔液位显示准确，方便参数的控制。（2）为利于转产，可在D3882、D3840和D3835各塔之间增设一导水阀，消除系统原始开车前期需补加大量清水后逐级溢流才能开车的情况，而直接通过导水阀将液位设置为50%，自动导水；更不会因为临时更换产品造成洗涤系统长时间置换不及时而对生产造成影响。（3）保证干法除尘效果，特别是保证旋风除尘器的密封性，提高干法除尘效率，减少进入湿线的粉尘量。

［参考文献］

［1］ 宋羽.聚乙醇酸装置自动化仪表选型研究[J].广东化工,2022,49(10):163-164,184.
SONG Y. Study on Automatic Instrument Selection for Polyglycolic Acid Plant[J]. Guangdong Chemical Industry,2022,49(10):163-164,184.

［2］ 王美华,赵文达,官木诚.吹气法液位检测装置及其应用[J].自动化仪表,2004,25(3):31-34.
WANG M H,ZHAO W D,GUAN M C. Air blowing based level detecting device and its application [J]. Process Automation Instrumentation,2004,25(3):31-34.

［3］ 周建红,李自皋.吹气法在硫磺回收装置液硫池液位测量中的应用[J].石油化工自动化,2017,53(3):70-73.
ZHOU J H,LI Z G. Application of Blowing Method in Liquid Sulfur Tank Level Measurement of Sulfur Recovery Unit [J]. Automation in Petro-Chemical Industry,2017,53(3):70-73.

［4］ 鄢行俊.浅析吹气式液位计在硫磺装置液硫池上的应用[J].石油化工自动化,2014,50(2):56-58.
YAN X J. Brief Discussion on Application of Air Blowing Liquid Level Gauge in Liquid Sulfur Tank of Sulfur Installation [J]. Automation in Petro-Chemical Industry,2014,50(2):56-58.

［5］ 张妍妍.吹气法液位测量系统在化工装置中的应用[J].化工自动化及仪表,2015,42(11):1266-1268.
ZHANG Y Y. Application of Gas Blowing Liquid Level Gauge Measurement System in Chemical Plants [J]. Control and Instruments in Chemical Industry,2015,42(11):1266-1268.

［6］ 王志魁.化工原理[M].3版.北京:化学工业出版社,2004.
WANG Z K. Principles of Chemical Engineering[M]. 3rd Edition. Beijing:Chemical Industry Press, 2004.

［7］ 杨祖荣,庞瑶琳.化工单元操作　流体输送[M].北京:化学工业出版社,1985.
YANG Z R, PANG Y L. Fluid Transport in Chemical Unit Operations[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 1985.

［8］ 林义英.化工单元操作　气体吸收[M].北京:化学工业出版社,1986.
LIN Y Y. Gas Absorption in Chemical Unit Operations [M]. Beijing:Chemical Industry Press,1986.

［9］ [美]斯蒂芬·沃尔夫雷姆.MATHEMATICA全书[M].赫孝良,周义仓,译.4版.西安:西安交通大学出版社,2002.

［10］ 蔡燧林.常微分方程[M].2版.武汉:武汉大学出版社,2015.
CAI S L. Ordinary Differential Equations [M]. 2nd Edition. Wuhan:Wuhan University Press, 2015.

［11］ 陈志敏,胡成龙.高等数学[M].上海:复旦大学出版社,2006.
CHEN Z M, HU C L. Advanced Mathematics [M].Shanghai: Fudan University Press, 2006.

［12］ 焦士杰,刘春扬.复合肥旋风除尘器效率降低原因分析及对策[J].磷肥与复肥,2013,28(3):49-50.
JIAO S J, LIU C Y. Analysis of the causes and countermeasures for the efficiency reduction of the cyclone dust collector for compound fertilizer[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2013, 28(3):49-50.