

液氮喷雾冷却在复合肥装置流化床冷却器中的应用

刘 伟, 曾 贞

(湖北大峪口化工有限责任公司, 湖北 荆门 431910)

[摘要] 针对流化床冷却器在高温高湿天气时实际使用效果不理想的问题, 在总结目前各企业应对调整措施的基础上, 提出利用液氮喷雾冷却技术进行流化床冷却介质降温除湿预处理的方法, 对液氮喷雾冷却进行物料和热量衡算, 并对其能耗与经济性进行评估。在高温高湿天气生产复合肥产品时, 液氮喷雾冷却技术能够快速冷却产品, 避免流化床因物料返潮堵塞, 提高生产效率, 减少产品结块, 从而增加产品附加值, 弥补了其较高的成本投入。

[关键词] 液氮喷雾冷却; 流化床冷却器; 复合肥; 温度

[中图分类号] TQ051.5 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2025) 06-0068-04

Application of liquid nitrogen spray cooling in fluidized bed cooler of compound fertilizer plant

LIU Wei, ZENG Zhen

(Hubei Dayukou Chemical Co., Ltd., Jingmen 431910, China)

Abstract: In view of the fact that the practical use effect of the fluidized bed cooler is not ideal in weather of high temperature and humidity, based on the summary of the current adjustment measures of various enterprises, the method of using liquid nitrogen spray cooling technology to conduct the pretreatment of the cooling medium of the fluidized bed for cooling and dehumidification is proposed, the material and heat balance of the liquid nitrogen spray cooling is carried out, and its energy consumption and economy are evaluated. During the production of urea based compound fertilizer products in high temperature and humidity weather, liquid nitrogen spray cooling technology can quickly cool the products, avoid the moisture returning and blocking of the fluidized bed, improve the production efficiency, and reduce the agglomeration of products, thus increasing the added value of products and making up for its high cost input.

Key words: liquid nitrogen spray cooling; fluidized bed cooler; compound fertilizer; temperature

0 引言

磷复肥产品在进入包装工序前一般要进行冷却, 以防止其粉化、结块^[1]。流化床冷却器适用于粒度均匀的颗粒物料的直接冷却, 冷却介质与处于流化状态的料料表面充分接触、换热, 因而具有冷却速度快、物料降温均匀等特点, 广泛应用于磷酸铵、复合肥等颗粒产品的冷却。流化床冷却器冷却介质多采用自然空气, 由于物料与冷却介质混合接触, 其冷却效果受空气性质影响明显。环境温度过高时, 易造成产品温度过高无法满足工艺要求; 环境湿度过高时, 因复合肥存在临界相对湿度低和吸湿性强的特点, 在流化床内随着物料温度降低, 其临界相对湿度降低, 物料易返潮结块, 严重时甚至会软化成泥。高温高湿天气时磷复肥产品在冷却过程中容易出现粉化、结块、吸湿返潮等问题, 这些问题会严重影响产品质量和生产工艺。粉化会导致产品

细度超标, 影响施肥均匀性; 结块会导致产品流动性差, 难以包装和运输; 吸湿返潮会导致产品含水量增加, 降低肥效, 甚至变质。因此, 选择合适的冷却设备和方法对于保证磷复肥产品的质量至关重要。

为了解决高温高湿环境下流化床冷却器使用效果不佳的问题, 各企业采取了不同的调整措施, 例如改用转筒冷却器, 对流化床冷却器进行技改, 改用粉体流冷却器, 将硫酸装置与磷复肥装置联产, 利用硫酸装置的绝干尾气作为冷却介质。然而, 这些调整措施都存在一定的局限性, 例如成本高、能耗大、操作复杂等。

液氮喷雾冷却技术是一种新型冷却技术, 具有

[收稿日期] 2024-03-07; **[修回日期]** 2025-04-30

[作者简介] 刘 伟(1982-), 男, 安徽淮南人, 部门经理, 主要从事磷复肥生产与研究工作。

以下优势：(1) 快速降温，液氮的沸点为 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，具有极高的冷却能力，可以迅速降低物料温度；(2) 高效除湿，液氮蒸发过程中会吸收空气中的水蒸气，可以有效地降低空气的相对湿度，防止物料吸湿返潮；(3) 安全性高，液氮是一种无毒、无味、无腐蚀、不易燃烧的惰性气体，使用安全可靠；(4) 操作简单，液氮喷雾冷却系统操作简单，易于控制。

笔者将重点探讨液氮喷雾冷却技术在流化床冷却器中的应用，包括其原理、应用方法、能耗与经济性评估等，并展望其应用前景。

1 流化床冷却器的调整措施

针对流化床冷却器在高温高湿天气实际使用效果不理想，有些工厂甚至改回到转筒冷却的老路上^[2]。另外，部分厂对流化床冷却工艺进行了技改，如云南三环中化化肥有限公司通过在流化床冷却器进口新增翅片管换热器，利用液氮对空气降温后，再用于冷却磷酸二铵产品^[3]，用以应对高温天气流化床降温无法满足工艺要求的问题。湖北大峪口化工有限责任公司35万t/a NPK装置，通过在流化床进口增设液氮除湿机组，对湿空气进行降温除湿后用于复合肥产品冷却^[4]，用以应对因冷却空气湿度高导致的物料吸湿返潮问题。但是，在利用液氮对流化床冷却介质空气进行降温除湿时，液氮均通入管式反应器参与中和反应，冷却效果受装置生产负荷的制约。另外在空气降温过程中，液氮换热器的翅片管会严重结霜，换热效率下降。当停供液氮时，结霜快速融化极易造成流化床物料成泥。还有部分厂选择放弃使用流化床冷却器，改用粉体流冷却器^[5-6]。粉体流冷却器虽然能耗低、占地面积小、降温能力高，但对物料要求较高，操作不当容易造成换热板片堵塞、物料颗粒降温不均匀，进而导致颗粒内部冷却效果差。

也有人提出将硫酸装置与磷复肥装置联产，利用来自硫酸装置的绝干尾气来替代常温空气作为磷复肥冷却介质和干燥介质。将硫酸装置 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 绝干尾气通入空气冷却器，冷却至 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。然后送入流化床用作复合肥冷却介质。因其相对湿度基本为零，可确保复合肥在冷却过程中不会因临界相对湿度过低而返潮。经流化床后的绝干空气温度可达到 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右，再经空气加热器加热至 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右，通入干燥机对物料进行干燥，最终干燥尾气经除尘和洗涤后排放。采用硫酸尾气作为冷却介质，存在的最大问题为露点腐蚀。硫酸尾气露点腐蚀源于三

氧化硫与水蒸气相互作用生成硫酸蒸汽，如果管壁温度低于某一数值，硫酸蒸汽就会在管壁上凝结并产生腐蚀。这一温度就称为硫酸尾气的露点，露点温度主要取决于硫酸尾气中三氧化硫和水蒸气的含量。高温下运行的压力容器、管道在保温不良的部位（如人孔、接管、支吊架和膨胀节等部位容易发生壁温偏低的现象）或破损处容易出现露点腐蚀。因此在采用硫酸装置绝干尾气冷却过程中必须考虑硫酸尾气露点腐蚀的问题。

2 流化床冷却器冷却介质降温除湿技术探讨

针对高温高湿环境下，流化床出料温度过高、冷却介质易达到物料临界相对湿度造成肥料吸湿返潮等问题，须对冷却介质进行降温除湿预处理。液氮降温除湿^[3-4]作为磷复肥降温除湿的新型手段之一，其并未发挥最大的效用。主要因为间壁式换热易造成换热翅片结霜影响换热效果；其次，液氮属于危险化学品，基于安全生产管理和企业实际需求，对流化床进行液氮除湿机组改进与升级的企业不多。

对冷却介质进行降温除湿须综合考虑投资成本、操作安全性以及冷源来源，冷源应具备快速降温、对介质相对湿度影响较小等特点。工业常用的冷源如干冰、液氮等，均满足上述条件，并且可以实现混合冷却降温。特别是液氮喷雾冷却可利用液氮的超低温特性，通过喷雾方式将液氮喷洒在需要冷却的物体表面，从而实现快速、高效的冷却效果。这种技术在许多领域都有广泛的应用，如电子器件冷却、金属加工、生物医学等^[7]。在肥料生产中，液氮喷雾冷却技术也可用于肥料冷却，达到迅速降低物料温度，防止结块，提高产品质量的目的^[8]。

西安交通大学陈双涛等对开式通道内液氮喷雾的降温特性进行了全面系统的研究^[9-10]，其通过构建一个由液氮喷射低温检测设备构筑的开放性通风冷却液氮喷射实验设备，同时借助CFD软件，为其内的空气循环系统构建三维数字化模型。运用欧拉-拉格朗日技术来进行液氮喷射的仿真研究，针对液氮喷射的蒸腾以及空间的温度分布，探讨流速、颗粒大小以及喷口的数量和气流的速度与冷却效果的关系。研究结果表明：随着液氮喷射的质量流量提高，在一定的时段内，喷射的液氮量也相应增加，这将提高其蒸发的效率，从而优化冷却效果。然而，这种提升的速度也在逐渐减慢。当喷射器的数量上升，液态氮的蒸发量和比例也将提高，从而使得降温效果得以优化，同时，出口部分的温

度下降也将有所提升，然而，这种提升的程度将会因为喷射器的位置而有所不同。在喷嘴的数量达到某个临界值后，液态氮的蒸腾与冷却过程基本上没有任何干扰；随着气流速度提升，液态氮的蒸腾量和蒸腾比例会逐步下降，从而使得出口部分的平均温度更高。为了提升液态氮的蒸腾能力，并且提升其在空中的冷却效果，可以通过提升液态氮的喷射流速、缩小喷射颗粒的直径和气流的速度，还有合理地扩充喷射器的数量等方式，同时也要注意将多个喷射器的分散配置。

3 液氮喷雾冷却在流化床冷却器中应用探索

3.1 技术路线

依液氮喷雾冷却技术在开式通道内的实验研究，在流化床开式进口风道进行实验放大。因热物料颗粒遇到冷空气急剧降温易破碎，影响产品外观^[11]，因此，将液氮喷射器设置于流化床二级鼓风机处。即在流化床二级鼓风机出口，均匀布置3根液氮DN15的长管，管子上每间隔100 mm设置一个喷射器，总计约48个喷射器（见图1）。液氮经计量后与仪表空气按比例混合，通入流化床床板，与复合肥进行混合换热。液氮总流量控制在1 t/h，每个喷射器流量约为0.005 5 kg/s。在流化床床板下部设有温度、湿度检测装置，用于调控冷却介质预处理效果。

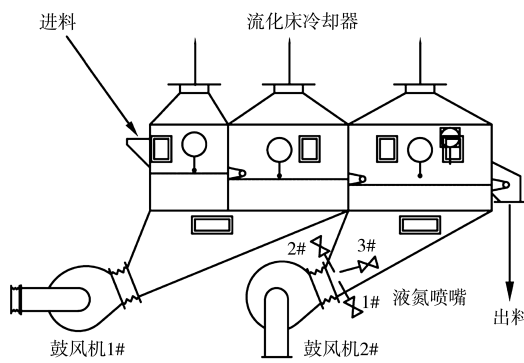


图1 液氮喷雾冷却在流化床冷却器中应用的技术路线

Fig. 1 Technical roadmap of liquid nitrogen spray cooling applied in fluidized bed cooler

3.2 液氮喷雾冷却物料和热量衡算

分别用 T_i 、 H_i 、 φ_i 、 I_i 表示冷却介质在液氮喷雾冷却前后的温度、湿度、相对湿度和焓（ $i=1$ 表示冷却前， $i=2$ 表示冷却后）。假设液氮喷雾冷却过程中无水气析出，喷雾冷却后冷却介质的流量为液氮流量与原冷却介质流量之和。

由水质量守恒有：

$$q_{m1}H_1 = q_{m2}H_2 \quad (1)$$

由湿度的定义有^[12]：

$$H_i = 0.622 \frac{\varphi_i p_{si}}{p - \varphi_i p_{si}} \quad (2)$$

其中， p_{si} 为湿空气的饱和蒸汽压。

由 Antoine 公式有：

$$\lg p_{si} = A - \frac{B}{T_i + C} \quad (3)$$

其中 A、B、C 为 Antoine 常数。若保证进入流化床的鼓风量 q_m 恒定，液氮与原冷却介质的质量流量比 n ，记为液氮比。联立（1）（2）（3）可得，经液氮喷雾冷却前后冷却介质的相对湿度比值为：

$$\frac{\varphi_2}{\varphi_1} = (1 - n) 10^{\frac{B}{(T_1+C)(T_2+C)} \frac{p - \varphi_2 p_{s2}}{p - \varphi_1 p_{s1}}} \quad (4)$$

由于 $p \gg p_{si}$ ，所以：

$$\frac{\varphi_2}{\varphi_1} \approx (1 - n) 10^{\frac{B}{(T_1+C)(T_2+C)}} \quad (5)$$

由（5）式和 Antoine 常数 B、C 可知，随着冷却介质温度 T_2 降低，其相对湿度 φ_2 逐渐升高。实际生产中可将冷却介质温降控制在8~10℃，将每吨产品液氮消耗控制在20 kg。通过引入一定比例的仪表空气，提高 n 值，降低冷却介质相对湿度。一般 n 可取0.172，此时冷却介质相对湿度下降幅度为单纯降温除湿的82.80%，可大幅度提高流化床的操作空间。确保在高温高湿条件下冷却介质的预处理效果，保证流化床的稳定运行。

液氮的汽化热为199 kJ/kg，沸点为-196℃。1 t的液氮变成气态的容量是860 m³。而且，氮的比热是1.083 kJ/(kg·℃)。1 t液氮汽化成气体，并升温至常温30℃，吸收的总热量为443 758 kJ。若每吨复合肥产品消耗液氮20 kg，流化床处理量50 t/h，根据热量守恒，可使复合肥降温约5.98℃，使其远离临界相对湿度，从而降低结块的风险。有利于产品的稳定性和储存。液氮喷雾冷却技术还可以缩短冷却时间，提高包装效率，并延长复合肥外在保质期。

4 液氮喷雾冷却技术的能耗与经济性评估

无论是液氮还是压缩氮气，其获取都需要成本。液氮的价格受到原料空气成本、生产工艺成本以及运输成本等因素影响。在一些地区，液氮的采购价格较高，加上运输过程中的损耗，使得使用液氮作为冷却介质的运行成本大幅度增加。如果采用压缩氮气，虽然避免了液氮的低温储存和运输问题，但压缩氮气的制备也需要消耗电能，其成本同样不可忽视。目前，液氮市场价约为500元/t，若采用液氮喷雾冷却产品成本价相比液氮除湿机组上

涨10元/t。但液氮冷却受生产负荷的制约和翅片严重结霜等情况,换热效率低下。

另外,由于液氮喷雾冷却系统涉及高压、低温等特殊工况,对设备的维护要求较高。氮气储存设备需要定期检查绝热性能和压力状况,喷雾装置的喷嘴等部件容易磨损,需要定期更换,这都增加了维护成本。液氮除湿机组虽无维护成本,但初始设备投入较高。

尽管液氮喷雾冷却技术在液氮成本和运行成本上较高,但在高温高湿天气复合肥产品生产时,液氮喷雾冷却技术能够快速冷却产品,避免流化床返潮堵塞,提高生产效率,减少产品结块,从而增加产品附加值,弥补了其较高的成本投入。总体而言,要实现经济效益的正向回报,需要根据具体应用场景进行细致的成本效益分析和长期规划。

5 结论与建议

液氮是一种无毒、无味、无腐蚀、不易燃烧、温度极低的冷源,并且它对于磷肥产品的质量没有任何负面作用。通过使用液氮进行喷雾冷却,可以迅速降低复合肥产品的温度,从而有效处理由于温度过高导致的复合肥产品粉化和结块等质量问题。需要注意的是,液氮喷雾冷却技术在肥料生产中的应用需要结合具体的生产工艺和设备进行设计和实施,以确保安全和冷却效果。同时,液氮的使用也需要考虑其成本、供应等因素。另外,还需考虑液氮喷雾冷却前介质的相对湿度,否则介质中夹带的水气会造成流化床内物料返潮。

总的来说,液氮喷雾冷却技术在解决高温高湿环境下流化床冷却器使用问题方面具有显著优势,在磷复肥生产中具有广阔的应用前景。未来,随着技术的不断发展和完善,液氮喷雾冷却技术将更加成熟,成本将逐渐降低,应用范围将更加广泛。液氮喷雾冷却技术可以与其他冷却技术结合应用,例如与风冷、水冷等技术结合,进一步提高冷却效果。液氮喷雾冷却系统可以实现智能化控制,根据物料特性和环境条件自动调节液氮流量和喷射参数,提高冷却效率和稳定性。液氮喷雾冷却技术不仅可以提高产品质量、降低生产成本,还可以实现节能减排,具有显著的经济效益和社会效益。

【参考文献】

[1] 张尉杰,丁德承.磷肥和磷复肥生产用冷却器的工艺计算[J].硫

磷设计与粉体工程,2011(4):15-18.

ZHANG W J, DING D C. Process Calculation for Coolers of Phosphate Fertilizer and Compound Phosphate Fertilizer Production [J]. S P & BMH Related Engineering, 2011(4): 15-18.

[2] 张明慎.流化床冷却器热量平衡计算[J].化工设计,1999(5): 16-17.

ZHANG M S. Heat Balance Calculation for Fluidized-bed Cooler [J]. Chemical Engineering Design, 1999(5): 16-17.

[3] 魏正坤.600 kt/a传统法磷酸二铵装置降低产品温度的节能技改[J].磷肥与复肥,2016,31(8):20-21.

WEI Z K. Technical improvement of energy conservation of reducing product temperature in traditional process of 600 kt/a diammonium phosphate plant[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2016,31(8):20-21.

[4] 樊帆.液氮除湿机组在磷复肥上的应用[J].化学工程与装备, 2019(4):237-238.

FAN F. Application of Liquid Ammonia Dehumidification Unit in Phosphate Compound Fertilizer[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2019(4):237-238.

[5] 吕新春,张承锋,李道岭,等.粉体流冷却器在复合肥生产中的应用[J].硫磷设计与粉体工程,2021(6):22-24.

LV X C, ZHANG C F, LI D L, et al. Application of Power Flow Cooler in Compound Fertilizer Production [J]. S P & BMH Related Engineering, 2021(6):22-24.

[6] 张勇松,王宝安,王文科.100 kt/a复合肥装置冷却系统改造[J].磷肥与复肥,2017,32(7):43-44.

ZHANG Y S, WANG B A, WANG W K. Transformation of cooling system of 100 kt/a compound fertilizer plant[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2017,32(7):43-44.

[7] 张振豪,蒋彦龙,李卓裴.液氮喷雾冷却综述[J].石油化工自动化,2014,50(2):56-58.

ZHANG Z H, JIANG Y L, LI Z P. Overview of liquid nitrogen spray cooling[J]. Petrochemical Automation, 2014,50(2):56-58.

[8] 何春云.磷铵产品冷却技术探讨[J].磷肥与复肥,2022,37(5): 14-15.

HE C Y. Discussion on cooling technology of ammonium phosphate products [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2022, 37 (5) : 14-15.

[9] 陈双涛,王鑫,曲林锋,等.开式通道内液氮喷雾的降温特性[J].西安交通大学学报,2020,54(10):144-150.

CHEN S T, WANG X, QU L F, et al. Cooling Performance of Liquid Nitrogen Spray in an Open Tunnel [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020,54(10):144-150.

[10] 胡白梅,左建国.液氮喷雾超快速冷却的数值模拟研究[J].节能,2022,41(6):40-43.

HU B M, ZUO J G. Numerical simulation study on ultra fast cooling of liquid nitrogen spray[J]. Energy Conservation, 2022,41 (6):40-43.

[11] 焦士杰.复合肥流化床冷却浅析[J].磷肥与复肥,2016,31 (11):21-22.

JIAO S J. Analysis on fluid bed cooling of compound fertilizer [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2016,31(11):21-22.

[12] 王志魁.化工原理[M].3版.北京:化学工业出版社,2005.