

600 kt/a 磷酸二铵装置粉体流冷却工艺技术改造及应用实践

杨耀辉

(云南三环中化化肥有限公司, 云南 昆明 650114)

[摘要] 针对云南三环中化化肥有限公司 600 kt/a 磷酸二铵 (DAP) 装置原两段式流化床冷却系统存在的成品温度高、能耗大、尾气粉尘含量超标问题, 采用粉体流板式换热器冷却工艺进行技术改造。改造后, DAP 成品温度由改造前的 59.1 °C 降至 43.0 °C, 温降提升 16.3 °C, 有效解决产品仓储发白、花料等质量问题; 系统用电负荷从 850 kW 降至 96 kW, 降幅达 88.7%, 年节电 5.428×10^6 kW·h, 年省电费 217.15 万元; 排放尾气颗粒物质量浓度从 453.66 mg/m³ 降至 76.64 mg/m³, 降幅达 83.1%, 满足 GB 16297—1996 标准。该技改实现了产品质量、节能效益与环保绩效的协同提升, 为同类磷铵装置绿色低碳升级提供了可复制的技术方案。

[关键词] 磷酸二铵; 粉体流冷却; 技术改造; 应用实践

[中图分类号] TQ44 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 2097-4566 (2026) 04-0035-05

Technical transformation and application practice of powder flow cooling process for 600 kt/a diammonium phosphate plant

YANG Yaohui

(Yunnan Three Circles-sinochem Fertilizer Co., Ltd., Kunming 650114, China)

Abstract: In response to the problems of high finished product temperature, high energy consumption, and excessive dust content in the tail gas of the original two-stage fluidized bed cooling system of the 600 kt/a diammonium phosphate (DAP) plant of Yunnan Three Circles-sinochem Fertilizer Co., Ltd., a powder flow plate heat exchanger cooling process is adopted for technical transformation. After the transformation, the finished product temperature of DAP is reduced from 59.1 °C before the transformation to 43.0 °C, with a temperature drop of 16.3 °C, effectively solving the quality problems such as product storage discoloration and uneven material distribution; The system power consumption is decreased from 850 kW to 96 kW, with a reduction of 88.7%, and the annual electricity savings are 5.428×10^6 kW·h, with annual electricity cost savings of 2.171 5 million RMB Yuan; The tail gas particulate emission concentration is reduced from 453.66 mg/m³ to 76.64 mg/m³, with a decrease of 83.1%, meeting the GB 16297—1996 standard. This technical transformation achieves a coordinated improvement in product quality, energy-saving benefits, and environmental performance, providing a replicable technical solution for the green and low-carbon upgrade of similar ammonium phosphate plants.

Key words: diammonium phosphate(DAP); powder flow cooling; technical transformation; application practice

0 引言

我国是全球最大的磷复肥生产国, 磷铵产能规模持续居于世界前列。然而, 行业整体面临着产能过剩、能源消耗偏高以及环境保护要求日益严格等多重挑战。在此背景下, 推动节能降碳与产品质量升级已成为行业可持续发展的核心议题。磷酸二铵 (DAP) 作为主流的高浓度磷复肥, 其最终物理性

状, 如抗结块性、仓储稳定性及颗粒外观品质, 在很大程度上由成品冷却工序的效能所决定。该过程本质上是高温颗粒体与非等温环境间复杂的非稳态传热与传质耦合过程。当前, 行业内普遍采用的冷却技术主要包括基于气固两相流直接换热的流化床冷却、转鼓冷却以及塔式冷却等。其中, 两段式流化床冷却器^[1]因结构相对简单、系统阻力较低等

收稿日期: 2025-07-08

作者简介: 杨耀辉 (1976—), 男, 云南大理人, 化工工艺工程师, 长期从事磷复肥生产管理、工艺技术及质量管理工作。

优点而被广泛应用。然而,该技术路线普遍存在冷却效率有限、尾气粉尘含量高、系统能耗大等技术瓶颈,其根源在于气固直接接触换热方式固有的局限性。

云南三环中化化肥有限公司(以下简称公司)2×600 kt/a磷酸二铵装置,作为区域磷复肥产业的重要组成部分,其原配套冷却工序是基于西班牙INCRO公司技术建设的两段式流化床冷却系统。在长期运行中,该系统暴露出成品冷却后温度偏高所带来的产品质量风险,以及系统运行能耗巨大等问题,共同构成了制约装置经济效益与环境绩效提升的关键瓶颈。

1 原工艺存在的质量与能耗问题分析

原工艺采用两段式流化床冷却器,旨在通过强制对流换热降低DAP成品温度。但运行数据表明,冷却后成品温度长期维持在55~60℃的高位区间^[2]。这一初始热状态,为后续仓储过程中一系列质量问题埋下了隐患^[3]。

从传热与传质机制角度分析,高温颗粒(55℃以上)在进入常温仓库后,会与周围环境形成显著的温度梯度与水蒸气分压梯度。这一方面导致颗粒内部因不均匀冷却产生热应力,引发颗粒表面粉化(即“发白”现象);另一方面,驱动颗粒内部孔隙中的游离水及其溶解的盐分(如DAP、磷酸一铵及铁铝镁杂质等)向温度较低的表层迁移。随着表面水分的蒸发,溶解盐分达到过饱和而结晶析出,在颗粒表面形成白色霜状物,即“白色花料”,严重损害产品外观与光泽度。上述机制共同作用,导致产品市场竞争力下降,并造成了显著的经济损失。在能耗与环保方面,原流化床冷却系统依赖大功率风机维持巨大的换热风量,是其运行电耗高的主要原因。同时,高速气流对颗粒的冲刷与夹带作用,导致系统尾气粉尘浓度居高不下。这不仅使尾气处理系统持续处于高负荷运行状态,增加了运营成本,其排放指标也已逼近《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996)的限值,存在明确的环保合规性风险。

基于对行业发展趋势与企业提质降耗迫切需求的研判,本次技术改造旨在从根源上解决原冷却系统的瓶颈问题,确立了以下核心目标:①将产品下线温度稳定控制在45℃及以下,以抑制由传质驱动的表面晶析和热应力粉化;②大幅度降低系统电耗;③有效控制尾气颗粒物排放浓度,确保长期稳定达标。

经充分的技术论证与方案比选,最终决定采用间接换热式粉体流板式冷却工艺替代原有的直接式流化床冷却工艺。该技术的核心创新在于从传热机制上实现了根本性变革,其技术路线整合了三大要素:密相粉体流的垂直重力式换热、闭式脱盐水循环以及低风量除湿补风。该路线通过固体颗粒在冷却板片间的缓慢移动,以及板片内冷却介质与颗粒料层的间接导热,实现了温和、均匀且高效的冷却过程。它彻底避免了高速气流的干扰,从而在理论上杜绝了粉尘夹带,并显著降低了风机功耗,为同时实现产品质量升级与节能降耗提供了可靠的工程解决方案。

2 600 kt/a磷酸二铵装置流化床冷却工艺分析

2.1 流化床冷却原理

流化床冷却采用浅床层气固两相流态化技术实现颗粒物料的高效冷却,其核心机制基于双膜理论与非均相流体动力学原理。高温磷酸二铵颗粒物料(粒径2~4 mm)通过进料分布器均匀布于气体分布床上(开孔率约9.8%,孔径1.5 mm)。常温空气从孔板下方送入,形成具有塞状流特征的气固两相流^[4]。当气体曳力与颗粒重力达到动态平衡时,床层膨胀率达15%~30%,形成鼓泡流态化区域。高温固体颗粒进入沸腾流化床后,呈现类流体特性,同时气流上升过程中形成尾涡使颗粒表面边界层减薄,从而强化了传热效率。颗粒与冷空气相对运动,形成均匀的流化混合状态,在经过流化床孔板且具有一定流速的常温空气向上拖曳作用下,悬浮在空气中,通过高速空气与固体颗粒之间的相对运动,高温固体颗粒的热量被常温空气带走,固体颗粒得到冷却。

2.2 600 kt/a磷酸二铵装置流化床冷却工艺简介

公司原DAP产品冷却系统采用两段式流化床冷却工艺,经抛光筛二次筛分后粒径为2~4 mm的合格粒子(温度85~95℃),用斗提机送到流化床冷却器。流化床冷却器分为两段,冷却空气用流化床一、二段风机输送,流化床一段流化速度为2.6~3.0 m/s,二段流化速度为2.3~2.6 m/s。DAP产品颗粒在流化床冷却器的孔板上被流态化,并冷却到55~60℃。冷却后的产品经产品斗提机送到包裹筒,用胺化油等进行包裹。冷却空气离开二段后返回到一段,离开一段的空气进入旋风除尘器回收夹带的粉尘,除尘器出来的热空气分别由流化床排气风机和循环风机,部分送到热风炉燃烧室和干燥机之间的管道上进行配风,剩余部分送到尾气洗涤器

除尘后排空。流化床冷却工艺流程见图1。

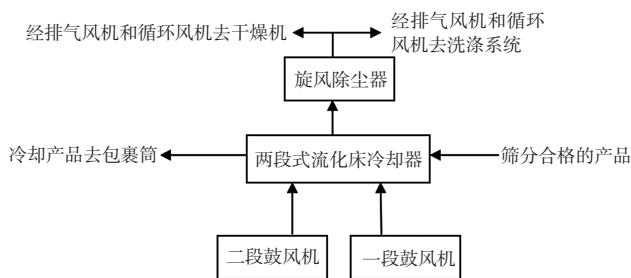


图1 流化床冷却工艺流程

Fig. 1 Cooling process of the fluidized bed

2.3 流化床冷却工艺存在问题

流化床冷却工艺采用气固两相流态化技术实现颗粒物料的冷却，具有压降低、结构简单等优点，但存在因鼓入风量大（一段鼓风机设计风量为160 000 m³/h，二段鼓风机设计风量为100 000 m³/h）导致的尾气风量大、 $\rho(\text{尘})$ 高（达300~500 mg/m³）问题。同时因需配置鼓风机、引风机等大功率设备，能耗较高。系统设计复杂，动设备多，维修费较高。流化床冷却空气冷却停留时间短，物料停留时间为1.8~3.0 min，流化床孔板易堵塞，操作控制难度大，颗粒流态化状态不稳定，导致冷却效率不高，冷却效果达不到预期。物料经流化床冷却后温度为55~65℃。因冷却后物料温度较高，在散料库堆存过程中，不易散热，物料堆顶分层、发白、潮湿，并导致包装产品出现“白色花料”，颗粒“发干、发闷、无光泽”等问题。为解决上述问题，2019年12月公司采用粉体流板式换热器冷却工艺对600 kt/a磷酸二铵二期装置进行了技术改造。

3 粉体流板式换热器冷却工艺技改

3.1 粉体流板式换热冷却原理

粉体流板式换热工艺作为一种高效的固体颗粒冷却方案，其核心运作机制建立在密相、慢速移动的粉体床层与内置冷却介质的板式传热单元之间稳定的传导与对流耦合传热原理之上^[5]。该技术从根本上革新了传统流化床依靠气固两相流直接接触的快速对流换热模式，实现了从“动态暴冷”到“静态缓冷”的工艺革新。在该系统中DAP颗粒（粒径2.0~4.0 mm，堆积密度0.90~1.05 g/cm³）在重力驱动下以密相柱塞流形态稳定通过波纹板片构成的垂直通道，确保物料停留时间分布均匀。当颗粒群在板间流动时，粉体层呈现出独特的拟流体宏观特性。波纹板片通过诱导近壁面二次环流与弱湍流效应，将气膜边界层厚度减薄至0.1~0.2 mm，显

著提升了界面对流传热系数。同时，颗粒间的高频碰撞（500~800次/s）在床层内部构建了高效的三维导热网络，有效克服了颗粒自身导热系数低的局限^[6]。该冷却技术通过重力稳流、边界层优化与内部导热网络的协同作用，实现了对DAP颗粒的均匀高效冷却，从根本上解决了传统流化床因高速气流导致的颗粒磨损与温度不均等问题。

3.2 粉体流板式换热冷却工艺简介

该工艺采用新增粉体流冷却器替代流化床冷却器^[7]。DAP产品物料颗粒以密相输送的方式，垂直自上而下通过板式换热器传热板之间的间隙通道，冷却水循环通过传热板^[8]。物料自上而下移动过程速度缓慢，以保证有足够的停留时间。冷却后的颗粒物料经输送皮带和产品斗提机输送到包裹机进行包裹。本工艺使用脱盐水作冷却水对产品进行冷却，使产品温度由85~95℃降低到40~45℃。吸收热量后的脱盐水通过脱盐水泵打入闭式板冷冷却塔降温后循环使用，闭式板冷冷却塔自带循环水泵及轴流风机，把脱盐水的热量释放到大气环境中。本工艺冷却介质不使用工艺水，采用脱盐水为传热介质，可保证冷却器水侧不产生结垢，避免了污垢热阻的产生，保障了冷却器换热效率及使用周期。粉体流板式换热器冷却工艺流程如图2所示。

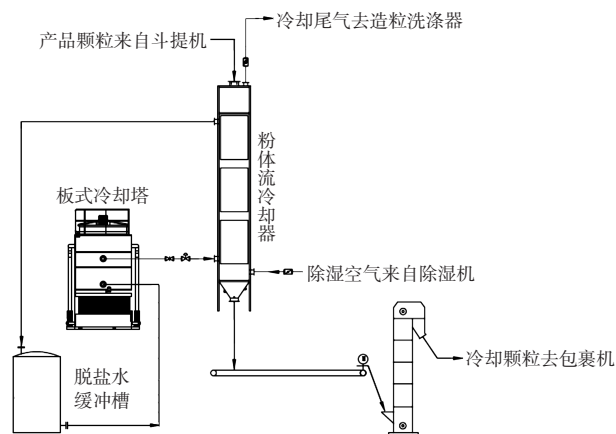


图2 粉体流板式换热器冷却工艺流程

Fig. 2 The cooling process of powder flow plate heat exchanger

4 技改后的效果

4.1 有效降低产品温度

通过对实施改造前后工艺参数监测及数据对比分析，改造后换热效果显著提升。使用流化床冷却工艺可使物料温度由93.3℃降到约59.1℃，温差34.2℃。而粉体流冷却工艺可使物料由93.5℃降温到约43.0℃，温差达50.5℃，降温效果比改造

前提升了16.3℃，相关温度数据见表1。产品温度的精准控制对磷酸二铵的最终品质至关重要。粉体流冷却工艺的深度冷却效果使物料温度接近环境温度，有效抑制了磷酸二铵颗粒内部残余水分的迁移与表面潮解倾向。自改造实施以来，产品堆存过程中长期存在的“堆顶潮料”问题得到根本性遏制。深度冷却稳定了颗粒微观结构，减少了表面粉化和晶体缺陷，从而改善了物料外观与流动性，颗粒表面因水分失衡导致的“发白、发干、发闷、无光泽”等不良外观现象获得显著改善。温度降低大幅度减缓了磷铵产品中微量杂质（如铁、铝等）诱导的缓慢分解反应及由此产生的着色剂（若添加）失效进程。改造前，产品堆存24~48h即普遍观察到“油色消褪”现象；改造后，特别是采用粉体流冷却的产品，堆存时间延长至48~72h方出现类似现象，仓储与物流弹性显著增强。

表1 改造前后磷酸二铵物料温度对比

Table 1 Comparison of diammonium phosphate material temperature before and after reforming

项目	2019年流化床冷却温度/℃		2020年粉体流冷却温度/℃	
	进料	出料	进料	出料
1月	91.5	58.8	94.1	43.1
2月	92.5	58.4	92.3	42.5
3月	94.5	60.1	94.3	41.8
4月	93.2	59.3	92.8	44.8
5月	93.5	58.5	93.5	42.4
6月	93.5	59.3	95.0	44.3
7月	93.4	58.9	91.8	41.5
8月	94.2	59.5	93.8	43.5
平均	93.3	59.1	93.5	43.0

4.2 节能效果显著

本次技改采用粉体流冷却工艺替代传统流化床冷却，其节能效果显著，核心源于传热机制的根本性变革所带来的动力设备精简与效率提升。新系统摒弃了依赖大风量、高风压的流化风机，转而采用低功率的脱盐水循环泵与冷却塔风机，从而在源头上实现了能耗的跨越式降低。如表2所示，原流化床冷却系统配套的3台大功率风机总功率为850kW，而粉体流冷却系统的总运行负荷（含脱盐水泵与冷却塔风机）仅为96kW，用电负荷净减少754kW，降幅高达88.7%。这一转变不仅降低了设备本身的运行功率，更因其高效的间接换热特性，大幅度减少了为处理尾气而配套的环保辅助设施的

能耗。以装置年稳定运行300d为基准进行测算，该工艺每年可实现节电量 5.4288×10^6 kW·h。

表2 两种冷却工艺用电负荷对比

Table 2 Comparison of electricity load of two cooling processes

流化床冷却			粉体流冷却		
设备名称	数量/台	功率/kW	设备名称	数量/台	功率/kW
第一段FBC风机	1	315	脱盐水循环泵	1	37
第二段FBC风机	1	220	除湿风机	1	18.5
FBC排气风机	1	315	产品皮带输送机	1	18.5
			闭式凉水塔	1	22

按当地0.4元/(kW·h)的综合电价计算，年节省电费支出达217.15万元。从国家能源战略与节能减排视角评估，参照国家标准《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2020)提供的等价值折算系数，此节电成果对应的节能量为标准煤667.19 t/a。这意味着，该项技术改造在为企业创造可观经济效益的同时，也为实现“双碳”目标做出了实质贡献，标志着企业在推动绿色制造与高质量发展方面取得了关键性突破^[9]。

4.3 尾气排放特性与环境协同效益分析

粉体流冷却工艺的环境增益效应，根植于其“固-液间接换热”这一核心传热机制的革新。该工艺摒弃了传统流化床依赖高气量空气作为流化动力与直接换热介质的粗放模式，转而仅需引入微量可控的除湿空气，其作用局限于维持系统必需的微负压操作条件与移除边界层扩散的微量气相水。这一根本性转变，从源头上彻底消除了高速气流对物料颗粒的机械冲刷、摩擦与夹带，从而直接抑制了颗粒物的次生排放。

如表3所定量呈现，实施技术改造后，系统热态尾气总排放量由改造前的395 389 m³/h显著降至281 580 m³/h，绝对削减量达113 809 m³/h。更具环境指标意义的是，尾气中颗粒物排放质量浓度由改

表3 改造前后尾气排放量对比

Table 3 Comparison of tail gas emissions before and after reforming

项目	热态气量/(m ³ ·h ⁻¹)	标干气量/(m ³ ·h ⁻¹)	ρ(颗粒物)/(mg·m ⁻³)
改造前	395 389	221 125	453.66
改造后	281 580	147 116	76.64
消减量	113 809	74 009	377.02

造前的 453.66 mg/m³ 急剧下降至 76.64 mg/m³, 降幅高达 83.1%, 不仅稳定满足《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996) 的法定限值, 更为企业应对未来可能趋严的环保标准预留了充足的缓冲空间, 体现了技术的前瞻性^[10]。采用源头控制策略取得了显著的效益。

(1) 大幅度削减末端治理负荷: 尾气处理系统的气量负荷降低约 28.8%, 直接导致洗涤液循环量、泵送能耗及气液夹带量大幅度减少, 有效降低了尾气洗涤系统的运行成本。

(2) 提升系统运行可靠性与稳定性: 低粉尘负荷、低湿含量的尾气特性, 显著缓解了尾洗塔内构件(如喷头、填料)的结垢与堵塞风险, 提高了废气处理单元的操作弹性与连续运行周期。

(3) 优化企业环境绩效指标: 污染物排放总量显著降低, 直接减少了企业大气污染物许可排放总量的实际占用率, 为企业的可持续生产与未来发展释放了环境容量空间。

5 结束语

通过此次工程实践验证, 新型粉体流冷却工艺^[11]可有效解决传统法磷酸二铵生产中长期存在的冷却效率低、能耗高、粉尘排放量大等共性难题。该工艺基于密相粉体流与板式间接换热耦合的核心设计, 实现了传热模式从“气-固直接快冷”向“固-液间接缓冷”转变, 在保障产品物性稳定的同时, 显著提升了系统的能源与环境绩效。

在产品质量方面, 该工艺通过均匀、可控的冷却过程, 将产品下线温度稳定控制在 40~45℃ 的较优区间, 相比原流化床工艺显著降低, 从根源上抑制了因高温导致的颗粒表面粉化、晶析、潮解及仓储结块等质量问题。在能效与排放方面, 系统因取消大功率流化风机, 用电负荷降低超过 85%, 年节电量可达数百万千瓦时; 同时, 工艺气量及其夹带的粉尘浓度大幅度下降, 从源头减轻了末端治理负荷, 实现尾气颗粒物排放质量浓度低于 100 mg/m³, 环保效益突出。在运行维护方面, 闭式脱盐水循环系统杜绝了换热面结垢风险, 保障了换热效率的长期稳定, 且系统操作简便、可靠性高, 维护工作量显著减少。

综上, 本次工程实践不仅为企业带来了直接的经济效益与环保效益, 更从技术路线上印证了高效

传热-源头减排-运行稳定三者协同的可行性, 为同类磷酸二铵装置的绿色低碳升级提供了具备工程可复制性的技术范式, 对推动磷复肥行业高质量发展具有积极的示范意义。

[参考文献]

- [1] 许熟祥. 磷酸生产中流化床冷却器操作气速范围的确定[J]. 磷肥与复肥, 1999, 14(4): 24-26, 77.
XU S X. Selection of Gas Velocity of Fluidized-bed Cooler in DAP Production[J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 1999, 14(4): 24-26, 77.
- [2] 念吉红. 降低磷酸二铵/复混肥装置产品温度的优化措施[J]. 化肥工业, 2014, 41(3): 10-11, 26.
NIAN J H. Optimization Measures for Lowering Product Temperature of Diammonium Phosphate /Compound Fertilizer Plant[J]. Chemical Fertilizer Industry, 2014, 41(3): 10-11, 26.
- [3] 何新建, 孙立田, 徐志强, 等. 400 kt/a 磷酸二铵装置成品冷却系统的节能技术改造[J]. 磷肥与复肥, 2013, 28(6): 31-33.
HE X J, SUN L T, XU Z Q, et al. Energy saving technical transformation of product cooling system in 400 kt/a DAP plant [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2013, 28(6): 31-33.
- [4] 江善襄, 方天翰, 戴元法, 等. 磷酸、磷肥和复混肥料[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999: 499.
- [5] 刘梦涛. 粉体流换热器在尿素冷却系统的应用[J]. 小氮肥, 2016, 44(10): 1-3.
- [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] 王平飞. 固体无尘冷却器在磷酸二铵生产中的应用[J]. 肥料与健康, 2020, 47(1): 54-56.
WANG P F. Application of Solid Dust-Free Cooler in Production of Diammonium Phosphate [J]. Fertilizer & Health, 2020, 47(1): 54-56.
- [8] 郭旭东. 颗粒流板式换热器在化肥行业中的应用[J]. 低碳世界, 2019, 9(6): 298-299.
- [9] 李秋萍, 程建伟, 邵国兴. 颗粒肥料冷却设备的选型[J]. 化肥工业, 2011, 38(1): 16-20.
LI Q P, CHENG J W, SHAO G X. Model Selection of Cooling Equipment for Granular Fertilizers [J]. Chemical Fertilizer Industry, 2011, 38(1): 16-20.
- [10] 陈诚. 传统法磷酸二铵装置产品冷却系统技术改造[J]. 磷肥与复肥, 2016, 31(8): 18-19.
CHEN C. Technical improvement of products cooling system in traditional process of diammonium phosphate plant [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2016, 31(8): 18-19.
- [11] 吴利彦, 刘梦涛. 粉体流换热器在轻质纯碱冷却中的应用[J]. 纯碱工业, 2015(4): 36-38.