某大型磷化工企业副产物氟硅酸高值化综合利用现状及展望

代金凤，刘　波，付宇杰，杨　宵，贺豫娟，沈映昆，李志祥

（云南云天化股份有限公司 研究院，云南 昆明　650228）

［摘　要］聚焦湿法磷酸生产过程中的副产物——氟硅酸的综合利用现状与挑战，系统梳理云南云天化股份有限公司当前以氟硅酸为原料生产氟硅酸钠、氟硅酸镁、氟硅酸铵、氟化氢铵、氟化铝及无水氟化氢等产品的技术路径及其在经济性、资源效率与环境影响方面的局限。针对现有氟、硅产品结构不合理，下游氟利用率偏低等传统路径的瓶颈和新兴技术的经济性挑战，公司布局未来氟硅酸资源综合利用向高端氟化学品合成、硅基材料协同制备及循环经济系统集成的方向转型，以推动磷–氟–硅化工产业的绿色升级与资源价值最大化。

［关键词］氟硅酸；高值化综合利用；氟化盐；氟化氢；技术路径

［中图分类号］TQ124.3　　［文献标志码］A　　［文章编号］2097-4566（2026）06-0075-06

Current status and prospects of high-value comprehensive utilization of fluorosilicic acid, a by-product from a large phosphorus chemical enterprise

DAI Jinfeng, LIU Bo, FU Yujie, YANG Xiao, HE Yujuan, SHEN Yingkun, LI Zhixiang

(*Research Institute, Yunnan Yuntianhua Co., Ltd., Kunming* 650228, *China*)

Abstract: Focusing on the comprehensive utilization status and challenges of fluorosilicic acid, a by-product generated during the production of wet-process phosphoric acid, the current technical pathways employed by Yunnan Yuntianhua Co., Ltd. for manufacturing sodium fluorosilicate, magnesium fluorosilicate, ammonium fluorosilicate, ammonium hydrogen fluoride, aluminum fluoride, and anhydrous hydrogen fluoride from fluorosilicic acid, along with their limitations in economic feasibility, resource efficiency, and environmental impact are systematically examined. Addressing bottlenecks such as the unreasonable structure of existing fluorine and silicon product, low downstream hydrogen fluorine utilization rates, as well as economic challenges posed by emerging technologies, the company has strategically planned a future transformation toward high-end fluorine chemical synthesis, silicon-based material co-production, and circular economy system integration, aiming to drive the green upgrading and resource value maximization of the phosphorus-fluorine-silicon chemical industry.

Key words: fluorosilicic acid; high-value comprehensive utilization; fluoride salts; hydrogen fluoride; technological pathways

湿法磷酸是全球磷肥及磷酸盐生产的核心中间产物，在其生产过程中，原料磷矿中含有的氟元素（通常以氟磷灰石形式存在）会以氟硅酸（H_2SiF_6）的形式大量释放并富集于酸解系统中。据统计，每生产湿法磷酸（以P_2O_5计）1 t，可副产$w(H_2SiF_6)$ 100%的氟硅酸0.06～0.07 t[1]。这一副产物若不能有效处理与利用，不仅造成氟、硅两种重要元素的资源浪费，其强酸性及潜在的环境风险还制约行业可持续发展[2]。因此，充分利用磷矿石中伴生的氟是氟化工行业的发展方向，也是磷肥行业的责任，同时为氟化工行业提供了新的、廉价的氟来源[3-4]。云南云天化股份有限公司（以下简称公司）拥有340万t/a湿法磷酸的生产能力，每年副产氟硅酸（以$w(H_2SiF_6)$ 100%计）22万～23万t，为其资源化利用提供了巨大的原料基础，也提出了严峻的技术与市场考验[5]。

收稿日期：2026-03-11

作者简介：代金凤（1995—　），女，云南昆明人，工程师，主要从事磷、氟产品研发及其资源化利用工作。

通信作者：李志祥（1969—　），男，云南昆明人，正高级工程师，主要从事磷、氟产品研发及其资源化利用工作。

1　氟硅酸传统利用技术路径及其瓶颈

目前，现有工业生产上对氟硅酸的利用主要围绕将其转化为各类氟盐或进一步加工为无水氟化氢（AHF）展开，但这些传统路径普遍面临技术经济性或资源环境效益的制约。

1.1　低值氟盐生产：市场与技术双重困境

（1）氟硅酸钠（Na_2SiF_6）：这是最传统、技术最成熟的处理方式，广泛应用于水处理、建材、搪瓷等领域[6]。然而，该产品技术门槛低、附加值有限，市场竞争激烈，经济效益不高，属于典型的“为处理而生产”的模式。

目前公司氟硅酸钠实际产量稳定在 7.7 万 t/a。其主要生产工艺为[7]：利用湿法磷酸、磷复肥副产的氟硅酸与硫酸钠进行复分解反应，之后再进行液固分离，得到氟硅酸钠产品。氟硅酸钠生产工艺流程见图 1。

反应方程式：

$$H_2SiF_6 + Na_2SO_4 = Na_2SiF_6 + H_2SO_4。\quad (1)$$

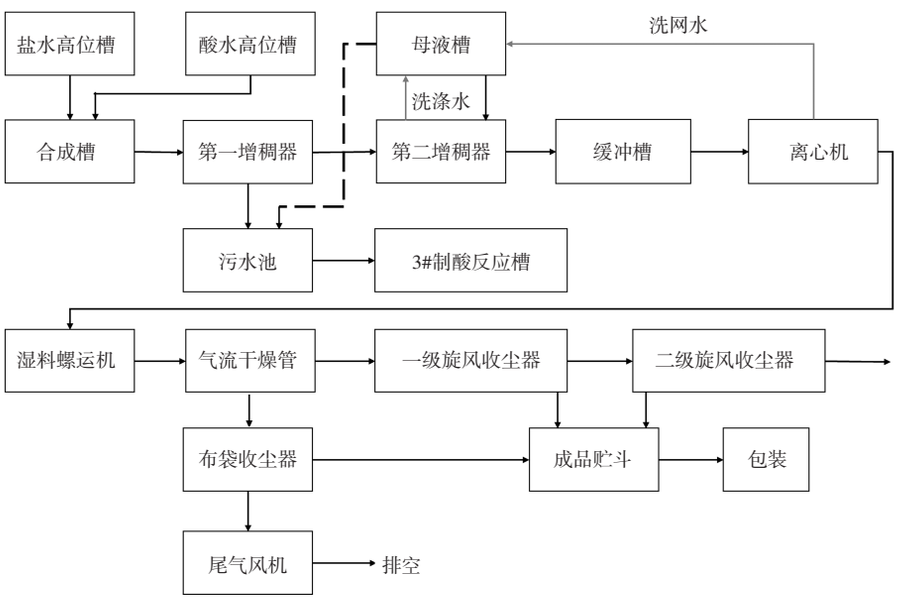

图 1　氟硅酸钠生产工艺流程

Fig. 1　Production process flow of sodium fluorosilicate

（2）氟硅酸镁（$MgSiF_6$）：主要用作混凝土增强剂、混凝土缓硬剂、橡胶胶乳凝固剂、荧光材料、木材防腐剂和纺织品防蛀剂，亦可作为新型荧光材料、低碳钢的平光剂、稳定土壤及减少活性物质流失的土壤改良剂等[8]。但市场规模相对较小，需求增长有限，其有限的消费量难以消化大规模磷酸企业产生的巨量氟硅酸。

目前，公司建设了 1 万 t/a 氟硅酸镁产能，其工艺流程主要为[9]：氟硅酸经菱苦土中和后，过滤得到氟硅酸镁滤液，氟硅酸镁清液打入真空浓缩系统，控制浓缩温度不超过 70 ℃。待溶液密度达到 1.33 ~ 1.36 g/cm^{3}后，放入冷却结晶槽冷却、结晶，然后过滤得到氟硅酸镁。滤液一部分打入结晶槽用来冷却物料，一部分返回氟硅酸镁滤液中间槽，一部分返回中和槽。过滤出来的氟硅酸镁湿产品送到气流干燥系统干燥，一般控制物料温度为 65 ~ 70 ℃，干燥后得到氟硅酸镁产品。其生产工艺流程见图 2。

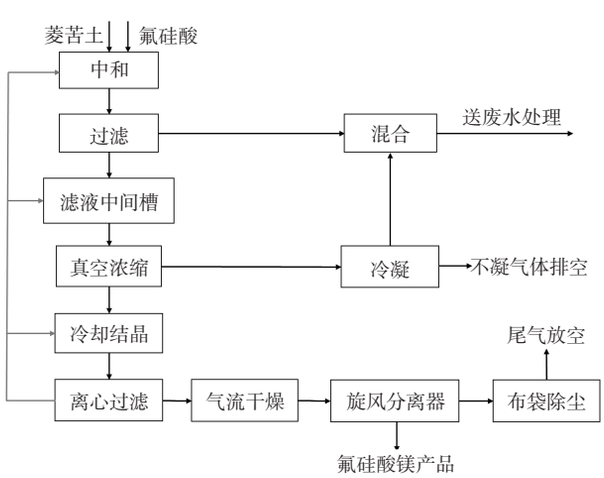

图 2　氟硅酸镁生产工艺流程

Fig. 2　Production process of magnesium fluorosilicate

（3）氟硅酸铵（$(NH_4)_2SiF_6$）：可应用于电子工业、玻璃和陶瓷制造、农业等多个领域。其主要生产工艺为：氟硅酸经澄清、计量后打入中和反应槽，在搅拌的条件下通入液氨，控制反应温

度大于82 ℃，反应终点pH为3.0～4.0，反应时间约60 min。反应完成后，经陈化约120 min，物料进入真空浓缩系统。控制真空度在0.07～0.08 MPa，出料物料密度在1.22～1.25 g/cm³。然后经冷却结晶、过滤得到氟硅酸铵半成品，再经干燥、包装后，得到氟硅酸铵产品[10]。氟硅酸铵生产工艺流程见图3。期间发生的化学反应如下：

$$H_2SiF_6 + 2NH_3 \longrightarrow (NH_4)_2SiF_6。 \quad (2)$$

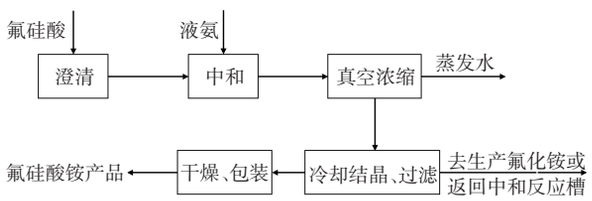

图3　氟硅酸铵生产工艺流程

Fig. 3　Production process flow of ammonium fluorosilicate

（4）氟化铵（NH_4F）：用途极为广泛，是制造氟盐、高能燃料的原料，在稀有元素和稀有金属提质过程中使用也较多。其主要生产工艺：向氟硅酸中通入液氨直至pH为9以上，中和反应后真空过滤，得到硅胶和氟化铵滤液，滤液浓缩至密度1.14 g/cm³时，经冷却结晶、过滤得到氟化铵母液和滤饼，滤饼经干燥后得到氟化铵产品[11]。氟化铵生产工艺流程见图4。

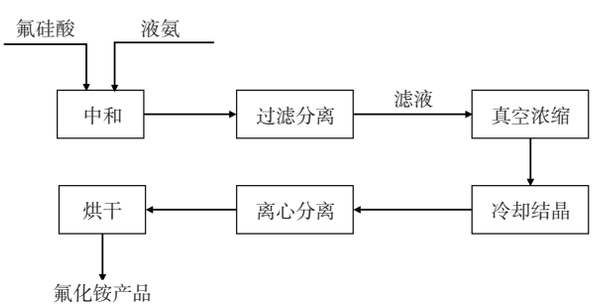

图4　氟化铵生产工艺流程

Fig. 4　Production process flow of ammonium fluoride

（5）氟化氢铵（NH_4HF_2）：可用作化学试剂、玻璃蚀刻剂、发酵工业消毒剂和防腐剂、表面处理剂，也用于陶瓷与镁合金制造、脱垢、油田砂石的酸处理，还可作为烷基化、异构化反应的催化剂组分等[12]。其主要工艺流程：氟硅酸经中和、过滤后得到氟化铵溶液；氟化铵溶液经真空浓缩至氟化铵质量分数为60%左右，再升温进行真空热分解得到氟化氢铵和氟化铵的混合料浆，向混合料浆中回用部分母液进行溶解，并在温度高于80 ℃的条件下经重结晶，以提纯氟化氢铵，离心分离后烘干得到氟化氢铵成品[13]。公司关于10 kt/a氟化氢铵联产4 kt/a氟化铵已完成投料试车，产能正在释放中。氟化氢铵生产工艺流程见图5。

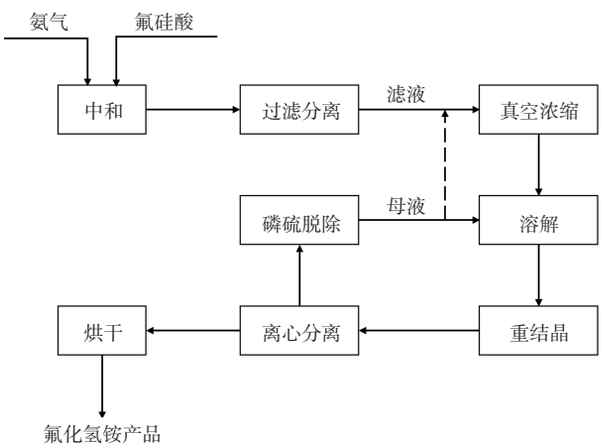

图5　氟化氢铵生产工艺流程

Fig. 5　Production process of ammonium hydrogen fluoride

1.2　氟化铝（AlF_3）生产：资源效率与环保挑战

氟化铝是电解铝工业重要的助熔剂，以氟硅酸为原料生产氟化铝（通常采用氟硅酸与氢氧化铝反应）的技术已实现产业化。公司通过合作模式，已建成1套产能5万t/a的低密度氟化铝装置。然而，该工艺存在显著缺陷：氟收率通常仅为80%左右，反应生成的硅胶（$SiO_2 \cdot nH_2O$）因成分复杂、纯化困难，大多未能得到有效利用，常作为固体废弃物堆放，不仅占用土地，其含有的微量氟等物质也存在环境淋溶风险，造成了硅资源的浪费和潜在的环境负担[14]。

公司氟化铝生产工艺[15]：将氟硅酸溶液加热至一定温度，然后在反应器中与氢氧化铝在95～105 ℃下进行反应，制成氟化铝。反应完成后，在水平带式过滤机上分离除去二氧化硅，滤液进入结晶器在95 ℃以上保温若干小时，即得氟化铝结晶，离心分离得氟化铝滤饼，经计量后由螺旋输送器送入干燥器内于170～180 ℃进行干燥，脱去全部附着水和部分结晶水后，由出口漏斗排出，再经螺旋输送器送入间接式焙烧炉，在550～570 ℃下进行煅烧，脱去残存的结晶水，氟化铝从出口排出进入流化床冷却器，冷却至50 ℃以下送去包装。

其主要生产工艺流程见图6。期间发生的化学反应主要有：

$$3H_2SiF_6 + 2Al(OH)_3 \longrightarrow Al_2(SiF_6)_3 + 6H_2O; \quad (3)$$

$$Al_2(SiF_6)_3 + (6+3n)H_2O \longrightarrow 2AlF_3 + 3SiO_2 \cdot nH_2O + 12HF; \quad (4)$$

$$3HF + Al(OH)_3 \longrightarrow AlF_3 + 3H_2O。 \quad (5)$$

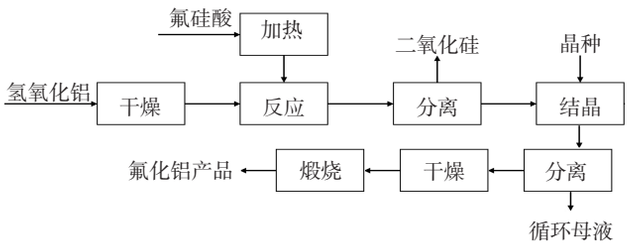

图 6 氟化铝生产工艺流程

Fig. 6 Production process of aluminum fluoride

1.3 无水氟化氢（AHF）生产：技术可行性与合作模式

AHF 是进一步生产六氟磷酸锂、含氟聚合物等高附加值产品的关键中间体，利用氟硅酸生产 AHF 对加快磷化工转型升级发展步伐，推动行业技术进步与可持续发展，促进产业向环境友好型、循环经济型演化具有重要而深远的意义。公司通过与行业领先企业合作，已建成 2 套合计 6 万 t/a 的 AHF 装置，标志着氟硅酸利用向更高价值链的迈进。

AHF 主流生产技术工艺流程如图 7 所示。经提浓后的氟硅酸与吸收干燥 HF 气体后的浓硫酸在反应器内反应，控制反应器温度约为 110 ℃。生成的 SiF_4 气体用质量分数为 16% ~ 20%的氟硅酸溶液洗涤，提浓至 40%左右，过滤除去硅胶，再返回反应器。硫酸与氟化氢混合液（又称氟磺酸）进入氟化氢解析塔，控制温度在 160 ~ 180 ℃，逸出的粗氟化氢气体经 $w(H_2SO_4)$98%的浓硫酸吸收干燥后，再经净化、精馏得到无水氟化氢。经解析后 $w(H_2SO_4)$ 为 75%的稀硫酸溶液返回湿法磷酸生产系统[16]。

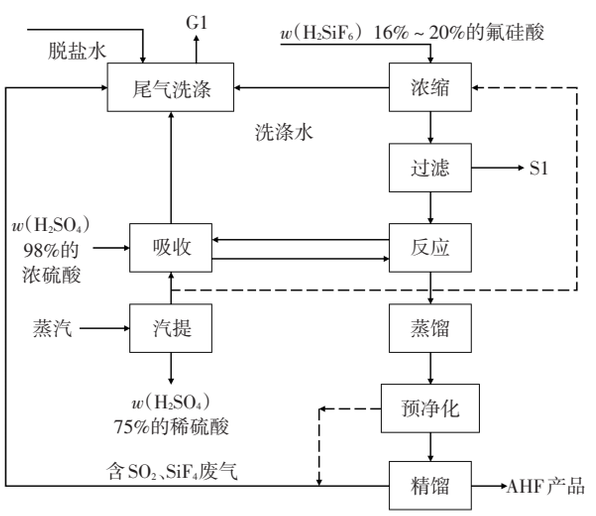

图 7 氟硅酸–硫酸法生产无水氟化氢工艺流程

Fig. 7 Process flow of producing anhydrous hydrogen fluoride by fluorosilicic acid sulfuric acid method

此路径打通了磷化工与氟化工的链接，但装置投资大，对技术水平和管理要求高，且副产硅胶未能有效利用，硅胶中残留氟较高，导致整体氟收率较低（70% ~ 74%）；产品面临来自萤石法 AHF 的市场竞争[17]。反应方程式为：

$$2H_2SO_4 + H_2SiF_6 \longrightarrow 2H_2SO_4\cdot HF + SiF_4\uparrow; \quad (6)$$

$$5SiF_4 + 2H_2O \longrightarrow 2H_2SiF_6\cdot SiF_4 + SiO_2; \quad (7)$$

$$H_2SO_4\cdot HF \longrightarrow H_2SO_4 + HF。 \quad (8)$$

2 其他技术：氨化–热分解路径的技术经济性分析

公司前期开展了“氟硅酸氨化制备氟化铵→氟化铵热分解制备氟化氢铵→氟化氢铵与浓硫酸热分解生产氢氟酸”的全链条中试及产业化技术研究。该路线的初衷是实现氟元素的定向转化与提纯，然而，深入的技术经济评估揭示了其固有瓶颈[18]。

其主要工艺为[19]：氟硅酸先与液氨反应，控制在一定的 pH 下，生成氟硅酸铵溶液，氟硅酸铵溶液经真空浓缩、冷却结晶、离心分离后即得到氟硅酸铵半成品。继续向氟硅酸铵母液中通入液氨，中和至 pH 为 8.0 ~ 8.5，经过滤后即得到氟化铵溶液。氟化铵溶液经真空浓缩、冷却结晶、分离后即得到氟化铵半成品。浓的氟化铵溶液经真空热解后得到氟化氢铵和氟化铵的混合液，经加水溶解、冷却结晶、分离后可得到氟化氢铵成品，氟化氢铵与浓硫酸热分解得到氢氟酸。其生产工艺流程见图 8。期间发生的主要化学反应有：

$$H_2SiF_6 + 2NH_3 \longrightarrow (NH_4)_2SiF_6; \quad (9)$$

$$(NH_4)_2SiF_6 + 2H_2O + 4NH_3 \longrightarrow 6NH_4F + SiO_2\downarrow; \quad (10)$$

$$2NH_4F \longrightarrow NH_4HF_2 + NH_3\uparrow; \quad (11)$$

$$2NH_4HF_2 + H_2SO_4 \longrightarrow (NH_4)_2SO_4 + 4HF。 \quad (12)$$

该工艺存在的问题如下。

（1）副产大量硫酸铵：用硫酸分解氟化氢铵步骤会生成等摩尔量的硫酸铵。硫酸铵作为一种大宗化肥，价值较低，且市场容量和价格波动可能影响整体工艺的经济性。若销售不畅，其储存与处置将成为新的问题。

（2）过程能耗高：多步的分解、热解反应均需在较高温度下进行，能耗成本显著。

（3）原料成本压力：氨的消耗以及浓硫酸的循环或补充，增加了原料费用。

综合以上因素，该技术在当前市场环境下缺乏竞争力，尤其是在与成熟的萤石法 AHF 或改进型氟硅酸直接法制 HF 技术相比时，优势不足，因此未能实现大规模产业化。

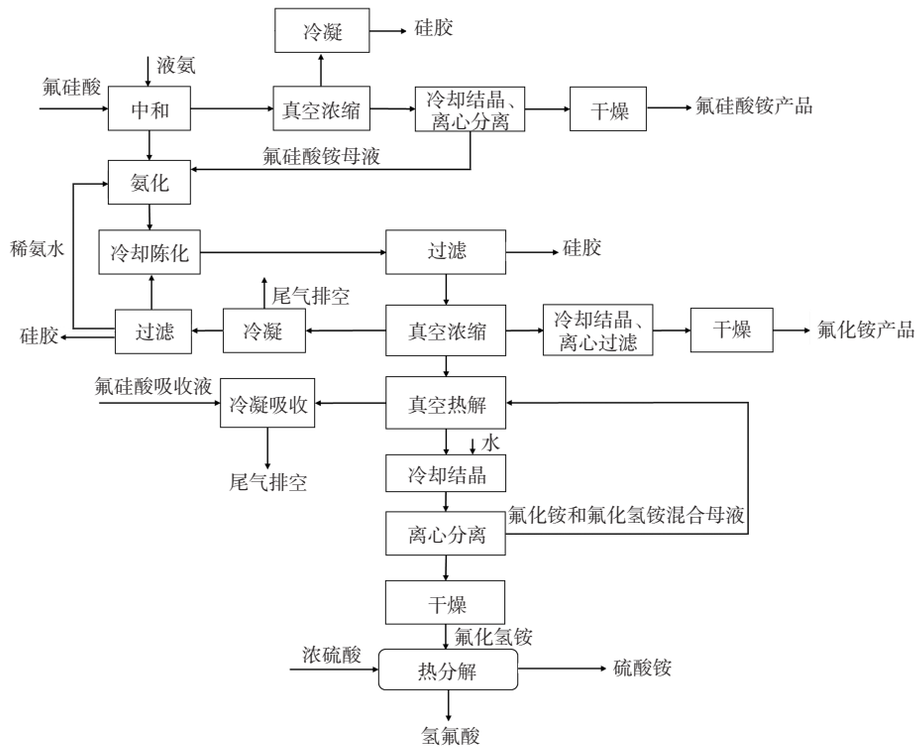

图8　氟硅酸生成氢氟酸联产氟硅酸铵、氟化铵工艺流程

Fig. 8　Process flow for generating hydrofluoric acid from fluorosilicic acid and co-producing ammonium fluorosilicate and ammonium fluoride

3　未来高值化综合利用发展趋势与展望

面对公司现有氟、硅产品结构不合理，下游氟利用率偏低等传统路径的瓶颈和新兴技术的经济性挑战，公司布局了未来氟硅酸资源综合利用朝向精细化、高端化、系统化发展。

3.1　聚焦高端含氟化学品

突破单一生产AHF或简单氟盐的思路，利用氟硅酸作为特色氟源，直接或间接合成具有更高附加值的含氟精细化学品或特种材料，如电子级氢氟酸、特种氟化盐（如电池级氟化锂、电子级氟化铵）、含氟电子化学品（六氟磷酸锂等）、含氟表面活性剂或含氟医药中间体（含氟硝基苯等）。这需要加强与精细化工、新能源、半导体等前沿领域的跨学科研发合作。

3.2　硅资源的协同回收与高值利用

彻底解决“硅胶”难题是实现全元素利用的关键。未来研究聚焦于开发高效、低成本的硅胶纯化、活化和转化技术，将其制备成具有市场价值的硅材料，如无机硅新材料行业中高分散性白炭黑（用作橡胶补强剂）、硅基气凝胶、高纯石英、碳化硅等，有机硅行业中气相二氧化硅、晶体硅等，甚至尝试向更高价值的硅基负极材料、硅基电子特气、分子筛等领域延伸。

3.3　工艺集成与循环经济系统优化

（1）过程强化与耦合。研发新型反应器、分离膜和催化工艺，提高氟、硅的转化率和收率，降低能耗物耗。探索将氟硅酸分解与磷酸生产、烟气脱硫等过程进行热集成和物料耦合。

（2）副产品内部循环。将低浓度硫酸、硫酸铵等副产物尽可能作为原料回用于生产系统（如作为湿法磷酸生产或氮硫源用于复合肥生产），或与周边产业形成生态链接，构建区域工业共生网络。

（3）绿色工艺开发。关注低排放、低能耗的新工艺，如电解法、络合分解法等，从源头改善技术经济性和环境友好性。

4　结论

湿法磷酸副产氟硅酸的综合利用，已从简单的“废物处理”阶段，步入以“资源高效转化和价值最大化”为核心的新阶段。当前主流的氟盐路线经济性差，氟化铝路线资源利用率低，而早期的氨化–热分解路线受制于成本与副产问题。未来突破的方向在于跳出传统大宗产品的竞争，通过技术创新，将氟硅酸精准转化为服务于新能源、新材料、半导体、电子信息等战略性新兴产业的高端氟、硅

产品，并实现生产过程的系统优化与循环链接。这对于提升磷化工企业的核心竞争力、保障国家战略性氟资源安全、推动行业绿色低碳发展具有深远意义。相关企业需加大研发投入，深化产学研用合作，并结合自身产业链特点，选择并培育最适合的高值化技术路径。

[参考文献]

[1] 李志祥.湿法磷酸副产氟硅酸生产氢氟酸与白炭黑的工艺技术[J].磷肥与复肥,2008,23(4):52-54.
LI Z X. Technology for production of hydrofluoric acid and white carbon black from fluosilicic acid—by-product of WPA [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2008, 23 (4): 52-54.

[2] 冯胜波,李白玉,姜菲.磷酸副产氟硅酸利用研究现状[J].浙江化工,2020,51(5):6-9.
FENG S B, LI B Y, JIANG F. Research Status of Utilization of By-product Fluosilicic Acid from Phosphoric Acid [J]. Zhejiang Chemical Industry, 2020, 51 (5): 6-9.

[3] 李维红,顾典华,张玲芳.湿法磷酸装置副产氟硅酸含硅胶问题的处理[J].磷肥与复肥,2016,31(4):30-31.
LI W H, GU D H, ZHANG L F. Solution to silicone in byproduct fluorosilicic acid of WPA plant [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2016, 31 (4): 30-31.

[4] 李朝波,刘志平,杨利春,等.湿法磷酸生产中氟硅资源循环经济利用的技术研究与实践[J].生态产业科学与磷氟工程,2025,40(6):84-88.
LI C B, LIU Z P, YANG L C, et al. Technical research and practice on the circular economy utilization of fluorine silicon resources in the production of wet-process phosphoric acid [J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2025, 40 (6): 84-88.

[5] 李志祥,明大增,钟英.磷矿伴生氟资源的综合利用[J].磷肥与复肥,2008,23(1):64-66.
LI Z X, MING D Z, ZHONG Y. Comprehensive utilization of fluorine resource associated with phosphate rock [J]. Phosphate & Compound Fertilizer,2008,23(1):64-66.

[6] NDIAYE S, TOURE A O, SAMBE F M, et al. Exploration of a Two-Step Aqueous Process for the Valorization of Sodium Fluorosilicate (Na_2SiF_6), an Intermediate Product of the Fluorosilicic Acid Conversion [J]. Waste and Biomass Valorization,2022,13:547-562.

[7] 张明军,菅玉航,常志强,等.氟硅酸制氟硅酸钠法工艺探析及优化改造[J].河南化工,2017,34(7):35-36.

[8] 黄凤鸣.真空蒸发技术在氟硅酸镁生产中的应用[J].无机盐工业,2007,39(6):54-56.
HUANG F M. Application of vacuum evaporation technique in the production of magnesium fluorosilicate [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2007, 39 (6): 54-56.

[9] 赵瑞祥.工业生产氟硅酸镁工艺探究[J].无机盐工业,2021,53(8):79-82.
ZHAO R X. Investigation on industrial production process of magnesium fluorosilicate [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2021, 53 (8): 79-82.

[10] 隋岩峰,刘松林,秦红.氟化铵溶解含氟硅渣制备氟硅酸铵的实验研究[J].无机盐工业,2020,52(1):76-78.
SUI Y F, LIU S L, QIN H. Experimental study on preparation of ammonium fluosilicate from fluorinated silica slag dissolved by ammonium fluoride [J]. Inorganic Chemicals Industry,2020, 52 (1):76-78.

[11] 黄忠,余双强,高开元,等.高杂质氟硅酸制备氟化铵联产氟化镁工艺技术研究[J].无机盐工业,2020,52(10):110-116.
HUANG Z, YU S Q, GAO K Y, et al. Study on process technology of preparing NH_4F and co-producing MgF_2 with high impurity fluosilicic acid [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2020, 52 (10): 110-116.

[12] 张梅.氟硅酸法制氟化氢铵联产优质白炭黑工艺研究[J].无机盐工业,2010,42(1):55-56.
ZHANG M. Study on technology of copreparing ammonium bifluoride and silica white by fluorosilicic acid process [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2010, 42 (1): 55-56.

[13] 曾春华,邓强,赵鹏,等.氟硅酸生产氟化氢铵产品主含量偏低的原因分析及解决措施[J].硫磷设计与粉体工程,2018(3):34-38.
ZENG C H, DENG Q, ZHAO P, et al. Cause Analysis and Countermeasures of Low Main Content Figures of Ammonium Hydrogen Difluoride from Fluosilicic Acid [J]. S P & BMH Related Engineering, 2018(3): 34-38.

[14] CHEN G X, YANG X D, QU J Y, et al. Kinetic Study on the Preparation of Aluminum Fluoride Based on Fluosilicic Acid[J]. Polish Journal of Chemical Technology, 2021, 23(3): 10-16.

[15] 邓智,龙秉文,张逸,等.磷化工副产氟硅酸湿法合成氟化铝的工艺研究[J].无机盐工业,2025,57(3):71-77.
DENG Z, LONG B W, ZHANG Y, et al. Study on wet synthesis process of aluminum fluoride from fluosilicic acidby-product of phosphorus chemical industry[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2025, 57 (3): 71-77.

[16] YANG H C, LI S J, YU H H, et al. Production of anhydrous hydrogen fluoride from fluorosilicic acid: A review[J]. Frontiers in Chemistry,2024,12:1372981.

[17] 曹骐,张志业,王辛龙.磷化工副产氟硅酸的利用及无水氟化氢的生产研究进展[J].无机盐工业,2010,42(5):1-4.
CAO Q, ZHANG Z Y, WANG X L. Utilization of fluorosilicic acid by-produced from phosphorus chemical industry and research progress in anhydrous hydrogen fluoride [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2010, 42 (5): 1-4.

[18] 杨勇,陈海洋,李煜坤,等.无水氟化氢和氟化铝工艺研发及工业应用进展[J].无机盐工业,2023,55(9):17-25.
YANG Y, CHEN H Y, LI Y K, et al. Progress of process development and industrial application for anhydrous hydrogen fluoride and aluminum fluoride [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2023, 55 (9): 17-25.

[19] 徐欢,安涛,刘烨,等.氟硅酸法制无水氟化氢铵新工艺[J].化学工程,2014,42(8):76-78.
XU H, AN T, LIU Y, et al. New process of preparing anhydrous hydrogen fluoride ammonium by fluorosilicic acid [J]. Chemical Engineering (China), 2014, 42 (8): 76-78.