◆新质生产力与产业态势◆

氟硅资源综合利用现状及发展趋势

李世江

（多氟多新材料股份有限公司，河南 焦作 454001）

［摘 要］氟基材料因其独特优异的性能广泛应用于各个领域，尤其是新能源、半导体以及同位素等高精尖行业。随着含氟产业的高速发展，高品质自然氟资源日渐枯竭，因此，低品位氟资源的高质高效综合利用意义重大。对氟资源情况进行说明，列举目前工业中常见的氟硅资源回收方法和再生工艺，同时对氟硅化学品的种类、应用领域和性能优势进行介绍，分析未来氟硅材料在新能源、半导体和同位素等高精尖领域的应用和发展方向，以及数字化支撑、产业链协同发展的必然趋势。

［关键词］氟硅资源；综合利用；氟硅材料；新能源；半导体；数字化
［中图分类号］TQ124.3；TQ127.2 ［文献标志码］A ［文章编号］2097-4566（2025）03-0001-08

Current situation and development trend of comprehensive utilization of fluorine and silicon resources

LI Shijiang

（*Do-Fluoride New Materials Co., Ltd., Jiaozuo* 454001, *China*）

Abstract: Fluorinated materials are widely used in various fields because of their unique and excellent properties, especially in advanced industries such as new energy, semiconductors and isotopes. With the rapid development of the fluorine-containing industry, high-quality natural fluorine resources are gradually depleting. Therefore, the high-quality and efficient comprehensive utilization of low-grade fluorine resources is of great significance. The current situation of fluorine and silicon resources is overviewed, the common recovery methods and regeneration processes of fluorine and silicon resources in the industry are listed, and the types, application fields and performance advantages of fluorine and silicon chemicals are introduced. It also analyzes the application and development trends of fluorosilicon materials in high-tech fields such as new energy, semiconductors and isotopes, as well as the inevitable trend of digital support and the coordinated development of the industrial chain.

Key words: fluorine and silicon resources; comprehensive utilization; fluorosilicon material; new energy; semiconductors; digitization

含氟材料因其独特的化学和物理特性，在众多领域展现出卓越的性能和广泛的应用前景。氟元素是电负性最强的元素，这使得部分氟材料具有极强的抗腐蚀能力，例如氟化乙烯丙烯共聚物（FEP）、全氟烷氧基树脂（PFA）等，这类材料在化工设备、管道以及存储容器等领域有着不可替代的地位。同时，氟材料还具有良好的电绝缘性能，例如聚四氟乙烯（PTFE），具有极低的介电常数和介电损耗，是电气和电子设备中理想的绝缘材料。此外，随着科技不断进步，氟硅材料的应用也已经深入到新能源、半导体等新兴领域，并展现出优异的性能。例如六氟磷酸锂是锂电池电解质材料中性能较好的材料；电子级氢氟酸是半导体行业中重要的刻蚀液和清洗剂；高纯四氟化硅，既是制备高纯度硅材料的前驱体，也是光纤制备过程中的重要源气体。随着新能源和半导体产业快速发展，氟硅材料的需求量也在不断增加，为其未来发展提供了广阔的市场空间。

萤石俗称氟石，是制备高性能氟材料的重要原料，也被称为“第二稀土”。我国萤石资源丰富，其中有60%以上为低品位伴生萤石，与其他金属、非金属共生关系紧密，难以高效利用[1]。萤石精矿

［收稿日期］2024-12-02

［作者简介］李世江（1950-），男，河南温县人，高级经济师，焦作多氟多实业集团有限公司党委书记、董事长，多氟多新材料股份有限公司董事长，长期从事企业管理和技术创新工作，研究氟锂硅硼等元素的相互作用及其内在规律。主持制修订多项国家、行业标准，是国际标准化组织成员，国际ISO标准氟化盐工作组召集人。

品位越低，则后续氟化工成本越高，产生的含氟废料也越多，造成氟资源浪费和环境污染问题。因此低品位萤石的高效利用是目前氟化工行业的一项重要课题。除萤石外，磷矿石中含有质量分数约 3% 的氟，在磷矿石生产磷肥过程中产生含氟硅废气，经吸收后副产氟硅酸。由于氟硅酸中氟硅键能较强，分离难度较大，因此主要应用于生产氟硅酸钠、氟化铝等产品，存在附加值低、应用范围窄、氟硅资源利用不彻底、环境污染等问题 [2]。磷肥副产氟硅酸高质高效利用，成为解决氟化工资源短缺和保障磷化工可持续发展的重大课题。多氟多新材料股份有限公司（以下简称多氟多）积极探索氟硅资源的高效利用方式，将氟硅酸转化成无水氢氟酸和白炭黑，进一步转化为氟精细化学品、氟电子化学品，实现了氟硅资源高效转化。这种创新不仅提升了产业竞争力，还为氟硅资源的综合利用提供了新的思路。针对高品质氟硅资源紧缺的问题，分析近年来低品位氟硅资源利用现状，综述氟硅资源高质高效利用方法和具体应用实例，根据目前氟硅材料在高精尖行业的应用，分析未来氟硅材料的发展趋势，为氟化工行业的发展方向提供参考。

1 氟的来源

1.1 自然氟资源

氟资源在自然界中主要来源于萤石及磷矿石。其中，萤石氟含量较高，被广泛应用于氟化工行业。但由于我国伴生萤石资源禀赋差，共伴生组分多，品位低，生产出来的萤石精矿（$w(CaF_2)$ ≤85%，$w(SiO_2)$ >2.5%）大多数只能满足冶金级要求，而化工级萤石精矿（$w(CaF_2)$ ≥93%，$w(SiO_2)$ <2.0%）产量低，达到酸级萤石质量要求的精矿（$w(CaF_2)$ ≥97%，$w(CaCO_3)$ ≤1.2%，$w(SiO_2)$ ≤1.0%）则更少 [3]。随着高质量萤石资源逐渐消耗，其储量日益减少，因此亟须开发低品位萤石高效利用工艺方法，并同时开发其他可利用氟资源，例如磷矿石中氟资源。有数据显示全球磷矿石储量为 740 亿 t，伴生氟资源量为 23.68 亿 t。我国磷矿石储量为 37 亿 t，主要分布于云南、湖北、四川、贵州等地。因其储量大，磷矿石现已成为氟的重要来源 [4]。

1.2 再生氟资源

有关专家指出，我国工业副产的氟硅资源完全可以为我国氟化工产业提供足够的氟资源 [5]。氟硅的综合利用涉及诸多行业，包括磷化工、氟化工、电子、有色金属等行业。在磷化工产业中，磷矿石中的氟元素储量约占国内氟资源总量的 87.4%。在磷肥行业和磷矿石加工过程中，氟硅元素会以氟化氢和四氟化硅的形式释放，或以氟化盐的存在形式存留在废渣中 [6]。此外，在湿法磷酸工艺中，磷矿石与硫酸反应会生成氟硅酸，氟硅酸可以进一步转化为氟化氢等氟化工产品。尽管磷矿伴生的氟资源储量丰富，但其实际利用率并不高。这主要是由于过去缺乏成熟的技术工艺，导致氟资源在磷矿加工过程中被大量浪费。然而，随着近年来氟硅酸法制取氟化氢等技术的成熟与推广，磷矿伴生氟资源的利用率正在逐步提高。

在电子行业中，作为清洗剂和刻蚀液的电子级氢氟酸是电子行业中的关键辅助材料之一。电子级氢氟酸在清洗和蚀刻等工序的反应原理是与二氧化硅反应形成氟硅酸，在经过蚀刻和清洗之后，溶液中含有大量杂质，被当作危险废物处理。随着我国电子行业高速发展，电子级氢氟酸的需求量在不断增加，同时产生的氟硅酸废液也将逐年递增。

在氟化工和有色金属行业中，各类氟化物的生产过程以及金属冶炼中的多个工序都会产生含氟废料。具体来说，洗涤过滤会产生含氟废水或废渣；氟化反应、电解反应及其他化学反应可能产生含氟副产物或其他含氟废料；分离与纯化阶段也会产生含氟废渣或废水。通过回收利用磷肥、新能源和半导体等行业产生的含氟废物，可以实现氟资源的再生和综合利用，减少环境污染，对于氟化工产业的可持续发展具有重要意义。

1.3 小结

随着氟硅资源需求不断增长，氟硅自然资源的开采和利用也面临着诸多挑战，如资源枯竭、环境污染等问题。因此，回收和综合利用工业生产过程中产生的含氟硅副产品或废料意义重大。一方面可以有效节约原材料，提高资源利用率，降低生产成本；另一方面，可以减少废弃物和废水的排放，减少环境污染，有助于实现绿色生产和可持续发展。展望未来，随着氟硅材料在各个领域的广泛应用，氟硅资源的回收和利用将越来越受到重视。通过技术研发和创新，提高回收效率和产品质量，氟硅资源回收产业有望迎来更加广阔的发展空间，为氟硅化工行业的可持续发展注入新的动力。

2 氟硅资源综合利用现状

氟硅资源的回收和综合利用呈现出多元化、高效化的趋势。同时，随着科技进步和产业发展，新的材料和应用领域不断涌现，为氟硅资源的综合利用提供了更广阔的空间。

2.1　含氟硅废料的回收及综合利用

含氟硅废料的产生途径主要有：磷肥生产、有机氟化物和无机氟化物生产、铝工业、半导体与电子工业、钢铁和有色金属冶炼、玻璃制造和其他建材生产等。本节将分别针对不同种类的含氟硅废料回收工艺以及再生的氟硅材料进行介绍。

2.1.1　四氟化硅废气

四氟化硅废气可以通过干式吸附、湿式吸收和催化氧化法进行回收。稀土精矿行业中的某工厂使用干式化学吸附法处理以粉尘、HF、SiF_4及SO_2为主的废气，其在砂滤器内设置CaO粉末作为吸附剂，经处理后含尘废气中氟质量浓度从380 mg/m³降至1 mg/m³以下，除氟率高达99%[7]。反应方程式如下：

$$CaO + 2HF = CaF_2 + H_2O; \quad (1)$$

$$SiF_4 + 2H_2O = SiO_2 + 4HF。 \quad (2)$$

这种干式吸附法适用于处理低浓度、大风量的含氟废气，不产生废水、成本低，但是吸附剂长时间使用后需要再生。对于高浓度含氟废气更适合使用湿式吸收处理。即利用氟元素在液体中分配系数不同，使氟离子以扩散形式通过气液两相的界面溶于液体或与液体成分发生化学反应，从而达到除氟的目的，除氟率高并且成本低，但存在设备腐蚀以及产生含氟废水等问题[8]。杨晓红等[9]研究采用氨–氟化铵溶液对低温钾肥生产过程中产生的四氟化硅气体进行吸收的工艺条件，在高效吸收含氟废气的同时，联产氟盐溶液并沉淀白炭黑。反应方程式如下：

$$SiF_4 + (n+2)\ H_2O + 4NH_3 = 4NH_4F + SiO_2 \cdot nH_2O \downarrow 。 \quad (3)$$

这种方法解决了传统工艺中产生含氟废硅胶价值较低的问题，避免了硅胶可能堵塞管道的风险弊端，一步法制备工业原料氟化铵和白炭黑，实现了四氟化硅废气的综合利用，但从实验研究到工业应用还有一定的距离，仍然需要综合考量。

催化氧化法则是通过催化剂的作用将含氟废气中的氟化物氧化为无害物质，该方法的优点是处理效果好、无二次污染，但是催化剂的选择和活性对处理效果有着重要影响[10]。此外，采用蓄热氧化技术（RTO）处理含氟有机废气，即通过高温氧化将有机组分转化为CO_2、H_2O和HF，同时回收热量，具有高效、节能等优点[11]。

2.1.2　氟硅酸和氟硅酸盐

磷化工以及稀土冶金等行业中，应用最广的处理含氟硅废气的方法是水吸收法。其除氟效率高，且吸收剂廉价易得，但经过水吸收后产生大量低浓度氟硅酸和氢氟酸混合液，这种含氟废液成分复杂，难以直接利用，并且腐蚀性强，对设备要求较高。程立静等[12]开发利用钾化合物处理磷肥副产低浓度氟硅酸，生产氟材料的基础原料高纯氢氟酸，涉及的反应方程式有：

$$H_2SiF_6 + K_2CO_3 = K_2SiF_6 + H_2O + CO_2 \uparrow; \quad (4)$$

$$K_2SiF_6 + 4NH_4OH + nH_2O = 2KF + 4NH_4F + SiO_2 \cdot nH_2O + 2H_2O; \quad (5)$$

$$NH_4F + KF = KHF_2 \downarrow + NH_3 \uparrow; \quad (6)$$

$$KHF_2 = KF + HF \uparrow 。 \quad (7)$$

整个工艺过程实现了氟硅资源的高效利用，中间媒介钾化合物和氨可实现闭路循环，所得产品氢氟酸可作为氟化物的基础材料用于无机氟化物和有机氟化物生产。庞枫林等[13]介绍多氟多利用磷化工副产氟硅酸间接法制备氢氟酸（氟化钠中间法），即将副产氟硅酸氨解制得氟化铵溶液并联产优质轮胎级白炭黑，再经过浓缩、熔融、热解、精馏等工艺制备合格无水氟化氢，反应方程式如下：

$$H_2SiF_6 + 2NH_4OH = (NH_4)_2SiF_6 + 2H_2O; \quad (8)$$

$$(NH_4)_2SiF_6 + 4NH_4OH + nH_2O = 6NH_4F + SiO_2 \cdot nH_2O + 2H_2O; \quad (9)$$

$$2NH_4F = NH_4HF_2 + NH_3; \quad (10)$$

$$NH_4HF_2 + NaF = NaHF_2 \downarrow + NH_4F; \quad (11)$$

$$NaHF_2 = NaF + HF \uparrow 。 \quad (12)$$

多氟多依靠技术进步和创新，围绕氟资源综合利用开发了低品位氟硅酸制备氢氟酸和高性能冰晶石联产白炭黑，以及制备高纯氟化氢联产白炭黑新工艺，拓宽了氟化物的原料来源，解决了氟化工行业面临萤石资源近乎枯竭的困境，为氟化工行业和磷肥行业发展提供了新方向，也可解决氟污染问题，是化工行业技术迭代和环保升级的新突破。

若使用碱性溶液如NaOH、$Ca(OH)_2$、Na_2CO_3和氨水等吸收含氟废气则会产生氟硅酸盐溶液[14]。刘海霞[15]介绍氟硅酸（或氟硅酸钠）–硫酸法制备氟化氢工艺，即将硫酸和氟硅酸钠常温均匀混合形成糊状混合物，置于反应温度环境中，控制搅拌转速，反应产生四氟化硅和氟化氢气体，将气体收集后再分离，制得氟化氢。反应方程式如下：

$$H_2SO_4 + Na_2SiF_6 = Na_2SO_4 + SiF_4 \uparrow + 2HF \uparrow 。 \quad (13)$$

在电子行业产生的含氟废水主要成分为氟硅酸、氢氟酸和其他杂质，其产生量也逐年递增，对于其回收和再生工艺也更加丰富。邓国平等[16]以半导体、面板行业生产过程中产生的含氟废液为原料，采用沉淀法将含氟废液中的游离氟资源化制备氟化钠，通过对反应条件和回用次数的实验探究，打通了不同成分的含氟废液资源化制备氟化钠的工

艺流程，氟利用率最高为92.17%，极大地提高了含氢氟酸废液的有效利用率。此外，明大增等[17]以低浓度的氟硅酸与硼酸为原料制备氟硼酸，通过对反应条件的控制和探究，制备氟硼酸的纯度达到40.21%，缩短了氟硼酸的制备工艺流程，也避免氟硅酸分解，减少氟损失，并能够合理利用氟资源，降低氟污染，推动了氟化工行业发展。

整体来说，低品位氟硅酸制备氢氟酸是低品位氟资源横向和纵深发展的关键一步，也是低品位氟资源综合利用的最佳选择之一，是今后氟硅酸综合利用的主要发展方向，也是低品位氟资源开发为高附加值氟化物的关键研发点，值得行业推广应用。

2.1.3 氟化盐

在电解铝工艺中，常会产生废铝电解质，其主要成分为冰晶石和氟化铝，w(F) 较高，通常在50%左右。目前关于废铝电解质的回收工艺主要是酸浸法，即含氟废渣与稀酸溶液或酸性盐溶液反应，使氟化物溶解于酸中进行回收，再生所得氟化铝和冰晶石可以继续用于电解铝，实现了氟资源的循环利用[18]。除此之外，含氟废渣还可以用于建筑行业。例如，将含氟废渣以适当比例掺入水泥生料中，可以改善生料的易烧性，提高熟料的抗压强度等物理性能[19]。也可以经过处理后用于生产建筑材料，如砖块、混凝土等。这不仅可以实现废渣的无害化处理，也节约了原材料资源。张铭杰等[20]提出一种磷石膏回收F及无害化处理方法，具体包括磷石膏与硫酸混合煅烧，并用烧碱回收逸出氟，热处理后的物料制备为无害化磷石膏。这种方法在回收氟资源的同时，实现了氟污染物减量化，为后续无害化处理提供了条件。

在使用磷肥工业副产氟硅酸制备无水氟化氢过程中也会产含氟硅渣。这种含氟硅渣活性较差，不能作为橡胶或其他领域的填料，因含氟不可长期堆放。李世江等[21]提出一种含氟硅渣制备白炭黑的方法，硅渣与氨水反应后过滤、干燥得到无水硅渣，再经造孔处理后得到高比表面积的白炭黑。涉及的反应方程式有：

$$H_2SiF_6 + 2NH_4OH = (NH_4)_2SiF_6 + 2H_2O; \quad (14)$$

$$(NH_4)_2SiF_6 + 4NH_4OH = SiO_2 + 6NH_4F + 2H_2O。 \quad (15)$$

该工艺制备流程简单，易操作，且效率高，废水少，具有一定的工业化潜力。

2.2 氟硅材料的应用

氟硅材料广泛应用于国防军工、航空航天、电子信息、新能源等战略性新兴产业的高新技术领域，是综合性能优异的化工新材料。氟硅材料的发展与生命、材料、人类健康、国家安全、国民安全、国民经济密切相关。

2.2.1 传统氟硅材料

1992年全国计划会议1号参阅文件《氟化盐发展策略》提出利用磷肥副产氟资源生产冰晶石、氟化铝，开启了氟硅资源综合利用新篇章。但限于当时技术落后，所得再生产品品质较差，利用率低。多氟多始终把“磷肥副产氟硅资源高质利用”作为公司发展的1号工程，推动磷氟行业向高端化、绿色化发展。

氟硅的第一次分家，产生了冰晶石、氟化铝和白炭黑。冰晶石在电解铝工业中作为氧化铝的溶剂，专门用于精炼铝，有助于确保铝的纯净度，提高产品质量。同时，冰晶石良好的化学稳定性和热稳定性使其被用作制造排污管道的关键材料，以解决润滑问题，提高管道的使用寿命和安全性。另外，冰晶石还被用作橡胶、砂轮的耐磨填充剂，搪瓷乳白剂，玻璃遮光剂以及金属熔剂等。

氟化铝主要用作铝电解的助熔剂，降低电解温度，减少电解液挥发损失，实现节能减排。另外，氟化铝也可用于制造光学透镜等光学材料，以及作为非铁金属的熔剂、焊接液、有机合成的催化剂等。

白炭黑，尤其是高品质白炭黑具有粒径小、比表面积大、表面能大、吸附能力强、纯度高、稳定性高等优异性能，在橡胶、涂料、塑料、造纸、陶瓷、油墨、化妆品以及医药领域都有广泛应用。

随着科技进步和产业升级，类似氟化铝、冰晶石等无机氟化盐的应用领域不断拓展，市场需求持续增加。常见的应用领域有：用于制造光学玻璃、搪瓷、萤光粉、塑料、油漆、杀虫剂、医药等的氟化钙；用于防腐剂、乳浊剂、助熔剂的氟硅酸钠；用于制造特种玻璃、搪瓷釉料、焊接助熔剂，以及锂源材料的氟化锂等。

无机氟化盐市场竞争激烈，企业间在产品质量、技术创新、市场营销等方面展开竞争。未来，无机氟化盐行业将更加注重技术创新和绿色发展。通过研发新产品、优化生产工艺、提高资源利用效率等措施，推动行业持续健康发展。

2.2.2 氟基新材料

2.2.2.1 电子级氢氟酸

为实现低品位氟硅资源的高质高效利用，多氟多经过不断的技术开发和工艺创新，实现了氟硅的二次分家，从低品位氟硅资源制备氟化工基础原料

氢氟酸，以及无水氟化氢，甚至半导体行业不可或缺的电子级氢氟酸，完成了再生氟化物从低价值向高精尖的转变。

在半导体制程中，有50多个环节需要使用高纯度电子级氟化氢，电子级氟化氢的纯度和洁净度对集成电路的成品率、电性能、可靠性都有着十分重要的影响。根据用途不同，电子级氢氟酸分为EL、UP、UPS、UPSS、UPSSS 5个等级。据不完全统计，我国电子级氢氟酸生产厂家仅有11家，能够达到UPSS级别的企业只有四五家，多氟多的电子级氢氟酸达到UPSSS级，已经进入国际一流水平。

BOE（Buffer Oxide Etch）刻蚀液是一种用于集成电路制造中氧化膜刻蚀的化学品，由电子级氢氟酸、电子级氟化铵与超纯水混合而成。它主要用于蚀刻SiO_2薄膜，能够实现微米级甚至纳米级的图案转移，是制造集成电路和平板显示器等微电子设备的关键原料之一。此外，BOE刻蚀液还广泛应用于光电子器件、传感器以及太阳能电池等领域，是现代电子工业不可或缺的重要材料。

2.2.2.2　含氟精细化学品

六氟磷酸锂（$LiPF_6$）、双氟磺酰亚胺锂（LiFSI）、氟代碳酸乙烯酯（FEC）等含氟精细化学品是锂离子电池电解液中的重要添加剂和隔膜材料，对于提高电池的循环性能和安全性，以及提供优异的机械强度、化学稳定性和热稳定性具有重要作用（见图1）。

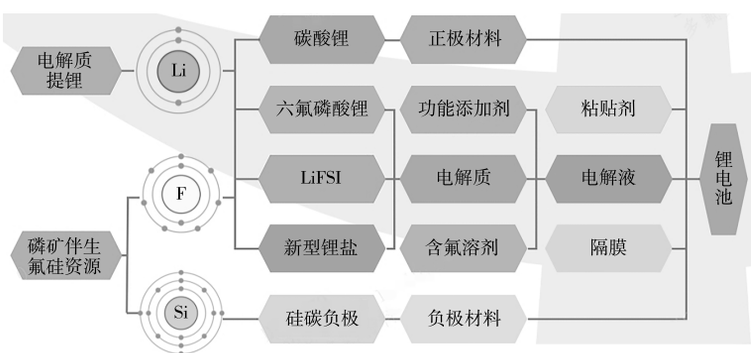

图1　氟硅材料在新能源领域的应用

Fig. 1　Application of fluorosilicon materials in the field of new energy field

$LiPF_6$主要应用于锂离子电池的电解液中，是新能源汽车、储能系统等领域的关键材料。多氟多自主研发的六氟磷酸锂产销量全球第一，打破了国外垄断，售价由原来的每吨100多万元降至10万元，为我国新能源行业的发展提供了重要技术保障和产业支撑。

LiFSI作为锂离子电池电解液添加剂，具有高导电率、化学稳定和良好的热稳定性，能提升电池容量和性能。目前，LiFSI出货量增长势头强劲，随着锂离子电池市场的扩大和技术进步，其应用前景广阔，尤其在动力电池、储能电池等领域。

FEC也是锂离子电池电解液的重要添加剂，它能显著提升电池性能，如提高安全性、增加锂离子迁移速率、有利于拓宽电池的使用温度范围、提高电解液的分解电压和电池的循环稳定性等。随着新能源领域的不断发展，FEC需求将快速增长，并在电子储能设备中广泛应用。

氟硼互动，助力高精尖科技发展。三氟化硼可用作半导体材料、火箭高能燃料、有机合成催化剂、硼同位素分离原料、化学合成原料、金属合金防氧化剂、环氧树脂固化剂等。在同位素方面，^{10}B在核工业、国防和医药等领域应用，且具有不可替代性，我国^{10}B市场需求呈现快速增长趋势。同时，^{11}B同位素作为集成电路的半导体掺杂所生产的集成电路芯片具有极强的抗辐射和抗单粒子效应能力，是半导体制造过程中的消耗性材料。但三氟化硼（^{11}B）生产技术壁垒高、产能低，我国市场需求主要依赖进口，且单价高。多氟多硼同位素生产技术打破了国外技术壁垒，填补了国内空白，产品各项指标全部符合用户需求，得到原子能工业、半导体产业、大健康领域的认可。

2.2.2.3　含氟聚合物

常见的含氟聚合物，如聚偏氟乙烯（PVDF）、聚四氟乙烯（PTFE）、聚全氟烷氧基（PFA）等，具有优异的耐化学腐蚀性、耐热性和电绝缘性，广泛应用于化工、电子、航空等领域。

PVDF广泛应用于能源、建筑、化工、电子等领域，具有出色的耐化学腐蚀性、高机械强度、良

好的热稳定性和较低的介电常数。在锂电池中，PVDF 可用作黏结剂、隔膜涂层、电极改性剂、阻燃剂等，还可用于制备固态电解质、形成导电薄膜、作为隔膜黏合剂等，在新能源产业具有广阔的应用前景。

PTFE 因具有优良的耐热性、耐化学腐蚀性、电绝缘性和不粘性，被广泛应用于各个领域。例如，不粘锅的表面涂层、冲锋衣等户外服装的防水透湿层、化工设备的防腐衬里、5G 领域的高频覆铜板、射频线缆和基站天线滤波器等。

PFA 是 PTFE 的改性材料，其保持了 PTFE 的优异物理、化学性能，同时改善了冷流动性和熔融黏度。其主要用于半导体制造装置内的软管、接头、阀门、过滤器等零部件，以及需要耐高温和强腐蚀性的场合。

2.2.3 硅基材料

多氟多通过氟硅的相互作用，完成了氟硅资源的第三次分家，开发了更高端的氟硅材料产品，包括四氟化硅以及硅烷等，为半导体工业奠定了坚实的基础（见图 2）。



图 2 氟硅材料在半导体行业的应用

Fig. 2 Application of fluorosilicon materials in the semiconductor field

四氟化硅是电子和半导体行业中重要的电子特气，是制造硅基半导体器件的蚀刻剂、掺杂剂及外延沉积扩散硅源。同时，四氟化硅也是太阳能电池元件、光纤、高纯石英玻璃等制造过程中的关键原料。此外，它还被用于生产水泥硬化剂、氟硅酸及氟化铅等。随着科技进步，四氟化硅在光敏剂产业中的应用也日益广泛。

硅烷在电子领域是高纯度半导体材料，用于制造晶体管、集成电路等。在塑料和橡胶工业中，则作为增强剂和填料，可提高材料的强度和耐热性。此外，硅烷还用于涂料中，能提高涂料的附着力、耐水性和耐磨性。同时，硅烷在玻璃制造、混凝土表面处理等领域也有应用，能提高透明度和耐久性等性能。

2.2.4 小结

整体来说，我国含氟材料产业具有特定用途、技术密集、附加值高等特点，但同时也存在生产技术综合水平较低、规模较小、集中度低、产品结构简单、高端产品缺乏等问题。因此，我国需要加大研发力度，提高生产技术水平和产品质量，以满足市场需求并推动产业升级。

3 氟硅材料未来发展趋势

随着科技进步和产业发展，氟硅材料的应用领域将不断拓宽，涉及更多高新技术领域和战略性新兴产业，市场需求也将推动其性能不断提升，以满足更多高端应用。同时全球化发展和国际竞争不断加剧，推动国内氟硅材料企业加强研发和技术创新，提高产品的质量和竞争力，以应对国际市场的挑战。此外，在信息时代，数字化革命浪潮将推动氟硅材料行业的智能化转型，提高生产效率和产品质量的同时完成产业链上下游企业信息共享、协同创新，实现资源优化配置和协同发展。

3.1 氟硅与新能源

新经济时代最重要的是新能源产业。新能源产业发展日新月异，能源变革正在全球酝酿，无论是能源的取得方式，还是能源的储存方式，以至于能源的消耗方式都在发生巨大变化。多氟多将氟锂结合，在新能源领域大放异彩：自主研发的高纯晶体六氟磷酸锂关键制备技术及产业化项目，荣获国家科学技术进步奖二等奖；从电解质向新能源电池延伸，构成制能、节能、储能三位一体的智慧能源体系，相继打造“以氟为基、制能依氢、行之有锂、坐地为钠”的新能源多元化体系，把“氟”融入我国新能源“弯道超车”的新赛道。

从氟化工出发，打造向新能源进军的全产业链，这是一条以夯实产业基础、立足核心关键技术、贵在打造产业联盟平台、具有新时代思维的新能源全产业链。未来，氟硅材料将不断创新，提升

性能，降低成本，满足新能源行业对高性能、环保型材料的需求。同时，产业链协同和绿色转型也将成为氟硅在新能源行业发展的重要方向，推动氟硅材料行业的可持续发展。

3.2　氟硅与半导体

人类社会从碳基文明向硅基文明转变的过程，也是能源取得方式从燃烧碳转变为以硅为基础并通过半导体电子跃迁取得能量的过程。氟硅材料作为半导体制造中的重要材料之一，半导体行业的技术创新不断推动氟硅材料的发展。新的制备工艺和改性技术使得氟硅材料的性能得到进一步提升，从而满足更高端半导体器件的制造需求。同时，国产替代进程正在加速推进。国内企业在氟硅材料的研发和生产方面取得了显著进展，为半导体行业的自主可控提供了有力保障。笔者提出氟硅相互作用构成半导体工业基础之一，氟硅协同，助力“中国芯”，打造电子级化学品“南北双基地”，高端硅烷系列产品在国际舞台绽放精彩，为我国半导体工业“强链”贡献力量。

3.3　氟硅与同位素

氟作为同位素分离过程中的重要媒介或载体，在医疗、环保、核能等领域都有广泛的应用。长期以来，同位素产品主要依赖进口，这制约了我国相关行业的长期稳定发展。在国家政策的推动下，我国同位素国产化取得了显著进展[22]。中核集团中国核动力研究设计院打造的医用同位素及药物国家工程研究中心，已具备多种医用同位素生产销售资质，并布局掌握了多种堆产医用同位素生产核心技术。秦山核电基地则成功投运了国内首个商用堆在线辐照生产同位素装置，实现了镥–177医用同位素的批量化生产。

在探索同位素奥秘的道路上，多氟多提出氟硼互助，打破硼同位素国外技术壁垒，填补国内空白，探索稳定硼同位素和放射性技术融合。同位素产品的国产化为我国原子能工业、医疗健康和半导体等战略性新兴产业的发展提供了关键材料支撑，未来还要实现硅、锂等其他同位素的产业化，以氟为基，聚焦主业，依托氟化工技术和产业优势，实现相关元素耦合发展。

3.4　数字化支撑，产业链协同

在大力推进中国式现代化的背景下，数字化不仅仅是技术手段的升级，更是生产方式和组织模式的深刻变革，使得生产过程中的信息获取、处理和应用更加高效，从而实现生产过程的智能化和自动化，推动生产力水平的全面提升。数字化转型不是“选择题”，而是“生存题”。多氟多作为氟化工行业数字化转型的先行者，规划了“1+1+N”的顶层架构，即一个覆盖全厂区、全生产过程的5G工业网络环境，一个专注于氟材料的工业互联网平台，N个数字化具体应用场景，打造“5G+氟化工”智能工厂。数智化转型的深入推进，将推动生产力水平实现质的飞跃，为中国式现代化注入强劲动力，助力中国经济实现高质量发展，迈向更加繁荣的未来。

未来的竞争不是单个产品的竞争，也不仅仅是企业之间的竞争，而是平台的竞争，产业链整合能力的竞争、生态系统建设能力的竞争，这是经济社会发展的特殊规律。无序竞争只会加剧行业不平衡，唯有构建可持续发展的产业生态，方能确保行业的长远发展。产业链协同不仅是企业发展的选择题，更是关乎生存与发展的必答题。一个良性发展的产业链，其各个环节都应获得合理的利润，这样才能为企业的创新活动提供坚实的支撑。只有当整个产业链形成利益共享、风险共担的紧密合作机制，才能激发各环节的积极性和创造力，共同推动产业的升级和发展。

4　结束语

综上所述，面对高品质氟资源的日益匮乏，以及因低品位氟硅副产和废料产量逐年递增而造成日益严重的环境污染问题，氟硅资源的回收和综合利用已成为行业发展的必然趋势。为了提高氟硅资源回收和综合利用效率，制备高品质氟硅材料，保障氟化工可持续发展，推动我国氟化工及相关行业向高效化、多元化、高端化、绿色化方向前进，提出以下几点建议：

（1）低品位氟硅资源的高质高效回收。低品位氟硅资源回收工艺需根据实际情况进行选择和调整，关键在于技术创新、工艺优化以及环保升级，提升效率与产品质量，实现资源的最大化利用，推动氟硅资源回收向绿色、高效、可持续方向发展。

（2）高端氟硅材料的产业结构优化。紧跟行业动态，加大氟硅新材料在新能源和半导体行业的研发投入，开发更多高性能、高可靠性的氟硅产品，提升行业竞争力，推动产业向高端化、精细化方向发展。

（3）氟化工的数字化转型和产业链协同。通过引入大数据、云计算、物联网等先进技术，氟化工企业能够实现生产过程的智能化、自动化和精细化

管理，提高生产效率，降低运营成本。同时，产业链上下游企业之间紧密协同，实现资源的优化配置和共享，促进产业链的整体升级。

未来，氟硅资源综合利用和氟化工行业的发展需更加注重技术创新、绿色发展、数字化转型和产业链协同。政府、企业和科研机构应携手合作，加大研发投入，推动技术创新和成果转化，加强产业链上下游企业的协同合作，关注国际氟硅行业的发展趋势，共同应对市场变化和挑战，提升我国氟硅行业的整体竞争力。通过持续的努力和创新，氟硅资源综合利用和氟化工行业将迎来更加广阔的发展前景，为实现经济社会的可持续发展做出更大贡献。

[参考文献]

[1] 黄丽娟,温建,岳丽琴,等.福建某萤石矿选矿试验研究[J].福建冶金,2024,53(2):11-14.
HUANG L J, WEN J, YUE L Q, et al. Beneficiation Experimental Study of a Fluorite Mine in Fujian[J]. Fujian Metallurgy,2024,53(2):11-14.

[2] 王建萍.低品位氟资源制备无水氟化氢工艺研究进展[J].河南化工,2022,39(7):15-18.
WANG J P. Research Progress in Preparation of Anhydrous Hydrogen Fluoride from Low-Grade Fluorine Resources[J]. Henan Chemical Industry,2022,39(7):15-18.

[3] 刘铭,阳华玲,王长福,等.低品位萤石精矿深度提质降杂制备酸级萤石试验研究[J].中国非金属矿工业导刊,2023(6):68-72.
LIU M, YANG H L, WANG C F, et al. Experimental Study on Preparation of Acid Grade Fluorite from Low Grade Fluorite Concentrate by Deep Quality Improvement and Impurity Reduction[J]. China Non-metallic Minerals Industry, 2023(6): 68-72.

[4] 杜璐杉,李艳平.磷肥副产氟硅资源综合利用现状及发展思路[J].磷肥与复肥,2013,28(1):66-69.
DU L S, LI Y P. Comprehensive utilization status and development thinking of the by products fluorine and silicon of phosphate fertilizer production [J]. Phosphate & Compound Fertilizer,2013,28(1):66-69.

[5] 佚名.重视磷肥生产中氟、硅资源的综合利用[J].化工矿物与加工,2008,37(12):38-39.

[6] 孙督翁.我国磷化工中氟的去向[J].云南化工,2024,51(S1):75-82.
SUN D W. The Fate of Fluorine in China's Phosphorus Chemical Industry[J]. Yunnan Chemical Technology, 2024, 51(S1):75-82.

[7] 欧健,李天祥,隋岩峰,等.工业含氟废气处理及资源回收的概述[J].无机盐工业,2021,53(5):39-46.
OU J, LI T X, SUI Y F, et al. Review of treatment and resource recovery of industrial fluoride-containing waste gas[J]. Inorganic Chemicals Industry,2021,53(5):39-46.

[8] 李培成.浅析我国氟化工行业含氟废弃物资源化处置研究进展[J].有机氟工业,2023(2):57-60.
LI P C. Research Progress in the Resource Disposal of Fluorine-containing Waste in the Fluorine Chemical Industry[J]. Organo-Fluorine Industry,2023(2):57-60.

[9] 管小伟,张刚,朱杰.一种高温含氟VOCs废气处理装置:CN220861099[P].2024-04-30.

[10] 徐冰,唐毅成,黄理明,等.一种有效分解含氟烷烃类物质的方法:CN117732241[P].2024-03-22.

[11] 杨晓红,薛希仕,王霞.氨-氟化铵吸收含氟废气工艺条件研究[J].山东化工,2015,44(8):173-176.
YANG X H, XUE X S, WANG X. The Research on the Absortion Condition of Fluoride-containing Waste Gas by Ammona and Ammonium Fluoride [J]. Shandong Chemical Industry,2015,44(8):173-176.

[12] 程立静,刘海霞,张小霞.磷肥副产氟硅酸制备高纯氢氟酸新工艺研究[J].河南化工,2019,36(8):29-31.

[13] 庞枫林,崔虎斌.氟硅酸制氢氟酸工艺研究[J].磷肥与复肥,2020,35(12):29-30.
PANG F L, CUI H B. Study on hydrofluoric acid production from fluosilicic acid [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2020,35(12):29-30.

[14] 张慧芳,张冬冬,宁平,等.含氟废气的治理及资源化利用研究进展[J].磷肥与复肥,2018,33(11):29-34.
ZHANG H F, ZHANG D D, NING P, et al. Research progress of treatment and utilization of waste gas containing fluorine[J]. Phosphate & Compound Fertilizer,2018,33(11):29-34.

[15] 刘海霞.氟硅酸综合利用工艺技术研究进展[J].无机盐工业,2017,49(3):9-13.
LIU H X. Research progress in technology of comprehensive utilization of fluosilicic acid[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2017,49(3):9-13.

[16] 邓国平,伍勇,段利中,等.含氟废液资源化制备氟化钠的工艺研究[J].无机盐工业,2024,56(6):133-138.
DENG G P, WU Y, DUAN L Z, et al. Research on process of preparing sodium fluoride from waste liquid containing fluorine as resource [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2024, 56(6): 133-138.

[17] 明大增,李志祥,黄壮昌.一种用湿法磷酸副产低浓度氟硅酸制备氟硼酸的方法:CN101497448[P].2012-05-02.

[18] 原泽,薛峰峰,张梦蕾.从铝电解质中回收锂资源的工艺研究进展[J].河南化工,2024,41(7):39-43.
YUAN Z, XUE F F, ZHANG M L. Research Progress of Recovering Lithium Resources Process from Aluminum Electrolyte[J]. Henan Chemical Industry,2024,41(7):39-43.

[19] 高海涛,马小华.氟石膏生产砌筑水泥工艺研究[J].化学工程与装备,2015(8):9-12,42.

[20] 张铭杰,夏举佩.一种磷石膏回收F及无害化处理方法:CN118439643[P].2024-08-06.

[21] 李世江,杨华春,李凌云,等.一种含氟硅渣制备白炭黑的方法:CN118724000[P].2024-10-01.

[22] 刘鹏,杜克泽,马福秋,等.医用放射性同位素制备的现状与展望[J].同位素,2024,37(1):77-90.
LIU P, DU K Z, MA F Q, et al. Present situation and prospect of medical radioative isotope preparation[J]. Journal of Isotope, 2024,37(1):77-90.