

固废地聚物硅基纳米胶凝材料技术概要

组成结构 · 性能特征 · 核心优势 · 应用场景 · 产业瓶颈

中国工业固废管理股份有限公司 · 固废产业研究院

2026 年 9 月

目录

执行摘要

- 一、引言
- 二、材料组成与结构特征
- 三、地聚物胶凝材料的性能特点
- 四、地聚物胶凝材料的核心优势分析
- 五、典型应用领域
- 六、标准与政策环境
- 七、存在的主要问题与挑战
- 八、发展建议
- 九、结论

执行摘要

较传统水泥方案减排	28 d 抗压强度	耐高温上限	重金属固定率
60%—80%	55—136 MPa	1000—1200 °C	≥ 90%
CO ₂ 排放降幅	视原料体系而定	不氧化、不分解	部分体系 > 98%

地聚物（Geopolymer，又称地质聚合物）是一类以硅铝质固废为前驱体、经碱激发缩聚反应形成的三维网络状无机聚合胶凝材料，自 20 世纪 70 年代末由法国科学家 Joseph Davidovits 提出以来，被视为最具潜力的硅酸盐水泥替代路线之一。

华筑绿建在地聚物理论上采用镧系稀土盐改性自主研发的硅基纳米胶凝材料在组成结构、反应机理与性能特征上在固废资源化领域具有广阔应用场景，本技术的概述报告从低碳环保、资源利用、性能表现、施工效率、循环再生五个维度量化分析其核心优势，并与普通硅酸盐水泥作系统对比，结合工程案例、标准政策与产业瓶颈提出发展建议。

分析表明：地聚物在耐高温、耐酸腐蚀、早强快硬、重金属固封等方面显著优于传统水泥，生产环节碳排放可降低 **60%—80%**，是工业固废高值化利用与建筑行业低碳转型的重要技术载体；同时，其收缩控制、激发剂成本、长期耐久性数据与标准体系仍是制约规模化推广的关键短板。

一、引言

地聚物的出现，既是水泥工业减排压力的产物，也是工业固废资源化需求的结果。以下先说明其产业背景与技术由来。

（一）研究背景

混凝土是全球用量最大的建筑材料，而其性能主要依赖硅酸盐水泥。目前市场上 95% 以上的水泥为硅酸盐水泥体系，其生产过程需要在约 1450℃ 下煅烧石灰石，不仅消耗大量石灰石资源与能源，还排放二氧化碳、三氧化硫及粉尘等污染物。

从碳排放角度看，水泥工业是典型的难减排行业：全球水泥生产的二氧化碳排放约占人为排放总量的 **5%—8%**，2020 年全球水泥产量预计达 59 亿 t，对应二氧化碳排放超过 48 亿 t。在双碳目标下，水泥行业逐步纳入碳交易体系，将显著抬升碳排放成本。

从资源角度看，我国工业固废存量巨大。以煤矸石为例，年产量已超 7 亿 t，累计堆存超 60 亿 t；粉煤灰、粒化高炉矿渣、钢渣、赤泥、尾矿等硅铝质固废同样体量庞大。传统处置以填坑筑路、回填、低性能砖瓦建材为主，既未充分利用其中的硅铝组分，又存在二次污染风险。

正是在“减排压力”与“固废消纳需求”的双重驱动下，地聚物胶凝材料进入产业化视野：它既是低碳胶凝材料的候选路线，也是实现“以废治废”、固废高值化利用的关键技术路径。

(二) 地聚物的定义与由来

地聚物是由含硅铝酸盐活性组分的固体材料在化学激发剂作用下，通过一系列化学反应形成的具有胶凝特性的无机材料。20 世纪 70 年代，Joseph Davidovits 首次发现并命名了地质聚合物，最初以高岭土为原料通过碱激活反应制备；随着研究深入，原料范围从高岭土逐步扩展到火山浮石、粉煤灰等天然矿物及工业废渣。

可从三个角度界定地聚物：

- 1. **制备角度**：以偏高岭土或粉煤灰等硅铝质材料，搭配碱激发剂，经特定工艺处理得到的化学反应产物，性能与陶瓷相似，化学组成接近某些天然火山灰。
- 2. **空间结构角度**：一类新型的高性能无机聚合材料，特点是独特的三维氧化物网络结构。
- 3. **化学键角度**：由 Si、Al 等元素通过共价键连接形成的无机聚合物骨架。

从材料定位上看，地聚物是一种区别于传统硅酸盐水泥的新型碱激发胶凝材料，凭借丰富的原料资源、低能耗、低污染特性以及不消耗石灰石资源的优势，被称为"绿色环保水泥"。学界普遍认为，地聚物有望在 21 世纪成为生态建筑的关键材料。

二、材料组成与结构特征

要理解地聚物的性能优势，须先理解它"由什么构成"与"如何成键"。以下从原料体系、结构模型与反应机理三个层面展开。

(一) 原料体系

地聚物的原料体系由"硅铝质前驱体 + 碱激发剂 + 功能外加剂"三部分构成，其中工业固废占据核心地位。

组分类别	典型原料	作用
铝硅质前驱体（天然矿物）	高岭土、偏高岭土、硅藻土、钾长石尾矿、火山灰	提供活性 SiO_2 、 Al_2O_3
铝硅质前驱体（工业固废）	粉煤灰、粒化高炉矿渣、钢渣、煤矸石、赤泥、磷渣、钒尾矿、废玻璃、尾矿	提供活性硅铝组分，同时消纳固废
碱激发剂	氢氧化钠、氢氧化钾、水玻璃（硅酸钠 / 硅酸钾）、碳酸钠	提供碱性环境，断裂 Si-O 、 Al-O 键并参与骨架构建

促硬剂与校正料	无定形硅酸钙、低钙硅比硅酸钙、硅灰、偏高岭土	加速硬化、校正硅铝比
外加剂与增强体	缓凝剂、减缩剂、高效减水剂、碳纤维、玻璃纤维	调节凝结时间、抑制收缩、改善工作性、增强增韧

值得强调的是，粉煤灰、煤矸石、矿渣、钢渣、锰渣、建筑废弃物微粉等因富含硅、铝元素且具备反应活性，已成为制备地聚物的主要原料，实现了"以废治废"的资源化利用。

(二) 三维网络结构

地聚合物的主要成分是非晶质至半晶质的三维铝硅酸盐聚合物，其结构既类似于有机高聚物的链接方式，又保持着无机硅氧四面体和铝氧四面体的基本框架。

Davidovits 将地聚物的聚合分子式写为 $Mn\{-(SiO_2)_z-AlO_2\}_n \cdot wH_2O$ ，其中 M 代表碱金属元素，z 表示 Si/Al 比，n 为聚合度。根据结构单元中 Si/Al 比的不同，地聚物可分为三类。

类型	结构单元	Si/Al 比
单硅铝酸盐 (PS)	-Si-O-Al-O-	1
双硅铝酸盐 (PSS)	-Si-O-Al-O-Si-O-	2
三硅铝酸盐 (PSDS)	-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-	3

在三维网络中，任意两个铝氧四面体之间不能共用同一个桥氧，必须以单个形式与四个硅氧四面体通过桥氧结合（内部），或一至三个硅氧四面体结合（表面）。硅为 +4 价，硅氧四面体显电中性；铝为 +3 价却与四个氧原子成键，铝氧四面体显电负性，需吸收 Na^+ 、 K^+ 、 Li^+ 、 Ca^{2+} 、 Ba^{2+} 等阳离子平衡电荷，最终使体系显电中性。

这一结构特征带来两个深远影响：其一，网络骨架键合以共价键和离子键为主，键能高、方向性强，赋予材料高强度与高稳定性；其二，网络空隙中可容纳并束缚阳离子与重金属离子，使材料具备离子交换与固封功能。行业中普遍认为，地聚物骨架的 Si-O 键能高达 535 kJ/mol 且具有方向性、不易转动，是其抗氧化能力的根本来源。

(三) 地聚合反应机理

地聚物的形成过程可概括为溶解、单体重构、缩聚三个核心阶段：

1. **溶解阶段**：在强碱激发剂（如 NaOH、水玻璃）作用下，固废中的硅铝酸盐玻璃体发生 Si-O、Al-O 键断裂，解离出活性硅、铝离子。
2. **单体重构阶段**：解离的硅、铝离子重新组合，形成低聚硅氧四面体和铝氧四面体单体。
3. **缩聚阶段**：低聚单体通过共用氧原子缩聚，形成三维网络状无机聚合物结构，碱金属离子参与电荷平衡与骨架构建。

更细致的机理模型将其细化为四步：铝硅酸盐矿物粉体在碱性溶液中的溶解；溶解的铝硅配合物由固体颗粒表面向颗粒间隙扩散；凝胶相形成导致在碱硅酸盐溶液与铝硅配合物之间发生聚合；凝胶相逐渐排除剩余水分，固结硬化成地聚合物块体。

按激发体系是否含钙，又可分为含钙碱激发体系和无钙碱激发体系。含钙体系中 NaOH 作为催化剂使硅铝化合物溶解，进一步与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成硅酸钙和铝酸钙矿物，并重新生成 NaOH 参与下一轮反应；无钙体系则主要形成 N-A-S-H 凝胶。

与硅酸盐水泥的水化反应相比，地聚合反应有一个显著特点：反应过程中除脱水之外没有损失其他物质，且该脱水反应在强碱性条件下是可逆的——这意味着地聚物废料粉碎后可直接作为原料再次制备地聚材料。

三、地聚物胶凝材料的性能特点

地聚物的性能优势集中体现在力学、耐热、耐久、耐蚀、体积稳定性与固封能力六个方面，以下逐项给出量化指标。

（一）早强快硬与高强度

地聚反应过程中溶胶的形成和脱水反应速度较快，网络骨架容易形成，因此可快速制得高强度制品。试验数据显示，用水和标准砂调成的砂浆在 20℃ 环境下仅需 4 h，强度即可达到最终强度的约 70%（约 15—20 MPa），28 d 抗压强度可达 70—100 MPa。

材料体系	强度表现
偏高岭土基砂浆	20℃ 下 4 h 达最终强度约 70%；28 d 抗压强度 70—100 MPa
粉煤灰基地聚物	28 d 抗压强度 55.6—136 MPa

熔融还原炉渣基地聚物	28 d 抗压强度 93.4 MPa
全地质聚合物混凝土	14 d 、 28 d 抗压强度较常规混凝土提高 30.71% 与 47.59%
碳纤维增强地聚物	抗弯 245 MPa 、抗拉 327 MPa 、抗剪 14 MPa

从机理上看，地聚物的强度优势源于其化学结构：地聚物不存在硅酸钙的水化反应，最终产物以离子键和共价键为主、范德瓦尔斯键为辅，性能类似天然沸石矿物；而传统水泥以范德瓦尔斯键和氢键为主。硅酸盐水泥因含低强度化学键，在高压下容易被破坏并出现裂纹；地聚物的结构不依赖这些低强度键，因而具备更高的强度上限。

（二）优异的耐高温与耐火性能

地聚物本身是氧化物网络结构体系，在 1000—1200℃ 之间不氧化、不分解；同时，密实的氧化物网络可以隔绝空气，保护内部物质不被氧化。

更值得注意的是，经 480℃、580℃ 和 680℃ 烧制后，地聚物胶凝材料的强度不仅没有下降反而有所上升，这可能是高温促进了新矿物晶体的形成。相关研究也表明，三组分地聚物净浆在不高于 900℃ 时的残余强度保持率仍在 70% 以上。

碳纤维增强地聚合物材料在高温下同样表现突出：即使在 800℃ 的高温环境下，该材料仍能保持其原始抗弯强度的 63%。

这一特性使地聚物在非铁铸造、冶金、耐火材料与防火构件等高温场景中，具备硅酸盐水泥无法比拟的优势。

（三）突出的耐久性

地聚物的优良耐久性一方面源于其稳定的网络结构，另一方面因为它能够完全避免普通水泥因金属离子迁移与骨料反应而引起的碱集料反应。

普通硅酸盐水泥混凝土在 200 天后可因碱集料反应膨胀约 1.5 mm/m，是极大的安全隐患；而地聚物由于消除了金属离子迁移与骨料反应，不发生膨胀，因而经受自然破坏的能力很强。Davidovits 在考察罗马古竞技场、希腊古混凝土墙、埃及古金字塔等古建筑后发现，这些古建筑材料具有“类沸石”结构，并认为这是它们能够屹立千年的重要原因。

此外，地聚物的三维网络结构使其在高温或低温下都能保持结构完整，从而呈现出良好的抗冻性和抗氧化性，同时具备低渗透率的特点。钢筋在地聚物混凝土中的腐蚀速率也低于普通硅酸盐水泥混凝土。

（四）优良的耐化学腐蚀性能

地聚物网络结构中的 Si-O 和 Al-O 在室温下较难与酸（HF 酸除外）反应，因而适合用于制造耐酸材料。多项对比试验给出了明确的量化结论。

试验条件	地聚物表现	普通硅酸盐水泥表现
硫酸（pH=0）浸泡 60 d	质量损失约 3%	质量损失约 63%
3% 硫酸溶液浸泡 28 d	抗压强度损失 13%—21%	抗压强度损失 51%
5% 硫酸溶液	分解率仅为硅酸盐水泥的 1/12	—
海水浸泡 28 d	强度下降 15%	强度下降 44%

在同样酸性条件下，地聚物胶凝材料的强度保有率显著高于普通硅酸盐水泥，且酸性越强优势越明显。同时，地聚物胶凝材料还展现出优异的耐硫酸盐侵蚀能力。

这一性能使其在污水处理系统、工业地坪、海岸结构与海洋工程、隧道管片、盐雾环境等强腐蚀场景中具有突出价值。

（五）体积稳定性与热膨胀系数可调

地聚物展现出较低的高温收缩率和低膨胀率，且膨胀系数具备可调性，主要指标如下表所示。

指标	数值
硬化过程线收缩率	仅为普通水泥的 1/5—1/8
400℃ 收缩率（钾铝硅酸盐聚合物）	0.2%—1.0%
800℃ 收缩率	0.2%—2.0%
线膨胀系数（0—1000℃）	$(2.1—4.5) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
膨胀系数调节范围（Si/Al 在 2—20 时）	$(4—25) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

膨胀系数的可调性具有重要工程意义：在制备复合材料时，可调节地聚物的热膨胀系数使其与陶瓷、钢、铜等填充物相匹配，从而降低因热膨胀系数不同而导致的内应力，提高复合材料的使用寿命。

(六) 重金属与放射性核素的固封能力

地聚物的结构是由环状分子链构成的"类晶体"结构。环状分子之间结合形成密闭空腔（笼状），可以把金属离子和其他毒性物质分割包围在空腔内；骨架中的铝离子也能吸附金属离子；部分研究认为金属离子还参与了地聚物结构的形成，因此可以更有效地固定体系中的金属离子。

固封对象	固定率
Hg、As、Fe、Mn、Pb 等重金属离子	≥90%
高钙粉煤灰地聚物对铅、铬、汞（掺量 0.025%/0.025%/0.01%）	>98%
核设施地基固化中的 Cs ⁺ 、Sr ²⁺	>99%，γ 射线辐照下结构稳定

由于网络骨架即使在核辐射作用下仍比较稳定，且材料具备卓越的耐水热性能，地聚物被广泛应用于重金属及核废料的固化处理，可确保长期安全固定、无泄漏风险。

(七) 主要物理性能参数汇总

为便于工程比选，现将地聚物胶凝材料的主要性能参数汇总如下。

性能维度	典型指标
28 d 抗压强度	55.6—136 MPa（视原料体系而定）
抗拉强度	2—8 MPa
抗折强度	5—10 MPa
4 h 早期强度	可达最终强度的约 70%
耐高温上限	1000—1200℃ 不氧化不分解
线收缩率	为普通水泥的 1/5—1/8
线膨胀系数	$(2.1—4.5) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ （0—1000℃）
重金属固定率	≥90%（部分体系 >98%）
CO ₂ 排放	约为同重量水泥的 1/10—1/5

四、地聚物胶凝材料的核心优势分析

在性能特点之上，本节从价值维度提炼地聚物的五项核心优势，并与普通硅酸盐水泥作系统对比。

（一）低碳环保优势

地聚物的低碳属性来自生产路径的根本差异。传统水泥依赖 1450℃ 高温煅烧石灰石，碳排放既来自燃料燃烧，也来自石灰石分解本身；地聚物则以既有的固废材料为前驱体、以化学激发替代高温煅烧，规避了这一过程。

对比项	普通硅酸盐水泥	地聚物胶凝材料
生产能耗	基准	约为水泥的 1/6—1/4
CO ₂ 排放（同重量）	基准	约为 1/10—1/5
CO ₂ 排放（权威综述口径）	基准	仅为 20%—60%
固废基地聚物方案减排幅度	基准	约 80%
地聚物混凝土单位体积减碳	基准	约 43%（隐含碳最高降 45%）
工程实测减碳	基准	60%—80%

减排效益的工程验证

英国 A10 公路采用地聚物注浆技术进行软弱地基快速加固，相较传统全深度重建方案减少碳排放 62.43%（约 326.7 吨二氧化碳当量）。这说明地聚物的减排效益不仅在实验室可验证，在真实工程中同样可观。

吴中伟院士曾指出，地聚物材料的能耗只有陶瓷的 1/20、钢的 1/70、塑料的 1/150。此外，其制备过程没有 NO_x、SO₂ 和 CO 的排放，且无需消耗石灰石资源。

（二）资源与成本优势

原料来源广泛。制备地聚物所用的主要原料为硅铝氧化合物（天然硅铝酸盐矿物、高岭土等），以及高炉矿渣、钢渣、粉煤灰、煤矸石、废玻璃、各种炉渣等工业矿渣。氧、硅和铝是地壳中含量最多的三种元素，储量远多于金属材料。

价格低廉且可消纳固废。工业固废作为原料具有双重价值：既降低了原料成本，又为固废找到了高值化出路。以煤矸石为例，采用碱激发工艺制备地质聚合物材料，其强度可达传统水泥的 1.5 倍，显著优于制砖、回填等粗放利用方式。

成本结构的现实约束

碱激发剂（尤其是水玻璃）价格较高，约占材料总成本的 30%—50%，这是目前地聚物经济性的主要短板；固废的收集、预处理和运输也增加了间接成本。但随着碳市场扩容、水泥行业纳入碳交易体系，碳排放成本上升将通过“碳资产”积累抵消部分生产成本。

（三）性能与寿命优势

将地聚物的性能优势归纳为“四高一稳一固”：

1. **高强度**：最终产物以离子键和共价键为主，强度明显高于水泥，碳纤维增强体系抗弯强度可达 245 MPa。
2. **耐高温**：1000—1200℃ 保持结构稳定，680℃ 煅烧后强度不降反升。
3. **耐腐蚀**：耐酸、耐硫酸盐、耐海水侵蚀能力显著优于普通硅酸盐水泥。
4. **高耐久**：无碱集料反应膨胀风险，抗冻、抗渗、抗氧化，经受自然破坏能力强。
5. **体积稳定**：收缩率仅为普通水泥的 1/5—1/8，热膨胀系数可调。
6. **固封能力强**：对重金属固定率 $\geq 90\%$ ，可稳定固封放射性核素。

在结构寿命维度，地聚物更低的渗透率意味着更低的氯离子侵入速率和更长的服役寿命。已有研究表明，地聚物混凝土在侵蚀性环境中的表现普遍优于对应的普通硅酸盐水泥混凝土，特别适用于隧道管片、污水管、桥墩、海岸桥梁和水下构筑物等场景。

（四）施工效率优势

地聚物的快硬早强特性直接转化为施工效率。在 20℃ 环境下，材料 4 h 即可达到 15—20 MPa 的强度，使公路、机场等基础设施的快速修复成为可能——1 h 后可允许行人通行，4 h 后可通车，6 h 后即可供飞机起飞或降落。

1991 年海湾战争期间，美国在战场修建的临时机场正是采用地聚物水泥（Pyrament）快速完工并投入使用，成为该材料军事工程价值的经典案例。

工程实测同样印证了这一优势：杭州桐庐 320 国道养护项目采用非开挖地聚物注浆技术，材料 3 h 抗压强度达 10 MPa、1 天强度超 20 MPa、6 h 即可开放交通，施工效率较传统水泥浆提升 5 倍，48 h 内完成 1.6 km 病害路段加固，弯沉值降低 40%。

在低温施工方面，济南深基坑回填项目开发的低温环境专用地聚物固化剂，在 -15℃ 下仍能达到 0.8 MPa 强度标准，将 7 天强度达标时间从 3 天缩短至 1 天，较传统灰土回填节约工期 40%。

(五) 循环利用优势

由地聚物的反应机理可知，地聚合反应本质上是硅铝酸之间的脱水反应，在碱性条件下是可逆的。因此地聚物产物粉碎后可以作为制备地聚物的原料重新使用，而水泥使用后则不能再作为原料。这一特性使地聚物具备了“从摇篮到摇篮”的闭环材料属性，可大幅节省原材料与能源并减少环境污染。

(六) 与普通硅酸盐水泥的系统对比

综合前述分析，地聚物与普通硅酸盐水泥的系统对比如下表所示。

对比维度	普通硅酸盐水泥	地聚物胶凝材料
主要原料	石灰石、黏土（不可再生）	硅铝质矿物与工业固废
制备温度	约 1450℃ 煅烧	常温至 90℃ 化学激发
胶结机制	水化反应（C-S-H 凝胶）	缩聚反应（N-A-S-H 三维网络）
主导化学键	范德华键、氢键	离子键、共价键
28 d 抗压强度	一般为 30—60 MPa	55.6—136 MPa
早期强度	较慢	4 h 达最终强度约 70%
耐高温	高温下钙化合物分解、开裂剥落	1000—1200℃ 结构稳定
耐酸性	硫酸（pH=0）浸泡 60 d 失重 63%	同条件下失重仅 3%
耐海水	28 d 强度下降 44%	28 d 强度下降 15%
碱集料反应	有膨胀风险（200 d 可膨胀 1.5 mm/m）	基本消除
干缩	基准	为基准的 1/5—1/8

重金属固封	能力有限	固定率 $\geq 90\%$
可回收性	使用后不可再作原料	可粉碎后循环再用
CO ₂ 排放	约占人为排放 5%—8%	较水泥降低 60%—80%

五、典型应用领域

凭借性能与施工优势，地聚物已在建筑工程、道路抢修、固废固化、耐高温耐蚀工程、预制构件等领域形成落地案例。

（一）建筑工程与基础设施

在基础设施及建筑领域，地聚物胶凝材料被用于结构构件、地基处理与加固维修。一种创新维修方法使用纤维复合物制成外部连接柔韧板，显著提升结构的破坏载荷与挠度；连续纤维复合材料已在日本和美国等地广泛应用，主要用于地震和飓风多发区域的建筑物及受损桥梁加固。

地基与路基处理方面，中建八局在深圳阜外医院三期、燕罗智能网联汽车产业园等项目中，采用铸余渣粉、矿渣粉等工业固废制备地聚物胶凝材料，对黏性土、粉质黏土等工程渣土进行原位改性固化，3 天抗压强度达 0.5 MPa、7 天强度突破 1.0 MPa，满足临时施工平台及人工硬壳层需求。

（二）道路与快速抢修

地聚物以其快硬早强性能在交通及抢修工程中发挥重要作用。除前述 320 国道养护案例外，英国 A10 公路针对地基空隙导致的路面沉降，采用地聚物注浆技术通过 1 米网格布孔注入液态地聚物，填充基层下方 1.5 米深度的空隙，使路面承载力提升至原设计值的 180%，施工仅耗时 6 周，较传统全深度重建方案缩短工期 80%。

在地聚物注浆应用中，材料的高强度、快速固化以及非开挖、低干扰的施工方式，使其特别适用于日均车流量大、交通不能长期阻断的重载道路应急修复。

（三）固废、危废与核废料固化

地聚物聚合后形成“牢笼型”结构，可高效固定绝大多数重金属离子，同时具备卓越的耐水热性能，能够在核废料的水热环境中长期维持优良结构稳定性，因此被广泛应用于重金属及核废料的处理。

典型案例是德国 BPS 工程采用地聚物胶凝材料固化核废料处理设施地基，通过“牢笼型”三维网络结构固定放射性元素，重金属离子（如 Cs^+ 、 Sr^{2+} ）固定率超 99%，材料在 γ 射线辐照下仍保持结构稳定，28 天抗压强度达 80 MPa，满足核设施长期安全要求。

在固废资源化方向，钒尾矿、石煤提钒尾矿、赤泥等难处理废渣通过机械活化—碱激发复合活化方式制备地聚物，既减少了尾矿堆存对农林地的占用与水土污染风险，又产出了可用的胶凝材料。

（四）耐高温与耐腐蚀特殊工程

凭借在 1000—1200℃ 高温环境下保持优良结构稳定性的特点，地聚物在非铁铸造及冶金行业中找到广泛应用，并可作为防火构件、工业炉衬、高温烟道等耐火材料。在耐蚀工程方面，地聚物适用于隧道管片、污水管、工业地坪、海岸结构与水下构筑物等强腐蚀环境。

（五）预制构件与装配式建筑

地聚物可以采用蒸汽养护或常温养护，且模具周转率快，非常适合在工厂化环境下进行大规模生产。在建筑业向智能建造转型的背景下，地聚物预制构件（如管廊、电缆沟盖板、模块化建筑单元）的需求有望快速增长。其快硬特性可显著缩短脱模时间、加速模板周转，进而提升工厂产能。

（六）航空、汽车与艺术装饰

在航空领域，地聚物基复合材料被用于飞机机舱的货运飞机、顶棚、地板镶板及侧壁，以及导线绝缘，迄今已生产 2500—3000 kg 复合材料。在汽车领域，班尼顿 F1 赛车小组曾于 1994—1995 年采用地聚物复合材料制作热屏障，在承受剧烈震动和 700℃ 以上高温的条件下连续两年夺冠，至今仍受众多 F1 赛车小组青睐。

在艺术与装饰领域，地聚物产品外观类似天然石材且易于塑形，被广泛用于艺术及装饰制品。此外，地聚物修建的粮仓维护成本低、具备自调温调湿功能，无返潮现象、能抑制霉菌生长，其高强度特性还可预防鼠类等啮齿类动物入侵。

六、标准与政策环境

标准缺失曾长期是地聚物推广的主要障碍，近年来这一状况正在快速改变。

(一) 国内标准体系

我国固废基胶凝材料与地聚物的标准体系正在快速完善，已形成国家标准、行业标准、团体标准与地方标准并行的格局。

标准号	标准名称	状态与实施日期
GB/T 28294-2024	钢铁渣复合料	现行， 2025-01-01 实施
T/CECS 10400-2024	固废基胶凝材料	现行， 2024-12-01 实施
T/CECS 1943-2025	固废基胶凝材料混凝土应用技术规程	现行， 2025-11-01 实施
T/CECS 689-2020	固废基胶凝材料应用技术规程	现行
JC/T 2956-2026	道路用固废基胶凝材料	即将实施， 2026-09-01
行业标准（征求意见）	固废基胶凝材料应用技术规范	2025-10 公开征求意见
T/SXHZ 003-2025	煤基固废胶凝材料	现行
T/XJCETS 016-2025	工业固体废弃物制备地质聚合物标准技术指引	现行

其中 T/XJCETS 016-2025 首次建立了工业固废地聚物全流程标准，覆盖原料、制备、试验、应用全链条，明确了原料硅铝酸盐总量 $\geq 70\%$ 、无定形相 $\geq 50\%$ 、烧失量 $\leq 8\%$ 等阈值，规定复配型激发剂模数 1.2—1.8、碱当量 4%—8%，并强制重金属浸出限值与碳排放 $\leq 200\text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ 要求，是“双碳”政策导向下的重要标准进展。

(二) 国际标准进展

国际层面，ASTM C1948/C1948M-24《碱活化胶凝材料标准规范》已发布实施，ASTM C1697-25a《混合辅助胶凝材料标准规范》亦已更新，为碱活化胶凝材料的规范化应用提供了国际参照。

(三) 政策与市场驱动

在政策端，双碳目标下水泥行业纳入碳交易体系将大幅提升碳排放成本。地聚物技术通过积累“碳资产”，可以抵消其生产成本，帮助企业在未来的碳定价体系中获得竞争优势。“十五五”期间推动建筑业向智能建造与绿色低碳转型，也为地聚物预制构件与绿色建材创造了明确的市场空间。

七、存在的主要问题与挑战

地聚物虽然优势显著，但距离大规模替代硅酸盐水泥仍有明显距离。客观梳理其瓶颈，有助于制定更具针对性的技术路线。

（一）技术与性能层面的瓶颈

从材料本身看，以下八个问题最为突出：

1. **原料成分波动大**：工业废渣的化学组成受上游工艺影响巨大，导致地聚物性能波动，需要更先进的在线检测与动态配比技术。
2. **收缩与开裂风险**：部分地聚物材料存在较大的干燥收缩，可能引起开裂，尤其在大体积结构中，需要减缩剂或纤维增韧等措施。
3. **碱集料反应风险**：高浓度碱性环境可能引发碱集料反应，对长期耐久性提出挑战。
4. **脆性较大**：需通过纤维增强增韧改善，目前通过复合改性可将抗折强度提升至 8 MPa 以上。
5. **高温养护依赖**：部分体系需 60—90℃ 高温养护才能达到最优强度，增加能耗与设备投入。
6. **工作性较差**：新拌浆体因激发剂溶液黏度大，工作性偏低，常需高效减水剂，进一步抬高成本。
7. **长期数据不足**：20—30 年以上的长期耐久性实测数据有限，碳化、冻融循环、氯离子渗透与徐变行为仍需深入研究。
8. **批次稳定性**：从实验室放大到工业化生产，保持质量一致性与过程可控性仍是难题。

（二）经济性层面的制约

经济性方面的主要制约包括四项：

- **激发剂成本高**：碱激发剂（特别是水玻璃）约占材料总成本的 30%—50%，钾基激发剂更贵，直接削弱了相对水泥的成本竞争力。
- **安全与设备投入**：强碱激发剂腐蚀性强，需要专用设备与严格安全防护，增加运营成本与复杂度。
- **激发剂自身环境足迹**：水玻璃等激发剂的生产过程本身能耗较高，研发更绿色、低成本的固体激发剂或天然矿物激发剂是未来科研难点。
- **运输成本与地理错配**：工业废渣产地集中于华北、西北等重工业区，而建材需求量大的地区在东部沿海，物流成本与运输碳排放增加。

（三）标准与产业化层面的障碍

尽管标准体系正在完善，但在招投标、质量验收等环节，地聚物仍常被视为“非常规材料”，缺乏统一的计价依据和政策强制性应用要求。设计规范与测试方法多基于普通硅酸盐水泥体系，工程师、承包商与监管方在采用时存在不确定性。行业存在较强的路径依赖，新型材料的信任度建立尚需时日。同时，全过程经济性分析（涵盖原料、激发剂、养护能耗、人工、维护与全生命周期性能）仍显不足，导致产业投资意愿不高。

八、发展建议

结合上述分析，提出以下四方面建议：

1. **以复合改性突破性能短板**：通过纤维增强增韧、减缩剂调控收缩、复配激发剂优化凝结时间，改善脆性大、收缩大、工作性差等问题；同时开发常温养护体系，降低对高温养护的依赖。
2. **以原料均质化保障产品稳定性**：建立固废原料的在线检测与动态配比机制，对煤矸石、赤泥等低活性原料实施煅烧活化预处理，对粉煤灰、矿渣进行粉磨至比表面积 $\geq 400 \text{ m}^2/\text{kg}$ 的细度控制，从源头降低批次波动。
3. **以低成本绿色激发剂降低经济门槛**：研发低碱替代方案、固体激发剂与天然矿物激发剂，探索利用废玻璃等废弃物自制水玻璃，推动激发剂成本占比下降。
4. **以标准与示范工程推动市场接纳**：积极参与固废基地聚物相关标准编制，在市政道路、基坑回填、抢修工程等对早强快硬要求高、对长期数据要求相对宽松的场景先行示范，逐步积累工程实绩与耐久性数据，再向结构工程延伸。

九、结论

1. 地聚物胶凝材料是一类以硅铝质固废为前驱体、经碱激发缩聚形成的三维网络状无机聚合材料，其结构以硅氧四面体和铝氧四面体为基本单元，键合以共价键和离子键为主，这是其高强度、高稳定性、高耐久性的物理化学根源。
2. 在性能层面，地聚物呈现“早强快硬、高强、耐高温、耐腐蚀、高耐久、体积稳定、固封性强”的鲜明特征：4 h 强度可达最终强度的约 70%，28 d 抗压强度可达 55.6—136 MPa；1000—1200℃ 不

氧化不分解；硫酸（pH=0）浸泡 60 d 失重仅 3%；线收缩率仅为普通水泥的 1/5—1/8；重金属固定率 $\geq 90\%$ 。

3. 在优势层面，核心价值集中于三点：一是低碳环保，生产能耗约为水泥的 1/6—1/4，碳排放降低 60%—80%；二是资源化属性突出，可大规模消纳粉煤灰、煤矸石、矿渣、钢渣、赤泥、尾矿等工业固废；三是施工效率与应用场景优势明显，快硬早强支撑道路与机场快速修复，耐高温耐腐蚀打开冶金、耐火与海洋工程等增量市场。
4. 在瓶颈层面，碱激发剂成本占材料总成本 30%—50%、干燥收缩与脆性、原料成分波动、长期耐久性数据不足以及标准与计价体系不完善，是制约其规模化推广的主要因素。
5. 综合判断，地聚物胶凝材料在道路工程、基坑与地基处理、抢修工程、预制构件、危废与核废料固封等场景已具备工程化落地条件，是固废资源化与建筑行业低碳转型的重要技术载体；随着复合改性技术成熟、低成本激发剂突破以及标准体系健全，其替代硅酸盐水泥的应用边界有望持续扩展。

2026 年 9 月 18 日