

某生活垃圾焚烧厂垃圾仓屋面板发泡水泥板早期腐蚀失效分析

陈 昆 陶 欢

中城院（北京）环境科技股份有限公司 北京 100120

【摘要】：为查明某生活垃圾焚烧厂垃圾仓屋面板发泡水泥板服役不足一年即发生严重腐蚀的失效原因，通过现场宏观调查、环境介质检测、材料性能测试及微观结构分析，系统诊断了腐蚀机理与失效主因。从实验结果可以看出，在仓内硫化氢、酸性凝结水形成的化学、物理协同侵蚀下，发泡水泥板的氢氧化钙溶出、钙矾石结晶膨胀、孔隙结构劣化，材料强度丧失率较高%，由此得出失效主因在于材料耐腐蚀性能与服役环境严酷程度不匹配。

【关键词】：发泡水泥板；垃圾焚烧厂；腐蚀机理；协同侵蚀

DOI:10.12417/2811-0536.26.06.062

引言

生活垃圾焚烧发电已经成为我国城市生活垃圾处理的主要技术路线，垃圾仓是焚烧工艺链的前端核心设施，承担垃圾接收、储存、发酵、渗沥液导排等多种功能。发泡水泥板相较于最常用的聚苯乙烯泡沫板（简称苯板），具有隔热、防火、环保、抗老化、强度高优点。但工程实践证明，部分焚烧厂投产运行不到一年，屋面板就出现了大面积粉化、剥落、开裂等早期腐蚀失效现象，严重影响了结构安全和耐久性。因此，以某实际失效案例为研究对象，从现场调查、环境分析、材料测试三个方面入手，找到早期腐蚀失效的机理特点和主要因素，为垃圾仓围护结构材料选择及防腐设计提供依据。

1 工程概况

某生活垃圾焚烧发电厂设计处理规模为每天1000吨，垃圾仓采用钢筋混凝土结构，屋面板跨度为31.5m，用厚度100mm的发泡水泥板做保温隔热和覆面材料，板面外覆防水卷材，投产运行8个月左右就出现明显的破损。现场调查得知，失效现象主要出现在垃圾仓正上方屋面板底和拼接缝处，具有很强的分布规律性。板底普遍存在着大面积的粉化起砂现象，用硬物轻触即出现表层剥落，局部区域骨料外露，结构疏松程度明显加深，在拼接缝两侧约200mm范围内腐蚀最为严重，多处出现贯穿性裂缝及板底破碎脱落，部分区域甚至可见内部增强钢筋裸露并伴有锈蚀产物渗出^[1]。板面颜色整体为不均匀的黄褐色水渍状斑痕，是仓内溶液蒸发凝结后残留物长期浸润造成的。现场测量结果表明，腐蚀严重的部位板厚由原来的100mm减薄到不足80mm，强度严重降低，屋面防水层宏观完整性较好，无明显破损点，初步判断腐蚀介质主要不是由屋面上方侵入，而是极有可能是由垃圾仓内部恶劣环境的作用引起的。对不同腐蚀程度区域

取样标记，为理化性能测试和微观分析提供代表性的样品基础，也初步发现了腐蚀失效和环境暴露条件密切相关。

2 垃圾仓环境工况

(1) 气体环境：垃圾仓内生活垃圾在厌氧发酵、初步分解过程中会释放出许多腐蚀性气体。从行业内已知数据可知，仓内气相空间硫化氢浓度在垃圾搅动、卸料时可达50ppm~150ppm，氨气浓度波动为10ppm~30ppm，二氧化碳、挥发性有机物含量较高。这些气体组分在仓内相对密闭、通风受限的环境下不断积聚，特别是屋面板下方的处，气体浓度比较高。

(2) 液体环境：垃圾渗沥液是垃圾仓内最主要的液相腐蚀介质，其化学组成比较复杂，侵蚀性强。仓底渗沥液的pH值为4.5-6.2，呈弱酸性，氯离子含量为5000mg/L~12000mg/L，硫酸根含量为800mg/L~2000mg/L，含有高浓度的有机酸和铵盐。屋面板与积存渗沥液没有直接接触，但是仓内湿热环境使水分蒸发、凝结形成循环，使得渗沥液中的挥发性组分和雾滴一直附着在板底表面。

(3) 温湿度环境：垃圾发酵过程中会产生大量的生物热，使仓内长期处于高温高湿的极端环境，连续温湿度记录显示仓内日均气温35℃~55℃，相对湿度常年大于75%，卸料口及发酵活跃区近饱和状态。屋面板是围护结构，室内侧表面温度受外界气温波动影响，冬季夜间可降到15℃以下，与仓内湿热空气形成较大温差。

3 材料性能测试与微观结构分析

3.1 理化性能测试

对现场采集的腐蚀失效板样和同批未用对照样进行理化性能对比测试。干密度测试结果表明，失效板的平均干密度由原来的520kg/m³降到412kg/m³，说明

材料的孔隙率明显增大，骨架物质流失。抗压强度测试结果表明，失效板核心区强度保留率偏低，边沿剥落区已经不能制取标准试件。吸水率测试结果有明显变化，失效板 24h 吸水率明显提升，说明孔隙结构劣化造成连通孔隙比例大大增加。表 1 为主要理化性能指标对比测试数据汇总表，从宏观上可以看出材料性能退化情况。

表 1 发泡水泥板理化性能指标对比

测试项目	单位	未使用对照样	腐蚀失效板样	变化率/%
干密度	kg/m ³	520	412	-20.8
抗压强度	MPa	3.8	1.4	-63.2
24h 吸水率	%	12.5	28.7	+129.6
软化系数	/	0.76	0.41	-46.1

3.2 腐蚀产物成分分析

用 X 射线衍射和能谱分析来表征腐蚀产物的物相组成和元素分布。X 射线衍射图谱显示，失效板样品中氢氧化钙的特征衍射峰强度比对照样明显降低，同时出现了钙矾石、二水石膏和 Friedel 盐的特征衍射峰，说明硫酸盐侵蚀和氯盐结合反应的发生。能谱面扫描结果表明腐蚀层中氯元素的质量百分含量为 3.2%至 5.7%，硫元素含量为 1.8%至 2.9%，钙元素含量由原来的 24.5%降至现在的 15.3%。元素分布图像显示氯、硫元素在板表面以下 0mm 到 5mm 范围内富集，并沿微裂缝向内渗透，有明显的由表及里的扩散梯度。腐蚀产物的生成不但消耗了水泥基材料中的胶凝组分，而且它结晶生长的过程还会产生膨胀应力，使微结构损伤不断累积^[2]。

3.3 微观形貌观察

用扫描电子显微镜对样品断面微观形貌进行观察分析，对照样微观结构呈均匀多孔状，孔壁致密，水化硅酸钙凝胶完整，无明显缺陷。失效板样品微观结构有严重的劣化特征，孔壁表面有很多针棒状的钙矾石晶体和板状的石膏晶体，晶体穿插生长造成孔壁开裂剥落，部分区域水化硅酸钙凝胶呈蜂窝状疏松状，胶凝性完全丧失，微裂缝发育比较广泛，宽度在 2μm~10μm 之间，相互连通形成侵蚀介质输运通道。在高倍率下可见氯盐结晶物填充在部分孔隙中，结晶压力使孔壁产生放射状微裂纹。微观结构观察直接显示出化学侵蚀和物理结晶共同作用之后，材料骨架发生渐进式破坏的全过程，如图 1：

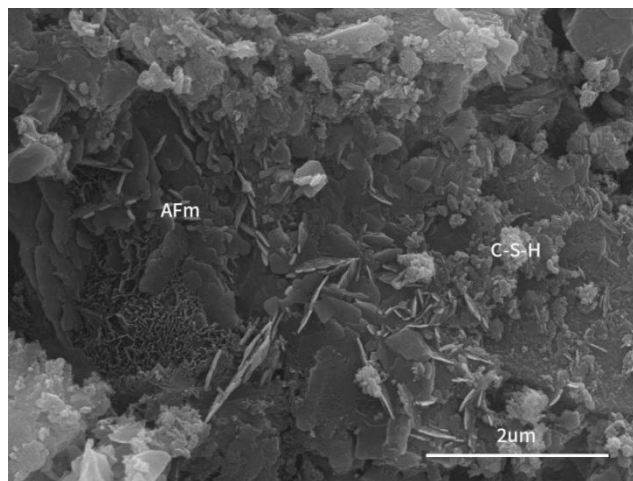


图 1 腐蚀区域微观形貌观察图示意

4 腐蚀机理与失效原因综合诊断

4.1 化学腐蚀机理

垃圾仓内酸性气体及渗沥液挥发组分与发泡水泥板中水泥水化产物发生系列化学反应，构成材料劣化的化学侵蚀基础。硫化氢溶于板面凝结水膜后电离成硫氢根离子和氢离子，与氢氧化钙反应生成硫氢化钙，硫氢化钙再氧化为硫酸钙；二氧化碳不断扩散到孔隙中，与氢氧化钙发生碳化反应生成碳酸钙，但是碳酸钙在酸性凝结水中溶解形成碳酸氢钙流失；有机酸分子可以直接和氢氧化钙、水化硅酸钙反应生成可溶性有机酸钙盐，随凝结水溶出迁移。上述反应一直消耗水泥石中的碱性储备，使孔隙溶液的 pH 值降低到 9.0 以下时，水化硅酸钙凝胶开始分解脱钙，释放出无定形硅胶，材料胶凝性能不可逆丧失。化学腐蚀使材料的微观结构由致密连续状态变成疏松多孔的状态，给物理侵蚀介质的侵入和结晶破坏创造了条件。

4.2 物理结晶侵蚀机理

可溶性盐类在发泡水泥板孔隙内周期性结晶、溶解，产生结晶压力，造成孔壁开裂、结构损伤的累积。渗沥液蒸发浓缩及酸性气体氧化转化在板表面及近表面孔隙中生成硫酸钠、硫酸钙、氯化钠及盐等结晶产物。当板面温度下降或者湿度上升时，盐类吸水溶解，溶液向孔隙内部迁移，温度上升或者湿度下降时，水分蒸发，盐类在孔隙狭窄处过饱和和结晶析出^[3]。硫酸钠结晶过程中产生的结晶压力可达 10MPa-20MPa，超过发泡水泥基体的抗拉强度，造成孔壁出现微裂纹。反复干湿循环造成结晶-溶解过程周期发生，微裂纹不断扩展延伸并互相连通，最终形成贯穿性裂缝网络。结晶产物同时填充孔隙，阻止水分排出，加大局部过饱和结晶程度，造成正反馈加速破坏。

4.3 化学物理协同作用机制

化学腐蚀和物理结晶侵蚀不是孤立的，二者之间存在着明显的协同加速作用。化学腐蚀过程优先溶出水泥石中的氢氧化钙，增大孔隙率和孔径尺寸，使侵蚀性盐溶液更容易渗透到材料内部；孔隙率增大同时给结晶生长提供更大的空间，但是连通孔隙结构也使得溶液在干燥时更容易迁移至蒸发前沿，促进盐分在某些区域富集结晶。物理结晶过程中产生的微裂缝，为酸性气体和渗沥液雾滴提供快速运输通道，使化学腐蚀反应界面由表面向内推进，形成剥蚀层逐渐增厚的动态发展过程。裂缝尖端应力集中效应加快了局部区域材料的剥落，暴露出了新的界面又暴露在侵蚀环境中。干湿循环、温度变化、化学反应、结晶过程的叠加，造成材料损伤具有非线性加速演化特征，远远大于单一因素作用下线性叠加预期。

4.4 失效主因诊断

综合分析现场调查结果、环境工况数据、材料性能演变规律及微观结构特征，判定本次发泡水泥板早期腐蚀失效的根本原因，在于材料耐腐蚀性能与服役环境不匹配。该厂采用的发泡水泥板以通用硅酸盐水

泥为胶凝材料，孔隙率高且无额外防腐蚀措施，设计时未充分考虑垃圾仓顶板长期暴露于高浓度硫化氢、酸性凝结水及氯盐干湿交替环境的服役条件^[4]。腐蚀介质的复合侵蚀作用使材料在短时间内经历化学溶蚀、碳化破坏及盐结晶开裂三重劣化过程，胶凝组分持续流失，孔隙结构加速劣化，微裂纹发育连通，最终导致宏观性能急剧下降。节点构造设计中未设置有效的板底防腐蚀隔离层，拼接缝密封材料耐老化性能不足，进一步加剧了板边区域的局部腐蚀集中。失效模式的区域性分布特征与腐蚀机理的空间作用规律高度吻合，验证了诊断结论的合理性。

5 结语

本文对某垃圾焚烧厂垃圾仓屋面板发泡水泥板现场调查、环境检测、材料测试、微观分析，系统地揭示了某垃圾焚烧厂垃圾仓屋面板发泡水泥板早期腐蚀失效机理。发泡水泥板的腐蚀失效是由化学溶蚀和盐结晶侵蚀共同造成的，仓内高浓度硫化氢和氯盐环境使水泥石碱度下降、胶凝组分流失、孔隙结构变坏，材料强度丧失率大于63%。普通发泡水泥板的耐腐蚀性能和垃圾仓恶劣服役环境不匹配，选择专用耐腐蚀板材，改善通风排湿来减小腐蚀介质浓度。

参考文献：

- [1] 王培.基于绿色建造的纤维水泥板施工技术分析[J].中国住宅设施,2025,(06):148-150.
- [2] 贾宇.发泡水泥保温系统施工技术应用研究[J].建筑技术开发,2024,51(11):144-146.
- [3] 卢万龙,孙若轩,杜卫恒.复合发泡水泥板应用在外墙保温系统中的施工工艺研究[J].建筑技术开发,2024,51(11):149-151.
- [4] 全培周.BFPR 增强复合水泥板与混凝土黏结机能试验研究[J].混凝土,2021,(03):131-133.