

# 环保型晶硅清洗剂的配方研发及表面清洁机理探究

韩军 常帅锋

嘉兴市小辰光伏科技有限公司 314000

**【摘要】**作为光伏产业与电子信息领域核心基材的晶硅材料，其表面清洁度因直接决定产品的光电转换效率与使用寿命，而传统晶硅清洗剂多采用挥发性有机溶剂，导致存在环境污染风险高、生物降解性差等难以满足当前绿色发展需求的问题，故本研究围绕环保型晶硅清洗剂展开，通过合理筛选组分以构建环保溶剂体系、优化制备工艺并评价清洗剂性能，同时对其表面清洁机理进行深入探究，该研究成果可为环保型晶硅清洗剂的工业化应用提供理论支撑，且对推动晶硅相关产业的绿色升级具有重要现实意义。

**【关键词】**环保型清洗剂；晶硅；配方研发；表面清洁机理

Development of Eco-Friendly Crystalline Silicon Cleaning Agent and Investigation of Surface Cleaning Mechanisms

Han Jun Chang Shuaifeng

Jiaxing Xiaochen Photovoltaic Technology Co., Ltd. 314000

**【Abstract】**As a core substrate material in photovoltaic industry and electronic information fields, the surface cleanliness of crystalline silicon directly determines product photoelectric conversion efficiency and service life. Traditional crystalline silicon cleaning agents predominantly use volatile organic solvents, which pose significant environmental pollution risks and poor biodegradability, failing to meet current green development requirements. This study focuses on eco-friendly crystalline silicon cleaning agents by rationally selecting components to construct environmentally friendly solvent systems, optimizing preparation processes, evaluating cleaning agent performance, and conducting in-depth investigations into surface cleaning mechanisms. The research findings provide theoretical support for industrial application of eco-friendly crystalline silicon cleaning agents and hold substantial practical significance for promoting green transformation in crystalline silicon-related industries.

**【Key words】**Environmentally friendly cleaning agent; Crystalline silicon; Formulation development; Surface cleaning mechanism

## 引言:

在晶硅材料的制备与加工过程中，其表面易残留油污、金属杂质及粒子污染物等，这些污染物不仅会破坏晶硅表面的完整性、降低其光电转换效率，还会加速基材老化并缩短产品使用寿命，尽管目前国内外关于晶硅清洗剂的研究已取得一定进展，但现有产品普遍存在环保性能不足或清洁效能有限的问题，部分清洗剂甚至会对晶硅基材产生腐蚀作用，基于此，开展环保型晶硅清洗剂的配方研发及清洁机理探究十分必要，本文明确了配方设计、工艺优化、性能评价及机理分析的研究思路，旨在开发出兼具环保性与高效清洁性的晶硅清洗剂。

### 1.1 核心组分选型依据

环保型晶硅清洗剂核心组分的选型因需兼顾清洁效能与环保性能，所以从清洁需求来讲，核心组分需具备良好的去污能力，能够与晶硅表面的各类污染物发生相互作用以实现污染物的快速脱离，从环保要求出发，核心组分应优先选择低挥发性、高生物降解性的物质，避免使用有毒有害的有机溶剂，同时还需考虑组分与晶硅基材的兼容性，防止对基材造成损伤，组分的来源稳定性与成本可控性也是选型过程中需重点考量的因素，综合以上多方面因素，通过对比不同类型物质的理化性质与应用效果，从而为环保型晶硅清洗剂核心组分的确定提供科学依据。

### 1.2 环保溶剂体系构建与配比优化

环保溶剂体系作为环保型晶硅清洗剂的关键组成部分，

## 一、环保型晶硅清洗剂的配方设计与组分筛选

其构建需以绿色溶剂为基础,由于绿色溶剂具有环境友好、安全性高的特点,可有效降低清洗剂的环境风险,在体系构建过程中,需根据污染物的类型与特性选择合适的绿色溶剂种类,同时考虑不同溶剂之间的协同作用,通过单因素实验与多因素正交实验对溶剂体系中各组分的配比进行优化,因为不同配比会影响溶剂体系的溶解能力、表面张力等理化性质,进而影响清洁效果,所以通过系统研究各配比下溶剂体系的性能,能够确定最优的溶剂配比方案,以确保构建的环保溶剂体系具备高效的清洁能力。

### 1.3 辅助组分筛选及作用机制

关于辅助组分筛选及其作用机制的探究在清洗剂里占比不高的辅助组分,却对于提升清洁效能以及改善使用性能而言有着重要作用,像表面活性剂、缓蚀剂、螯合剂等都是常见的辅助组分,其中表面活性剂能够降低清洗剂的表面张力,进而增强其对晶硅表面的润湿能力,以此促进污染物的剥离;缓蚀剂可以起到保护晶硅基材的作用,避免清洗剂对其产生腐蚀现象;螯合剂则能够与金属杂质发生螯合反应,从而提高金属杂质的去除效率,而通过开展不同类型辅助组分的筛选实验,分析各类组分所起到的作用效果,进而明确适配于核心溶剂体系的辅助组分种类以及添加量,最终阐明辅助组分与核心组分之间的协同作用机制。

## 二、环保型晶硅清洗剂的制备工艺优化

### 2.1 制备工艺参数确定与影响

环保型晶硅清洗剂制备工艺的优化在环保型晶硅清洗剂的制备过程中,其工艺参数主要包含混合温度、搅拌速率、搅拌时间以及陈化时间等内容,这些参数会直接对清洗剂各组分的混合均匀性产生影响,进而影响到清洗剂的稳定性和清洁性能,比如混合温度过高的话,有可能会造成部分热敏性组分出现分解情况,从而降低清洗剂的性能;若搅拌速率不足,就难以实现各组分的充分混合,甚至会出现分层现象;而搅拌时间和陈化时间过长会增加制备成本,过短则无法保证清洗剂的稳定性,所以需要系统研究各工艺参数对清洗剂制备效果的影响,明确各参数的合理取值范围,为后续的工艺优化奠定基础。

### 2.2 工艺参数多因素优化设计

工艺参数的多因素优化设计为了对制备工艺参数进行综合优化,会采用多因素优化实验设计方法,结合前期单因素实验的结果,选取混合温度、搅拌速率、搅拌时间作为主

要影响因素,以清洗剂的稳定性和清洁效能作为评价指标,设计正交实验或者响应面实验,然后通过对实验数据进行统计分析,明确各因素的主次影响顺序,建立评价指标与工艺参数之间的数学模型,再利用该模型预测最优的工艺参数组合,并且通过验证实验来检验预测结果的可靠性,这种多因素优化设计能够有效排除各参数之间的交互干扰,进而提高工艺优化的科学性和准确性。

### 2.3 优化工艺稳定性验证

优化工艺的稳定性验证工艺稳定性对于保证清洗剂批量生产质量的一致性至关重要,在确定最优制备工艺参数之后,需要进行稳定性验证实验,按照优化后的工艺参数,开展多批次清洗剂的制备实验,同时检测各批次清洗剂的理化性质、清洁效能以及环保性能,通过分析各批次检测结果的离散程度,来判断工艺的稳定性,与此同时,还需要考察储存条件对清洗剂性能的影响,将制备好的清洗剂在不同温度、湿度条件下储存一定时间,然后检测其性能变化情况,通过稳定性验证,确保优化后的制备工艺具备良好的重复性和可靠性,能够满足工业化批量生产的需求。

## 三、环保型晶硅清洗剂的性能评价与表征

### 3.1 表面清洁效能评估方法

表面清洁效能作为衡量晶硅清洗剂性能的核心指标,需建立科学合理的评估手段。结合晶硅表面污染物的特性,运用重量法、接触角测量法以及表面粗糙度测量法等多种方式实施综合评估。重量法通过测定清洁前后晶硅样本的质量差别,计算污染物的去除比例;接触角测量法通过检测清洁前后晶硅表面的接触角变化情况,评价表面清洁程度的提升状况;表面粗糙度测量法则通过分析清洁后晶硅表面的粗糙程度,判断清洗剂是否对基材造成损伤。

### 3.2 环保性能检测与分析

环保性能检测是环保型晶硅清洗剂研发工作的重要组成部分,主要包括生物降解性、挥发性有机化合物含量、急性毒性等指标的检测。依据国家相关环保标准,采用对应的检测方法开展试验。生物降解性检测通过模拟自然环境中的微生物降解过程,考察清洗剂在规定时间内降解速度;挥发性有机化合物含量检测运用气相色谱法,测定清洗剂中挥发性有机化合物的总含量;急性毒性检测通过生物实验,评价清洗剂对水生生物或陆生生物的毒性级别。

### 3.3 基材兼容性评估

基材兼容性评估的目标是判断清洗剂是否会对晶硅基材产生不良影响。采用浸泡实验、外观观察以及性能检测等方法进行评估。将晶硅样本浸泡在清洗剂中,在规定的温度和时间条件下放置,取出后观察样本表面是否出现腐蚀、变色、氧化等现象。同时,检测浸泡后晶硅样本的光电性能,对比浸泡前后性能指标的变化。若样本表面无明显不良现象,且光电性能未出现显著降低,则表明清洗剂与晶硅基材具有良好的兼容性。

#### 四、环保型晶硅清洗剂的表面清洁机理探究

##### 4.1 清洗剂与污染物相互作用

清洗剂与污染物的相互作用是实现表面清洁的基础,主要包括溶解、乳化、螯合以及吸附等作用形式。对于油污类污染物,清洗剂中的溶剂成分可通过相似相溶原理对油污进行溶解,表面活性剂可将油污乳化分散在清洗液中;对于金属杂质,螯合剂成分可与金属离子形成稳定的螯合物,使其从晶硅表面脱离;对于粒子污染物,清洗剂可通过吸附作用降低粒子与晶硅表面的附着力,促进粒子的脱落。

##### 4.2 清洁过程动力学机制

清洁过程动力学机制的探究需通过明确清洁反应速率规律与控制步骤,在改变清洗温度、清洗剂浓度等实验条件的基础上,研究污染物去除率随清洗时间的变化规律并建立动力学模型,依据模型参数判断清洁过程是受扩散控制还是反应控制,同时分析各实验条件对清洁反应速率常数的影响以阐明温度、浓度等因素调控清洁速率的内在机制,而深入

理解该动力学机制可为清洗剂性能优化与清洗工艺参数调控提供理论依据进而提高清洁过程的效率与可控性。

##### 4.3 清洁机理表征与验证

对表面清洁机理进行直观表征与验证需采用多种表征手段,利用扫描电子显微镜观察清洁前后晶硅表面微观形貌变化以清晰呈现污染物去除过程与基材表面状态,通过 X 射线光电子能谱分析清洁前后晶硅表面元素组成变化来判断污染物去除程度与清洗剂组分表面残留情况,借助原子力显微镜表征清洁前后晶硅表面力学性能变化以进一步验证清洁机理的合理性,结合表征结果与前期实验数据构建完整的表面清洁机理模型对清洁过程本质进行系统阐释,并通过验证实验检验机理模型的准确性。

#### 五、结论

本研究完成环保型晶硅清洗剂的配方研发、工艺优化、性能评价及表面清洁机理探究等工作,通过合理筛选核心组分与辅助组分成功构建兼具高效清洁性与良好环保性的溶剂体系并确定最优配方组成,基于单因素实验与多因素优化设计优化得到稳定性良好的清洗剂制备工艺,经多批次验证实验表明该工艺具备良好重复性与工业化应用潜力,性能评价结果显示研发的清洗剂具有较高污染物去除率、环保指标符合国家相关标准且与晶硅基材具有良好兼容性,表面清洁机理探究表明清洗剂通过溶解、乳化、螯合及吸附等多种作用形式实现污染物去除且清洁过程受扩散与反应共同控制。

#### 参考文献

- [1]张盖伦.让晶硅企业看到“零震损”生产的可能[N].科技日报, 2025-11-05 (002).
- [2]王贺礼,刘卓.退役晶硅光伏组件资源回收技术研究进展[J].现代化工, 2025, 45 (S2): 89-92.
- [3]彭辉.N型全钝化接触晶硅电池的薄膜沉积工艺与性能研究[D].扬州大学, 2025.
- [4]许烁烁,杨彬,张威,等.新型石墨舟等离子体清洗设备的工艺效果与优势[J].电子工业专用设备, 2023, (02): 6-9.
- [5]何佳琦,岳辉,王雪飞.一种替代丙酮清洗剂的新型印刷网版环保清洗剂[J].化工安全与环境, 2025, 38 (11): 89-92.

作者简介:韩军,出生年:1991-12,男,汉族,籍贯:安徽省安庆市,职务:研发总监,学历:硕士,研究方向:光伏材料、晶硅添加剂研发;

常帅锋,出生年月:1994-02,男,汉族,籍贯:河南省郑州市,学历:硕士,职称:中级工程师,研究方向:化学工程、制绒添加剂、碱抛添加剂等产品开发。