

成平衡的中尺度模拟。例如工业级多晶硅流化床内颗粒生长过程的耦合模拟。

## 4 多晶硅流化床模拟的关键技术难点与优化策略

### 4.1 曳力模型修正与优化

气固相间动量传递的核心闭合范式系曳力模型，其适配效能对模拟精度构成直接限定。多晶硅流化床域内，多分散性颗粒、高浓度颗粒聚团及气泡主导的流动拓扑并存，传统曳力模型未纳入此类特异流动性状，致模拟偏差显著抬升。针对该困境，主导优化路径含亚网格校准与聚团效应修正。陆时杰团队提出的亚网格校准曳力模型，借由网格尺度与颗粒尺度匹配关系的考量，对气泡尺寸分布的预测精度实现显著增益，优化效能超越传统模型。基于能量最小多尺度理论的曳力模型，通过颗粒聚团多尺度性状的纳入，在多晶硅流化床内“核心-环形”流场拓扑的预测中呈现显著优势，更能精准捕获床内颗粒浓度分布。多分散颗粒流动模拟场景下，需采用颗粒粒径分布锚定的曳力模型，以加权平均方式计算不同尺寸颗粒的曳力系数，规避传统单分散曳力模型的简化偏差。

### 4.2 网格划分与数值算法优化

网格划分的合理性，作为决定模拟结果收敛性与精度的核心要素，其直接影响作用必须被置于分析的首要层级。多晶硅流化床内部气泡的尺寸范围，通常在几毫米至几十毫米之间波动；颗粒直径则处于微米到毫米的量级。网格尺度的设定，要求在保障计算效率的同时，实现对气泡与颗粒流动特性的精准捕捉。研究显示，当网格尺寸设定为颗粒直径的200倍左右时，计算效率与模拟精度之间的平衡得以达成。陆时杰等人在直径0.5m的多晶硅流化床模拟中，采用200倍粒径的网格尺寸，成功获取了稳定的流场结果。对于具备复杂结构的多晶硅流化床——例如配置异形分布器或导流构件的系统——非结构化网格的应用成为必要，以此提升流场复杂区域的网格质量，避免因网格畸变引发的计算误差。<sup>[1]</sup>

### 4.3 颗粒聚团与多分散性处理

多晶硅颗粒在其流动进程中，由于范德华力、静电力的作用，极易发生聚团现象，进而形成尺寸更为庞大的聚团

结构。聚团的存在会对床内气固流动特性产生显著改变，这一改变会影响硅沉积的均匀性。传统模拟模型往往假设颗粒是单分散、无聚团的理想球体，这种假设使得其难以对实际流动过程进行准确描述。针对这一问题，存在两种可采用的优化策略。第一种策略是在TFM模型中引入颗粒聚团动力学模型，通过对曳力系数与固相粘度进行修正，来考虑聚团对气固流动产生的影响。第二种策略是采用CFD-DEM模型，直接对颗粒聚团的形成与破碎过程进行模拟，通过对颗粒间的粘附力模型进行定义，精准捕捉聚团的动态演化过程。

多晶硅颗粒生长进程内，粒径分布的显著离散性（即多分散性）构成了核心挑战。单分散模拟框架，因系统性低估颗粒间相互作用的异质性，将不可避免地引发流场预测的偏差。处理多分散颗粒流动的有效路径，在于群体平衡模型（PBM）与主流模拟方法的耦合。PBM的核心机制，是通过颗粒数密度输运方程的求解，刻画颗粒粒径分布的动态演化轨迹。这一模型，可与TFM、CFD-DEM或MP-PIC模型实现耦合。此耦合策略，能达成气固流动与颗粒生长过程的同步模拟。

## 5 结论

数值模拟作为揭示多晶硅流化床内气固两相流动规律的关键手段，其不同方法在效能与适用场景上存在显著差异：TFM-KTGF模型以计算效率的优势适用于工业级宏观尺度模拟；CFD-DEM模型凭借高精度特性可捕捉微观流动机制，适用于实验室小尺度研究；MP-PIC模型兼顾效率与精度，适用于中尺度多分散颗粒流动模拟。未来需聚焦多尺度耦合模拟、精准封闭模型构建、高效并行计算算法开发及模拟与工程实践深度融合等方向，以进一步提升模拟技术水平，为多晶硅生产工艺优化与反应器结构创新提供支撑，助力新能源产业高质量发展。

### 参考文献

- [1] 朱言志. 工业级硅烷流化床条件下的多晶硅颗粒生产数值模拟分析[J]. 化工设计通讯, 2025, 51(10): 96-98.
- [2] 吕子婷, 江郡, 阚苏玉, 等. 多晶硅流化床气体分布器的设计与优化[J]. 石油和化工设备, 2024, 27(07): 97-100.
- [3] 董一晨, 张亚新. 多晶硅气固流化床数值模拟与结构优化[J]. 化学工程, 2023, 51(08): 49-54.

# Study on Long-term Operation Mechanism of Chemical Safety Risk Classification and Control

Weixing Zheng

Bocui Resource Recycling Technology (Quzhou) Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang, 324000, China

## Abstract

Safety risk management in the chemical industry is pivotal for ensuring production safety and minimizing accidents. This paper examines the characteristics of chemical safety risks, explores the design and implementation of a tiered risk control mechanism, and analyzes assessment methods and control strategies for various risks. It further discusses practical approaches to ensure the long-term effectiveness of risk control mechanisms, including the application of information technology and continuous optimization of control measures. Through case studies, the paper proposes a highly operational and adaptable risk control system, providing robust theoretical support and practical guidance for safety management in the chemical industry.

## Keywords

chemical safety; risk classification; control mechanism; long-term operation; safety management

## 化工安全风险分级管控长效运行机制研究

郑卫星

博萃资源循环科技(衢州)有限公司, 中国·浙江衢州 324000

## 摘要

化工行业的安全风险管控是保障生产安全、减少事故发生的关键。本文从化工安全风险的特点出发,探讨了分级管控机制的设计与实施路径,分析了各类风险的评估方法和管控策略。进一步讨论了如何在实际操作中实现风险管控机制的长效运行,包括信息化技术的应用和管控措施的持续优化。通过案例分析,提出了一套可操作性强、适应性广的风险管控体系,为化工行业的安全管理提供了有效的理论支持和实践指导。

## 关键词

化工安全; 风险分级; 管控机制; 长效运行; 安全管理

## 1 引言

化工行业由于其复杂的工艺流程和高危的作业环境,一直是各类安全事故的高发领域。随着国家对安全生产监管力度的不断加大,如何建立一个持续有效的化工安全风险管控机制成为亟待解决的课题。现有的安全管理体系在风险识别和应对措施上存在一定的局限,亟需通过创新的管理模式来完善。这一问题不仅关系到化工企业的安全运营,也关乎整个社会的公共安全与环境保护。因此,构建科学、完善的风险分级管控体系,对于提升化工企业的安全管理水平,降低事故发生率具有重要的意义。

## 2 化工安全风险的特点与分类

化工安全风险具有高度的复杂性和多样性。化工企业的生产过程通常涉及大量的危险化学品,这些化学品在生

产、储存、运输等环节均可能引发火灾、爆炸、泄漏等事故,造成严重的人员伤亡和环境污染。化工生产过程中的高温、高压、强腐蚀等特殊工艺环境,也增加了安全隐患的发生概率。在这些复杂因素的共同作用下,化工企业面临着巨大的安全管理压力。化工安全风险可按照不同标准进行分类。按照风险的发生频率与影响程度,可以将风险分为高危、较高危和低危三个等级。高危风险通常涉及到具有较高危险性的物质或设备,如易燃易爆物质的处理设施,若发生事故,后果极为严重,且发生的概率较高。较高危风险一般涉及到较为危险但相对可控的物质或过程,虽然发生事故的可能性较低,但一旦发生,同样会造成较大的危害。低危风险主要涉及常规操作或设备,但长时间累积也可能引发隐患,需要特别注意防范。

按照风险的类型,可以进一步细分为化学风险、物理风险和操作风险等<sup>[1]</sup>。化学风险主要与有害化学品的使用、储存和运输等过程相关,涉及到化学反应、泄漏、污染等问题。物理风险通常与设备的运行状态、机械故障等因素相关,可能导致爆炸、火灾或泄漏等事故。操作风险则与人员操作、

【作者简介】郑卫星(1978-),男,中国浙江衢州人,本科,注册安全工程师。

管理措施、设备维护等环节的失误或不足相关，往往是导致事故发生的重要因素之一。化工安全风险的复杂性要求管理者不仅要各类风险进行精准识别与分类，还要根据不同风险等级和类型采取相应的控制措施。合理的风险评估与分类是制定科学、安全的风险管控策略的前提，只有深入了解各类风险的特点，才能确保管控措施的有效性和针对性。

### 3 风险分级管控体系的构建与实施

化工企业在实施风险分级管控体系时，首要任务是进行全面的风险识别和评估。风险评估过程需要结合化工生产的特殊性，详细了解生产过程中可能存在的各类风险因素，并根据危险物质、设备、工艺流程等维度进行详细分类。对于每一类风险，应按照其可能造成的损失程度、发生的概率以及影响范围进行分级。这一过程不仅仅是一个数据收集的环节，更是风险控制措施制定的基础，精准的评估有助于明确风险的优先级，为后续的管控措施提供决策支持。

在构建风险分级管控体系时，针对不同级别的风险，企业应采取不同的防控措施。对于高危风险，要求企业实施最严格的安全防护措施，诸如完善的设备检测与维护系统、高标准的人员培训及应急演练等。还需设立专门的监控和预警系统，实时掌握生产过程中的各类风险信息，一旦出现异常，能够及时采取应急响应措施<sup>[2]</sup>。较高危风险则需要通过合理的工艺优化、技术改造及人员管理等手段，降低其发生的可能性。对于低危风险，企业可以通过常规的管理手段和日常巡查来确保安全。

实施风险分级管控体系不仅依赖于物理设备和技术手段，还需要管理层和员工的全面参与。管理层应当为体系的建设提供充分的资源保障，包括技术投入、人员配备以及培训等，而员工则是体系有效运行的执行者。各级员工应根据自身职责，参与到风险评估、隐患排查以及应急预案的制定与实施中。企业应定期对风险管控体系进行评审与更新，根据实际生产情况的变化和外部环境的影响，及时调整风险评估标准和管控措施，确保体系的动态适应性。

企业在实施过程中，应着重打造信息化管控平台，通过先进的数据采集与分析技术，实现对风险信息的实时监控和动态管理。通过数据可视化技术，实时呈现风险分级的具体情况，使得管理者能够清晰掌握各类风险的动态变化。这一信息化手段不仅能提高管控效率，还能增强各部门间的协调和沟通，确保在紧急情况下能够迅速作出反应。风险分级管控体系的实施不仅仅是对现有管理模式的补充，更是对化工企业安全文化的深度重塑。

### 4 信息化技术在化工安全风险管控中的应用

信息化技术在化工安全风险管控中的应用，已成为提升安全管理效率与精度的重要手段。随着化工行业的快速发展，传统的人工管理方式和依赖经验的管控模式逐渐暴露出局限，信息化技术的引入则为企业的安全生产提供了强有

力的支撑。通过采用先进的信息技术手段，化工企业能够对生产过程中的各类风险因素进行实时监控和预测，从而实现更精准的风险管控。一种核心应用是通过传感器和物联网技术实现对设备状态和环境参数的实时监控。通过在关键设备上安装传感器，能够实时获取设备的运行数据。这些数据通过网络传输至监控平台，进行分析和处理。若发现任何异常或潜在风险，系统会立即发出警报，并向相关人员推送预警信息。

数据分析和大数据技术的应用，也在化工安全风险管控中发挥了重要作用。通过对海量数据的收集、整理和分析，企业能够挖掘出潜在的风险隐患和趋势，提前做好应对准备<sup>[3]</sup>。基于历史事故数据和实时生产数据，采用大数据分析算法可以识别出生产过程中存在的薄弱环节，优化生产流程并预测可能发生的风险事件。这种数据驱动的管理方式，不仅提高了管控的准确性，也为事故的预测与防范提供了科学依据。信息化技术还在化工企业的应急管理和事故处理上起到了积极作用。现代化的应急响应系统，结合实时监控数据和历史风险分析，能够为应急指挥人员提供全面的决策支持。通过建立应急预案库，系统可以在事故发生时，依据不同类型的风险，快速生成应急处理方案，并根据现场情况进行动态调整。信息化手段还能够协同各部门、各环节的应急响应，提高整体反应速度和处置能力。

移动互联网和云计算技术的应用，也在化工安全风险管控中逐步展开。通过移动端的安全管理平台，现场操作人员可以随时获取安全数据、查看管控措施，并通过移动设备进行实时记录和上报。在云计算平台的支持下，所有数据和信息都可以集中存储和分析，确保信息的及时共享与更新。无论是日常安全检查、隐患排查，还是应急事件的处理，都能在更广泛的范围内进行协同与管控，提高了工作效率和信息透明度。信息化技术的不断发展，正在推动化工行业安全管理的创新和变革。通过科学的技术应用，化工企业能够更精准、更高效地识别、监控和控制安全风险，确保生产安全和员工生命财产的保护。

### 5 长效运行机制的保障与优化路径

化工安全风险管控体系的长效运行，依赖于一系列保障措施和持续优化路径。实现长效运行的关键在于如何将安全管理机制嵌入到企业的日常运营中，并确保这一机制能够适应不断变化的外部环境和企业内部的实际情况。保障机制的有效性，首先取决于明确的管理责任和组织结构。每个岗位的安全责任需要清晰界定，确保从管理层到一线员工都能在各自职责范围内进行有效的安全管理与执行。企业应当构建一个专门的安全管理部门，负责日常的风险评估、隐患排查、培训管理及应急演练等任务。每个部门都应设立安全专责人员，确保安全工作有专人负责并持续跟进。为了使长效机制得以实施，企业还需结合信息化手段，建立完善的监控