

Simulation and Accident Prevention of Industrial Pipeline CO₂ Leakage

Zhixing Song

Daqing Normal University, Daqing, Heilongjiang, 163712, China

Abstract

Carbon dioxide is transported through pressure pipelines in scenarios such as chemical industry, refrigeration, food, and CCUS. Upon leakage, it can form high-concentration plumes near the ground, accompanied by hazards such as severe cooling, frost and ice formation, and asphyxiation exposure. Under certain conditions, it exhibits characteristics of dense-phase release and heavy gas diffusion, which conventional empirical methods struggle to account for peak deviations caused by low-lying retention, obstacle bypassing, and phase transformation. This paper focuses on source term calculations, near-field jet and downstream diffusion interface parameters, and proposes simulation key points that can be directly implemented in China's engineering safety assessment and design review. The study also provides a preventive checklist for layout isolation, connection reliability, and operational control, aimed at translating simulation outputs into on-site disposal boundaries.

Keywords

industrial pipeline; CO₂ leakage consequences; simulation; accident prevention; research

工业管道 CO₂ 泄漏后果仿真模拟与事故预防研究

宋智星

大庆师范学院, 中国·黑龙江 大庆 163712

摘要

二氧化碳在化工、制冷、食品及CCUS等场景中经压力管道输送, 泄漏后可形成近地富集的高浓度气团, 并伴随强降温、结霜结冰与窒息暴露等危害。其在一定条件下呈现密相释放与重气扩散特征, 常规经验法难以覆盖低注滞留、障碍绕流与相态转化带来的峰值偏差。本文围绕源项计算、近场射流与下游扩散的接口参数, 提出可在工程安评与设计复核中直接执行的仿真要点。本研究并给出面向布置隔离、连接可靠性与作业控制的预防清单, 用于将仿真输出转化为现场处置边界。

关键词

工业管道; CO₂泄漏后果; 仿真模拟; 事故预防; 研究

1 引言

中国 CCUS 产业与工业副产 CO₂ 综合利用规模上升, 推动了密相或高压 CO₂ 管道及厂内管廊系统的应用, 同时也把无火灾爆炸但可致群体窒息的风险类型推到前台。既有后果分析多借助商用软件完成, 但在介质杂质、相变与复杂地形等关键环节常出现参数取值随意、场景边界不清与输出难以用于疏散决策等问题。结合中国标准体系建设与工程实践需求, 本研究从后果仿真与事故预防两个维度展开, 强调可复核的输入口径、可校核的中间变量以及可用于现场处置的结果表达。

【基金项目】 CO₂ 管道泄露后果仿真模拟研究 (项目编号: 2025WB120023)。

【作者简介】 宋智星 (2003-) , 男, 中国黑龙江牡丹江人, 本科, 从事化学工程与工艺研究。

2 工业管道 CO₂ 泄漏后果仿真模拟

2.1 源项与工况窗口的可追溯定义

为使工业管道 CO₂ 泄漏后果仿真的源项输入可核验、可复算, 应先将工况窗口与边界条件以场景卡方式固化。其一, 按压力等级、介质温度与相态把运行区间分为气相、液相与密相三套窗口, 分别规定取值点位为站场出口、阀后或管段平均状态, 场景卡同时记录管壁温度、保冷完好性与环境温度, 并统一单位与基准压力, 对每次场景迭代保留版本号与修改记录, 便于审核回溯, 并把介质质量边界写入必填字段, 包括纯度、含水、氧含量及酸性杂质上限, 字段需绑定来源为化验单或在线分析仪, 注明校验周期与缺项替代规则, 确保物性与温降计算不被纯 CO₂ 默认值拉偏^[1]。其二, 孔口泄漏按针孔、裂缝与全断建立几何模板, 针孔用等效直径叠加收缩系数, 裂缝按长宽比给出附加阻力, 全断按破口角度确定有效面积, 计算先做临界流判别, 再用等熵膨胀并

引入真实气体状态方程修正质量流率、喷口温度与声速比,同时把阀门关闭时间、上游库存、并联支路回流与压缩机停机惯性写入操作条件,输出初期高流率与后期衰减的双阶段源项曲线。其三,针对密相喷放的低温效应,在源相端同步求解相包络穿越点、固相分率判别量与结霜增长速率的敏感区间,并将地表干冰沉积量与喷口局部堵塞系数作为近场边界,使扩散模型能够反映二次喷射偏转、落地堆积与暴露时程变化。其四,设置源项工程闭合校核流程,至少完成管径、粗糙度、摩阻系数、阀门等效阻力、保冷段换热假设与关键测点压力的闭合核算,并将计算书中的压降、温降与现场DCS趋势对照校核,最后用P&ID与竣工图逐项核对隔离阀位置、旁通与放空支路,确保源项可追溯到图纸与数据记录。

2.2 近场射流与重气扩散的分区耦合

为避免工业管道CO₂泄漏后果计算在近场与远场之间出现边界不一致,可采用射流区与重气扩散区的分区耦合流程。第一,0至50 m定义为动量主导区,按孔口类型确定喷流初始截面并执行临界流判别,取质量流率、喷口温度与速度作为输入,采用射流夹带与扩张角关系求中心线速度和浓度衰减,同时结合管道离地高度与地表粗糙度计算再附着距离与贴壁流长度,识别喷流抬升或俯冲并形成有效释放高度,对贴壁段按摩擦阻力修正动量耗散,最终输出有效释放高度、等效初速度与等效源半径并作为下游扩散的边界条件。第二,50 m以外按重气云团处理,依据密度比与理查森数选择重气模型或高斯修正模型,并将气象参数统一到10 m风速与1.5 m受体高度,稳定度、粗糙度与下垫面热通量按企业气象站记录和场景卡片固定口径,工程计算可选用SLAB等重气扩散算法,并遵循定量风险评估导则对重气与非重气扩散的选择要求。第三,存在厂房间隙、管廊挡风墙、围堰或沟渠时,采用局部CFD校核与工程模型主算组合,局部区域仅覆盖障碍物上下游与低洼滞留区,边界采用第一分区输出的等效源参数,计算提取回流区长度、滞留系数、绕流加速因子与近地湍流增强系数,再将这些量回填为工程模型修正项并保持同一源项与气象输入,避免全域CFD带来的网格依赖。第四,结果校核按可验证性组织输出,至少给出中心线浓度峰值随时间曲线、1.5 m高度等值线、低洼点超限持续时间与关键受体点浓度时程,并对峰值出现时刻、云团推进速度与稀释斜率进行自检,必要时与公开重气试验规律或同类模型对照其趋势一致性^[2]。

2.3 暴露判据与后果量化的本地化输出

为实现工业管道CO₂泄漏后果仿真结果的现场可用化,应将浓度时空分布转译为本地化暴露判据与可执行输出。第一,暴露阈值采用分层对照表管理,作业人员以GBZ 2.1的PC-TWA与PC-STEL为主,分别按8 h时间加权平均与15 min短时平均判读,仿真结果以1 min步长导出并同步计算15 min滑动平均,明确瞬时值与平均值两套口径,巡检

与抢险人员另设峰值控制并记录超限次数,危及生命档采用IDLH等急性阈值作为上限,所有ppm与mg/m³在泄漏漏压条件下统一换算,受体呼吸高度在站场取1.5 m,在低洼沟渠取1.0 m,在公众区取1.3 m。第二,后果量化以阈值首达时间与持续超限时间为核心指标,受体布设结合厂区门禁、换班集合点、固定岗、承包商作业点与巡检路线节点,逐点输出浓度时程并形成清单字段,至少包含首达时间、峰值、连续超限时长与可通行时间窗,同时在GIS上输出各阈值的危险区边界线,便于直接生成疏散优先级与封控半径。第三,气象输入按厂址多年统计与典型不利并行,统计集依风速风向与稳定度分箱选代表工况,不利工况优先取低风速稳定层结与清晨逆温,并对雨雾削弱湍流导致的近地累积、风向摆动造成的多次扫掠单独标注,确保扩散边界与预案条款可一一对应。第四,交付文件以可审计附录固化假设与参数来源,记录源项、地表粗糙度、障碍物修正与模型选型依据,对孔径、阀门关闭时间与杂质含量等开展一因素扰动得到危险距离区间,并按中国超临界或密相CO₂管道定量风险评估文件所述伤害准则与风险可接受基准给出危险距离建议值及适用条件。

3 工业管道CO₂泄漏事故预防研究

3.1 工程布置与隔离能力的前置约束

为把工业管道CO₂泄漏的窒息性危害在设计阶段就锁定在可隔离、可放散的边界内,应将工程布置与隔离能力作为前置约束。第一,总图与管廊方案比选应基于重气体滞留敏感区清单,结合厂址风向频率、地形高差与人员流线,硬性避开地下通道、下沉地坑、半封闭连廊和低洼绿化带等低位空间,对确需穿越部位通过抬高标高、布置通风挑檐、预留连续自然通风廊道减弱滞留条件,并在厂房夹缝与窄通道设置净空与禁堆控制,禁止临设围挡形成封闭死角^[3]。第二,切断阀与放散点按最小可隔离段成对布置,段两端设置可远程紧急切断阀并保留就地手动隔离,阀位以可达性、可视性、结冰防护与检修作业面校核为准,统一设置阀位指示、编号牌与安全站位线,放散口引至开阔安全区并避开疏散通道的下风向,放散管口配备防雨帽和导向筒以减少回落滞留,同时在操作卡中明确阀门动作顺序、盲板隔离位置、放散朝向和人员避让距离,使疑似泄漏点可在预限定时间内完成上游截断、段内降压与受控放散。第三,法兰、阀组与软连接集中区应划定导排边界,排水沟、电缆沟与雨水口采取封堵或隔断并保持可复位,沟道穿越处设置可拆封堵板并纳入点检,必要时配置水封阻断气体窜入,对可能产生冷凝液或干冰颗粒的泄放区预留冲洗口、收集槽与可拆格栅检修位,并将地面防滑、防冻与防绊倒的结构细节写入维护标准。第四,施工与检修变更执行几何条件不劣化原则,凡围墙加高、围堰增设、检修棚封闭、挡风板安装或通风开口调整等改变气体流动路径的事项,必须同步复核人员通行宽度、应急车道

通畅性与检修车辆回转半径,并按变更后边界更新竣工资料与现场交底卡。

3.2 材料与连接部位的失效防控

在工业管道 CO₂ 泄漏事故预防中,为降低泄漏的突发性,材料与连接部位需按失效机理实施前置防控。第一,针对 CO₂ 夹带水分与酸性组分的内腐蚀,工艺文件应明确脱水控制值与取样复核频次,设计给出腐蚀裕度并对薄壁支管设定最小壁厚控制线,焊缝热影响区、螺纹连接与小口径支管纳入重点清单,施工落实坡口清洁、预热与层间温度控制、根部成形复核,并按比例进行射线或超声检测及必要的表面检测,缺陷返修后复验并归档材质与检验记录。第二,对节流、减压、放散等降温敏感点,必须校核最低金属温度并将泄放相变的温度骤降计入不利工况,材料选型以低温冲击韧性覆盖母材及焊缝金属和热影响区为准,连接优先对焊并避免温度频繁变化处采用不利法兰型式,现场严控冷弯半径与热处理偏差,保冷外护层破损及时修补并恢复排水,避免凝露积水诱发点蚀^[4]。第三,密封件与紧固件实行定型管理,垫片按介质相态及温压等级选型,装配前复核密封面缺陷,按扭矩分级对称紧固并记录首紧与复紧值,启停后在热循环稳定窗口复紧并复查预紧力,对快装接头、软管与临时跨接件设定使用次数与报废判据,开停工后执行肥皂水检漏。第四,在役检查分为日常与停检两层,日常关注结霜、白雾、异常噪声、阀杆渗出与支吊架松动,停检围绕测厚、保冷破损、法兰面与错口复核,必要时做泄漏试验,发现项纳入工作包闭合。

3.3 作业控制与应急处置的现场化机制

为使工业管道 CO₂ 泄漏防控落到班组动作,应把作业许可与应急处置做成可核查的现场机制。第一,按 GB30871 实施特殊作业票证联动,凡涉及 CO₂ 管线、阀组或放散点周边施工,先完成停输确认、上游截断、段内放空与置换,再做残压释放和盲板隔离,阀门上锁挂牌并复核隔离点,交底必须写清阀位顺序、盲板编号、放空持续时间与撤离方向,作业放行以压力归零和放空口朝向校核为条件,警戒区按下风向外扩并对沟渠、地坑等低洼点同步封控。第二,针对 CO₂ 单纯性窒息风险,进入可疑空间前按有限空

间要求检测氧含量,氧体积分数应在 19.5% 至 23.5% 范围内,超限则禁止进入,必须处置时由受训人员佩戴正压自给式空气呼吸器进入,外部监护保持持续联络、人员清点与出入口畅通,防护同步配置防寒手套与面屏以应对低温喷放,救护先转移至新鲜空气处并保持气道通畅,冻伤采用温水缓慢复温且不揉搓破皮。第三,演练按情景化脚本组织,覆盖夜间低风、雨雪低温和检修交叉作业等不利条件,按报警、切断、放空、封控、疏散、集合点清点、交通管制与外部救援接应的顺序逐项计时核对,同时检查集合点选址、通道封闭、现场联络和救护器材到位情况,演练结束当班修订班组处置卡和集合点路径^[5]。第四,事故与未遂事件实行同口径闭环,凡渗漏、误放散、阀位误操作或人员不适均形成原因分析和整改清单,明确接口改造、标识更新、规程条款补充与复训验证的期限,整改结果回填到作业票证条款和交接班要点,并在下一轮检修前对关键阀组、放空口和受限空间出入口复查签认。

4 结语

面向工业管道 CO₂ 泄漏的风险控制,应将源项、近场射流与下游扩散的接口参数固化为可复核口径,并在复杂厂区条件下采用分区耦合方法保持结果的可解释性与可追溯性。事故预防需从布置隔离、连接部位失效防控与作业应急三条线落实到可执行条款,并通过变更管理与经验反馈持续闭合薄弱环节,使设计、施工与运行阶段使用同一套风险边界表达。

参考文献

- [1] 谢飞,李佳航,王新强,等.天然气管道 CO₂ 腐蚀机理及预测模型研究进展[J].天然气工业, 2021, 41(10):109-118.
- [2] 李萌,聂超飞,欧阳欣,等.超临界 CO₂ 管道输送理论与仿真研究进展[J].油气储运, 2025(5).
- [3] 闫振汉.工业规模 CO₂ 管道泄漏过程热力学特性研究[D].吉林化工学院, 2020.
- [4] 朱国承,曹琦,王萌,等.超临界 CO₂ 管道泄漏扩散风险分析[J].安全与环境学报, 2022(003):022.
- [5] 曹琦,何春宏,辛保泉,等.二氧化碳管道泄漏扩散风洞试验研究[J].安全与环境学报, 2025(6).