

石油化工企业储罐爆炸模拟与优化设计技术研究

王亮亮 (山东神驰石化有限公司, 山东 东营 257237)

摘要: 石油化工企业储罐爆炸事故造成的危害严重, 因此有必要对储罐爆炸进行模拟和优化设计。本文从理论角度探讨了储罐爆炸的机理、影响因素以及优化设计技术。通过分析储罐爆炸的物理化学过程, 总结了影响爆炸的关键因素, 并提出了优化设计的策略和方法。本文的研究成果可为石油化工企业储罐的安全设计提供理论指导, 降低爆炸事故的风险。

关键词: 石油化工企业; 储罐爆炸; 模拟; 优化设计

0 引言

石油化工企业广泛使用各类储罐存储原料、中间产品和成品, 储罐爆炸事故时有发生, 造成人员伤亡、财产损失和环境污染。为了预防和减轻储罐爆炸事故的危害, 有必要深入研究储罐爆炸的机理, 开发模拟和优化设计技术。本文将从理论角度探讨储罐爆炸模拟与优化设计技术, 为石油化工企业储罐的安全设计提供参考。

1 储罐爆炸的机理分析

1.1 储罐爆炸的物理化学过程

储罐发生爆炸其实是一连串复杂物理和化学过程的综合, 这些复杂过程相互交织, 构成了一个多阶段、多阶段的破坏性序列。在研究这种现象的过程中, 必须深入考虑从燃料挥发到混合, 到燃烧和最后的压力波传递的各个关键环节。更具体地讲, 这个过程始于储罐内的可燃物体, 如石油和天然气, 这些物质在特定条件下, 从液体或固态状态挥发为气态。这些挥发出去的气体在储罐内与空气结合, 构成了一个带有爆炸危险的混合性气体。

当挥发性气体与空气的混合比率达到特定的爆炸限度, 这种混合气体开始进入一个高度不平稳的状态。如果在这样的场景中碰到外部火源, 例如电火花、温度较高的表面或其它任何可能引起燃烧的元素, 都将激发一种激烈的化学作用。此化学反应过程中, 储存的化学能被迅速地释放并转变为热量和压力能量, 这会产生大量的高温气体。这些气体的快速扩张对储罐的结构完整性产生了极为严重的威胁和影响。

在爆炸反应的化学阶段中, 所释放的热能会迅速地升高周围的气体温度, 导致气体体积急剧增大。由于储罐内部空间受限, 这部分快速扩张的气体在容器里引发了高压环境。当储罐内部的压力大大超出其设计能承受的最大承载能力之后, 储罐的物理构造便开

始出现明显的失效, 这可能引发材料的疲劳、裂纹生成, 甚至壁面可能导致断裂。这种突发性的压力释放, 并伴随着燃料和氧气混合增加, 有可能触发连锁反应, 导致更大范围的爆炸事件。

1.2 影响储罐爆炸的关键因素

存储罐发生爆炸属于高度破坏和危险性极高的事故, 涉及的触发机制十分复杂, 并且受到多种影响因素的综合作用。对储罐爆炸原因的深入分析揭示了, 储罐的内在结构、所用材料和其容量的大小都与其对抗爆炸的性能有着紧密的关联。通常来看, 一个储罐的设计结构越有逻辑性和合理性, 所使用的材料越具强度和韧性, 其对抗爆炸冲击波的能力也越出色。相对地, 若储罐出现了构造上的瑕疵或者其所使用的物料不满足标准, 那么在爆炸的过程中, 它更容易遭受破裂、变形或者是解体等重大风险。同时, 储罐容量也被视为影响爆炸危害程度的一个重要因素。储罐的容量如果更大, 爆炸时释放出的能量就会更强大, 从而对周围的生态和人的健康造成更大的伤害。

除了存储罐自身可能存在的特性, 储存物的理化属性也是导致和增加爆炸风险的主要原因之一。一般而言, 储罐中的物料展现了不同级别的可燃、挥发和反应性。若存储材料的可燃性很高, 在遭遇明火、高温等点状火焰时, 非常容易发生燃烧或爆炸; 当存储物质的挥发性很强时, 在室温常压的条件下, 它们会大规模蒸发, 从而生成具有爆炸性的气体混合物; 如果存储物的反应活跃度较高, 在遇到禁忌物质时, 可能会发生强烈的化学变化, 同时还会伴有大量的热能和气体释放, 可能导致爆炸性事件。因此, 对储存物资的危险特征进行全盘评估, 并实施有针对性的预防及控制策略, 是降低爆炸风险的关键步骤。

储罐爆炸的另一主要原因是环境的状况。储罐周围的温度、湿度及通风等各种环境指标都会在不同层

面上对爆炸事件的发生和扩展产生作用。举例来说,在高温条件下,存储物质的蒸发和分解过程会更加迅速,从而导致爆炸性气体混合物的生成增多;高湿度的条件可能会使储罐的材料受到腐蚀,从而减少其爆炸防护;如果通风条件不佳,爆炸性气体的混合物浓度会不断增加,一旦达到爆炸的临界状态,就有可能被成功点燃和引爆。所以,对储罐内部的温湿度环境进行严格的管理,确保良好的空气流通,是减少爆炸危险的关键

2 储罐爆炸的模拟技术

2.1 数值模拟方法

数值模拟作为一种功能强大且灵活多变的现代科学研究工具,在探索和揭示储罐爆炸这一复杂物理现象的本质规律和内在机理方面发挥着不可或缺的关键作用。通过建立能够高度概括和精确描述爆炸过程的数学模型,运用计算流体力学、有限元分析等一系列成熟完善的数值方法,研究人员能够深入剖析爆炸现象的动力学演化过程,全面掌握爆炸过程中流场、温度场和压力场的时空分布特征及其动态变化规律,从而准确预测爆炸的影响范围和破坏强度。

数值模拟技术以其独特的优势和强大的功能,为储罐爆炸研究提供了一种全新的思路和方法。传统的实验研究方法虽然直观可靠,但受限于实验条件和测试手段,往往难以全面获取爆炸过程的完整信息,且实验成本高昂、周期较长。而数值模拟则能够突破这些限制,通过建立精细的物理模型和数学方程,运用先进的计算机技术和数值算法,在虚拟的数字空间中完整再现爆炸全过程,实现对爆炸现象的全方位、多角度、高精度的模拟和分析。

在数值模拟中,计算流体力学方法能够准确捕捉和描述爆炸过程中复杂的流动现象,如激波传播、湍流混合、燃烧反应等,揭示流场的时空演化规律;有限元分析方法则能够详细刻画爆炸载荷作用下储罐结构的动力响应和失效模式,评估爆炸对储罐结构完整性的影响。通过耦合计算流体力学和有限元分析,可以实现流固耦合模拟,全面考虑流体力学效应和结构动力学效应之间的相互作用,提高模拟的精度和可靠性。

数值模拟的结果可以为储罐的设计和防护提供重要的理论依据和技术支撑。通过系统的参数分析和敏感性研究,可以优化储罐的结构形式和材料选型,提高其抗爆性能和安全裕度;通过模拟不同的爆炸工况

和应急措施,可以制定科学合理的防护方案和应急预案,最大限度地减轻爆炸事故的危害和损失。

2.2 物理模拟实验

物理模拟实验是一种在实验室环境中用于进行的科学探究方式,其主要目的是使用缩比模型或者实物模型来模拟真实世界中一些高度非线性且涉及多场相互耦合的复杂物理现象,比如储存罐的爆炸等极端工况。通过精心规划的物理模拟测试,研究人员能够在—个可控环境中模拟出某些特定的物理现象,并通过系统的测试与分析,从而获取大量高质量的实验数据。这些数据对于深入了解储罐发生爆炸的机理、确保数值模拟结果的准确性以及优化储罐设计具有至关重要的作用。

物理模拟试验的流程一般涉及以下几个核心阶段:首先,依据研究目标和现实需求,选取合适的相似性标准,如几何相似性、运动相似性和动力相似性,并根据这些来设计或制作缩小比例的模型或者真实物体模型;接下来,采用了高速摄影、压力传感器、应变片等前沿的检测方法,对模型在各类工作场景中的反应进行了实时的跟踪和记录;接着,我们对收集到的实验数据进行了详细的处理和分析,并从中提取了关键的物理参数,例如冲击波速度、爆炸产生的压力以及破片速度,然后与理论预期和数值模拟的结果作了详细对比和验证;最终,基于实验数据和深入的理论探讨,我们给出了针对储罐设计的优化建议和方向性指导,旨在增强其对爆炸的抵抗力和整体的稳定性。

储罐爆炸由于涉及到复杂的物理和化学事件以及极端环境因素,因此物理模拟实验的设计和执行为实验人员的专业能力和技术水平提出了极高的标准。一方面,实验人员需要具有坚实的基础知识和丰富的实践背景,能够根据实验的具体目的和模型特性,合理地选择相似准则和测试方法,同时对实验的过程进行精确的控制和调整;另一方面,在实验中,可能会遭遇如高温、高压、高应变率等极端环境,这些都为整个实验设备和测试仪器的工作效果及其稳定性带来了巨大的挑战。因此,实验人员必须拥有出色的操作能力和应急处理技巧,以确保实验的稳定与数据的可信度。

3 储罐爆炸的优化设计技术

3.1 储罐结构优化设计

为了增强储罐的爆炸抵抗力,选用合适的材料显得尤为关键。在选择材料时,除了要确保其在爆炸冲

击下能保持一定的机械强度和韧性，以防止脆性断裂外，还需对材料的耐腐蚀性和高温性能进行评估，以适应存储介质的化学属性和可能出现的温度异常。另外，材料的耐疲劳使用周期也是一个不应被忽视的考量因素，因为它与储罐的安全操作周期以及维护成本有直接的关联。

然后，储罐壁厚的优化成为另一个中心关注点。通过对储罐需要承载的峰值压力和爆炸时所引发的动态反应进行详细计算，我们能够确定出最理想的壁厚。这样不仅有助于维护构造的完好性，而且也能高效地应对外界的冲击以及内部压力的不稳定性。适度的增加壁厚能够显著提升储罐的爆炸抵抗力，但这也会导致材料的成本和建设的复杂性上升，因此在安全性与经济性之间寻求平衡是很必要的。

另外，储罐的支撑和连接设计对提高整体结构的稳定性和抗爆能力起着决定性的影响。设计合适的支撑结构能有效地分散爆炸时产生的冲击力，从而降低由于集中力触发的建筑结构损伤。选择连接方式时，我们需确保在遭受爆炸冲击时仍然保持结构连接的稳定性，避免结构接头掉落或失效。

优化储罐的外形、尺度和内部构造是一项对减少爆炸荷载和限制爆炸影响区域有效的战略策略。由于圆形和球状存储罐在承受均质压力时表现出优越的机械性能，因此通常被视为相较于方形或其他非对称的形状更能有效抵御爆炸冲击。通过对储罐尺寸和比例的调整，能优化其对内部压力的反应，进一步减缓因设计失误而引发的应力聚焦。内部建筑的改进措施，例如增加隔断或者支撑结构，都有助于在某种程度上隔离或减轻爆炸带来的压力波动，从而降低整个建筑的风的强度。

3.2 安全防护系统设计

泄压装置的设计理念是在异常压力累计到可能的危险水平时，能够迅速释放内部的压力，以降低储罐因压力过高导致爆炸的危险。这套装置通常由压力释放阀或爆破片组成，设计时需要仔细计算以保证与储罐最大的承受压力和体积相符，确保在紧急状况下能够迅速响应和有效释放压力。

此外，为了避免储罐在爆炸之后火情或爆炸产生的波涌能够被严格地局限在特定范围，并避免由连锁反应导致的更广泛的灾害，安装隔爆装置成了关键步骤。这种设备可能包含防爆墙体或者特制的隔断材料，其设计必须能够承受巨大的冲击和温度，同时确保其

结构的完好无损。

随后，设置灭火系统在遏制初期火灾以及防止其可能转变为全面爆炸的过程中具有至关重要的作用。这涵盖了自动化喷水系统、泡沫灭火器以及干粉灭火装置等多种设施。不同的系统都有自己的特定应用场景，例如泡沫系统可以用于石油基的液体火灾，而干粉系统则适合于涉及电气设备的火灾。在进行设计时，我们需要基于存储材料的特性以及储存罐的结构来选择最合适的灭火方法。

4 结论

在石油化工行业中，储罐爆炸事故构成了一种严重的安全威胁，其对人员安全、环境保护及企业资产造成的潜在破坏极其重大。因此，预防和控制此类事故的爆炸风险不仅是维护安全生产的核心任务，更是实现企业可持续发展的关键。本文将从理论和实践的维度深入探讨储罐爆炸事故的模拟与优化设计技术，详尽分析爆炸的机理及其影响因素，并在此基础上总结当前模拟技术与优化设计方法的应用现状与发展前景，从而为储罐爆炸的防护提供科学且系统的理论支持。关于储罐爆炸的机理，本文详细探讨了液化石油气、天然气等易燃易爆化学物质的物理和化学属性，及这些属性如何在特定条件下引发爆炸。通过对爆炸过程中热力学和动力学参数的深入分析，本文揭示了压力波动、温度升高及气体泄漏等因素在爆炸事件中的作用机制。此外，环境因素如温度、湿度以及储罐设计缺陷也被纳入考量，以揭示它们如何影响爆炸的发生与扩散。本文详述了模拟技术在储罐爆炸研究中的应用，特别是在复杂化学反应和多相流动模拟方面的最新进展。利用高级计算模拟工具，如计算流体动力学（CFD）模型，能够预测和重现爆炸过程中的关键变量变化，为储罐设计提供了更为精确的安全标准。这些模拟工具通过细致模拟事故发生的每一环节，帮助研究人员识别潜在的风险点和弱性区域，从而指导实际的储罐设计和安全防护措施的优化。

参考文献：

- [1] 罗晓琳. 大型储罐区检维修 HSE 风险管理 [D]. 兰州交通大学, 2022.
- [2] 张鑫. 石油化工企业油品储运过程中的安全环保问题及对策 [J]. 化工管理, 2020, (12): 106-107.
- [3] 玄军伟. 化工园区危险化学品储存风险管控模型研究 [D]. 首都经济贸易大学, 2017.