

前 言

氢能因其可再生、燃烧过程清洁零碳、能源利用效率较高等优点，被视为最具发展潜力的新能源，受到了世界各国的青睐。由于氢气密度低，高压储氢已成为氢能发展的一项关键技术，且已广泛应用于氢能产业链的各个环节。近年来，高压氢气泄漏诱发的火灾爆炸事故频繁发生，引起广泛关注，已成为高压储氢安全面临的重大挑战。

高压储氢存在一种特殊的安全隐患，即在无外界点火源存在的条件下，高压氢气泄漏后可能发生自发燃烧，即自燃。目前，扩散点火机制被认为是引起高压氢气泄漏自燃发生的主要原因。由于储存装置氢脆或泄压装置失效等，高压氢气通过管道或直接释放至空气中时，会首先在氢气射流前方形成一道激波，激波产生高温高压，从而使激波后方空气温度快速升高，高温空气与射流前沿之间发生物质和能量的扩散，形成局部的氢-空气混合层，当混合层浓度处于燃烧范围且达到点火温度时，便会发生自燃。根据氢气的燃爆特性，高压氢气泄漏引发的自燃，极有可能进一步发展成爆炸或湍流喷射火焰等严重的灾害事故。因此，面向氢能产业快速发展过程中高压储氢安全的重大需求，迫切需要对高压氢气泄漏自燃动力学机理，以及其向火灾与爆炸演变的规律开展系统研究，从而为高压储氢安全防控与应急决策提供理论基础和科学依据。

本书聚焦高压氢气泄漏过程中从自燃发生到火灾爆炸形成的动态演化规律，以实验研究方法为主，结合数值模拟技术和理论分析，对高压氢气泄漏激波传播特性、激波诱导氢-空气扩散层自燃动力学机理、自燃发生预测模型及其火焰传播规律等方面取得的最新研究成果进行全面论述。全书包含7章，第1章综述了氢能发展的安全挑战；第2章介绍了高压氢气泄漏自燃的基础理论与研究方法；第3章探讨了高压氢气泄漏激波传播特性；第4章分析了高压氢气泄漏自燃影响因素及其作用规律；第5章分析了高压氢气泄漏自燃动力学特性的数值模拟；第6章介绍了基于可视化实验的管道内自燃火焰传播机制；第7章讨论了氢气自燃火焰传播特性及诱发喷射火行为特征。全书由段强领、孙金华、弓亮共同撰写，段强领对全书进行统稿，蒋益明、张嵩林、蒋光波、张淮臣、李萍、曾倩、汤静、朱梦圆等对全书进行了校对。

本书凝聚了作者团队十余年来在高压氢气泄漏自燃领域的研究积累，涵盖了

从高压氢气泄漏模拟实验平台建设到系列研究成果的系统总结。本书的构思和完成得到了国家重点研发计划“氢燃爆致灾机理与预测技术”(2021YFB4000902),国家自然科学基金项目“高压氢气泄漏过程中激波诱导自燃发生的内在机理与预测模型研究”(51706220)、“高压氢气泄漏扩散动力学与火灾爆炸致灾机理及其危害评价”(U21A20144),中国博士后科学基金“管道内障碍物对高压氢气泄漏自燃的影响及其机理研究”(2017T100460)、“管道几何结构对高压氢气泄漏自燃的影响机制研究”(2016M602034),中国科学技术大学“统筹推进世界一流大学和一流学科建设专项资金资助”(YD2320002006)的支持。在此,谨向科学技术部、国家自然科学基金委员会、中国博士后科学基金会及中国科学技术大学等有关单位致以诚挚谢意。同时,本书在撰写过程中亦得到了多位专家学者的悉心指导,并参考和引用了国内外同行的宝贵成果,在此一并致谢。

尽管作者在写作过程中力求准确严谨,但由于水平所限,书中仍存在不足之处,敬请广大读者批评指正,以进一步完善和提升。

作 者

2026年2月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 氢能的应用现状	1
1.1.1 氢能应用概括	1
1.1.2 氢能发展中存在的问题	3
1.2 氢能的安全性	4
1.2.1 氢气的物理化学性质	4
1.2.2 氢气的安全属性	4
1.2.3 氢气的危险属性	5
1.3 氢气储存技术	6
1.3.1 常见氢能储存方式	6
1.3.2 不同储氢方式能源利用效率对比	7
1.4 高压氢气泄漏致灾问题	8
1.4.1 氢气泄漏致灾动力学过程	8
1.4.2 高压氢气泄漏自燃现象	9
1.5 高压氢气泄漏自燃研究趋势	10
参考文献	12
第 2 章 高压氢气泄漏自燃的基础理论与研究方法	15
2.1 氢气点火机制	15
2.1.1 逆焦耳-汤姆孙效应	15
2.1.2 静电点火	15
2.1.3 扩散点火	16
2.1.4 瞬时绝热压缩	17
2.1.5 热表面点火	18
2.1.6 机械摩擦和撞击	18
2.1.7 小结	18

2.2	火焰传播动力学概述	19
2.2.1	层流预混火焰	19
2.2.2	湍流预混火焰	23
2.2.3	非预混(扩散)火焰	27
2.3	高压氢气泄漏自燃的实验研究方法	31
2.3.1	实验系统设计	33
2.3.2	实验测量方法	39
2.3.3	实验程序	39
2.4	高压氢气泄漏自燃的数值模拟研究方法	40
2.4.1	控制方程和数值算法	43
2.4.2	燃烧模型	47
	参考文献	47
第3章	高压氢气泄漏激波传播特性	54
3.1	激波管流动理论	54
3.2	平直管道内激波传播特性	58
3.2.1	管道内激波产生和传播过程	58
3.2.2	泄放压力对激波强度的影响	60
3.2.3	管道长度对激波强度的影响	61
3.2.4	管道直径对激波强度的影响	65
3.2.5	管道横截面形状对激波强度的影响	67
3.2.6	管道横截面改变对激波强度的影响	69
3.2.7	管道内障碍物对激波强度的影响	74
3.2.8	泄放口开口率对激波强度的影响	76
3.3	异形管道内激波传播特性	79
3.3.1	U形管道内激波传播特性	79
3.3.2	不同角度弯管道内激波传播特性	81
3.4	杂质气体掺混对激波传播特性的影响研究	86
3.4.1	不同浓度甲烷掺混对激波传播特性的影响	86
3.4.2	不同浓度一氧化碳掺混对激波传播特性的影响	88
3.4.3	不同浓度氮气掺混对激波传播特性的影响	89
3.5	激波传播特性对氢气自燃的影响分析	92
	参考文献	93

第 4 章 高压氢气泄漏自燃影响因素及其作用规律	95
4.1 高压氢气泄漏自燃发生的理论分析	96
4.1.1 理论点火临界压力预测	96
4.1.2 自燃发生影响因素分析	97
4.2 泄放压力对自燃发生的影响规律	98
4.3 平直管道的尺寸对自燃的影响规律	102
4.3.1 管道长度的影响	102
4.3.2 管道直径的影响	104
4.4 平直管道内结构变化对自燃发生的影响规律	109
4.4.1 横截面形状的影响	109
4.4.2 变截面结构的影响	112
4.4.3 管道内障碍物的影响	118
4.5 异形管道结构对自燃发生的影响规律	119
4.5.1 U 形管道结构的影响	119
4.5.2 不同角度弯管结构的影响	122
4.6 泄放口开口率降低对氢气自燃的抑制作用	124
4.7 管道内气体成分对自燃发生的影响规律	126
4.7.1 甲烷掺混对自燃的影响	126
4.7.2 一氧化碳掺混对自燃的影响	128
4.7.3 氮气掺混对氢气自燃的影响	132
4.8 耦合多特征参数的高压氢气泄漏自燃预测模型	135
4.8.1 高压氢气泄漏自燃影响因素	135
4.8.2 特征参量的选取	136
4.8.3 量纲分析	138
4.8.4 相关性验证	139
4.8.5 预测模型构建	140
参考文献	142
第 5 章 高压氢气泄漏自燃动力学特性的数值模拟	146
5.1 模型有效性及网格无关性验证	146
5.1.1 数值方法检验	146
5.1.2 网格独立性测试	150

5.2	高压氢气泄漏自燃特性及其机理·····	152
5.2.1	激波作用下氢-空气混合层的温度演化规律·····	152
5.2.2	高压氢气泄漏自燃的初始点火时间和位置·····	157
5.3	自燃火焰的形成及其传播特性·····	160
5.3.1	可燃氢-空气混合层的发展·····	160
5.3.2	火焰传播规律·····	163
5.4	纯氢气点火的化学反应动力学分析·····	166
5.4.1	敏感性分析·····	166
5.4.2	反应路径分析·····	168
5.4.3	活性自由基浓度分析·····	168
5.4.4	热释放及化学反应速率分析·····	169
5.5	甲烷添加对氢气点火影响的化学反应动力学分析·····	170
5.5.1	敏感性分析·····	170
5.5.2	氢-甲烷混合气的反应路径分析·····	170
5.5.3	甲烷添加对活性自由基浓度影响分析·····	172
5.5.4	甲烷添加对热释放及化学反应速率影响分析·····	173
	参考文献·····	175
第 6 章	基于可视化实验的管道内自燃火焰传播机制·····	177
6.1	火焰图像识别方法·····	177
6.2	平滑矩形管道内高压纯氢气泄漏自燃火焰成长机制·····	179
6.2.1	自燃火焰传播动力学·····	179
6.2.2	氢气自燃火焰及火焰成长机制·····	184
6.3	管道内障碍物对高压氢气泄漏自燃火焰的影响·····	186
6.3.1	障碍物位置对氢气自燃的影响·····	186
6.3.2	管道内火焰加速机理研究·····	192
6.4	杂质气体掺混对氢气自燃火焰的影响·····	195
6.4.1	不同浓度甲烷影响·····	195
6.4.2	不同浓度一氧化碳影响·····	199
6.4.3	不同浓度氮气影响·····	202
	参考文献·····	208

第 7 章 氢气自燃火焰传播特性及诱发喷射火行为特征	211
7.1 自燃火焰在管外传播的微观动力学	212
7.1.1 管外激波传播特征及喷射火形成的临界条件	212
7.1.2 管外火焰微观结构	215
7.1.3 管外火焰传播特性	218
7.2 局部受限空间内自燃诱发爆燃的燃烧特性	220
7.2.1 爆燃火焰发展	220
7.2.2 爆燃超压特性	223
7.3 喷射火焰形成及发展特征	227
7.3.1 高压氢气喷射火的形成过程	227
7.3.2 氢气喷射火的行为特征	228
7.3.3 氢气喷射火形态的演变机制	228
参考文献	233

第1章 绪 论

1.1 氢能的应用现状

1.1.1 氢能应用概括

面向国家碳达峰、碳中和的重大决策需求，大力发展绿色低碳、清洁高效的新能源是助力实现“双碳”目标的有效途径。氢能因可再生、燃烧过程清洁零碳且有较高的能源利用效率等优点，被视为最具开发前景的新能源，受到了世界各国的青睐。当前美国、日本、德国、法国等国家均已明确将氢能规划上升到国家战略层面，并制定配套政策体系扶持“氢经济”发展。我国对氢能的研究和发展也极为重视，在《2030年前碳达峰行动方案》《国家创新驱动发展战略纲要》《能源技术革命创新行动计划（2016—2030年）》等国家级规划中均明确了“氢能与燃料电池”产业的战略性地位，将氢能技术的创新和发展列为重点攻关任务，明确要求加快低成本、高安全氢能技术的研究和开发，推动氢能技术在燃料电池、电动汽车、分布式发电、应急电源等领域的应用。

在早期，氢气主要作为直接燃料和工业原料进行使用。在热能应用领域，氢气可以直接燃烧为建筑物和工业生产提供热能，从而有效减少碳排放，显著提升环境质量。同时，由于其高热值特性，氢气在燃烧过程中能够释放出大量热能，满足各种热力需求。在航天领域，氢气作为推进剂的使用更是广泛。例如，阿波罗登月船、航天飞机、运载火箭等采用了液体氢作为燃料，这主要得益于其高能量密度和优良的燃烧性能。同时，氢气作为关键工业原料，被广泛应用于石油、化工、电子、冶金、油脂、航天、轻工业等领域。例如在化学工业中，氢气是合成氨、甲醇等的主要原料之一。在炼油工业中，氢气被广泛用于催化裂化、加氢精制等工艺，以提升油品质量、降低硫含量并生产清洁燃料。在电子工业中，氢气主要用作保护气体。在冶金工业中，有色金属如钨、钼、钛等生产和加工中，使用氢作还原剂和保护气。在油脂工业中，将液态油氢化为固态或半固态的脂肪，生产人造奶油或肥皂工业用的硬化油。在轻工业中，如石英玻璃、人造宝石的制造和加工、浮法玻璃生产中，都使用氢气作燃烧气或保护气。氢气还作为汽轮发电机的冷却

剂，被用于许多现代大型发电机的冷却。

近年来，随着燃料电池等相关技术的发展，氢能还广泛应用于交通领域、可再生能源消纳及储能等方面^[1]。氢燃料电池通过电化学反应直接转换成电能，用于发电及交通运输领域。其中，日本丰田已经量产了全球首款氢燃料电池汽车 Mirai，见图 1-1，该款氢燃料电池汽车可实现加氢 3~5 min 便可续航 700 km 的目标。我国也在加快推动氢能源燃料电池汽车关键技术研发，北京、上海、广东佛山、湖北武汉等地已经上线了多条氢能源燃料电池公交线路。在可再生能源消纳及储能方面，氢能可通过与风能、太阳能等可再生能源耦合形成综合能源系统，涵盖风光发电、电解水制氢、储氢、氢燃料电池等关键环节，有效解决风能、太阳能利用中因电网消纳能力不足而引起的弃风、弃光问题，从而实现能源供应的可持续性和稳定性，促进能源系统的转型和升级。例如，2022 年 7 月我国首座兆瓦级氢能综合利用示范站在安徽六安投运（图 1-2），标志着我国首次实现兆瓦级制氢-储氢-氢能发电的全链条技术贯通^[2]。总之，氢能的大规模应用将在推动碳减排、助力能源转型、破解能源危机和环境问题等方面发挥重要作用，表现出巨大的发展潜力。



图 1-1 氢燃料电池汽车在加氢站



图 1-2 我国首座兆瓦级氢能综合利用示范站（安徽六安）

1.1.2 氢能发展中存在的问题

氢能作为一种清洁、高效的能源形式，虽然具有巨大的潜力，但在其发展过程中仍然面临一系列挑战和问题。

1. 制取成本高

氢气制取是氢能产业链中的关键环节，但目前氢气制取成本仍然较高，成为制约氢能发展的主要因素之一。目前，主要的制氢方法包括天然气重整、煤炭气化以及电解水等。天然气重整和煤炭气化虽然成本相对较低，但会产生大量的二氧化碳排放，与环保目标相悖。而电解水制氢虽然环保，但成本较高，且需要消耗大量的电能。此外，氢气制取过程中还需要使用催化剂、吸附剂等材料，这些材料的成本也相对较高。为了降低氢气制取成本，需要加大研发投入，推动技术创新。开发新型高效的制氢技术，加强与风光等可再生能源耦合，提高能源转换效率，降低制氢过程中的能耗和材料消耗。

2. 储运存在技术瓶颈

氢气的储存和运输是氢能应用中的关键环节，但仍存在诸多难题。目前，常用的氢气储存方式包括压缩氢气储存、液态氢储存以及固态氢储存等^[3]。压缩氢气储存需要高压容器，但高压容器的制造和维护成本较高，且存在泄漏和爆炸的风险。液态氢储存虽然能够降低储存压力，但液态氢的密度较低，需要更大的储存空间，且液态氢的制备和储存过程中需要消耗大量的能量。固态氢储存虽然具有更高的安全性和能量密度，但目前技术尚不成熟，难以实现大规模应用。此外，在氢气的储存和运输过程中，所使用的材料必须具有良好的氢气相容性，以防止氢气的渗透和腐蚀。

3. 安全问题突出

氢能设备包括燃料电池、电解水制氢设备等，在运行过程中也可能存在安全隐患。例如，燃料电池的催化剂可能因过热或反应失控而导致起火或爆炸；电解水制氢设备中，高压电解过程可能引发设备破裂或氢气泄漏。基于氢气的易燃易爆特性，氢气一旦泄漏，极有可能被点火源（如明火、静电等）引燃，引发火灾、爆炸等灾害，从而造成严重事故后果^[4-8]。此外，公众对氢能安全问题的认知度较低，缺乏足够的安全意识和应急能力。因此，面向氢能产业快速发展过

程中重大安全需求，迫切需要加强安全防控技术的研究，提出切实可行的预测和防治方法，制定科学合理的安全标准、规范，从而促进氢能技术的安全应用和可持续发展。

1.2 氢能的安全性

1.2.1 氢气的物理化学性质

氢气，化学式为 H_2 ，分子量为 2.01588，常温常压下，是一种极易燃烧、无色无味且难溶于水的气体。氢气在标准条件下密度仅为 0.0838 kg/m^3 ，在常温常压下，按空气体积计，氢气的燃烧范围为 4%~75%，爆轰范围为 11%~59%^[9]。氢气在空气中的最小点火能为 0.019 mJ，意味着静电火花等微小能量就足以将其点燃。

1.2.2 氢气的安全属性

与常规能源相比，氢气既有不利于安全的属性，也有利于安全的属性^[10]。其中，氢气有更大的扩散系数和浮力是其有利于安全的属性。氢气在标准条件下密度比空气密度小很多，这使得氢气一旦泄漏到大气中，将在浮力作用下快速扩散。表 1-1 给出了氢气与天然气、丙烷和汽油气的相对空气密度和扩散系数对比，可以看出氢的密度仅为空气的 7%，而天然气的密度是空气的 55%，丙烷和汽油气都比空气重；同时氢的扩散系数是天然气的 3.81 倍、丙烷的 6.1 倍、汽油气的 12 倍。相对于汽油气、丙烷和天然气，氢气具有更大的浮力（快速上升）和更大的扩散性（横向移动），因此在发生泄漏的情况下，氢气在空气中可以向各个方向快速扩散，迅速降低浓度；而其他较重的碳氢化合物则非常容易在空间中聚集形成可燃气体混合物。这是氢气相比于其他碳氢化合物有利于安全的属性。

表 1-1 气体的相对空气密度和扩散系数

	氢气	天然气	丙烷	汽油气
相对空气密度	0.07	0.55	1.52	3.4~4.0
扩散系数/ (cm^2/s)	0.61	0.16	0.10	0.05

1.2.3 氢气的危险属性

氢气具有诸多不利于安全的属性：和大多数碳氢化合物燃料相比，氢气的点火能更低、着火范围更宽、更易发生爆炸；同时还存在氢脆风险，有着较高的泄漏性。

表 1-2 列出了氢气和丙烷相对于甲烷（天然气主要成分）的泄漏特性。从表 1-2 可以看出，在层流情况下，氢气的泄漏率很高，比甲烷高 26%，而在湍流情况下，氢气的泄漏率更高，约是甲烷的 2.8 倍。从高压储气罐中大量泄漏，氢气和甲烷都会达到声速。但是氢气的声速（1308 m/s）几乎是甲烷声速（449 m/s）的 3 倍，所以氢气的泄漏要比甲烷快。

表 1-2 氢气和丙烷相对于甲烷的泄漏率

类别	流动参数		相对泄漏率		
	0℃的黏度/（10 ⁻⁷ Pa·s）	21℃、1×10 ⁵ Pa 时的密度/（kg/m ³ ）	扩散	层流	湍流
甲烷	110	0.666	1.0	1.0	1.0
氢气	87.5	0.08342	3.8	1.26	2.83
丙烷	79.5	1.858	0.63	1.38	0.6

在空气中，氢的燃烧范围很宽，而且着火能很低。从表 1-3 可以看出，氢-空气混合物燃烧的范围是 4%~75%（体积分数），着火能仅为 0.02 mJ。表 1-4 给出了常见燃料的爆炸特性，从表中可以发现氢气的燃烧速度分别是甲烷和汽油的 7 倍和 9 倍；同时氢气还具有更宽的爆炸极限范围；且实验中阻止火焰传播的最大安全距离仅为 0.008 cm。在其他条件相同的情况下，氢气比其他燃料更容易发生爆燃甚至爆炸。

表 1-3 常见燃料的燃烧特性

特性参数	氢气	甲烷	丙烷	汽油
着火下限（空气中）/%	4	5.3/3.8	2.1	1
着火上限（空气中）/%	75	15	10	7.8
最小着火能/mJ	0.02	0.29	0.3	0.24

表 1-4 常见燃料的爆炸特性

特性参数	氢气	甲烷	丙烷	汽油
爆炸下限（空气中）/%	13~18.3	6.3	3.1	1.1
爆炸上限（空气中）/%	59	13.5	7	3.3
燃烧速度/（cm/s）	270	37	47	30
最大的实验安全距离/cm	0.008	0.12	—	0.074

基于以上氢气的各种性质，氢气在生产、储存、运输和应用的各个环节一旦发生泄漏，极易引发燃烧、爆炸事故。

1.3 氢气储存技术

1.3.1 常见氢能储存方式

氢气储存贯穿于氢气生产、储存、运输和使用等环节，它对于氢能及氢燃料电池汽车的发展是一项关键技术。目前的储氢技术主要有高压气态储氢、低温液态储氢和固态氢化物储氢等^[3]，其中高压气态储氢是目前最常用、最成熟和最节能高效的方式^[11, 12]。

1. 高压气态储氢

高压气态储氢是指将氢气压缩在储氢容器中，通过增压来提高氢气的容量，满足日常使用。常见的高压钢瓶气压为 15 MPa，这是一种应用广泛、灌装和使用操作简单的储氢方式，成本也低。其缺点是储氢密度低（体积储氢密度约 10 kg/m³，质量储氢密度约 0.5%）。目前，在氢燃料电池汽车领域，高压（35~70 MPa）气态储氢技术较成熟，已被成功应用于氢燃料电池汽车。国际上主流燃料电池汽车车型均采用 70 MPa 的氢气存储和供给系统。高压气态储氢遇到的主要问题包括：①体积储氢密度低，国际上研制的 800 bar 复合材料储氢罐的最大体积储氢密度也仅约 33 kg/m³；②压缩氢气的能耗大，如果采用机械压缩将氢气压缩到 800 bar，压缩消耗的能量占氢燃烧热值（低热值）的 15.5%；③输出调压 [按实验设计（DOE）指标，氢气输送压力对燃料电池约 4 atm，对氢内燃机约 35 atm]、安全性（储罐密封及罐体缺陷）等。

2. 低温液态储氢

液态储氢是一种深冷的氢气存储技术。氢气经过压缩后，深冷到 21 K 以下，使之变为液氢，然后存储到特制的绝热真空容器（杜瓦瓶）中。即使气态氢压力高达 800 bar，液态氢的体积储氢密度也比之高一倍多。但是，由于液态氢密度小，所以在作为燃料使用时，相同体积的液氢与汽油相比，含能量少，这意味着将来若以液氢完全取代汽油，则行驶相同里程数时，液氢罐的体积要比现有油箱大约 3 倍。基于氢气液化的高耗能（氢燃烧热值的 40%）、装置的高绝热

(装置体积相对于高压储氢小, 相对于固态储氢大)、不可避免的液氢汽化(每天汽化百分之几)以及涉及的安全性(储罐耐压不高)等问题, 其应用有限。

3. 固态氢化物储氢

一些金属具有很强的与氢反应的能力, 在一定的温度和压力条件下, 这些金属形成的合金能够大量地吸收氢气。储氢合金吸氢后, 原子态的氢占据了合金晶格的四面体或者八面体间隙, 形成金属氢化物。将这些金属氢化物加热或者降低氢气的压力后, 金属氢化物发生分解, 将储存在晶格间隙的氢释放出来。具有这样特征的合金称为储氢合金。由于金属氢化物中氢储存在储氢合金晶格间隙的位置, 只有在升温或者降低氢压时才能释放氢气, 因此其最大的优势是具有极高的体积储氢密度和安全性。金属氢化物通常在近室温、近常压环境工作, 条件温和, 吸放氢可逆性好, 循环使用寿命长。缺点是有效吸放氢量低, 一般不超过3% (质量分数, 下文如未特殊说明均指质量分数), 如果用在移动式设备(如汽车)上则显得笨重。

1.3.2 不同储氢方式能源利用效率对比

Sarkar 和 Banerjee^[12]采用净能量法分析了不同储氢方式(高压储氢、低温储氢和金属氢化物储氢)下燃料电池汽车的能源利用效率。通过对一辆燃料电池汽车行驶一公里路程所需的氢总量进行对比(表 1-5), 发现高压储氢是当前氢气存储的最佳选择, 也是最成熟和最高效的方式, 且其已广泛应用于氢能产业链的各个环节。

表 1-5 1 km 路程不同储存方式所需能量比较^[12]

	高压储罐	低温储罐	钛铁氢化物储罐	镁氢化物储罐
氢气消耗量/g	6.24	6.4	8.04	9.7
行程所需的直接能量/kJ	749	768	965.4	1164
生产和储存氢气所需的能量/kJ	1260.7	2172.7	1473.7	1777
生产储罐所需的能量/kJ	34.2	15.6	177.3	60
所需总能量/kJ	2043.9	2956.3	2616.4	3001.5

目前, 氢气高压储存已广泛存在于氢能利用过程。如量产的燃料电池汽车、加氢站等场所均采用高压储氢方式, 所采用高压氢气储罐压力可高达 70 MPa。随着氢能产业的不断发展, 氢气高压储存技术也在不断创新和完善。新型的储氢材料和储氢工艺不断涌现, 使得高压储氢技术更为安全、高效和经济。未来, 随

着氢能技术的进一步成熟和应用领域的拓展，高压储氢将在更多领域发挥重要作用，推动氢能产业的持续健康发展。

1.4 高压氢气泄漏致灾问题

1.4.1 氢气泄漏致灾动力学过程

氢气从压力容器、输运管道等泄漏到空气中通常是导致氢气火灾、爆炸事故发生的前提条件。从泄漏发展演变来看，高压氢气泄漏在事故类型方面主要包括两大核心问题：无燃烧泄漏、有燃烧泄漏。

针对高压氢气的无燃烧泄漏问题，主要考虑的是氢气射流特征和扩散传播规律等。从氢能技术的应用场景来看，氢气的泄漏又可分为开放空间泄漏和受限空间泄漏两种情况。若是氢气在开放空间中发生泄漏扩散，由于氢气密度较低，很容易向上扩散稀释，所造成的危险性相对较小；若是泄漏扩散到封闭空间内（或半封闭空间）以及遇到障碍物时，短时间内会出现氢气积聚，形成氢-空气预混气体，由于氢的燃烧范围很宽，一旦遇到点火源就会发生爆燃甚至爆轰（图 1-3），其危险性可想而知。

针对高压氢气的有燃烧泄漏问题，应科学认识氢气泄漏后引发火灾、爆炸的基本规律。统计表明，高压氢气一旦从储罐或管道中泄漏，就很有可能被点火源（如明火、静电等）引燃或发生自燃，形成爆炸事故或湍流喷射火焰。爆炸事故的危害不用赘述，即便是喷射火（图 1-3），其危害也巨大，通常高压氢气泄漏的喷射火的火焰长度能达到几十米甚至上百米，且由于其具有较高的火焰温度及热辐射通量，很可能冲击并导致周围设施失效或着火，引发“多米诺”效应，造成更大的火灾、爆炸事故，给人们生命和财产带来严重损害。

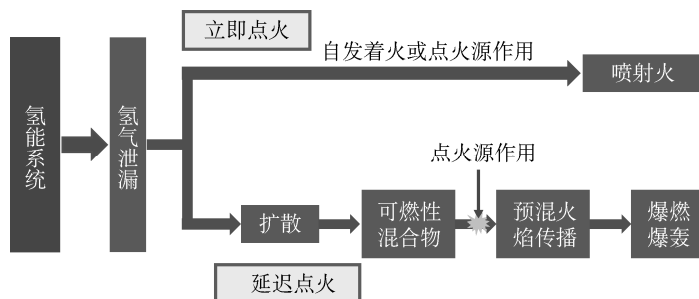


图 1-3 氢气泄漏致灾动力学过程

氢能利用各环节一旦发生氢气泄漏,极易造成巨大的火灾、爆炸等事故。仅在2019年5~6月的全球先后发生3起氢气泄漏火灾爆炸事故,分别为:5月23日韩国一家利用太阳能制氢企业发生氢气罐爆炸事故[图1-4(a)],造成2人死亡、6人受伤,厂房损毁;6月1日美国加利福尼亚州一家空气产品公司在氢气配送拖车的填充期间,发生氢气泄漏火灾事故,致使区域内加氢服务中断;6月10日挪威一处加氢站发生氢气泄漏爆炸事故[图1-4(b)],导致加氢站停运,氢燃料电池汽车禁售等后果。



(a) 韩国制氢厂储罐爆炸事故



(b) 挪威加氢站爆炸事故

图1-4 2019年典型氢气泄漏火灾爆炸事故案例

氢气火灾、爆炸事故层出不穷,不仅给人们的生命和财产带来巨大损失,同时还易造成公众“恐氢”心理,甚至“谈氢色变”。由此可见,提高氢气利用过程中的安全性是氢能产业以及燃料电池技术发展的重要支撑和保障,也是目前亟需解决的关键技术难题。

1.4.2 高压氢气泄漏自燃现象

在一些事故场景中^[13, 14],即使无明显点火源存在,氢气火灾事故仍有可能发生,且在事故案例中占有较高的比例。早在1920年Anon便首次发现,在没有明显点火源时高压氢气(2.1 MPa)泄漏到空气中出现着火的现象^[15],在随后的对81起氢气泄漏事故的统计调查发现,氢气泄漏以后,在没有明显点火源情况下发生着火或爆炸的事故高达86.3%^[14]。此外,英国金斯顿大学火灾爆炸研究中心对676起氢气事故统计发现^[13],超过90%的氢气事故伴随着火灾爆炸的发

生, 并且有 419 起火灾爆炸事故的点火源未被确定, 占氢气事故的 61.98%。氢气事故点火源的种类分布如图 1-5 所示。

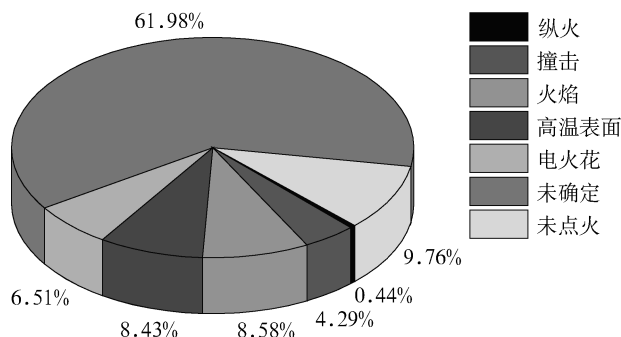


图 1-5 氢气事故中点火源种类和比例分布图

对于点火源未被确定的氢气火灾事故, 通常认为氢气泄漏后发生了自发着火燃烧, 简称自燃 (spontaneous ignition, self-ignition, auto-ignition)。由氢气的易泄漏性和燃爆特性可知, 因储存装置发生氢脆或泄压装置失效等原因造成高压储存的氢气意外泄漏后, 极可能发生自燃, 进而发展成爆炸事故或湍流喷射火焰。

高压氢气泄漏自燃并进一步引发的火灾爆炸安全问题是包括我国在内的世界各国在氢能推广和发展过程中面临并亟需解决的重大挑战。与氢气不同的是, 对于甲烷、乙烷等常规可燃气, 其高压泄漏后却鲜有自燃案例的报道。其本质原因是什么? 因此, 在氢能产业快速发展的今天, 迫切需要我们z对高压氢气泄漏自燃这一尚未被充分揭示的特殊燃烧现象进行研究, 需重点研究耦合氢气物理性质、高压储存状态以及泄漏环境的高压氢气泄漏自燃动力学机制、临界条件以及最后形成稳定喷射火的微观动力学过程, 科学认识其中蕴含的复杂机理与规律, 提出切实可行的预测和防治方法, 并制定科学合理的安全标准和规范, 从而促进清洁、安全、高效和可持续发展的氢能经济的实现。

1.5 高压氢气泄漏自燃研究趋势

目前, 国内外关于高压氢气泄漏自燃机理还没有形成统一认识, 学者们提出了若干可能的点火机制^[14]。其中, 扩散点火机制是世界各国学者研究的焦点, 被认为是自燃发生最有可能的诱导机理, 且相关实验^[16-18]和计算机数值模拟^[19-21]研究均证实了扩散点火诱导自燃发生的可能性。扩散点火模型由 Wolanski 和