

liveWire

氢及其主要衍生物的安全方面：政策制定者的文献综述

这份研究报告聚焦于氢及其相关产品的安全问题。

底线。

主要衍生物：氨和甲醇。在对文献和氢安全措施进行全面审查后，本研究总结了由信誉良好的机构制定的稳健、成熟的规范。本简报强调了遵守这些规范的关键重要性，并鼓励全面实施以确保有效的和一致的安全实践。

总之...

氢是宇宙中最简单且最丰富的元素。

自亨利·卡文迪什和安托万·拉瓦锡几乎250年前发现以来，氢一直被视为进步的工具。目前，氢被用于许多不同的应用，但不是直接使用；相反，大多数应用使用其两种主要衍生物，氨和甲醇。

由可再生能源生产的氢气可以为发电、交通和其他部门提供环境清洁、经济实惠、安全可靠的燃料（Tchouvelev 2016）。尽管它在革命性改变能源部门方面具有巨大潜力，但也提出了独特的安全挑战，必须解决这些问题以确保其安全生产、储存和利用（DOE 2016）。氢气的广泛采用需要理解其性质和相关的安全顾虑。

由于氢在自然界中不以游离状态存在，因此必须进行生产。清洁氢——通过可再生能源和化石燃料以及负责任的碳捕获和储存生产——在全球能源转型中可以发挥重要作用，加速全球气候目标的实现进程。

作为一种能源载体，氢可以用来储存、转移和输送能量。从氢中还可以获得高附加值衍生物，例如氨或甲醇。这些衍生物能够实现氢的高效储存和运输，因此在向可持续能源系统转变的过程中成为关键组件。利用这些技术，产业可以减少其碳足迹，并为更可持续的未来做出贡献。

清洁氢的部署对于去碳化难以控制的领域，如钢铁生产和长途运输尤其重要。但随着全球发展清洁氢的努力不断加强，确保有效管理风险变得至关重要。



是一名能源分析师
卡门·康德·帕达维拉
与世界银行能源部门管理援助计划



THE WORLD BANK
IBRD • IDA



ESMAP
Energy Sector Management
Assistance Program

本简报概述了与氢及其主要衍生物（氨和甲醇）相关的风险。旨在提高政策制定者对氢安全性的理解，并促进安全可持续的氢政策发展。为此，它综合了当前的研究，确定了潜在风险，并提出了可操作的建议，以确保氢技术安全有效的整合。由于在氢安全领域没有明确的全球领导者，因此将不会涉及国际最佳实践。

让我们首先从氢开始，然后转到氨和甲醇。它主要有哪些特性和安全隐患？

安全使用氢气需要精心管理其独特性质所带来的安全挑战

氢气在标准条件下是一种无色、无味且高度易燃的气体。它是已知最轻的元素，分子量为2.02克/摩尔。氢气在空气中的广泛易燃范围（按体积计4-75%），低点火能量（0.02毫焦耳 [mJ]）和高扩散性意味着它容易在空气中扩散并混合。此外，氢气燃烧时火焰几乎看不见，给检测和消防带来了挑战（DOE 2016）。

主要担忧之一是氢气的爆炸性。即使是轻微的泄露也可能迅速与空气形成爆炸性混合物，强调了严格泄露检测和有效通风措施的重要必要性（DNV 2021）。

清洁氢——通过可再生能源和化石燃料以及负责的碳捕获和储存生产——在全球能源转型中可以发挥重要作用，加速全球实现气候目标的进程。

储存和处理氢气因此带来了重大挑战。氢气可以以压缩气体的形式或以低温液态储存。压缩氢储存需要能够承受高达700个大气压的高压系统。另一种方法是，将氢气作为液体储存需要极低的温度，低于-253°C，这要求先进的绝缘和小心处理，以防止蒸发和泄漏。两种储存方法都需要坚固的容器解决方案，以最大限度地减少泄漏风险并确保安全（Calabrese等人，2024年）。

另一个关键问题是材料相容性。氢在某些金属中可能引起脆化，这可能导致管道、储罐和其他储运容器失效。为了保持氢储运系统的完整性，需要特殊的材料和防护涂层（Calabrese等，2024年）。

最后，氢气泄漏的检测与监控带来了一系列挑战。鉴于氢气既无色又无味，没有特殊传感器的情况下检测泄漏极其困难。因此，任何项目开始之初就必须实施可靠的氢气检测系统，以尽早发现泄漏并预防危险情况。

全面实现氢作为清洁能源的潜力，同时确保人员和基础设施的安全，需要通过严格的控制、安全协议和持续监测来解决这些安全问题。

氢气并不比其他易燃燃料（包括汽油和天然气）更危险或更安全。关于氢气的担忧并不是引起恐慌的原因，但它们与汽油或天然气周围的常规担忧不同。实际上，氢气的一些特定特性实际上与汽油或其他燃料相比提供了安全优势。以下列出了其中最显著的差别（NHA 2010）。

氢
氢气比空气轻并且迅速扩散。
具有高扩散率（比天然气快3.8倍）；这意味着，一旦释放，它能够迅速稀释到不可燃的浓度。氢气的上升速度是氮气的两倍，是天然气的六倍——以这种速度

几乎每小时45英里（20米/秒）。因此，除非屋顶、通风不良的房间或其他结构能够包含上升的气体，否则物理定律会阻止氢气在泄漏（或使用氢燃料设备的人附近）滞留。简单来说，要成为火灾隐患，氢气必须首先被限制——但限制宇宙中最轻的元素是非常困难的。工程师在设计将使用氢气的结构时会考虑这些特性。他们的设计有助于氢气在意外释放时向上和远离用户逸散。

因此，大多数
氢气是无色、无味、无臭的。
人类感官无法检测泄漏。因此，该行业通常使用氢传感器来帮助检测泄漏，并且已经使用这些传感器保持了数十年的高安全记录。相比之下，天然气也是无色、无味和无臭的，但行业会添加一种含硫的气味剂，称为甲硫醇，以便通过嗅觉检测。然而，所有已知的气味剂都会污染燃料电池（氢气的一种流行应用）。研究人员正在研究其他可能的氢气检测方法：示踪剂、新的气味技术、先进传感器等。

氢气 com-
氢火焰辐射热低。
bustion primarily produces heat and water. Since it produces not carbon but a heat-absorbing water vapor, a hydrogen fire has significantly less radiant heat than a hydrocarbon fire. The heat released near a hydrogen flame is low (though the flame itself is just as hot), meaning that the risk of secondary fires is also low. This fact has significant implications for the public and for rescue workers.

燃烧主要产生热量和水。因为它产生的是吸收热量的水蒸气，而不是碳，所以氢火比碳氢化合物火具有显著较少的辐射热。氢焰附近的放热量低（尽管火焰本身温度相同），这意味着二次火灾的风险也较低。这一事实对公众和救援人员具有重要意义。

要成为火灾隐患，氢必须
首先被限制——但限制最轻的
宇宙中的元素非常难以确定。”

任何易燃燃料，氢气也不例外，可以……
燃烧
破裂。然而，其浮力、扩散性和小分子尺寸使其难以控制，因此难以创造出可能发生燃烧的情况。对于氢火的发生，必须同时存在足够浓度的氢、点火源和适量的氧化剂（如氧气）。氢气具有广泛的易燃性范围（在空气中为4-75%），可能只需要相当低的热量即可点燃（0.02毫焦耳）。然而，在低浓度下（低于10%）点燃它的能量需求较高——与在各自的易燃性范围内点燃天然气和汽油所需的能量相似——这使得氢气在实际操作中更难在低易燃性极限附近点燃。另一方面，如果条件允许将氢气的浓度增加到化学计量比（最容易点燃）混合物（在空气中为29%），那么点火能量将降至点燃天然气的约十五分之一（或汽油的十分之一）。表1总结了广泛使用的燃料的主要特性。

一个爆炸不能在罐体或任何容器中发生。
爆炸。
娱乐场所仅存储氢气。发生爆炸需要具有特定浓度的氧化剂（例如，浓度至少为10%的纯氧或浓度41%的空气）。氢气在18.3%至59%的浓度范围内可燃。虽然这个范围很广，但仍值得注意。

表1. 广泛使用的燃料性质比较

	氢	氢	汽油蒸汽	天然气
燃点极限（在空气中）	4-75%	15-28%	1.4-7.6%	5.3-15%
爆炸限制（在空气中）	18.3-59.0%	15-28%	1.1-3.3%	5.7-14%
点火能量（毫焦耳）	0.02	0.2	0.20	0.29
火焰温度（℃）	2,045	1,800	2,197	1,875
化学当量混合物（在空气中最容易点燃）	29%	15%	2%	9%

来源：基于NHA（2010年）、新泽西州卫生部门（2016年）、美国职业安全与健康研究所（2024年）和Kobayashi等人（2018年）的原始汇编。

牢记汽油可能更具危险性，因为它可以在非常低的浓度下爆炸（1.1-3.3%）。此外，由于氢气有迅速上升的倾向，因此在露天环境中爆炸的可能性非常小。这与丙烷或汽油蒸气等较重的气体相反，后者会停留在地面附近，从而产生更大的爆炸风险。

偶尔在加氢站发生的爆炸导致公众对氢气的不安全印象，尽管爆炸风险并不比其他气体更大。

氢爆炸需要氧化剂意味着爆炸风险低于通常认知。然而，它仍然是一个需要解决的安全问题。例如，在氢加注站偶尔发生的爆炸，就是一个例子。德国，2024年6月 或者，在 2024年1月挪威（电动化2024），虽然氢气的爆炸风险并不比其他气体更大，但氢能作为一种相对较新的产业，这些事故造成了公众的严重反感。实施更多安全措施和传播风险评估——例如，氢燃料加注站氢泄漏风险评估 发表于：《国际氢能杂志》在2023年——可能有助于改善氢的形象（王和高，2023）。

所有气体（除氧气外）都可能引起窒息。

窒息。

在大多数情况下，由于氢气的浮力和扩散性，它不太可能被充分限制而导致窒息。

氢气无毒且不具腐蚀性。

毒性/毒物。

不会污染地下水（在正常大气条件下是一种气体），也不会释放时污染环境。氢气不会产生“烟雾”。

任何低温液体（氢变成）

冷冻烧伤

在-423°F以下液态的物质接触皮肤可能导致严重冻伤。然而，目前的方法是保持

氢超低温存储利用双层壁、真空隔热、超级隔热液氢储罐，这些储罐设计用于在检测到外层或内层壁破裂时，安全地以气体形式排放氢气。这些坚固的结构和冗余的安全功能极大地降低了人与之接触的可能性。

关于氢的性质和主要安全问题的更多信息，以下资源可供参考：

3 “氢的性质与效应”（EIGA 2019，第四章）

3 “氢具有独特的物理特性，使其与甲烷相比，活性显著更高。”（Accufacts Inc. 2022，第四章）

3 《氢能技术安全指南》（美国国家可再生能源实验室2015年）

3 安全性方面：在工业规模生产绿色氢能（ISPT 2023）

3 “氢安全挑战：关于生产、储存、运输、利用和基于CFD的后果及风险评估的全面综述”（Calabrese et al. 2024）

3 氢气事故与事故数据库 - HIAD 2.1
（欧洲委员会 2023c）

3 “氢：如何应对安全挑战”（德拉格勒，2020年）

3 法规框架、安全因素以及氢能技术应用的社会接受度，《基于氢能技术的科学和工程》（Tchouvelev, de Oliveira, and Neves 2018）第6章

3 氢安全中心（CHS 2024），一个于2019年成立的全球性非营利组织，旨在提供关于氢安全及全球最佳实践的指导、教育和协作论坛。

3 《氢安全审查》（NETL 2023）

3 《氢能安全工程基础 II》（莫尔科夫 2012）。

除了上述参考文献之外，欧洲委员会联合研究中心通过重大事故危害局，特别是Minerva门户，组织了两个部分的活动。氢风险研讨会——本报告的第一部分于2023年9月发布，第二部分将于2024年2月发布（欧洲委员会2023a，2024）。这是一场综合性的网络研讨会；许多国家参与了会议（例如，德国、荷兰、日本、芬兰、法国和英国）。与会者讨论了行业中最相关的安全问题，揭示了国家和国际层面的不同关切。为了本Live Wire的目的，盟委员会文件概述相关可靠的氢安全资源，尤其值得关注（欧洲委员会2023b）。

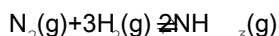
发展机构如美洲开发银行（IDB）对绿色氢的安全性问题进行了研究。“环境、健康、安全和社会管理在拉丁美洲和加勒比地区的绿色氢气”该研究于2023年5月发布。

继续探讨氨气，其主要的安全生产挑战有哪些？

尽管与其它燃料同样安全或危险，氨的安全性特征却很独特

氨（ NH_3 ）是一种在室温及大气压下呈无色且具有刺激性气味的液体。在正常条件下，氨极易溶于水，形成一种称为氨水（ NH_4OH ）的溶液，该溶液呈弱碱性。在工业用途中，氨通常经过加压和冷却以液态存储和运输，以提高效率和安全性。

氨通常是通过哈伯-博施法生产的，这是一种氮气（ N_2 ）和氢气（ H_2 ）在高温高压催化反应下生成氨的过程：



这个过程是化石燃料在工业应用中最大的用途之一，约占全球碳排放的1%。然而，氨在农业中发挥着不可或缺的作用，它被用来生产尿素、硝酸铵和硫酸铵等肥料。生产出的氨大部分（约80%）是

面向化肥，同时18%用于工业过程，还有一小部分用于冷藏和空调系统。

氨中毒对珊瑚礁、极地地区和红树林中的水生栖息地构成特别威胁，可能对食物链动态产生影响。有效的泄漏管理对于防止污染和保护水生环境至关重要。

哈伯-博世工艺通常被认为是能源和成本需求较高的过程，但绝大多数的能源输入、二氧化碳排放、资本和运营成本实际上与氨的生产有关；从氨中合成氨只需要相对较小的工作和投资。

许多低排放氨工厂目前正在开发中或最近已投入运营，证明了实现氨生产脱碳的技术可行性。预计2020年将有超过2250万吨产能的低排放氨工厂投入使用；还有超过2.933亿吨的产能正在开发中（氨能协会2024b）。

氨的安全性与其他燃料，包括氢、汽油和天然气，并无太大不同。然而，它的安全特性却与此截然不同，有毒性和腐蚀性取而代之了易燃性。与氢类似，围绕氨的安全关注并不构成恐慌理由，因为它们已经为现有领域（如制冷、化工、农业）所熟知且得到良好管理。然而，知识转移至关重要，以确保其他领域的氨安全使用。绿色氨的一个重要未来发展用途将是作为运输燃料。

以下是一些与氨相关的最显著风险，如下所示。

接触氨可能有害

暴露风险。

由于其腐蚀性和腐蚀性，氨会腐蚀金属如铜、黄铜、锌以及某些合金，导致设备和防护系统的结构故障。这给工业基础设施带来风险，并可能导致泄漏或溢出，进而造成进一步危害。

腐蚀性特别指氨通过直接接触对生物体立即产生的有害影响——与毒性不同，毒性涉及长期系统效应。氨具有高度碱性，直接接触可能导致皮肤、眼睛和粘膜严重损伤。吸入氨蒸气可能导致呼吸道刺激、肿胀，甚至根据浓度水平造成永久性损伤。为了减轻这种风险，美国职业安全与健康管理局已将氨的允许暴露限值设定为每百万份50份（ppm），在八小时工作日内，以及短期暴露限值为15分钟内的35 ppm。

毒性指的是潜在的有害影响。

毒性。

水生生物中的物质。当发生泄漏时，有毒物质可以渗透到水体中，造成严重的生态损害。长时间的暴露会破坏海洋生态系统，毒害鱼类、植物和微生物。根据环境防御基金2022年的报告：氨在海中：研究作为船舶燃料的氨对海洋生态系统潜在影响的研究“毒性对珊瑚礁、极地地区 and 红树林中的水生栖息地构成特别威胁，可能对食物链动态产生影响。有效的溢油管理对于防止污染和保护水生环境至关重要。这包括严格的处理和管控程序，以及应急响应措施以最小化毒性暴露并减轻长期环境影响。”

氨被归类为

易燃性和爆炸潜力。

被归类为易燃气体，尽管其可燃性极限较窄：在空气中的体积从15%到28%。当与空气混合，尤其是在高浓度下，氨可以形成爆炸性混合物，在工业环境中造成重大风险。然而，氨的相对较高的自燃温度（651°C）使得与甲烷或氢气等更易挥发的燃料相比，意外点燃的可能性较小。

鉴于其危害，氨必须

存储与处理。

这些材料必须按照严格的安保协议进行存储和处理。储罐必须由能够抵抗氨腐蚀作用的材料制成。这些储罐通常配备有安全装置，如压力释放阀，并且必须定期检查是否存在泄漏或结构弱点。

如果发生泄漏，氨气会迅速扩散，必须立即进行控制和疏散。大量处理氨气的设施通常需要制定应急预案，包括氨气检测系统、工人的个人防护装备以及医疗设施的可获取性。

以下是一些关于氨安全的有用资源：

3 “对氨作为运输燃料的安全评估（Risø 国家实验室 2005）

3 “氨基础设施：安全风险信息和指南（劳氏船级社 2020）

3 “全球无水氨生产、使用和储存法规综述（化学工程师学会 2016年）

3 “氨安全研究（零碳排放航运2022）

3 氨厂及相关设施中的氨安全研讨会，这是一个年度活动，自1955年以来由美国化学工程师学会组织。

进一步，众多机构维护氨安全标准；例如，包括国际全天然制冷研究院，这是一个致力于在冷却和冷藏系统中推广使用天然制冷剂的全球组织。该研究院提供资源、标准和专业技术指导，以确保天然制冷剂（如氨和二氧化碳）在各种应用中的安全、高效和环保使用。以下标准涵盖了IIAR标准中的氨检测和报警要求：

- ✓ ANSI/IIAR 2-2021 标准适用于设计安全封闭式氨制冷系统 (IIAR 2019)。

3 ANSI/IIAR 6-2019 标准针对封闭式氨制冷系统的检查、测试和维护 (IIAR 2021)。

压缩气体协会开发和维护与氨安全储存、处理和运输相关的标准，特别是用于工业应用的无水氨。这些标准涵盖了与氨使用相关的各个方面（例如，设备设计、安全实践和法规遵守）；有助于确保氨在工业应用中的安全使用；并最大限度地降低其毒性和易燃性相关的风险。

氨作为潜在替代品越来越受到关注。

由于其无碳燃烧和

活性船用燃料

与其它氢载体相比，相对较高的能量密度。包括全球海事脱碳中心的多篇报告在内，数份报告指出。安全与运营指南：新加坡氨燃料加注航行的指导原则（GCMD 2023）以及欧洲海事安全局（European Maritime Safety Agency）的报告 氨作为航运燃料的潜力（EMSA 2022）突出了氨作为船舶燃料的潜力、其优势以及支持其采用的监管框架。他们强调了安全挑战以及进一步的技术和监管进步的需求，以支持其广泛使用。

Several other organizations are also working on reports or tools regarding the use of ammonia as a fuel. For instance, the Clean Marine Fuels Working Group within the World Ports Sustainability Program has signed a memorandum of understanding with the Society of Gas as a Marine Fuel to develop safety tools for ammonia as a fuel (WPSP 2024).

几个其他组织也在研究和开发有关氨作为燃料的报告或工具。例如，世界港口可持续发展计划中的洁净船用燃料工作小组已与天然气作为船用燃料协会签署了一项谅解备忘录，旨在开发氨作为燃料的量的增加（氨能协会2024d）。（荷兰环境部下属的环境规划局DCMR已批准OCI全球公司在鹿特丹建设一座60000吨的氨储存罐。）一些 关键变更针对PGS-12代码 在荷兰包括（1）用于氨的上装和下装顶部潜水泵

油罐（而不是在油罐侧面），以及（2）一个三级混凝土外层，以最小化任何外部冲击的影响（Yara 2023）。

向氨作为船用燃料的转变将需要大量基础设施投资，包括专门的燃料供应设施和对船只进行氨兼容引擎的改造。

使用氨作为船用燃料的主要安全问题是其毒性和在加油、储存和船上操作期间泄漏的潜在风险。新加坡海事和港务管理局（GCMD）于2023年发布的关于氨加油的报告强调了制定稳健的安全指南的必要性，包括开发双层壁加油管线和储罐以降低泄漏风险，实施先进的通风和中和方法以防止氨积聚，以及确保所有参与氨处理的人员都接受适当的培训并配备适当的个人防护装备的努力。

氨作为船用燃料的过渡将需要基础设施的重大投资，包括专用燃油供应设施和为船舶配备氨兼容发动机的改造。这还要求建立一个全面的监管框架，解决安全、环境影响和操作规程问题。该行业已超越研究和试点项目，一些氨燃料船舶正在建造中（例如，）。一艘由日本邮船（NYK）、三菱重工业（IHI）、日本引擎公司和日本造船厂联合建造的船只，预计将于2026年11月交付。建立的氨安全措施因此具有极其重要的意义（氨能协会 2024a）。

氨是一种关键的工业化学品，它提供了显著的好处，但也带来了固有的风险。它在作为船用燃料的扩展作用中带来了新的安全挑战，这些挑战必须通过严格的安全标准、技术创新和国际合作来解决。随着全球向脱碳化的转变，氨在作为……

作为一个关键的农业投入和一个潜在的清洁燃料，突显了有效管理这些风险的重要性。

以下列出了一些关于氨作为储备燃料安全使用的有用资源。

3 “商业化早期氨动力船只（全球海事论坛2023）

3 “氨在海中：研究作为船舶燃料的氨对海洋生态系统潜在影响的研究（环境保护基金会 2022）

3 “氨动力散货船（绿色航运计划2023）

3 “外部安全研究——海上船舶替代燃料的加油操作（DNV 2021）

3 国际海事组织（IMO）关于氨作为燃料的指南将于2024年第四季度最终发布。这些指南预计将在2024年12月的海事安全委员会会议上被采纳（氨能源协会2024c）。

3 “燃料思考：氨报告（劳氏船级社 2024 年）。

在哪 Methanol 属于？

甲醇是一种用途广泛的化学物质，具有多种应用。其主要安全问题是其毒性。

甲醇，也称为甲基醇、木精或木醇，是一种在室温及大气压下呈轻质、挥发性和无色液体的酒精。它具有独特的气味，是结构最简单的酒精，易于运输。它广泛应用于工业过程，包括燃料生产和化学制造。

甲醇可以通过多种方法生产。最常见的一种工业方法是天然气转化，涉及将天然气进行蒸汽转化以生产合成气（一种由氢气、一氧化碳和二氧化碳组成的混合物），然后将其转化为甲醇。另一种方法是生物质气化，其中生物质作为原料，气化产生合成气。

该物质随后被加工成甲醇。一种新兴的方法是直接从二氧化碳和氢气中合成，涉及二氧化碳的催化加氢。

甲醇易溶于水的特性意味着地下水及土壤的污染风险是真实的，尤其是如果隔离措施不足的情况下。这些风险需要谨慎监控，因为即使是短期暴露于高浓度下也可能对生物多样性产生有害影响。

甲醇的多种应用包括作为甲醛、乙酸和其他各种化学品生产的化工原料。它还可用作内燃机的燃料，可直接使用或作为混合燃料的组成部分，例如M85，其中85%为甲醇。甲醇还可用作实验室和工业过程中的溶剂。它还用于挡风玻璃清洗液和其他防冻剂应用。甲醇还可以用作燃料电池中的能量载体，用于发电。其在海事运输中的使用越来越普遍。

DNV（2021）报告“外部安全研究——远洋船舶使用替代船用燃料的加油作业”如上所述，也考虑了甲醇作为储存燃料的安全问题。正如在所讨论的，甲醇正变得越来越有吸引力，成为实现全球气候目标的选项。《海事执行官》杂志文章《对甲醇进行“全面测试”，重点关注安全》（2024年）。然而，采用甲醇作为新燃料的安全问题也需要解决。《海事能源和可持续发展卓越中心》与甲醇研究所合作，在该报告中进行了更深入的分析。甲醇作为船用燃料（MESD卓越中心和甲醇研究所 2021年）。

关于甲醇的主要安全问题是其毒性，其降解产物甲醛和

格式，负责。甲醇如被摄入、吸入或通过皮肤吸收，则具有高度毒性。摄入超过20毫升可能致命，而较少的量已知会导致不可逆的失明。甲醇的代谢和毒性类似于乙二醇。必须采取适当的预防措施来处理 and 分发甲醇（IRENA和甲醇研究院2021年）。

接触少量甲醇必须立即进行医疗干预，这使得处理甲醇的产业必须建立适当的紧急响应程序至关重要。同时，也要考虑慢性、低水平接触，这对长期处理甲醇的工人构成重大关注。即使是小剂量但长期的甲醇接触也可能导致累积的健康影响，如头痛、视力损害和神经症状（甲醇研究所 2020；美国环境保护署 2016）。

甲醇领域也存在显著的风险。

火灾与爆炸

风险特征。由于甲醇具有低闪点并且燃烧时火焰几乎看不见，它在工业环境中造成严重危害。甲醇蒸气尤其危险，因为它们可以与空气形成爆炸性混合物，增加在封闭或通风不良区域发生火灾和爆炸的风险。储存或运输甲醇的设施必须实施严格的防火措施，包括充分的通风和使用防火材料。应急响应系统还应考虑由于甲醇火焰特征而检测甲醇火灾的挑战。甲醇火焰几乎看不见的特性也使得火灾检测和灭火特别具有挑战性；需要专门的传感器和灭火系统（IRENA和甲醇研究院2021年）。

出现于在泄漏或溢出事件发生期间

环境风险

运输或储存。甲醇是可生物降解的，尽管其环境持久性低于许多其他化学品，但大量泄漏到水体中会通过降低氧气水平和损害水生生物来扰乱水生生态系统。此外，甲醇能够溶解于水，这意味着地下水及土壤的污染是一个真实的风险，尤其是如果控制措施不足的话。这些风险要求进行仔细的监控，因为即使是短期暴露于高浓度下也可能对生物多样性产生有害影响。最大限度地减少甲醇对长期生态的影响

该物质的影响要求其在运输和储存过程中遵守监管规定，并配以严格的环境保护措施。在发生泄漏的情况下，确保迅速采取应对措施和补救计划对于保护附近的生态系统也是至关重要的（甲醇学会 2020）。

甲醇也可能导致腐蚀风险，因为它会随着时间的推移而降解金属、橡胶和某些塑料，并可能损害储罐、管道和运输容器的完整性。例如，甲醇可以腐蚀不锈钢，特别是在水污染的条件下，这会加速腐蚀过程。这种降解不仅增加了泄漏和意外释放的可能性，而且也提高了处理甲醇的行业的维护成本。行业必须使用由耐腐蚀材料制成的容器，例如特定的合金或处理过的塑料，并定期检查和维护基础设施以防止失效。通过向甲醇储存系统添加腐蚀抑制剂并完全去除水分，可以进一步降低风险（甲醇研究院2020年）。

在航运业，需要额外的安全协议。2021年DNV外部安全研究强调了特定甲醇加注指导方针的必要性；它强调港口设施和船舶运营商应确保他们有足够的设施来安全处理燃料。随着甲醇在该行业越来越普遍地使用，适当的培训和安全措施将变得至关重要（DNV 2021年）。还应考虑泄露和运输风险，因为甲醇的毒性和易燃性可能导致在运输过程中发生事故时出现大规模危害。

总之，尽管甲醇作为工业原料和替代燃料具有显著优势，但其风险，尤其是与毒性、火灾、爆炸、环境污染和材料退化相关的风险，要求在其整个生命周期内采取强有力的安全措施。从处理和储存到运输和使用，减轻甲醇的风险需要严格的法规遵守、定期安全审计以及对耐腐蚀基础设施的投资。此外，制定行业特定指南，特别是在海事燃料应用等新兴领域，对于确保甲醇的危害不会掩盖其益处至关重要。为了在工业和燃料相关环境中安全有效地使用甲醇，需要

优先事项应为应急准备、持续员工培训和采用尖端安全技术。

甲醇学院提供了关于甲醇安全处理的丰富资源。该资源包括指南、手册和技术报告，涵盖了各种安全方面，包括检测和扑灭甲醇火灾、健康和安全管理以及危机期间通信的指南。这些资源对于处理甲醇的各方至关重要，以确保他们为不可预见事故做好准备（甲醇研究院，不详）。

政策制定者在何处可以找到关于氢安全的最新信息？

氢气组件必须遵循严格的指导方针，并接受第三方安全性和结构完整性的测试。

其中一个关于水力工具最全面的资源，是美国国务院的一个门户。

基因安全性是H

能源（DOE）。太平洋西北国家实验室工具门户，得到美国能源部（DOE）的支持开发了H

能源部旨在支持氢能应用，燃料电池应用中氢气安全处理和使用的实践和程序。

该门户汇集并增强了各种工具和基于网络的内容在氢能和燃料电池技术安全方面的实用性，以帮助那些负责设计、批准或使用系统及设施的人员，以及那些应对事故的人员。

基于超过20年的经验，该门户设有专门针对燃料电池的编码和标准部分，以及工具2024a）。

另一个部分专门用于最佳实践（H）

在H工具收集的資源中，有两个是特别重要的。

普遍重要性：

3 氢安全中心：一个于2019年成立的全球非营利组织，旨在提供关于氢安全及全球最佳实践的指导、教育和协作论坛。

3 氢安全小组。该小组拥有超过20年的经验，由太平洋西北国家实验室领导，包括20多位专家，其中其他专家包括工程师、科学家、规范官员、安全专业人士和设备供应商。他们的目标是以一种非监管的方式实施最佳安全实践。

The

美国能源部——氢能与燃料电池技术办公室

HFTO在DOE内部也拥有一个网站，提供许多可靠资源的汇编。安全、规范与标准（HFTO 2024）。

中国高等教育学会（FCHEA）是

燃料电池和氢能协会。

美国领先行业协会，代表领先和创新组织，这些组织正在推进清洁、安全、可靠的氢能的生产、分销和使用。它出版了“氢能与燃料电池安全报告”，“一份每两个月发布一次的电子出版物，提供氢和燃料电池编码及标准的发展信息，以及相关的安全信息”

工具

信息（FCHEA 2024）。FCHEA还管理着H

代码和标准数据库 专注于全球超过400项氢能和燃料电池标准的开发，工具2024b）。

(H)

2

以下列出了关于氢能行业的其他相关法规出版物。

3 “基于风险监管设计的氢能安全使用（经合组织，2023年）

3 《氢能源技术法规框架、安全方面及社会接受度》（收录于Tchouvelev, de Oliveira, and Neves 2018年的第6章）。

为确保甲醇在工业和燃料相关领域的安全有效使用，应优先考虑应急准备、持续员工培训和采用尖端安全技术。

从这里我们该走向何方？

提出了几项实用的政策建议，以增强氢及其衍生物的安全性。

氢安全问题是通过已建立的严格标准和高度信誉的机构得到认真解决的。这些标准和措施的实施对于氢的安全处理至关重要。这些建议针对政策制定者、当局、检查员和其他感兴趣的利益相关者，旨在推广普遍遵守安全协议，并促进全球在氢安全方面的合作。

—例如—

确立清晰的标准或建议。

请，the 无水氨槽车清单 开发自化肥学会以确保氨罐火车安全。遵循这些程序在处理这些物质时尤为重要，考虑到它们的安全要求。此外，还推荐采用其他基本程序，如应急响应计划或应急演练，以促进事故情况下的工作人员安全和损害控制。

对公众和当局进行关于风险的宣传教育。

The

氢、氨和甲醇生产涉及。

氢及其衍生物的主要危害特性应从幼年时期开始广泛传播，并应强调安全操作程序。参与氢气处理、储存和运输的人员应接受全面培训。风险应以易于理解的方式传达——不仅向公众传达，也向政府部门传达——以便基于对风险充分理解的基础上做出决策。

确保氢储存设施符合rel-标准。

实施严格填充程序

埃万安全标准

对储罐的排空协议进行制定，以防止压力超过安全阈值。人员必须接受安全操作培训，包括个人防护设备的使用，并必须学会在装卸和转运操作中实施降低暴露风险的程序。氢储存和分配设备必须定期维护和检查。

确保所有操作符合适用的规范和

并遵守相关国际安全规定

标准

标准和法规，例如那些推荐的标准和法规

由国际标准化组织、美国机械工程师学会和国家消防保护协会制定。用警示标志标记氢气储存区域和设备，并建立明确的沟通协议，以便向人员、承包商和应急响应人员传达与氢气相关的活动。

确定潜在

定期进行风险评估

与氢相关的危害。必须实施缓解策略，如充分的通风、泄漏检测系统和紧急停机程序，以确保安全。

避免过于严格的法规或政策。这特别是在绿色燃料的案例中特别相关，因为绿色燃料在能源转型中具有巨大的潜力。

避免过度限制性的法规或政策。

例如，那些由于风险降低超出预期水平而创新受到负担的情况。这尤其适用于氢及其衍生物的某些应用，例如更环保的燃料，这些燃料在能源转型中具有显著潜力。

特别是在复杂情况下

遵循安全设计原则

具有显著使用阶段的技术。这种方法侧重于在设计初期解决安全问题，并通过提前加载安全考虑因素来平衡创新与谨慎。通过从一开始就最小化风险，创新者可以减少在产品生命周期后期进行广泛缓解措施的需求。有效的“安全设计”实践要求监管机构、创新者和利益相关者之间的积极合作，确保监管准备就绪以及适当的安全框架和工具的发展。协作努力将增加创新同时保持高标准的安全。

在整个生命周期中采取关键的缓解措施

以下是一些内容的清单：

电解槽和工厂。

在运营期间需采取的必要缓解措施（Zygier 2024）：

3 **退化管理。** 减轻膜降解风险是防止故障发生的关键。运营商必须严格遵守规定的维护时间表和程序，以维持设备的完整性。

3 **最优运行条件。** 坚持制造商的规定，并考虑当地运营条件，是至关重要的。

3 **早期检测与监测。** 持续监测膜和隔膜状态有助于早期发现退化，从而降低设备在预期使用寿命内发生意外故障的可能性。

3 **监控关键参数。** 定期监控如气体纯度、电压和电流等关键参数，以确保最佳性能和早期发现潜在问题。

3 **积极性的运营实践。** 积极措施，如当设备超出最佳参数运行时暂停生产，以及开发有效的排放和惰化程序，是基本的安全实践。

3 **措施：气体处理与安全。** 有效移除加工设备中的易燃和氧化性气体可最小化损失并提高安全性。严格遵守氢气危害管理——包括良好的管理、探测器、操作规程和预防燃料-空气混合物及点火源的措施——确保安全操作。

Accufacts Inc. 2022. 关于通过天然气管道运输氢气的安全性 雷德蒙德，华盛顿：Accufacts. <https://pstrust.org/wp-content/uploads/2022/11/11-28-22-Final-Accufacts-Hydrogen-Pipeline-Report.pdf>.

氢能协会. 2024a. “NYK的氨燃料气体运输船获得机舱安全认证。” 氢能协会，2024年8月26日. <https://ammoniaenergy.org/articles/engine-room-safety-ac-creditation-granted-for-nyks-ammonia-powered-gas-carrier/>.

氢能协会. 2024b. “全球项目列表：低排放和转型氨工厂。” <https://ammoniaenergy.org/wp-content/uploads/2024/11/AEA-LEAD-Plants-Executive-Summary-November-2024.pdf>.

氢能协会. 2024c. “国际海事组织推进氨燃料使用临时指南。” 氢能协会，2024年10月2日. <https://ammoniaenergy.org/articles/im-o-moves-forward-with-interim-guidelines-for-ammonia-fuel-use/>.

氢能协会. 2024d. “更新后的PGS-12代码：为荷兰增加的氨进口做准备。” 氢能协会，2024年8月16日. <https://ammoniaenergy.org/articles/updated-pgs-12-code-preparing-for-increased-ammonia-imports-to-the-netherlands/>.

Calabrese, M., M. Portarapillo, A. Di Nardo, V. Venezia, M. Turco, G. Luciani, 和 A. Di Benedetto. 2024. “氢安全挑战：关于生产、储存、运输、利用和基于计算流体力学（CFD）的后果及风险评估的全面综述。” *能源* 17 (6): 1350. <https://doi.org/10.3390/en17061350>.

CHS (氢安全中心)。2024. “氢安全中心。” <https://www.aiche.org/chs>.

DNV (Det Norske Veritas). 2021. 外部安全性研究——远洋船舶使用替代燃料的加油操作。文档编号：11J5ON0R-1. 挪威奥斯陆：DNV. https://sustainableworldports.org/wp-content/uploads/DNV-POA-Final-Report_Eternal-safety-study-bunkering-of-alternative-marine-fuels-for-seagoing-vessels_Rev0_2021-04-19.pdf.

DOE (美国能源部)。2016年。《氢能对代码官员的介绍》。华盛顿特区：美国能源部。 https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/introduction_to_hydrogen_for_code_officials_text_version.pdf?sfvrsn=f104444b_1.

Dräger. 2020. “氢气：如何应对安全挑战。” <https://www.draeger.com/Content/Documents/Content/hydrogen-safety-challenges-ebk-11064-en-master.pdf>.

EIGA (欧洲工业气体协会)。2019. “液氢储存、处理和分销安全。” 文件编号：06/19. <https://www.eiga.eu/uploads/documents/DOC006.pdf>.

Electrify. 2024. “挪威：氢燃料加注站爆炸。” <https://www.electrify.com/2019/06/11/norway-explosion-at-fuel-cell-filling-station/>

欧洲海事安全局 (EMSA)。2022. 《氨作为航运燃料的潜力》。里斯本：EMSA. <https://www.emsa.europa.eu/newsroom/latest-news/item/4833-potential-of-ammonia-as-fuel-in-shipping.html>.

环境防御基金。2022. “海洋中的氨：研究氨作为船用燃料对海洋生态系统潜在影响的研究。” <https://www.edfeurope.org/sites/default/files/2022-11/EDF-Europe-Ammonia-at-Sea-Summary.pdf>.

欧洲委员会。2023a. “氢燃料风险网络研讨会第1部分。” https://minerva.jrc.ec.europa.eu/EN/content/minerva/32adb4dd-5e93-11ee-9891-0050563f0167/eu_oecd_hydrogen_fuel_risks_webinar.

欧洲委员会。2023b. “氢安全资源链接。” https://minerva.jrc.ec.europa.eu/en/shorturl/minerva/jrclinks_to_hydrogen_safety_resources.pdf.

欧洲委员会。2023c. “HIAD 2.1: 氢事故与事故数据库。” <https://minerva.jrc.ec.europa.eu/en/shorturl/capri/hiadpt>.

欧盟委员会。2024. “氢燃料风险研讨会第2部分。” https://minerva.jrc.ec.europa.eu/EN/content/minerva/193b7298-cb4e-11ee-9895-0050563f0167/eu_oecd_hydrogen_fuel_risks_webinar_part_2.

FCHEA (燃料电池和氢能协会)。2024. “氢能和燃料电池代码及标准的在线资源。” <https://www.hydrogenandfuelcellsafety.info/>.

The Fertilizer Institute. 2018. “Anhydrous Ammonia Tank Car Checklist.” <https://www.aar.org/wp-content/uploads/2018/02/AAR-Anhydrous-Ammonia-Loading-Unloading-Guide-NAR.pdf>.

GCMD (全球海事脱碳中心)。2023年。
《安全与运营指南：新加坡氨燃料加注航行的指导原则》。新加坡：GCMD. GCMD-氨甲烷-补给-完整报告-更新日期：2024年6月28日。pdf (gcformd.org).

全球海事论坛。2023. 《商业化早期氨动力船只》。哥本哈根：全球海事论坛。 https://assets.ctfassets.net/gk3lrimlph5v/gNycdlIH-8dzuc7QP8U8tRP/93f1ef6e9e9775743b692a4ff3c4fe77/NoGAP-S-Report-Commercialising-early-ammonia-powered-vessels_1_.pdf.

绿色航运计划。2023. 《氨动力散货船：试点报告》。挪威：绿色航运计划。 <https://grontskipsfartsprogram.no/wp-content/uploads/2023/03/Ammonia-powered-bulk-carrier-Pilot-report..pdf>.

工具。2024a. “最佳实践。” <https://h2tools.org/H2>

² 最佳实践/最佳实践概述。
工具。2024b. “燃料电池代码”
H

² 并且标准和规范。” https://h2tools.org/fuel-cell-codes-and-standards?search_api_fulltext=

HFTO (氢和燃料电池技术办公室)。2024. “安全、规范和标准。” <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/safety-codes-and-standards>.

IDB (美洲开发银行)。2023. “拉丁美洲和加勒比地区绿色氢的环境、健康、安全和社交管理。” 技术简报 IDB-TN-2554, IDB, 华盛顿特区. <http://dx.doi.org/10.18235/0004888>.

国际天然制冷研究院 (IIAR)。2019。《ANSI/IIAR 2-2021标准：安全封闭循环氨制冷系统设计》。亚历山德里亚，VA：IIAR。https://www.iiar.org/IIAR/IIAR/Store/Publication_Product_Information/IIAR_2_2021_Product_Page.aspx#:~:text=ANSI%2FIIAR%20%2D2021%20is%2C,refrigeration%20systems%20published%20to%20date.

IIAR. 2021. “概述 ANSI/IIAR 6-2019：封闭式氨制冷系统检查、测试和维护标准。” https://resourcecompliance.com/wp-content/uploads/2020/02/IIAR-6-Part-1.pdf.

化学工程师协会. 2016. “全球无水氨生产、使用和储存法规综述。”系列研讨会 No. 161，危害 26。https://www.icheme.org/media/11771/hazards-26-paper-34-re-view-of-global-regulations-for-a-nhydrous-ammonia-produce-tion-use-and-storage.pdf.

IRENA (国际可再生能源机构) 和甲醇研究院. 2021年。 *创新展望：可再生甲醇*。阿布扎比：IRENA。https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/04/IRENA_Innovation_Renewable_Methanol_2021.pdf.

ISPT (可持续工艺技术研究院)。2023。*安全生产方面的绿色氨生产工业化规模*。阿姆斯特丹，荷兰：ISPT。https://www.h2-mobile.fr/uploads/doc_20231114192000.pdf.

小林, H., 植木, A., 萨马拉桑内, K. D. K. A., 和 奥卡福, E. C. 2018. “氨燃烧的科学和技术。”《燃烧学会会议论文集》 37 (1): 109–33. https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.029.

劳氏船级社. 2020. *氨基础设施：安全风险信息和指南* 伦敦，英国：劳氏船级社。https://static1.squarespace.com/static/5d1c6c223c9d400001e2f407/t/5eb553d755f94d75be877403/1588941832379/Report+D.3+Safety+and+regulations+Lloyds+Register.pdf.

劳氏检验局. 2024. *燃料思考：氨报告*。伦敦，英国：劳氏船级社 https://www.lr.org/en/knowledge/research-reports/2024/fuel-for-thought-ammonia-report/.

海事执行官. 2024年。“对甲醇进行全面测试，重点关注安全。”海事执行官，2024年5月27日。https://maritime-executive.com/editorials/putting-methanol-through-its-paces-with-a-focus-on-safety.

MESD (海洋能源与可持续发展) 中心及甲醇研究院. 2021. *甲醇作为船用燃料* 新加坡：MESD 中心卓越中心。https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/04/SG-NTU-methanol-marine-report-Jan-2021-1.pdf.

甲醇研究院. 2020. *甲醇安全操作手册 第5版* 阿灵顿，弗吉尼亚州：甲醇研究院。https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2020/03/Safe-Handling-Manual_5th-Edition_Final.pdf.

甲醇学院. 未知年。“甲醇安全处理。” https://www.methanol.org/safe-handling-resources/.

莫尔科夫, V. 2012. *氢能安全工程基础 (二)*。 https://www.arma.org.au/wp-content/uploads/2017/03/fundamentals-of-hydrogen-safety-engineering-ii.pdf

国家职业安全健康研究所. 2024. “氨水，氨，无水氨：肺损伤剂。” https://www.cdc.gov/niosh/ershdb/emergencyresponse/secard_29750013.html.

NETL (国家能源技术实验室)。2023年。*氢安全评估报告：燃气轮机、固体氧化物燃料电池和高温氢生产*。莫冈顿，西弗吉尼亚州：美国能源部国家能源技术实验室 (NETL)。https://www.netl.doe.gov/energy-analysis/details?id=36d409d2-dda0-4abb-a151-cb27de1ae8cc.

新泽西州卫生部门. 2016. “危险物质信息表：氨。” https://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/0084.pdf.

NHA (国家氢能协会)。2010. “氢能安全。”事实数据系列1.008。https://www1.eere.energy.gov/hydro-genandfuelcells/pdfs/h2_safety_fsheets.pdf.

国家可再生能源实验室 (NREL)。2015。*氢技术安全指南* 金，科罗拉多州：NREL。https://www.nrel.gov/docs/fy15osti/60948.pdf.

经合组织 (经济合作与发展组织). 2023. *基于风险监管设计的氢能安全使用*. 巴黎: 经合组织出版社. <https://doi.org/10.1787/46d2da5e-en>.

Risø 国家实验室. 2005. *安全性评估: 氨作为运输燃料*. 罗斯基尔德, 丹麦: Risø 国家实验室. <https://nh3fuelassociation.org/2005/02/01/riso-safety-assessment-of-ammonia-as-a-transport-fuel/>.

Tchouvelev, A. 2016. “序言: 从25年前的火素理论到氢能时代。” *传感器在氢技术中的安全与过程控制*, 由T. Hübert, L. Boon-Brett和W. Buttner编辑, 第xv-vvi页. 佛罗里达州博卡拉顿: CRC Press.

Tchouvelev, A., S. P. de Oliveira, 和 N. P. Neves. 2019. “氢能源技术的监管框架、安全方面和社会接受度。” 在 *氢能技术科学与工程*, 由P. E. V. de Miranda编辑, 第303-56页. Academic Press.

美国环境保护署. 2016. “甲醇.” <https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-09/documents/methanol.pdf>.

王雪岩、魏高. 2023. “氢燃料加注站氨泄漏风险评估.” *国际氢能杂志* 48 (91): 35795–808. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319923027581>.

WPSP (世界港口可持续发展计划). 2024. “氨作为一种燃料.” <https://sustainableworldports.org/clean-marine-fuels/ammonia-as-a-fuel/>

Yara. 2023. “Yara Clean Ammonia: PGS-12 Guidelines.” <https://ammoniaenergy.org/wp-content/uploads/2023/11/Naveed-Qamar-rapid-fire-2311142.pdf>.

零碳航运. 2022. 氨安全研究. 哥本哈根: 马士基麦肯尼莫勒零碳航运中心. <https://www.zerocarbonshipping.com/projects/ammonia-safety-study/>.

Zygier, C. 2024. “保险政策指南针对氢能新参与者.” https://www.linkedin.com/posts/carlos-zygier_modular-lay-out-plant-of-hydrogen-electrolyzer-ugcPost-7159767763215937536-0Wz4/?utm_source=share&utm_medium=member_ios

连接至

liveWire

The **实时热线** 一系列在线知识笔记，由世界银行集团能源和矿产资源全球实践部门发起，提供了世界银行集团在项目和分析工作中的丰富见解。

每天，世界银行集团专家将他们的知识和专业能力应用于解决客户国家的实际问题。**实时热线** 捕捉了在领域内获得的丰富见解，使作者能够与他们自己的实践者、政策制定者和规划者分享他们的发现。

难道你不应该连接到Live Wire吗？

自2014年以来，该系列中的120篇简报涵盖了诸如能源需求和供应、可再生能源、能源效率、能源政策、经济增长、环境保护、气候变化缓解、电力系统、城乡发展、能源获取、基础设施经济学、私营部门参与、融资获取以及监管等关键主题。

- ✓ 提供关于关键能源问题的技术知识。主题简报
- ✓ 突出实施经验中的教训，通常伴随着洞察。
案例研究
从私营部门参与中。
- ✓ 摘要 提供关键能源数据的分析概述及
全球趋势
发展。
- ✓ 描绘银行集团在能源和采掘业领域的活动。银行观点

该格式易于访问，严谨且简洁，便于分享。每个简报的6-12页内容充分利用了图表。简报由世界银行集团经验丰富的从业者进行同行评审，并由专业人士编辑和制作。虽然它们的主要传播渠道是线上，但《Live Wires》以印刷准备文件的形式适用于特定客户需求。

《Live Wire》是为世界银行集团内外部的实践者、政策制定者和规划者设计的。它是一份可以与客户、同事和同行分享的资源。

实时新闻简报旨在便于在屏幕上阅读，并可供下载和彩色或黑白自行打印。

关于世界银行集团

专业

员工：

打印可以根据会议和活动的需求进行定制。可通过联系GSDPM客户服务中心（电话：(202) 458-7479）或发送书面请求至cgsdpm@worldbank.org进行操作。



请访问世界银行集团的开放知识库，浏览“实时新闻”系列并下载您关心的议题：www.worldbank.org/energy/livewire

