

HYDROGEN READY 螺纹密封 解决方案和泄漏预防

SIMONE ZANETTI, 汉高意大利公司应用工程部

MIKE FEENEY, 汉高加拿大公司应用工程部

DAVID CONDRON, 汉高爱尔兰公司产品开发部

• 白皮书

目录

- 02** **执行摘要** >
- 03** **简介**
氢:前景广阔的
能源解决方案 >
- 06** **测试方法**
测试螺纹密封胶的
氢气泄漏预防效果 >
- 07** **结果** >
- 09** **结论** >
- 10** **参考资料** >



执行摘要

在当今越来越重视可持续发展和追求清洁能源替代方案的时代，绿色氢能解决方案的出现引起了人们的特别关注。然而，在从氢气生产到配送的整个生命周期中，最大限度地减少或杜绝氢气泄漏的必要性日渐突出，除了潜在的安全隐患外，还带来了经济负担。

为了应对微小氢分子带来的挑战，对接头进行连接又要保持密封就成了一项艰巨的任务。在与氢气相关的设备中，通常会避免使用螺纹连接。相反，工程师经常采用成本昂贵的装配工艺，如密封焊接或采用更昂贵的连接方法。在本研究中，我们展示了厌氧螺纹密封胶和螺纹密封绳的效果，这些出色的解决方案不仅可以有效防止螺纹接头泄漏，还为绿色氢能与我们追求的可持续能源解决方案无缝结合做出重要贡献。



简介

氢：前景广阔的能源解决方案

氢提供了一种非常有效的能量储存和运输方式。纯分子形式的氢 (H₂) 在地球上非常稀少，因此必须通过电解从水中或从天然气和煤炭中制取。在某些条件(取决于氢的制取方式)下，氢可以成为一种可持续的能源解决方案，替代或取代对环境影响更大的能源。

根据 RSE 报告“氢：实现脱碳的储能载体”，绿色氢能是到 2050 年实现能源系统完全脱碳的主要方案之一。欧洲委员会预测，到 2050 年，绿色氢能的使用将增长到占能源经济的 13%-14%；国际能源机构预测，到 2030 年，全球氢动力汽车的数量将达到约 250 万辆。

毋庸置疑，该行业的发展受益于氢的某些固有特性，这些特性总结如下：

- 氢是自然界中最丰富的元素(宇宙中超过 90% 的物质都是由氢构成的)，在地球上也是如此；

想想看，每个水分子都含有两个氢原子。

- 氢是一种高度易燃的气体，不会排放二氧化碳，燃烧产物是水和热量。
- 氢的能量密度很高(为 120 MJ/kg，而甲烷为 55.6 MJ/kg，汽油为 47.3 MJ/kg，柴油为 44.8 MJ/kg)。
- 氢可以长时间大量地储存。

氢具有巨大的应用潜力：传统重工业领域(铸造、钢铁、化工、石化、化肥和黄金公司)中用作还原剂；如今，在减排困难的行业(如纺织厂或造纸厂)中，它还可用于产生工业用热、发电和储电，以及为重型运输工具提供动力。上面提到的 RSE 报告预测，到 2050 年，氢将越来越多地用于非传统用途。

根据国际能源机构的数据，每年的氢气产量为 7000 万吨：

76% 来自天然气，22% 来自煤炭，2% 来自水电解(IEA, 2019)。因此，并非所有的氢气都是一样的；根据氢气制取方式的不同，人



们以不同的颜色对氢气进行了命名。如果氢气是由化石燃料燃烧产生的并且排放二氧化碳，那么就称之为灰氢；如果氢气是由化石燃料产生的，但有碳捕获系统，可以减少污染工厂的温室气体排放或可以直接从大气中去除这些排放，那么我们就称之为蓝氢；如果氢气是由可再生能源（如太阳能和风能）产生的，我们就称之为绿氢；如果氢气是由核能产生的，我们就称之为紫氢。因此，我们不能笼统地谈论氢气，而必须研究和追踪它的生产链。

《欧盟氢能战略》指出，到 2050 年实现碳中和目标的优先事项是：以发展绿氢为长远目标，以促进综合能源系统的形成；在中短期的过渡阶段发展蓝氢，迅速减少制氢过程中的排放，并大力发展可持续市场。显然，将可再生能源整合到氢气生产中起着重要作用。可再生能源，尤其是风能和太阳能，具有不可预测性和不可操控性：例如，太阳能电池板仅在白天和夏季期间有效；风力涡轮机仅在在有风时才能运行。因此，如果缺少了特定天气条件，这些系统就会停止运行，无法发电。有时候也会出现电能生产过剩的情况，由于缺乏电能源储存能力，往往需要限制发电量。因此，氢气可成为可再生能源发电的完美补充，为储存这些过剩的电能以供日后使用提供了方法。

要解决季节性储能问题，最清洁、最高效的办法是利用可再生能源来发电，然后将电输送给电解器中，将水转化为氢气和氧气。生成的氢气随即可通过天然气管网配送或储存在储罐中，然后在需要时再转化回电能，还可以转化成热能。这是一个自供电的闭环，可在工业层面，甚至智能城市层面应用。

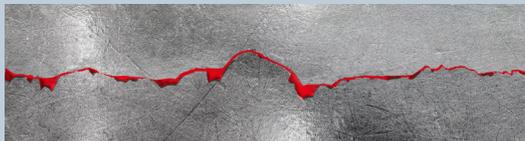
在向氢过渡的过程中，除了氢储存方面的挑战之外，运输也是一个关键问题，这主要是因为必须确保它的可持续性。目前，氢在通过气瓶装的压缩氢、低温罐装的液化氢以及管道形式输送的合适形态进行运输。至少从理论上讲，用专用管道运输或以与天然气混合的形式运输似乎是最合理的选择。

氢气泄漏是天然气管道面临的严峻挑战。由于氢气比甲烷更容

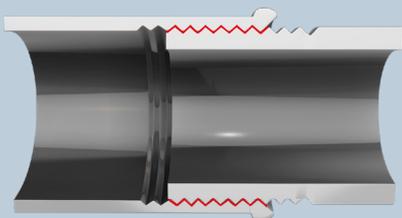
易通过细小的孔洞、裂缝和焊缝泄漏，因此氢气的运输和最终储存成为了其作为燃料和原料被广泛采用的主要障碍。氢气渗透和脆化则让问题变得更加复杂。

天然气泄漏率已经高于美国环境保护署的估计。《美国科学杂志》发表的一项研究发现，2015 年美国甲烷供应链中的损耗占总产量的 2.3%，比 EPA 的调查估计值高出约 60% (Alvarez et al., 2018)。受英国政府委托，由剑桥大学和雷丁大学的科学家撰写的白皮书“*Atmospheric implications of increased hydrogen use*”（加大氢气使用对大气的影响）（2022 年 4 月）指出，由于 H₂ 分子比 CH₄ 分子小，氢气的泄漏率可能会更高。

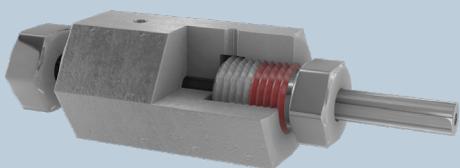




然而,所有金属材料,无论加工得多么精细,都会有表面粗糙度。因此,即使是精密配合(如过盈配合),零件之间也会存在接触点和空隙。这可能会产生逃逸通道,对于氢分子这种小分子更是防不胜防。厌氧粘合剂在施涂后会均匀分布,填满所有的空隙,并在部件之间形成 100% 的接触,从而确保完整可靠的密封效果。



在金属接头中,零件之间永远不会完全接触,否则接头的装配就不可能完成。因此,必须均匀地涂抹能填满空隙的产品,形成完全密封,这样才能防止泄漏。厌氧解决方案以及 LOCTITE 55 可为密封氢等极小分子提供可靠耐用的解决方案。



厌氧粘合剂施涂到螺纹接头上后,会在装配过程中均匀分布,形成完整均匀的接触区域,从而确保安全可靠的密封效果。

用于氢气管道 螺纹连接的 经济高效的密封解决方案

出于这些原因,人们通常建议对螺纹连接进行密封焊接,或者完全避免使用螺纹连接。这就给系统带来巨大的成本,因为需要更昂贵的部件来替代螺纹连接,或者需要熟练工来进行密封焊接。如果使用适当的密封胶对标准化和现成的螺纹连接进行可靠的密封,就可以避免或减少这些成本。美国机械工程师协会 (ASME) 关于氢气管路和管道的规范 (B31.12-2023) 为使用螺纹连接提供了指南。锥形螺纹接头 (NPT, 符合 ASME B1.20.1) 可用于设计压力低于 20,670 kPa (3,000 psig) 的系统,在工程设计规定的情况下,还可用于压力高达 48,280 kPa (7,000 psig) 的系统 (ASME, 2023)。

厌氧粘合剂和密封胶可以很好地提供氢气密封解决方案。它们是反应型粘合剂,在没有空气的情况下与金属表面接触时,可迅速固化成热固性塑料。

紧密贴合的金属螺纹创造了近乎完美的固化条件,因此这些材料成为了理想的螺纹密封胶选择,克服了传统密封方法的诸多局限性。当它们以液态形式施涂于螺纹上时,可以填满配合螺纹之间的任何空隙或修补其缺陷。当粘合剂被密封在金属螺纹之间时,没有足够的氧气来保持其液态稳定性,从而它们会快速聚合形成热固性塑料,在两个部件之间提供机械粘合。由于密封性能并不依赖于螺纹之间的压紧作用,因此最初可以对准任何方向装配,并且可以擦去从接头处挤出的任何多余粘合剂。这意味着接头可以保持整洁的外观,可耐受振动松动、高达 200°C 的温度和大多数系统的额定破裂压力。厌氧螺纹密封胶及其为气体和液体提供密封解决方案的能力在 McGurk 等人 [7] 的白皮书中作了进一步讨论。



测试方法

测试螺纹密封胶的氢气泄漏预防效果

为了证明密封解决方案的相容性和有效性，汉高设计了一项实验，并与外部实验室签订了合同，采用压降法对三种不同的螺纹密封胶材料进行低压氢气泄漏测试。此外，还将密封胶用在了使用美国国家标准锥管 (NPT) 螺纹和英国标准锥管 (BSPT) 螺纹的组件上，这两种螺纹是全球最常见的管螺纹类型。所有组件均由 304 不锈钢部件制成，因为 300 系列合金是气体输送管道系统中最常用的材料 (欧洲工业气体协会，2014)。

由于没有关于氢气密封测试的参考标准，我们根据现有标准创建了一套测试装置，这些标准包括 ASTM D6396 (测试 T 形管上管螺纹密封层的标准试验方法)、ASTM D1599 (塑料管、管道以及管配件的短时间耐液压强度的标准试验方法)、LOCTITE STM 772 (基于前两项 ASTM 标准) 和 EN 751-1 (与第一、第二和第三族气体和热水接触的金属螺纹接头的密封材料 - 第 1 部分：厌氧接合化合物)。

根据这些标准，我们创建了一个工具，并定义了测试参数。

我们选择了两类螺纹密封胶进行测试：厌氧螺纹密封胶 (LOCTITE 577 和 LOCTITE 567) 和非硬化螺纹密封绳 (LOCTITE 55)。

LOCTITE 577 是 BSPT 或其他直螺纹与锥螺纹连接最常用的厌氧密封胶，而 LOCTITE 567 是 NPT、锥螺纹与锥螺纹连接最常用的厌氧密封胶。

LOCTITE 55 是最常见的非硬化密封绳，通常用于使用前需微调的应用中。所有这三种密封胶都已通过了至少一个地区的天然

气认证。鉴于目前正在探索将氢与天然气混合并使用现有天然气基础设施进行输送的方案，所以，通过天然气认证是一个重要的考虑因素。

测试包括两个压力步骤。具体来说，对于 LOCTITE 55，测试压力为 9 bar (131 psi)，后增至 10.3 bar (150 psi)；对于 LOCTITE 567 和 577，测试压力为 20 bar (300 psi)，后增至 31 bar (450 psi)。

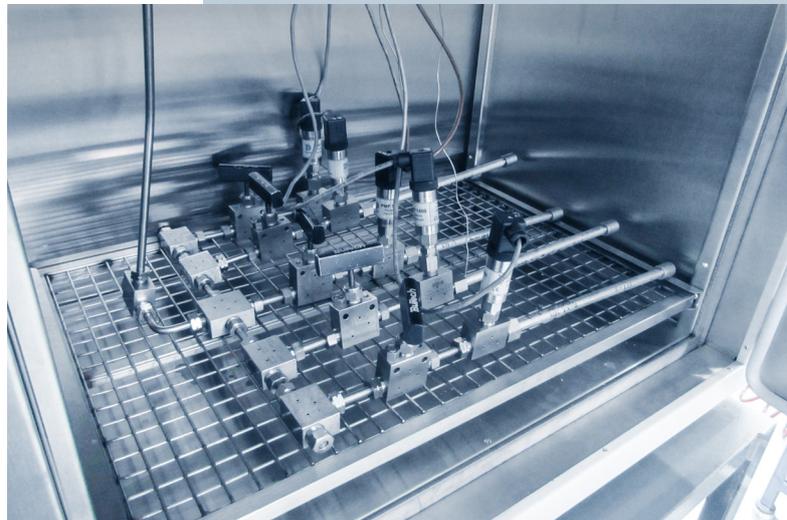


图 1: 测试

结果

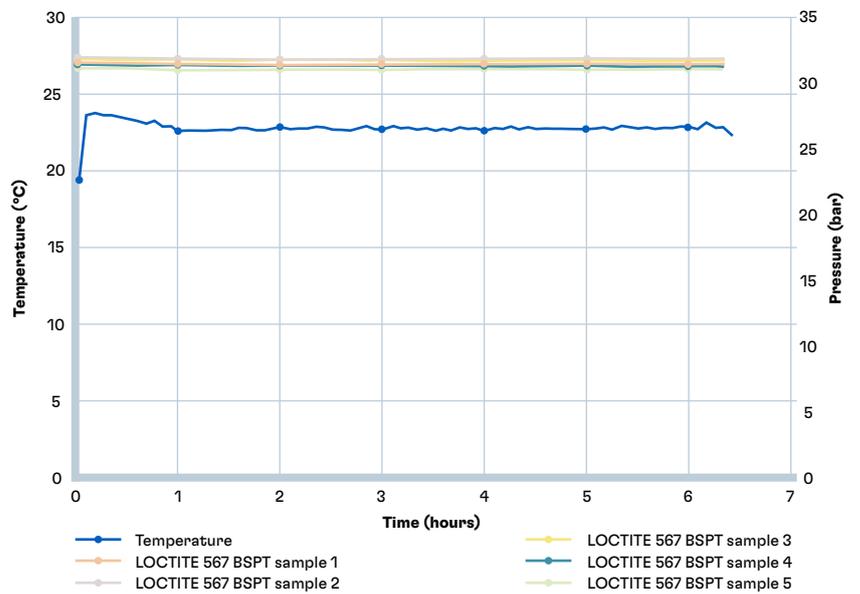
每次测试都记录了温度和压力。绘制了压力点，以确定每种螺纹密封胶材料的泄漏压力。系统中的气体量很小，因此任何压力下降都会很明显。



LOCTITE 567

图 2 汇总了 LOCTITE 567 在 31 bar 压力测试条件下的结果。该图显示了 BSPT 接头样品的压力和温度，并与 31 bar 氢气压力泄漏测试进行了对比。没有观察到压力下降，因此没有泄漏。

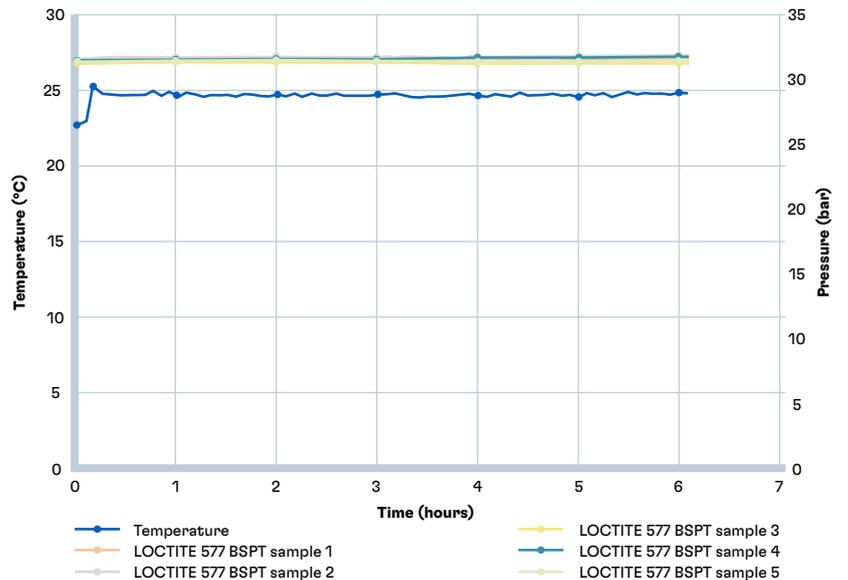
图 2: LOCTITE 567 BSPT 接头在 31 bar 压力下的温度和压力图



LOCTITE 577

图 3 汇总了 LOCTITE 577 在 31 bar 压力测试条件下的结果。该图显示了 BSPT 接头样品的压力和温度，并与 31 bar 氢气压力泄漏测试进行了对比。没有观察到压力下降，因此没有泄漏。

图 3: LOCTITE 577 BSPT 接头在 31 bar 压力下的温度和压力图

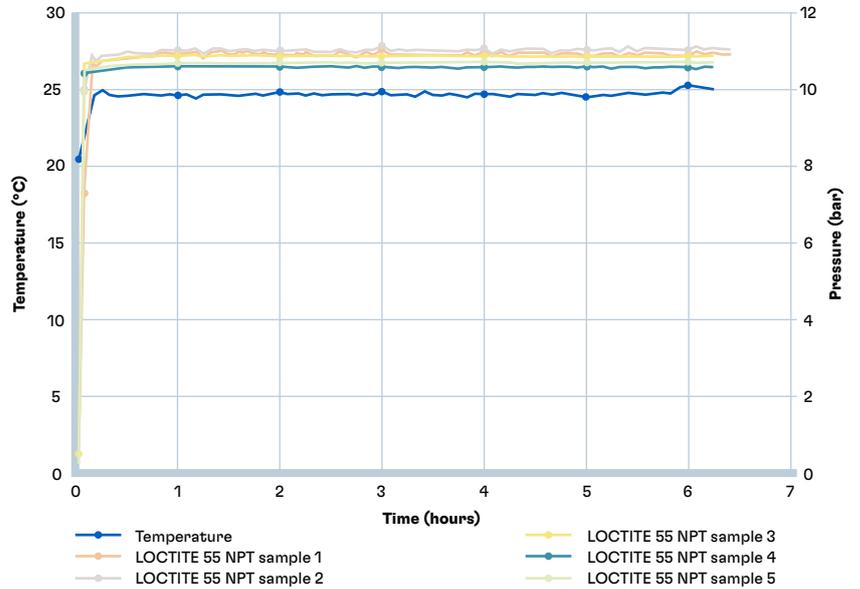




LOCTITE 55

图 4 汇总了 LOCTITE 55 在 10.3 bar 压力测试条件下的结果。它显示了 NPT 接头在 10.3 bar 的压力测试条件下的温度和压力图。压力没有明显下降，因此可以判定没有泄漏。

图 4: LOCTITE 55 NPT 接头在 10.3 bar 压力下的温度和压力图



汇总表

图 5 展示了在不同压力下，对不同类型的 NPT 和 BSPT 接头进行测试后得出的所有结果：

测试组件	密封胶	测试压力 (步骤 1)	测试结果	测试压力 (步骤 2)	测试结果	测试气体
1/4" NPT - 304 不锈钢 • 管接头 (长度 10") • 连接器 • 堵头	LOCTITE 55	131 psi (9 bar)	✓	150 psi (10.3 bar)	✓	氢
	LOCTITE 567	300 psi (20 bar)	✓	450 psi (31 bar)	✓	
	LOCTITE 577	300 psi (20 bar)	✓	450 psi (31 bar)	✓	
1/4" BSPT - 304 不锈钢 • 管接头 (长度 12") • 连接器 • 堵头 (316 不锈钢)	LOCTITE 55	131 psi (9 bar)	✓	150 psi (10.3 bar)	✓	
	LOCTITE 567	300 psi (20 bar)	✓	450 psi (31 bar)	✓	
	LOCTITE 577	300 psi (20 bar)	✓	450 psi (31 bar)	✓	

图 5: 测试结果汇总表



结论

- › 本文所述的密封测试旨在展示厌氧螺纹密封胶和 LOCTITE 55 螺纹密封绳产品能否为防止螺纹接头氢气泄漏提供有效的密封解决方案。
- › 测试中使用了压力传感器来测量压力,可提供经校准的电子输出,压力读数精度在 0.05 至 0.1 bar 之间。
- › 所有样品均成功地通过了测试。在所考虑的任何压力条件下,测试样品均未出现明显的压力下降。
- › 由此可以得出结论:LOCTITE 55 非固化螺纹密封绳可以解决在最大 10 bar (150 psi) 的较低压力条件下对 NPT 和 BSPT 接头进行氢气密封的问题。
- › 厌氧固化螺纹密封胶成功地在 31 bar (450 psi) 的压力条件下对 NPT 和 BSPT 接头进行了氢气密封。由于这些产品固化后会形成热固性聚合物,因此预计它们可以在更高的压力下进行密封,但使用现有的测试设备还无法实现这一点。
- › 此处测试的所有产品以及 LOCTITE 570 和 LOCTITE 638 均已通过 Kiwa 对氢气密封应用的测试和认证,符合 AR 214 标准要求。Kiwa NV 是一家测试、检验和认证市场机构,总部设在欧洲。
- › 本报告中评估的密封胶为密封氢气应用中的螺纹接头提供了方便、可靠且经济高效的方法。厌氧螺纹密封胶还能防止自松脱(考虑到氢气的易燃风险,这一点非常重要),为螺纹连接的密封提供了额外的安全保障。
- › 厌氧螺纹密封胶解决方案还适用于高压氢气应用。据我们所知,有客户在压力高达 1,000 bar 的氢气螺纹密封应用中使用我们的厌氧密封胶。在撰写本文时,汉高正在类似条件下进行实验室测试,以验证这些产品在高压氢气环境中使用的整体适用性。如果您对这些测试的结果感兴趣,或想进一步了解这些产品是否适合您的应用,请随时联系本文作者或您当地的汉高代表。



参考资料

- [1] RSE report 'Hydrogen. An Energy Carrier for Decarbonization', January 2021
- [2] International Energy Agency (IEA) 'The Future of Hydrogen' June 2019
- [3] Ramón A. Alvarez, Daniel Zavala-Araiza, David R. Lyon, David T. Allen, Zachary R. Barkley, Adam R. Brandt, Kenneth J. Davis, Scott C. Herndon, Daniel J. Jacob, Anna Karion, Eric A. Kort, Brian K. Lamb, Thomas Lauvaux, Joannes D. Maasackers, Anthony J. Marchese, Mark Omara, Stephen W. Pacala, Jeff Peischl, Allen L. Robinson, Paul B. Shepson, Colm Sweeney, Amy Townsend-Small, Steven C. Wofsy and Steven P. Hamburg, 'Assessment of methane emissions from the U.S. oil and gas supply chain', American Journal of Science, June 2018
- [4] Nicola Warwick, Paul Griffiths, James Keeble, Alexander Archibald, John Pyle, University of Cambridge and NCAS and Keith Shine, University of Reading, 'Atmospheric Implications of increased hydrogen use', UK government, April 2022
- [5] European Industrial Gases Association (EIGA), 'Hydrogen Pipeline Systems', IGC Doc 121/14, 2014
- [6] American Society of Mechanical Engineers, 'Hydrogen Piping and Pipelines', B31.12-2023
- [7] Ged McGurk, Mike Feeney, Siva Ayadurai, Oliver Droste, white paper 'High pressure leak prevention – improved performance and reliability from anaerobic thread sealing compounds', March 2016



联系方式

Henkel AG & Co. KGaA

Henkelstraße 67
D-40589 Düsseldorf
电话:(+49) 211 797 0
传真:(+49) 211 798 4008

www.henkel-adhesives.de
www.henkel.de

Henkel AG & Cie. AG

Salinenstr. 61
CH-4133 Pratteln
电话:(+41) 61 825 70 00
传真:(+41) 61 825 73 03

www.henkel-adhesives.de
www.henkel.com

Henkel Central Eastern Europe GmbH

Erdbergstraße 29
A-1030 Wien
电话:(+43) 1 711 04 0
传真:(+43) 1 711 04 4194

www.henkel-adhesives.de
www.henkel.at

