

氫氣防漏 管路密封 解決方案與洩漏防護

SIMONE ZANETTI, Henkel Italy 應用工程部門

MIKE FEENEY, Henkel Canada 應用工程部門

DAVID CONDRON, Henkel Ireland 產品開發部門

• 白皮書

目錄

- 02** **摘要** 
- 03** **簡介** 
氫：前景看好的
能源解決方案
- 06** **測試方法** 
氫氣洩漏防護的
管路密封膠測試
- 07** **結果** 
- 09** **結論** 
- 10** **參考資料** 



摘要

在這個越來越著重永續發展和追求乾淨能源替代方案的時代，綠氫被視為特別吸引人的解決方案。然而在整個生命週期，從生產到配送的每一個環節中，都必須盡可能地減少或消除洩漏，除了潛在的安全危害之外，這在目前是龐大的經濟負擔。

要解決微小氫分子帶來的挑戰，在維持良好密封的同時黏接，將會是艱鉅任務。相關氫設備通常會避免管路連接。因此，工程師經常採用昂貴的組裝程序，例如密封焊接或較昂貴的連接方法。在這項研究中，我們將展示厭氧管路密封膠和管路密封繩作為有效防止螺紋接頭洩漏的出色解決方案的功效，及其在我們追求永續能源解決方案時，扮演了綠氫無縫整合的核心元素。



簡介

氫：前景大好的能源解決方案

氫氣是儲存與運輸能量的實用方式。純粹分子型態的氫氣 (H₂) 在地球上很少見，因此必須透過電解水或從天然氣和煤炭中產生。視其生產方式而定，在某些條件下，氫氣可能是永續能源解決方案，並可替代或取代對環境影響更大的能量來源。

根據 RSE 的報告《Hydrogen. An Energy Carrier for Decarbonization》(氫：脫碳的能源載體)，綠氫是 2050 年時能源系統完全脫碳的

主要選擇之一。歐盟委員會預測，到了 2050 年，綠氫的使用量將會成長至能源經濟的 13% 至 14%；而國際能源署預測，到 2030 年，全球將會有大約 250 萬輛氫氣動力車。

氫的某些固有特徵可歸納為下列幾點，讓各界看好這項產業的發展：

- ✧ 這是最豐富的大自然元素 (宇宙中超過百分之 90 的物質是由氫組成)，而且地球富含此元素；

只要想想水的每個分子都含有兩個氫原子此一事實，就可見一斑。

- ✧ 這是一種不會釋出 CO₂ 的易燃氣體，其燃燒產物是水和熱。
- ✧ 它具有高能量密度 (120 MJ/kg，而甲烷為 55.6 MJ/kg，汽油為 47.3 MJ/kg，柴油為 44.8 MJ/kg)。
- ✧ 您可以大量儲放氫並延長存放期限。

氫氣具有極大的應用潛力：從

傳統用於重型工業 (鑄造廠、鋼鐵、化學、石化、肥料，以及黃金公司) 的試劑，到用於在

難以減排產業 (例如紡織或紙製造商) 中產生工業熱能、產生與儲存電力，以及為重載運輸提供動力。前述的 RSE 報告預測，到 2050 年時，會有更多氫氣導入非傳統用途。

根據國際能源署的資料，每年都會產生 7 千萬噸的氫氣：



76% 來自天然氣, 22% 來自於煤炭, 以及 2% 從電解水 (IEA, 2019)。因此, 各種來源的氫氣並不相等; 取決於氫氣生產方式, 採用不同的顏色來命名。簡單來說, 灰氫是燃燒化石來源產生, 會排放二氧化碳; 藍氫是使用化石來源搭配碳捕捉系統產生, 可減少會污染地球的溫室氣體排放, 或是直接從大氣中移除溫室氣體; 綠氫是利用可再生能源 (例如太陽能與風力) 產生; 紫氫則是使用核能產生。因此, 無法以概括方式談論氫氣, 而是必須研究並追蹤其生產鏈。

在歐洲氫能策略中, 到 2050 年達成碳中和目標的優先要務是長期發展綠氫、培養整合能源系統, 並在短期和中期的過渡階段中發展藍氫, 藉此快速減少氫氣生產中排放的溫室氣體, 並大幅提升永續市場的發展。很明顯地, 將可再生能源整合至氫氣生產, 在此過程中扮演重要角色。可再生能源 (尤其是風力和太陽能) 無法預測和設定; 舉例來說, 太陽能面板只能在白天和夏季有效運作, 而風力渦輪機只有在有風的情況下運作。因此, 在沒有特定天氣狀況的情況下, 系統會停止運作, 不會產生能量。此外, 也有一些時候會發生過量的能源生產, 而且由於缺乏能源儲存能力, 因此通常必須限制能源的生產。因此, 氫氣是再生能源發電的完美輔助, 提供儲存多餘能源供日後使用的方法。

為解決季節性儲存的問題, 最乾淨且最有效率的解決方案是使用可再生能源產生電力, 然後在電解槽中使用電力將水轉換為氫氣和氧氣。然後產生的氫氣可立即透過天然氣網路配送或儲存在貯槽中, 然後再轉換回電力, 也可以在需要時轉換為熱能。這是一個封閉的循環, 可自行供電, 並可在工業級甚至在智慧城市層級使用。

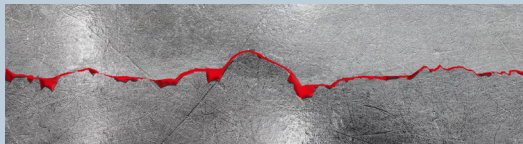
除了氫氣儲存方面的相關挑戰, 運輸也是移轉至使用氫氣的過程當中所必須因應的重大議題之一, 因為這關係到氫氣作為能源的長期可行性。現在, 氫氣在鋼瓶中以壓縮氣體的形式運輸、在低溫槽中以液化形式運輸, 以及在氫氣管線中以某種形式運輸。專用管線或與天然氣混合的運輸似乎是最合理的選擇,

至少在理論上是最合理的選擇。

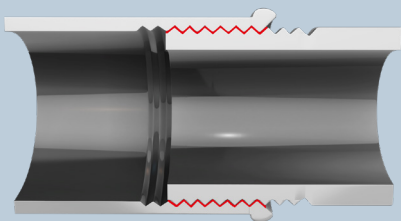
氫氣洩漏對於天然氣管線而言是一項艱鉅的挑戰。由於與甲烷相比, 氫氣可能經由最小的孔洞、裂縫和焊接縫而洩漏, 因此此氣體的運輸及最終儲存作業, 是其廣泛採用作為燃油與原料的主要障礙。氫氣滲透和氫脆只會使問題惡化。

天然氣洩漏率已高於美國國家環境保護局所估計的值。於美國《American Journal of Science》(美國科學雜誌) 發表的研究顯示, 在 2015 年, 美國甲烷供應鏈的損失是總產量的 2.3%, 比美國國家環境保護局 (EPA) 的庫存估計高出 60% (Alvarez 等人, 2018)。由英國政府委託並由劍橋大學和雷丁大學科學家所撰寫的白皮書《Atmospheric implications of increased hydrogen use》(增加使用氫氣對大氣的影響, 2022 年 4 月) 指出, 由於 H₂ 分子比 CH₄ 分子小, 因此氫氣的洩漏率可能更高。

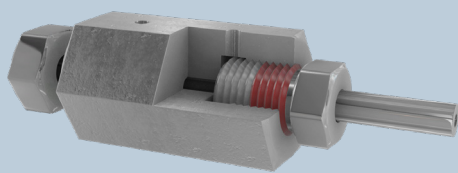




所有金屬材料，不論精密加工的細緻度如何，都勢必會有一定的表面粗糙度。因此，即使是在緊配等精密配合下，零件之間也會有接觸點和空隙。尤其是對氫氣等較小的分子而言，這可能會產生洩漏路徑。塗抹後，厭氧接著劑會均勻分佈，填滿所有空間，並在零件之間產生 100 % 的接觸，因此可確保完全可靠的密封。



在金屬配件中，零件之間永遠無法完全接觸；否則將無法組裝配件。因此，必須均勻塗抹可填滿空間並形成完整密封的產品，以避免滲漏。厭氧解決方案及 LOCTITE 55 提供可靠耐用的解決方案，即使是最小的分子，例如氫氣，也能密封。



將厭氧接著劑塗抹到螺紋零件上後，其可在組裝期間均勻分佈，建立完整且一致的接觸區域，進而確保密封安全可靠。

適用於氫氣管線中螺紋連接 且符合成本效益的 密封解決方案

基於這些原因，通常建議螺紋連接要進行密封焊接或完全避免。因為採用較昂貴的組件作為螺紋連接的替代方案，或是執行密封焊接所需的技術勞力，會為系統帶來可觀的成本。如果使用適當的密封劑，透過標準化且隨時可用的螺紋連接形成可靠密封，則可避免或降低這些成本。美國機械工程師學會 (ASME) 準則提供的氫氣管線和管線 (B31.12-2023) 等規範，可供用於螺紋連接。錐螺紋接頭 (NPT 符合 ASME B1.20.1) 可用於設計壓力低於 20,670 kPa (3,000 psig) 的系統，以及工程設計指定時，最高可達 48,280 kPa (7,000 psig) (ASME, 2023)。

厭氧接著劑和密封劑旨在提供氫氣的密封解決方案。它們是反應性接著劑，在沒有空氣時接觸金屬表面，可快速固化為熱固塑膠。

緊密配合的金屬螺紋創造近乎完美的固化條件，因此這些材料會成為理想的螺紋密封化合物，克服傳統密封方法的許多限制。由於它們是以液體狀態塗抹在螺紋上，因此可以在啮合螺紋之間填滿任何空隙或瑕疵。當受限於金屬螺紋之間時，氧氣不足以使材料穩定保持液態，所以快速聚合成熱固性塑膠，在兩個組件之間提供機械接合。由於密封效能並不依賴螺紋之間的壓縮，因此組件可初步對齊任何方向，且任何從接縫擠壓出的多餘塗料都可以拭去。這表示接頭外觀乾淨，並可提供耐振動鬆動，溫度高達 200°C，壓力高達大多數系統的爆破壓力額定值。McGurk 等人將在白皮書中進一步討論厭氧密封劑，以及其提供氣體與液體密封解決方案的能力 [7]。



測試方法

氫氣洩漏防護的 管路密封膠測試

為了展現密封解決方案的相容性與有效性，Henkel 設計了一項實驗，並與外部實驗室簽約採用壓降方法，對三種不同的管路密封膠材料執行低壓氫氣體洩漏測試。此外，在使用全球最常見的美國國家標準錐形管 (NPT) 螺紋和英國標準錐形管 (BSPT) 螺紋的組件上，使用密封劑。所有組件均以 304 不鏽鋼元件製成，因為 300 系列合金最常用於氣體傳輸管路系統 (歐洲工業氣體協會，2014)。

由於氫氣密封劑測試沒有參考標準，因此我們根據可用標準建立測試設置，例如 ASTM D6396 (T 型管上的管道管路密封膠測試標準測試方法)、ASTM D1599 (塑膠管、管路與接頭的短時間液壓壓力抗性標準測試方法)、LOCTITE STM 772 (基於前述兩個 ASTM)，以及 EN 751-1 (接觸第 1、第 2 和第 3 系列氣體和熱水的金屬螺紋接頭密封材料 - 第 1 節：厭氧密封劑)。

根據這些標準，我們建立了一項工具並定義測試參數。

測試涉及兩個壓力步驟。具體而言，LOCTITE 55 測試的壓力是 9 bar (131 psi)，增加到 10.3 bar (150 psi)，而對於 LOCTITE 567 和 577，測試的壓力是 20 bar (300 psi)，增加到 31 bar (450 psi)。

測試時會選擇兩種管路密封膠：厭氧管路密封膠 (LOCTITE 577 和 LOCTITE 567)，以及非硬化管路密封膠 (LOCTITE 55)。LOCTITE 577 是 BSPT 或其他直 (平行) 至錐形連接最常用的厭氧密封劑，而 LOCTITE 567 是 NPT、錐形至錐形螺紋連接最常用的厭氧密封劑。

LOCTITE 55 是最常見的非硬化密封紗，通常用於需要稍微調整才能使用的應用。這三種密封劑都已經過認證，符合至少一項適用於天然氣的區域核准。隨著目前正在探索如何將氫與天然氣混合送入現有的天然氣基礎建設，這是一項重要考量。

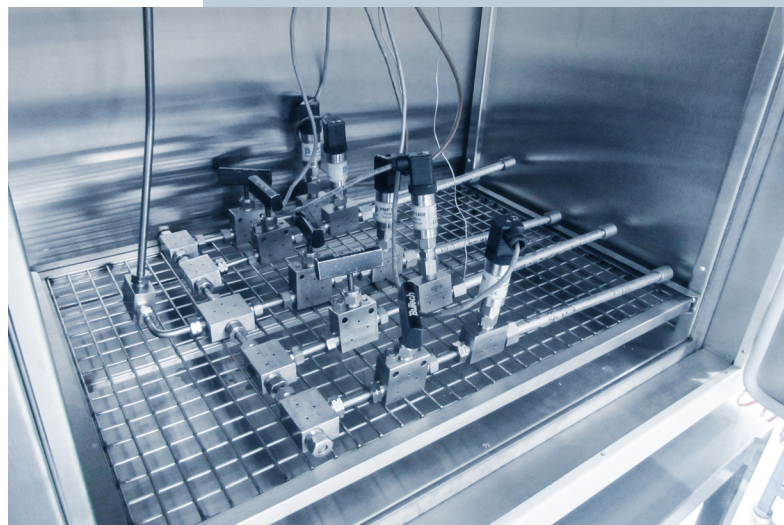


圖 1：測試

結果

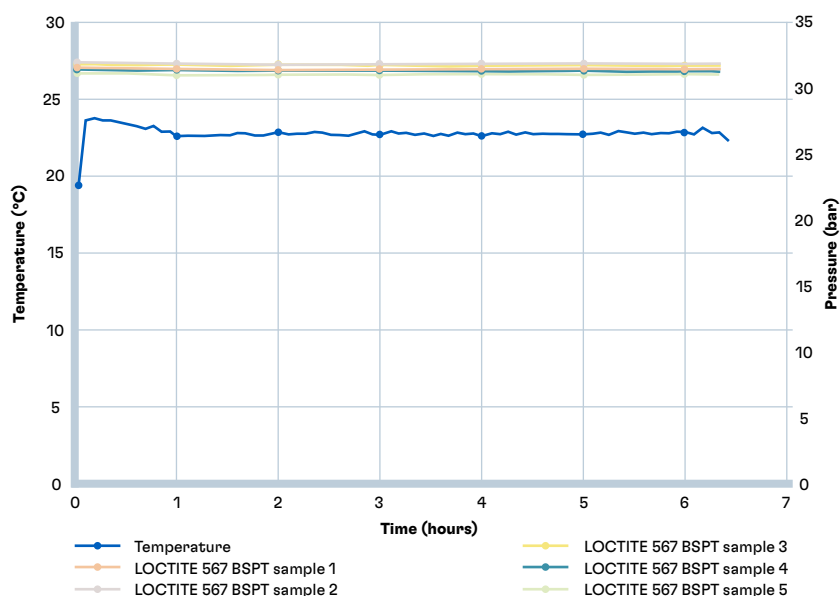
在每次測試期間記錄溫度和壓力。繪製多個小點，以識別每個管路密封膠材料的任何滲漏情形。系統中的氣體量非常小，因此任何壓降都很明顯。



LOCTITE 567

圖 2 總結在單一壓力測試條件下，LOCTITE 567 所獲得的結果。具體而言，圖表顯示與 BSPT 零件樣本的 31 bar 氬氣壓力洩漏測試相比的壓力和溫度。未觀察到壓力下降，因此沒有洩漏。

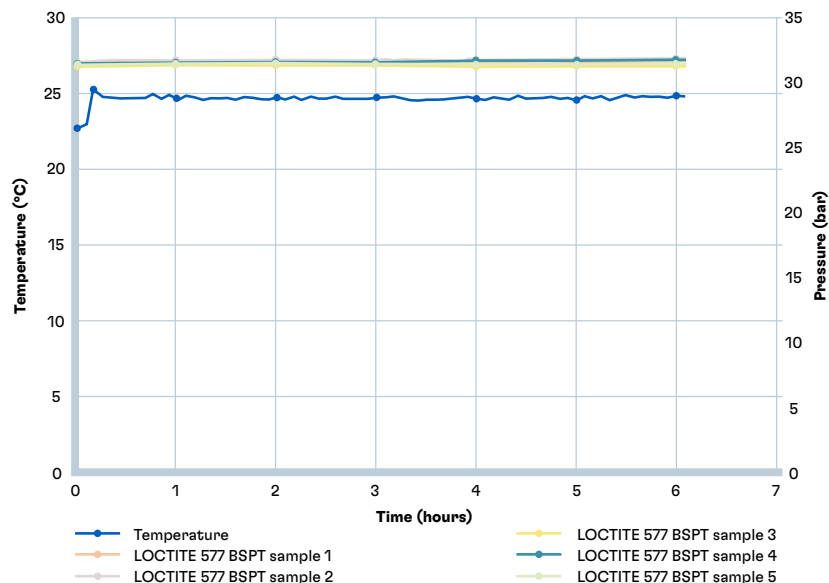
圖 2: LOCTITE 567 BSPT 零件在 31 bar 壓力下的溫度和壓力圖



LOCTITE 577

圖 3 總結在單一壓力測試條件下，LOCTITE 577 所獲得的結果。具體而言，圖表顯示與 BSPT 零件樣本的 31 bar 氬氣壓力洩漏測試相比的壓力和溫度。未觀察到壓力下降，因此沒有洩漏。

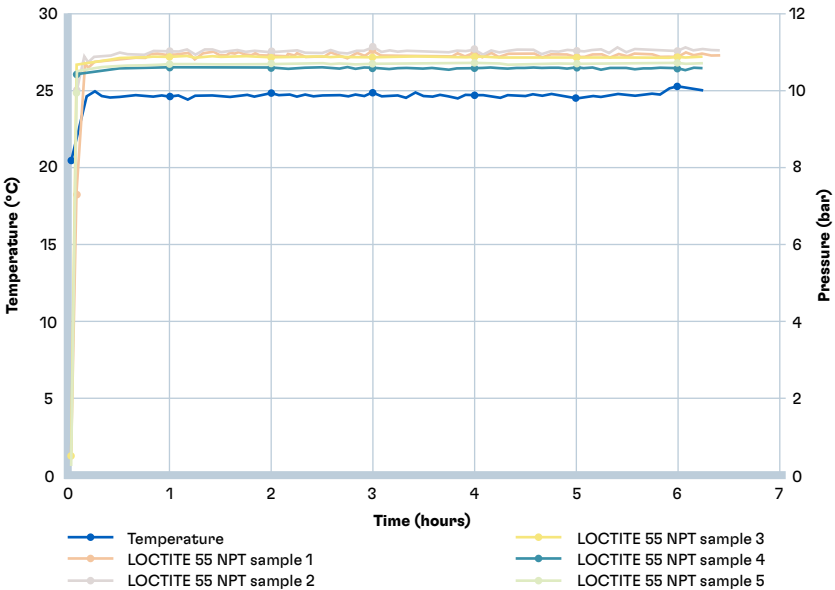
圖 3: LOCTITE 577 BSPT 零件在 31 bar 壓力下的溫度和壓力圖





LOCTITE 55
圖 4 總結在單一壓力測試條件下, LOCTITE 55 所獲得的結果。具體而言, 它顯示 NPT 零件在 10.3 bar 的第二個壓力測試條件下的溫度和壓力圖表。壓力並無明顯下降, 因此可得出結論為沒有洩漏。

圖 4: LOCTITE 55 NPT 零件在 10.3 bar 壓力下的溫度和壓力圖



一覽表

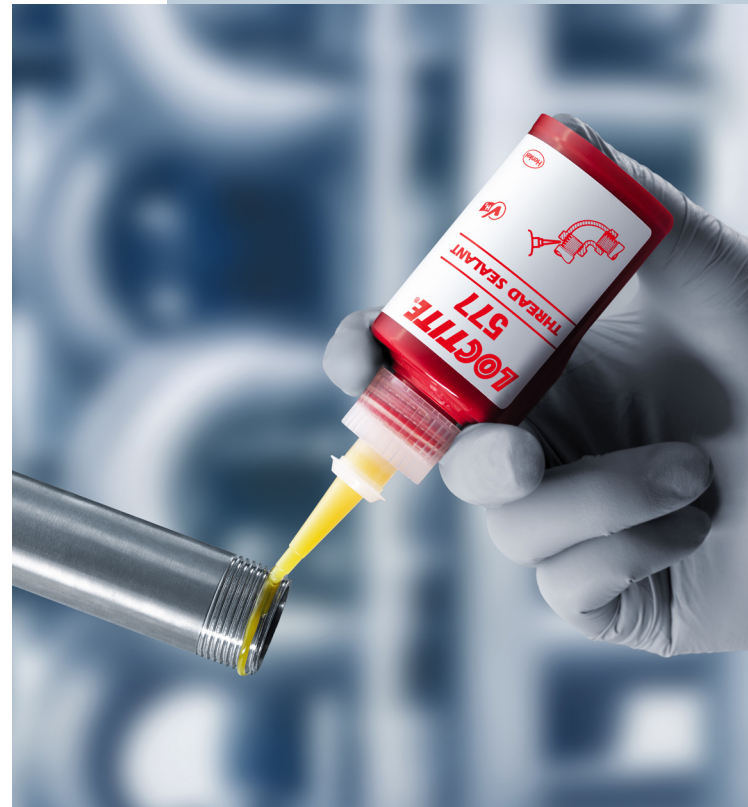
圖 5 說明在不同壓力下, 不同類型的 NPT 和 BSPT 零件的所有測試結果:

測試組件	密封劑	測試壓力 (步驟 1)	測試結果	測試壓力 (步驟 2)	測試結果	測試氣體
1/4" NPT – 304 不鏽鋼 • 管接頭 (10" 長) • 接頭 • 管塞	LOCTITE 55	131 psi (9 bar)	✓	150 psi (10.3 bar)	✓	氬
	LOCTITE 567	300 psi (20 bar)	✓	450 psi (31 bar)	✓	
	LOCTITE 577	300 psi (20 bar)	✓	450 psi (31 bar)	✓	
1/4" BSPT – 304 不鏽鋼 • 管接頭 (12" 長) • 接頭 • 管塞 (316 不鏽鋼)	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)	✓	

圖 5: 測試結果摘要表

結論

- › 本白皮書所述的密封測試是為了說明厭氧管路密封膠和 LOCTITE 55 管路密封繩產品如何提供有效的密封解決方案，以避免螺紋零件中的氬氣洩漏。
- › 使用壓力傳感器測量壓力，提供經過校準的電力輸出，使壓力讀數準確度介於 0.05 至 0.1 bar 之間。
- › 所有樣本均已成功測試。在任何考量的壓力下，測試的樣本均不會出現明顯的壓降。
- › 結論是，LOCTITE 55 非固化管路密封繩可提供解決方案，適用於在 NPT 與 BSPT 零件上，以最高 10 bar (150 psi) 的低壓力密封氬氣。
- › 厭氧固化管路密封膠在 NPT 與 BSPT 零件上，成功密封氬氣至 31 bar (450 psi) 的壓力。由於這些產品會固化以形成熱固性聚合物，因此預期它們可以在更高的壓力下密封，儘管無法使用可用的測試設備進行測試。
- › 依據 AR 214，在這裡測試的所有產品，以及 LOCTITE 570 和 LOCTITE 638，也經過 Kiwa 的氬氣密封應用測試和認證。Kiwa NV 是測試、檢查和認證市場中的歐洲機構。
- › 本報告中評估的密封劑提供方便、可靠且符合成本效益的密封螺紋零件方法，可用於氬氣。厭氧管路密封膠也可防止自行鬆脫，為密封螺紋連接提供額外的安全性，這在氬氣的易燃性風險下至關重要。
- › 厭氧管路密封膠解決方案也可用於高壓氬應用。我們知道，客戶使用厭氧密封劑的氬管路密封應用，最高可達 1,000 bar。在撰寫本文時，Henkel 正在類似條件下執行實驗室測試，以驗證這些產品在高壓氬環境中的整體適用性。如果您對這些測試的結果有興趣，或是想為您的應用進一步瞭解這些產品，歡迎聯絡本白皮書的作者或您當地的 漢高樂泰業務代表。



參考資料

- [1] RSE 報告《Hydrogen. An Energy Carrier for Decarbonization》(氫：脫碳的能源載體), 2021 年 1 月
- [2] 國際能源署 (IEA)《The Future of Hydrogen》(氫能的未來), 2019 年 6 月
- [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》(美國石油與天然氣供應鏈甲烷排放估計), 《American Journal of Science》(美國科學雜誌), 2018 年 6 月
- [4] Nicola Warwick, Paul Griffiths, James Keeble, Alexander Archibald, John Pyle, 劍橋大學與 NCAS, 以及 Keith Shine, 雷丁大學, 《Atmospheric Implications of increased hydrogen use》(增加使用氫氣對大氣的影響), 英國政府, 2022 年 4 月
- [5] 歐洲工業氣體協會 (EIGA), 《Hydrogen Pipeline Systems》(氫氣管線系統), IGC Doc 121/14, 2014 年
- [6] 美國機械工程師學會, 《Hydrogen Piping and Pipelines》(氫氣管線和管線), B31.12-2023
- [7] Ged McGurk, Mike Feeney, Siva Ayadurai, Oliver Droste, 白皮書《High pressure leak prevention – improved performance and reliability from anaerobic thread sealing compounds》(預防高壓洩漏：從厭氧管路密封化合物提升效能與可靠性), 2016 年 3 月



聯絡人

台灣漢高股份有限公司

23586 新北市中和區中正路866號10樓
D-40589 Düsseldorf
電話: (+886) 2 8978 9725
傳真: (+886) 2 2226 8699

[www.henkel-adhesives.com/tw/zh_tw/
about/our-brands/loctite-new.html](http://www.henkel-adhesives.com/tw/zh_tw/about/our-brands/loctite-new.html)
www.henkel.tw

