

強風作用下工業煙囪應力破壞現象改善對策

葉俊郎

國立虎尾科技大學飛機工程系 副教授

摘 要

本文旨在探討工業煙囪受強風吹襲時所引起之擺動現象，該現象可能引發煙囪支撐結構的破壞，嚴重時甚至可能造成煙囪本體的結構損壞，為避免上述情況發生，根本解決之道應抑制煙囪本體受強風吹襲時所引發的擺動現象，本文回顧了抑制風力所引起的細長結構體擺動現象之裝置，並對於這些裝置的效果進行比較，最後，並提出改善策略與執行步驟，期能有效解決工業煙囪受強風吹襲時所引起之結構異常問題。

關鍵詞：工業煙囪、擺動現象、縱向縫條、孔隙外罩、螺旋狀或長條狀外箍。

聯繫作者:國立虎尾科技大學飛機工程系，雲林縣虎尾鎮文化路 64 號。

Tel: +886-5-6315527

Fax: +886-5-6312415

E-mail: clyeh@nfu.edu.tw

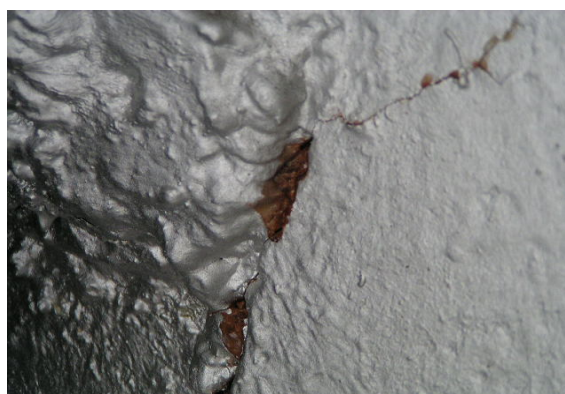
壹、研究背景與目的

石化工業是台灣經濟命脈中重要的一環，目前台灣的石化業廠家中以國營的台灣中油和民營的台塑石化為代表，兩家公司均排名國內前十大企業，對國內經濟發展影響甚鉅。石化廠外觀上最大的特徵是廠區內高聳林立的煙囪，這些煙囪在風力的作用下情況類似於流體流過細長體；在流體力學上，流體流過對稱性鈍體 (Blunt Body，如圓柱或球體) 在它的後方會形成渦漩 (Vortex)，渦漩交互影響會引起物體產生擺動現象 [1]。舉台塑石化為例，該公司六輕廠區位於雲林縣麥寮鄉，麥寮鄉位於俗稱「風頭水尾」之地，不但對外交通不便，且一年中有半年時間都吹著強烈東北季風，天候狀況十分惡劣，台塑石化公司煉二廠在 2001 年開車初期四座加熱爐中即發現代號 H-3610 的加熱爐 (圖一) 近煙囪處對流段爐體接合螺栓斷裂，該公司除了增加接合處支撐片做為緊急改善處理外，並於歲修期間加強爐體鋼構之補強措施，雖有效降低爐體段接合處之彎矩，然而，在 2002 年底至 2005 年底期間陸續發現鋼構補強處焊接出現裂痕 (圖二)，雖經再度焊補及貼圓弧型加強板改善，部分焊道仍然出現裂痕，因此，廠方邀請中鼎工程公司於 2005 年底至現場檢視 [2]，中鼎公司將煙囪及補強支撐結構進行模擬分析，研判問題癥結在於補強材料之材質及焊接之品質，乃針對此二部分進行改善，該措施雖暫時改善焊道出現裂痕之問題，然而，煙囪本體受強風吹襲而產生之擺動現象仍未改善，長久以往，難免焊道再度出現裂痕而影響操作安全，為長久之計，廠方希望能找出問題真正的原因予以改善，基於地緣之便，乃邀請與廠區最鄰近的虎尾科技大學兩位教授於 2007 年初至現場檢視，希望藉由學術界深厚的學理基礎協助找出問題的根源並提出改善對策。

本文的目的即是在探討工業煙囪受強風吹襲時所引起之擺動現象，該現象可能引發煙囪支撐結構的破壞，嚴重時甚至可能造成煙囪本體的結構損壞，為避免上述情況發生，根本的解決之道應抑制煙囪本體受強風吹襲時所引發的擺動現象，本文回顧了抑制風力所引起的細長結構體擺動現象之裝置 [3-9]，並對於這些裝置的效果進行比較，最後，並提出改善策略與執行步驟，期能有效解決工業煙囪受強風吹襲時所引起之結構異常問題。



圖一 典型的石化工業加熱爐與煙囪



圖二 煙囪支撐鋼構焊接處裂痕

貳、結構異常可能原因探討

虎尾科技大學教授於 2007 年元月五日赴台塑石化公司六輕廠區現場勘查煙囪及其支撐結構現況，並參考廠方所提供資料，發現以往的改善措施均集中於裂縫處之補強，雖屬事後必要工作，但並未解決造成問題的真正原因，猶如一位工作人員手受傷時僅將其包紮止血，而未將其工作環境改善，包紮止血雖屬必要措施，但未將工作環境改善，未來仍有受傷的可能，惟有徹底將工作環境改善，才能避免人員再度受傷，因此，必須找出造成結構裂縫的原因加以改善，才可避免再度發生類似情況，由現場勘查結果研判，煙囪本體受強風吹襲所引起的擺動現象相當明顯，結構擺動所引起之彎矩對於煙囪本體及支撐結構所造成的應力影響在長期作用下，極可能引發下列三種情況：

- 一、瞬時應力超過結構之最大應力容許值。
- 二、瞬時應力雖未超過結構之最大應力容許值，但和結構之自然頻率產生共振現象。
- 三、應力雖未超過結構之最大應力容許值，也未與其產生共振現象，但在長期的作用下，引起結構產生疲勞現象。

上述三種情況均可能引發支撐結構的破壞，嚴重時甚至可能造成煙囪本體的結構損壞，為避免上述情況發生，根本解決之道應抑制煙囪本體受強風吹襲所引發的擺動現象，此現象的起因在於流體流過鈍體 (Blunt Body) 後於其後方形成一低壓之尾流區 (Wake)，如果鈍體為對稱性細長體的話，則細長體的一側將完全處於高壓區，而另一側將完全處於低壓區，此壓力差所造成的壓力阻力將集中在同一方向而造成極大的彎矩，此彎矩如作用於具彈性之細長體上即會引起擺動現象 [1] 而造成彎曲應力，欲改善此現象，可改變細長體之對稱性外形，使其產生之尾流區不再集中於細長體之同一側，如此，壓力差所造成的壓力阻力就不會集中在同一方向而造成過大的彎矩，常用的方法敘述如下。

參、改善對策

根據文獻記載 [3-9]，較常見且有效的抑制風力所引起的細長結構體 (例如鋼製煙囪) 擺動現象之裝置 (Vortex-Induced Oscillation Suppressing Device) 有下列三種 (圖三)：

一、縱向縫條 (Longitudinal Slats)

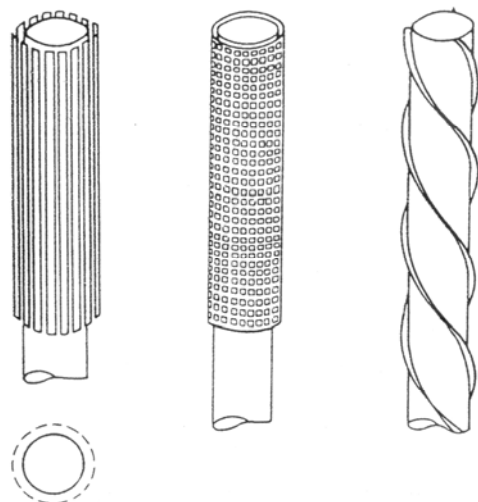
據文獻 [3] 記載，為三種方法中對於渦漩所引起之擺動現象抑制效果最佳之裝置，然而，其所引起之阻力係數介於其它兩種方法之間。

二、孔隙外罩 (Perforated Shroud)

據文獻 [3] 記載，為三種方法中阻力係數最小之裝置，然而，對於渦漩所引發之擺動現象抑制效果不如其它兩種方法。

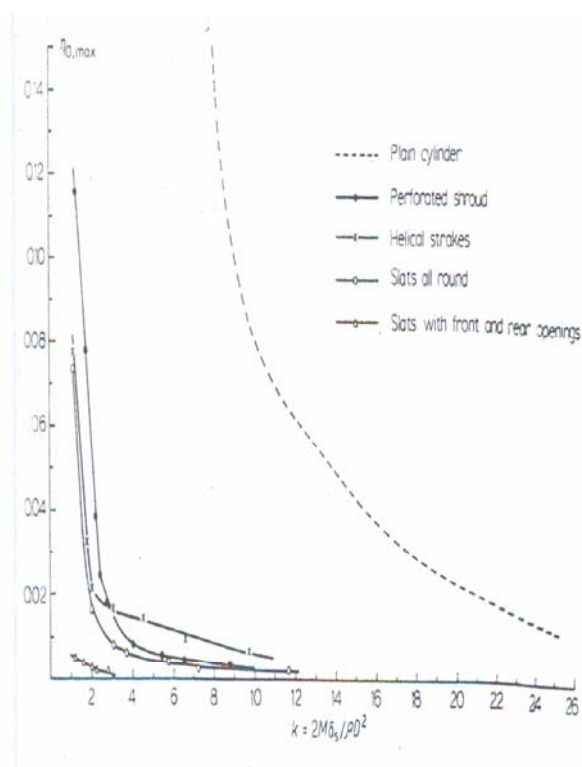
三、螺旋狀或長條狀外箍 (Helical or Straight Strakes)

據文獻 [3] 記載，其對於渦漩所引起之擺動現象抑制效果介於其它兩種方法之間，但所引起之阻力係數較大，然而，此法為三種方法中現場使用經驗最多的方法，美國石油學會規範 API Standard 560 [8] 中亦採用此法做為抑制風力所引起之擺動現象的方法，公開的研究文獻中對其探討亦較完整，此法對於渦漩所引發之擺動振幅降低程度至少在兩倍以上，對於結構壽命的延長效果非常顯著。



圖三 常見的抑制風力所引起擺動現象之裝置 [3]

以下將上列三種方法對於降低細長體擺動振幅之比較[3]顯示於圖四，圖中縱軸代表最大擺動振幅，橫軸代表無因次化阻泥係數 (Non-Dimensional Damping Coefficient)，Plain cylinder 代表煙囪裸管狀態，Perforated shroud 代表裝設孔隙外罩之煙囪，Helical strakes 代表裝設螺旋狀外箍之煙囪，Slats all round 和 Slats with front and rear openings 代表裝設縱向縫條之煙囪。由圖可看出三種方法對於降低細長體擺動振幅均具有相當功效，如前所述，縱向縫條為三種方法中對於渦漩所引起之擺動現象抑制效果最佳之裝置，而孔隙外罩對於渦漩所引發之擺動現象抑制效果不如其它兩種方法。螺旋狀外箍之效果雖不如縱向縫條，但為三種方法中現場使用經驗最多之方法，故本文建議採用此法來改善強風吹襲所引起之擺動現象。



圖四 三種抑制擺動裝置之擺動振幅比較[3]

肆、執行步驟

以下為改善強風吹襲所引發之煙囪擺動現象的建議執行步驟，此處以螺旋狀或長條狀外箍為

例，執行過程中所需之設備包含應力計(資料擷取系統)以量測應力、加速規以量測擺動頻率(週/秒)與振幅，在施工過程中(包含焊接螺旋狀外箍、裝設應力或擺動量測線路)應盡量選擇風力較小的天候下實施，以確保施工品質及人員安全。

一、量測煙囪裸管狀態時(亦即尚未裝設抑制擺動裝置前的煙囪)下列資料：

- (一) 煙囪與支撐結構接合處之應力
- (二) 支撐結構出現裂痕處之應力
- (三) 煙囪受風力影響所引起之擺動頻率(週/秒)與振幅(cm)
- (四) 煙囪上部三分之一之平均直徑(米)。
- (五) 煙囪在設計溫度時之彈性係數(MPa)
- (六) 煙囪截面慣性矩(cm^4)
- (七) 煙囪單位高度重量(公斤/米)
- (八) 煙囪總高度(米)
- (九) 煙囪內徑(米)
- (十) 煙囪截面厚度(米)
- (十一) 煙囪在設計溫度時之容許拉伸應力(MPa)。

二、依據參考文獻三或 API Standard 560[8]所建議之尺寸及方法於煙囪裝配螺旋狀或長條狀外箍(Helical or Straight Strakes)，依文獻記載及現場使用經驗，建議以螺旋狀外箍為優先考量。

三、量測煙囪裝設抑制擺動裝置後之下列資料：

- (一) 煙囪與支撐結構接合處之應力
- (二) 支撐結構出現裂痕處之應力
- (三) 煙囪受風力影響所引起之擺動頻率(週/秒)與振幅(cm)。

四、比較煙囪裝設抑制擺動裝置前後之下列資料：

- (一) 煙囪與支撐結構接合處之應力
- (二) 支撐結構出現裂痕處之應力
- (三) 煙囪受風力影響所引起之擺動頻率(週/秒)與振幅(cm)。

檢視上述資料是否降低至合理範圍，據文獻記載與現場使用經驗，此法對於風力所引起之擺動振幅降低程度至少在兩倍以上，因此，如確

實依照參考文獻三或 API Standard 560[8]所建議之尺寸及方法裝設，應足以有效解決支撐結構異常問題。

伍、結語

本文探討工業煙囪受強風吹襲時所引發之擺動現象，並回顧抑制風力所引起的細長結構體擺動現象之裝置，及對於這些裝置的效果進行比較，其中，縱向縫條對於渦漩所引起之擺動現象抑制效果最佳，孔隙外罩對於渦漩所引起之擺動現象抑制效果較不如其它方法，而螺旋狀外箍之效果雖不如縱向縫條，但為現場使用經驗最多的方法，故本文建議採用螺旋狀外箍來改善強風吹襲所引起之擺動現象，最後，本文並提出建議執行步驟，以供業界參考，期能有效解決工業煙囪受強風吹襲時所引起之結構異常問題。

誌謝

本文撰寫過程中承蒙台塑石化公司提供許多寶貴資料與意見，謹此致謝。

參考文獻

1. R. W. Fox, A. T. McDonald, P. J. Pritchard, *Introduction to Fluid Mechanics*, Chap.9, Wiley, 6th ed., 2004.
2. 鄭振昌，RDS 加熱爐鋼構補強焊接異常改善建議報告，中鼎工程公司，2006年2月9日。
3. H. Y. Wong and A. Kokkalis, “A Comparative Study of Three Aerodynamic Devices for Suppressing Vortex-Induced Oscillation”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.10, pp.21-29, 1982.
4. Ishizaki Hatsuo, Hara Hiroshi, Shimada Tadayuki, “The Efficiency of Helical Strakes for the Suppression of Vortex-Excited Oscillation of Steel Stacks”, *Engineering Structures*, Vol.6, No.4, pp.334-339, Oct, 1984.
5. Larsen Carl M., Baarholm Gro Sagli, Lie Halvor, “Influence from Helical Strakes on Vortex Induced Vibrations and Static Deflection of Drilling Risers”, *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, Vo.1A, *Proceedings of the 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2005 - OMAE2005, pp.477-483, 2005.
6. Thiagarajan K. P., Constantinides Y., Finn L., “CFD Analysis of Vortex-Induced Motions of Bare and Straked Cylinders in Currents”, *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, Vol.3, *Proceedings of the 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2005 - OMAE2005, pp.903-908, 2005.
7. Gro Sagli Baarholm, Carl Martin Larsen, Halvor Lie, “Reduction of VIV Using Suppression Devices – An Empirical approach”, *Marine Structures*, Vol.18, pp.489-510, 2005.
8. *Fired Heaters for General Refinery Service*, API Standard 560, 3rd ed., May, 2001.
9. Romashchenko V. A., Tarasovskaya S. A., “Numerical Investigation of the Dynamics of Thick-Walled Cylindrical Shells with a Helical Reinforcement”, *Mechanics of Composite Materials*, Vol.41, No.2, pp.153-160, March, 2005.

Strategy for Improving Stress Fatigue of an Industrial Stack under the Action of a Strong Wind

Chun-Lang Yeh

Associate Professor, Department of Aeronautical Engineering, National Formosa University

Abstract

This paper discusses the oscillation phenomenon of an industrial stack under the action of a strong wind. The oscillation can result in structure fatigue of the stack and its support. One way to alleviate this situation is to suppress the oscillation of the stack under the action of the strong wind. In this paper, the author reviews and compares the vortex-induced oscillation suppressing devices. Strategy and steps to resolve this problem are proposed with the aim to improve the structure fatigue problem of the stack and its support under the action of a strong wind.

Key words : Industrial Stack, Oscillation Phenomenon, Longitudinal Slats, Perforated Shroud, Helical or Straight Strakes.

Corresponding author: Department of Aeronautical Engineering, National Formosa University, Hu-Wei, Yun-Lin 632, Taiwan, R.O.C.
Tel: +886-5-6315527
Fax: +886-5-6312415
E-mail: clyeh@nfu.edu.tw