



# 兩種哲學，一個挑戰： LNG時代的引擎磨損策略

二衝程與四衝程雙燃料引擎的摩擦學對決



# 典範轉移：從「髒的保護」到「淨的挑戰」

傳統重質燃油(HFO)的燃燒產物(碳煙與硫酸鹽)意外地形成了一層固體潤滑保護膜。



HFO時代：固體潤滑膜



LNG時代：純粹金屬接觸

LNG的「乾式」與「清潔」燃燒特性消除了此保護機制，使引擎部件完全暴露於磨損風險之下。

# 兩種戰場：溜冰場 vs. 鐵砧

## 二衝程引擎

溜冰場



## 四衝程引擎

鐵砧

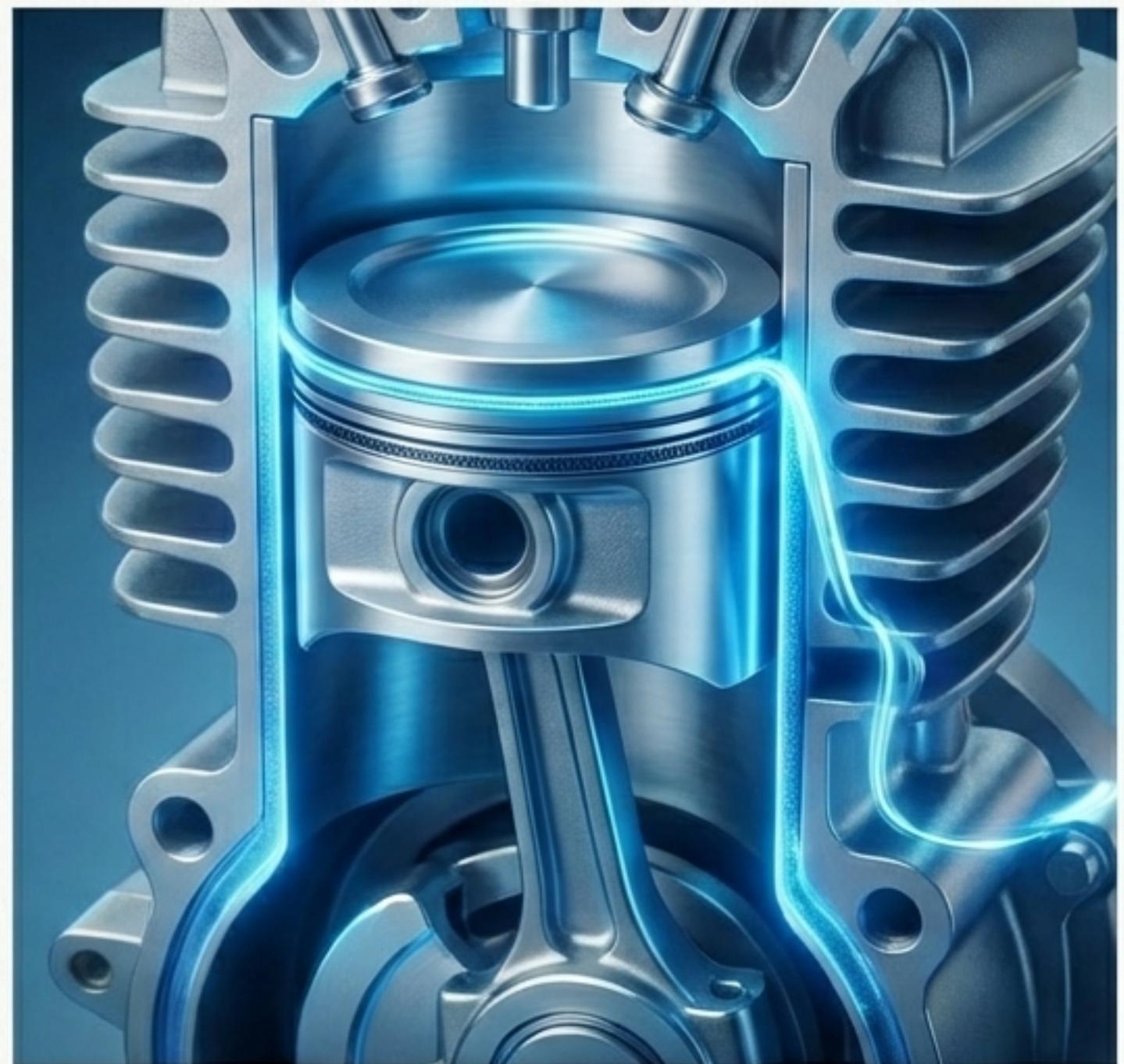


挑戰在於保護鐵砧（閥座）不被鐵錘（氣閥）反覆  
敲擊而凹陷。

# 溜冰場的世界：二衝程引擎的氣缸保衛戰

核心戰場是活塞環與氣缸套的廣大滑動介面。

- 採用全損耗潤滑系統（Total Loss Lubrication System）。
- 主要威脅源於油膜破裂時的直接金屬接觸。

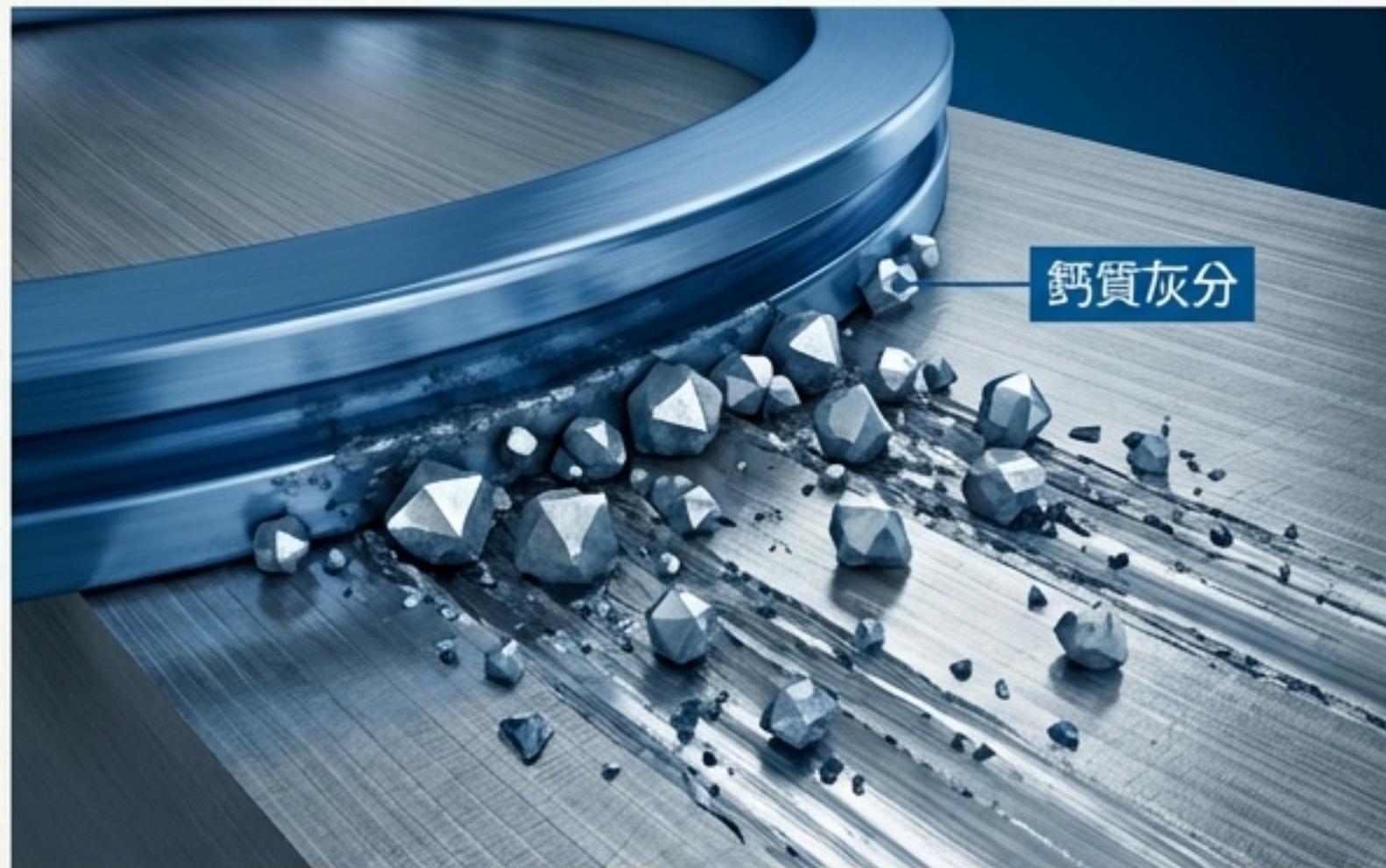


# 兩種潛伏的敵人

## 磨料磨損 (Abrasive Wear)

**MAN ME-GI**

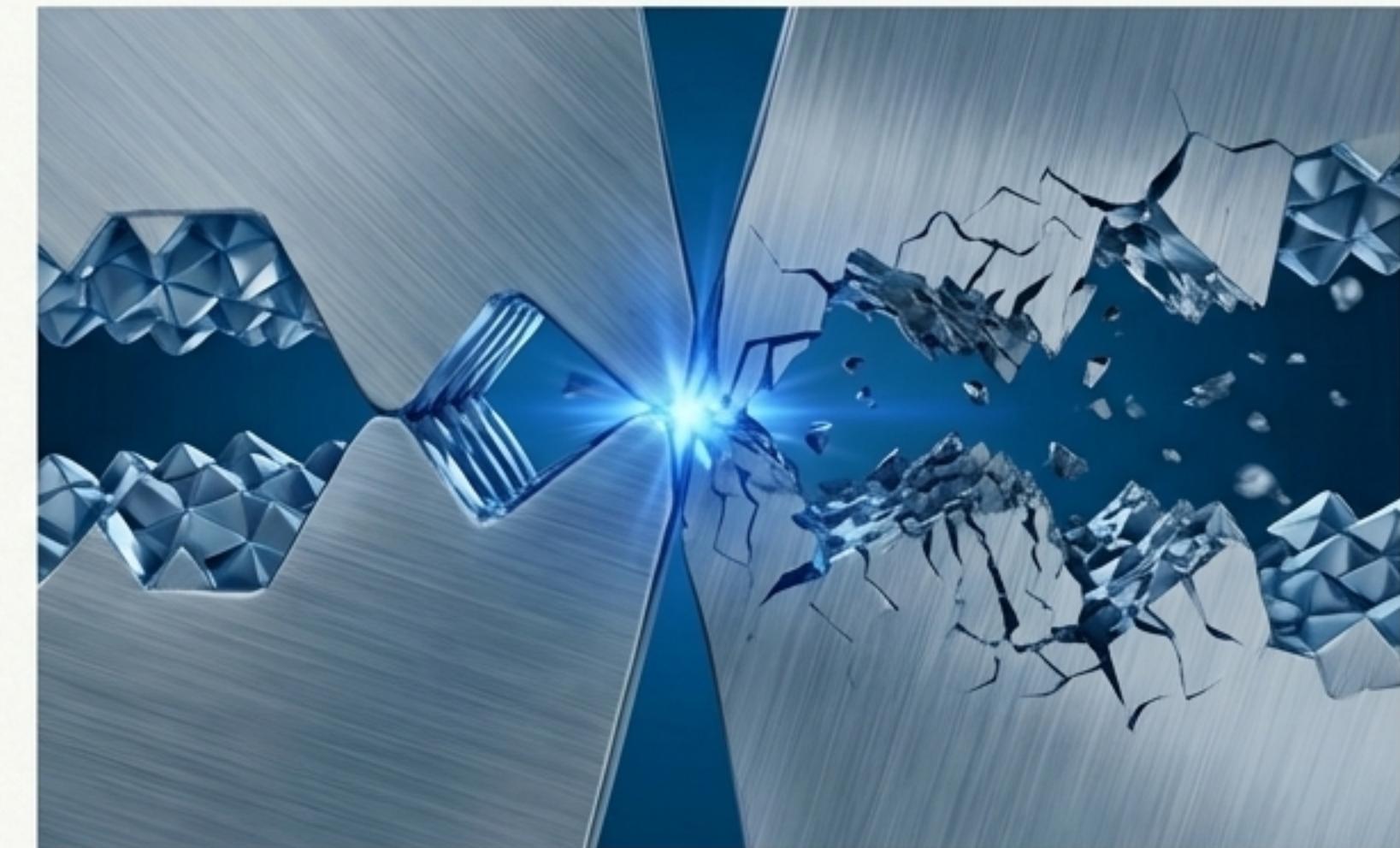
錯誤使用高鹼值(BN)氣缸油，導致未中和的鈣質添加劑形成堅硬的灰分沉積物，如同研磨膏般刮傷氣缸壁。



## 微觀卡死 (Micro-seizure)

**WinGD X-DF**

過度清潔的燃燒環境，缺乏摩擦化學膜(Tribofilm)保護。油膜破裂時，微凸體發生瞬時焊合與撕裂。



# 溜冰場的盔甲：化學與材料的雙重防線



## 化學對策

### Category II BN40 專用潤滑油

極低灰分，根除磨料來源；優異的清潔性，防止積碳。策略核心從「中和酸」轉為「清潔與抗磨」。



## 硬體對策

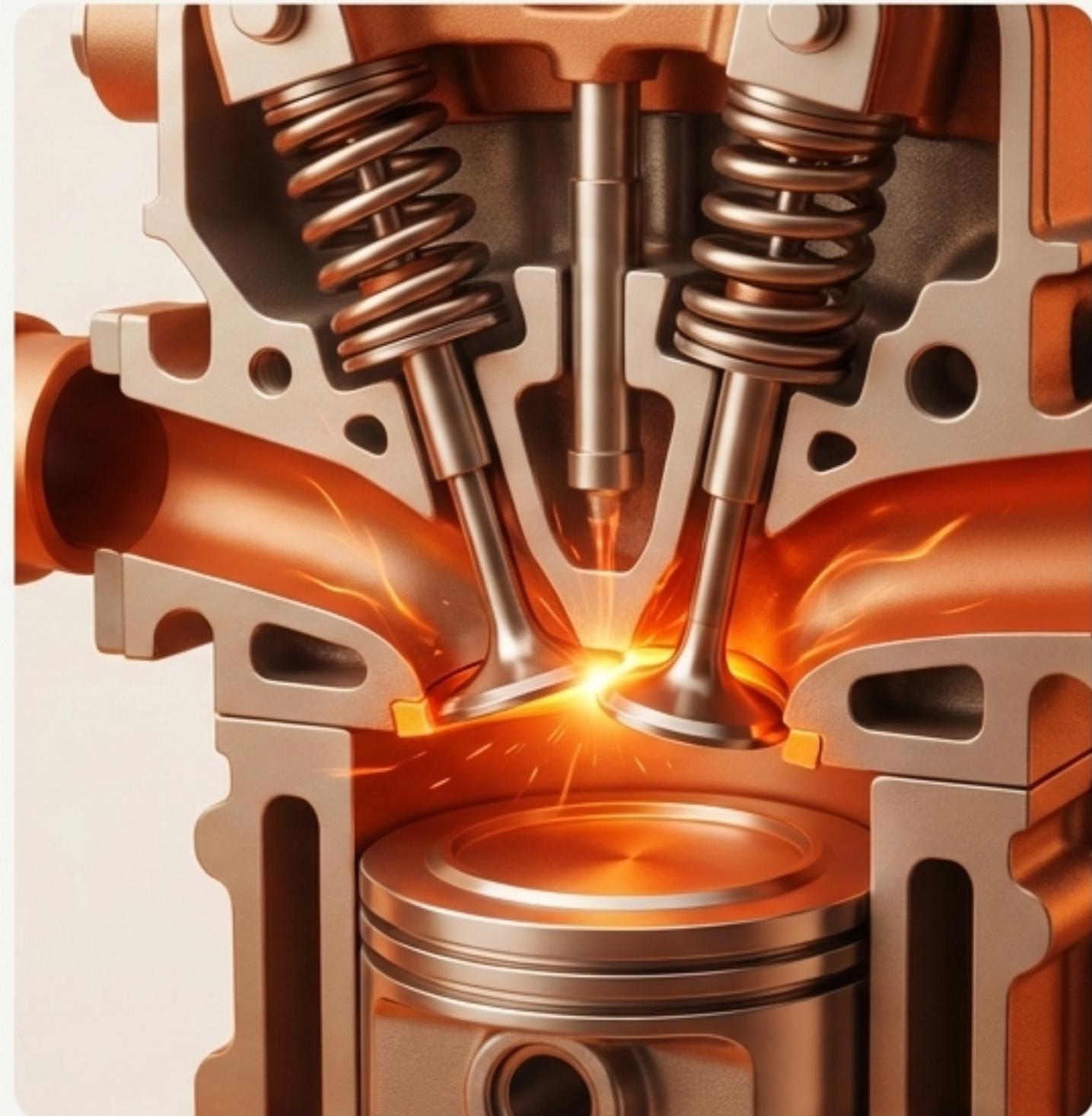
### Cermet (陶瓷金屬) 鍍層活塞環

在油膜失效時的最後一道防線。結合陶瓷的硬度與金屬的韌性，防止災難性刮傷。

# 鐵砧的世界：四衝程引擎的閥座存亡戰

核心戰場是排氣閥與閥座之間高溫、高頻的撞擊點。

- 採用循環油底殼潤滑系統 (Circulating Sump System)。
- 主要威脅源於缺乏HFO燃燒產物的緩衝保護膜。



# 唯一的敵人，致命的後果：閥座凹陷 (VSR)

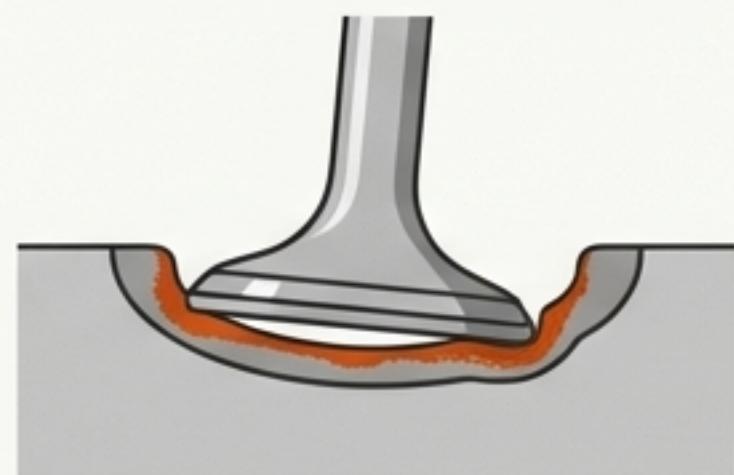
## 1. 乾式撞擊 (Dry Impact):

在 $>600^{\circ}\text{C}$ 高溫下，氣閥反覆撞擊閥座，無緩衝膜保護。



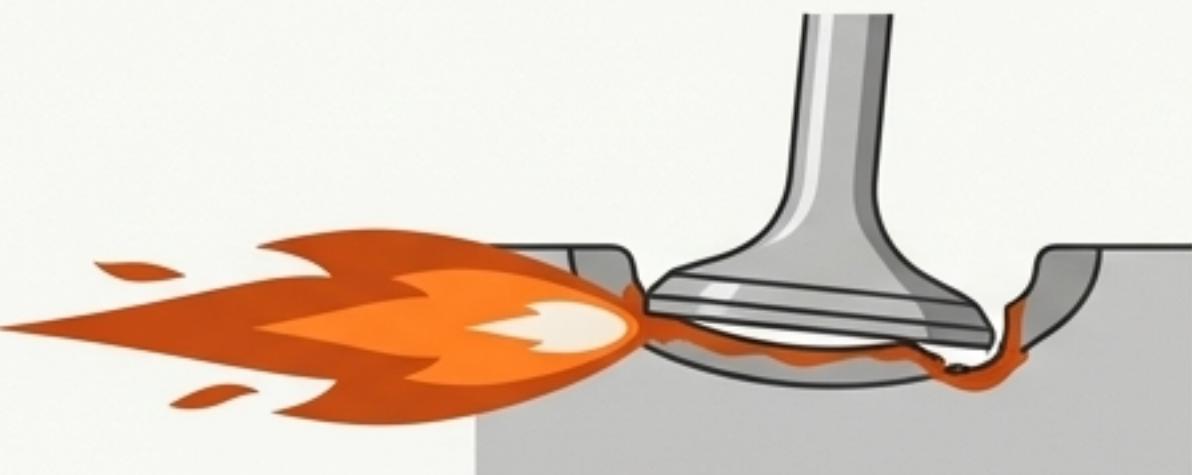
## 2. 塑性變形 (Plastic Deformation):

閥座金屬逐漸磨損，氣閥「陷入」氣缸蓋。



## 3. 災難性吹蝕 (Catastrophic Torching):

氣閥間隙消失，無法完全關閉。高溫燃氣如割炬般燒蝕閥面，導致氣缸失壓。



鐵砧的硬化：依靠超合金的冶金升級

## 鐵砧的硬化

當化學保護消失，  
硬體必須硬抗。

- 現代雙燃料引擎的排氣閥座已不再使用傳統合金鋼。
- 全面採用 Stellite (鈷鉻鎢合金) 或 Tribaloy 等超合金。
- **特性：**具備極高的熱硬度與抗氧化性，能在無潤滑條件下抵抗高溫撞擊磨損。



# 灰分的平衡藝術

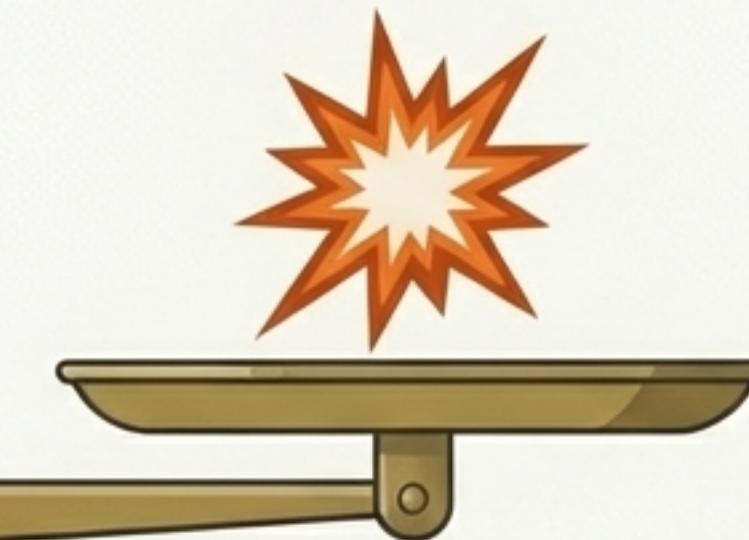
四衝程引擎對潤滑油灰分的需求是矛盾的一既需要它，又懼怕它。

保護閥座



適量的灰分 (0.5-1.0%)  
燃燒後形成緩衝保護膜，  
顯著減緩VSR。

預防爆震



過多的灰分會形成「熱點」，在  
奧托循環中引發災難性的爆震。

解決方案：使用灰分含量被嚴格控制在 0.5% 至 1.0% 之間的專用中/低灰分潤滑油。

# 共同的弱點，不同的對策：導引燃油系統

微量噴射導致噴嘴在高溫下容易產生結焦與阻塞。

## 二衝程 (WinGD)



### 「物理沖刷」

建議每週切換至柴油模式運行5-10分鐘，利用大流量燃油沖刷清除軟質沉積物。

## 四衝程 (Wärtsilä)



### 「工程與預防」

改良氣缸蓋冷卻設計以降低熱負荷，並嚴格執行 4,000-8,000 小時的預防性更換。

# 慢速航行的陷阱：低負荷運行的風險分歧

## 二衝程

### 低溫腐蝕 (Cold Corrosion)



低負荷導致缸內溫度低於酸露點，凝結的酸性物質腐蝕氣缸套。

提高冷卻水溫度或使用渦輪增壓器切斷 (Turbocharger Cut-Out) 來提升燃燒溫度。

## 四衝程

### 油液稀釋 (Oil Dilution)



低負荷導致燃燒不完全（甲烷逃逸），未燃氣體沖刷缸壁並稀釋曲軸箱機油。

避免長期在 $<20\%$ 負荷下運行，定期執行「拉高負荷」程序。

# 兩種哲學，一套總結

|         | 二衝程雙燃料引擎   | 四衝程雙燃料引擎  |
|---------|--|---|
| 主要戰場    |  氣缸套與活塞環<br>(滑動摩擦)     |  排氣閥與閥座<br>(撞擊摩擦)            |
| 潤滑油灰分策略 |  極小化/消除<br>(避免磨料沉積)  |  精確控制/平衡<br>(保護閥座 vs. 預防爆震) |
| 核心硬體對策  |  Cermet 鍍層活塞環        |  Stellite 超合金閥座            |
| 潤滑系統    |  全損耗<br>(Total Loss) |  循環式<br>(Circulating Sump) |

# 新戰場，新思維

HFO：中和酸

LNG：維持油膜



LNG時代的輪機工程，已從傳統「對抗腐蝕與油泥」的戰場，  
轉移至「管理乾式磨損與微觀接觸」的新戰場。

決勝關鍵，在於為正確的戰場，選擇正確的哲學。