

香港大學



最終報告

在實驗室環境下輪船用發動機測試

提交予：香港特區政府環境保護署

編寫：香港大學機械工程系
梁耀彰教授 及 鄭永權工程師

日期：2013 年 3 月 20 日

註：此報告是英文版報告之中文譯本，如有字義上之差別，當以英文版之報告為準。

目錄

	頁數
行政摘要	iv
1. 前言	
1.1 背景	1
1.2 目標	1
1.3 報告大綱	2
2. 測試範圍	3
3. 測試方法	
3.1 測試台裝置	4
3.2 燃油供應系統	5
3.3 性能測試	5
3.4 200小時耐用性測試	6
3.5 柴油分析及潤滑能力評估	7
3.6 機油選擇及質量下降評估	8
3.7 數據收集及監察	11
4. 測試台部件和檢測儀器的說明	12
5. 吉拿發動機測試結果及討論	
5.1 柴油分析	20
5.2 性能測試	23
5.3 耐用性測試	25
5.4 發動機潤滑油分析	28
5.5 掃描電子顯微鏡檢查	31
5.6 低功率電子顯微鏡檢查	35
6. 康明斯發動機測試結果及討論	
6.1 柴油分析	38
6.2 性能測試	40
6.3 耐用性測試	42
6.4 發動機潤滑油分析	45

6.5	掃描電子顯微鏡檢查	47
6.6	低功率電子顯微鏡檢查	51
7.	誤差分析	
7.1	誤差類型	54
7.2	不確定性評估	54
8.	結語	57
	參考資料	58

[以下附錄載於英文版的最終報告]

附錄 I	資料參考及工作小組成員
附錄 II	實驗儀器列表
附錄 III	測試台佈置
附錄 IV	儀器設置示意圖
附錄 V	工作計劃及項目進度
附錄 VI	項目團隊
附錄 VII	分析報告 <ul style="list-style-type: none"> ● 柴油分析 (香港通用公證行) ● 燃料泵及燃油噴射器的性能報告 (先進公司) ● 機油分析 (Signum/ 達石油) ● 燃油消耗率數據 (性能測試)
附錄 VIII	工作記錄樣本

行政摘要

背景

過去數十年，船舶空氣污染物排放持續增加，現已成為香港二氧化硫、可吸入懸浮粒子和氮氧化物排放源之首。香港特區政府已研究如何減少船舶排放，其中一個方法是改善本地供應的船用柴油質素，以減少本地和內河船舶的廢氣排放。香港特區政府環境保護署(環保署)建議把船用輕質柴油的含硫量上限由 0.5%降低至 0.05%，這可使個別船隻的二氧化硫和可吸入懸浮粒子排放量分別減少約 90%及 30%。環保署於二零一二年五月成立了一個工作小組，成員包括來自多個政府部門的官員、本地船舶營運商代表和學術界專家。工作小組成員在第一次和第二次會議上同意對兩款使用高硫柴油(按重量計最高含硫量為 0.5%)和低硫柴油(按重量計最高含硫量為 0.05%)的常用輪船用發動機進行測試，以確定低硫柴油與現有船隻發動機是否兼容及其性能。

環保署在二零一二年七月委託香港大學機械工程系進行一項名為「在實驗室環境下輪船發動機測試」的研究，以回應工作小組成員的要求。該項研究採用度身訂造的實驗室儀器，以評估兩款輪船用柴油發動機在不同模擬運作環境下的性能表現。工作小組已於二零一二年六月五日舉行的第二次會議上確認性能測試及耐用性測試的方法。吉拿 6LXB 發動機測試所得的初步結果已在二零一三年一月提交之中期報告敘述。本最後報告詳述吉拿 6LXB 及康明斯 NTA855(M)發動機所得的測試結果。

測試目標和範圍

- (1) 在實驗室控制環境下，向兩款輪船用發動機在使用低硫柴油下進行測試，以評估其：
 - (a) 性能，包括發動機最大功率輸出和在各種負載情況下的耗油量；以及
 - (b) 耐用性，包括燃油潤滑性能和與發動機是否兼容，即根據量度的燃油潤滑性、噴咀和噴油泵在顯微鏡下的觀察及機油分析；
- (2) 對高硫柴油進行相同測試，作為與低硫柴油比較的基準。

結果

A. 吉拿發動機

(1) 柴油燃料分析

這次測試所使用的高硫柴油和歐盟 V 期柴油（按重量計最高含硫量為百萬份之十）都是由政府指定的燃料供應商所提供。低硫柴油則是用十份（體積）歐盟五期柴油和一份（體積）高硫柴油混合而成。除燃料供應商定期提供高硫柴油及歐盟 V 期柴油的品質證明書外，高硫柴油及低硫柴油的物理特性亦會送交獨立化驗所再次進行分析，以確保測試之柴油質素符合規格。透過分別兩次分析測試的結果顯示，低硫柴油比高硫柴油的淨熱值分別只少 1.6%和 2.2%。

(2) 性能測試

(a) 發動機最大功率

測定發動機使用高硫柴油和低硫柴油對最大功率輸出，本次測試包括以下四種情

況：高硫柴油耐用性測試前（基準 1）、高硫柴油耐用性測試後、低硫柴油耐用性測試前（基準 2）及低硫柴油耐用性測試後，結果顯示：

最大功率輸出	基準 1	200 小時後 (高硫柴油- 耐用性測試)	基準 2	200 小時後 (低硫柴油- 耐用性測試)	整體 平均值
高硫柴油 (千瓦)	106.2	116.3	115.3	117.7	113.9
低硫柴油 (千瓦)	104.9	115.0	109.5	117.8	111.8
相差百分比	-1.3%	-1.1%	-5.0%	+0.1%	-1.8%

上述測試結果顯示低硫柴油對比高硫柴油的最大功率輸出數值變化範圍在+0.1%到-5.0%之間，平均比高硫柴油低 1.8%。這下降幅度與兩種柴油淨熱值的差額接近(低硫柴油的淨熱值比高硫柴油平均低(1.9%)。

(b) 燃油消耗率

此測試利用六種不同的發動機負載情況以計量每種情況的燃油消耗率，分別為 100%（即 89 千瓦），85%，75%，50%，25%的額定負載模式和從 83%至 87%的功率週期變化。同時，燃油消耗率測試會在三個不同階段進行：包括基準、已完成 200 小時耐用性測試後但沒有更換機油、以及在已完成 200 小時耐用性測試後並已更換機油。下面的表格紀錄高硫柴油和低硫柴油在不同測試階段和負載條件的相對比較值。

高硫柴油耐用性測試 低硫柴油對比高硫柴油	基準 1	200 小時後	200 小時及更 換機油後	平均值
發動機負載情況				
100%	-1.3%	+0.7%	+1.4%	-0.1%
85%	+0.1%	+0.6%	+0.9%	+0.4%
75%	+1.2%	+0.6%	+1.1%	+1.0%
50%	-0.3%	+1.9%	+1.2%	+0.6%
25%	-1.0%	+2.0%	+1.2%	+0.3%
功率週期變化(83% ~ 87%負載)	+0.9%	+1.0%	+1.3%	+1.0%
			整體平均值：	+0.5%

低硫柴油耐用性測試 低硫柴油對比高硫柴油	基準 2	200 小時後	200 小時及更 換機油後	平均值
發動機負載情況				
100%	+1.1%	+2.6%	+2.9%	+1.9%
85%	+1.2%	+2.7%	+2.6%	+1.9%
75%	+1.1%	+2.6%	+2.5%	+1.8%
50%	+1.1%	+1.9%	+2.0%	+1.5%
25%	+0.6%	+1.3%	+1.6%	+1.0%
功率週期變化(83% ~ 87%負載)	+0.8%	+2.7%	+3.0%	+1.8%
			整體平均值：	+1.7%

在高硫柴油耐用性測試前(基準 1)和 200 小時之後，低硫柴油於不同負載情況下的平均燃油消耗由-0.1%至+1.0%不等，整體平均值為+0.5%。同樣，在低硫柴油耐用性測試前(基準 2)和 200 小時之後，低硫柴油於不同負載情況下的平均燃油消耗率與高硫柴油相差由+1.0%至+1.9%不等，整體平均值為+1.7%。可見低硫柴油的平均燃油消耗率曾有輕微增加，符合上文提及低硫柴油與高硫柴油在不同時段之淨熱值差額變化(由 1.6%至 2.2%)。

(3) 耐用性試驗

(a) 基本操作數據

耐用性測試先在保持運行 200 小時及恆常功率輸出 68 千瓦時之耐用性測試期間，高硫柴油和低硫柴油分別需要添加 33.5 和 23.0 公升發動機機油以補充消耗。這顯示耐用性測試耗用大量機油，尤其在最初測試高硫柴油時。高硫柴油和低硫柴油的耐用性測試可以相差 10.5 公升。兩者的機油耗用量有如此大之差距，原因可能是：

- (i) 在高硫柴油耐用性測試初期發生機油滲漏情況及補充機油時的管理方法不完善；
- (ii) 發動機在大修後需時以令機件運行暢順，這效果對高硫柴油的影響較大；
- (iii) 使用低硫柴油的自然結果。一些研究人員發現，在燃燒過程中低硫柴油會產生較少的二氧化硫，繼而減少可能轉化為硫酸的機會。這可避免發生氣缸表面點蝕和影響氣缸表面的光潔度的機會，從而減少發動機機油的消耗量。

(b) 燃油噴射器試驗

在使用兩種燃油作耐用性測試前和後都會分別測試全部燃油噴射器的噴油壓力，透過檢查有關壓力值及燃油霧化狀態，以測定燃油噴射器在耐用性測試期間是否運作正常。根據測試結果顯示，無論是高硫柴油或低硫柴油耐用性測試，各噴射器的噴射壓力均符合吉拿操作及維修手冊中的廠方規定。同時，全部 6 個噴射器的噴灑霧化模式均屬於理想範圍。這顯示燃油噴射器在完成耐用性測試後仍然運作正常。

(c) 噴油泵試驗

燃油噴射泵在高硫柴油和低硫柴油耐用性測試之前和之後都會安排進行測試。以測量噴射泵的最高設定和以每分鐘 600 圈轉動速度時運行 200 衝程的燃油輸送量。測試方法以標準噴油泵測試設備量度，並以肉眼觀察及人手記錄。測試結果的誤差為±0.2 立方厘米，並未超出測試設備的不確定性與人為錯誤的綜合誤差範圍。

以上高硫柴油和低硫柴油的耐用性測試結果，符合泵柱塞及噴咀在掃瞄及低功率電子顯微鏡下的觀察及燃油潤滑性遠低於 460 微米的測量結果。

(d) 機油分析

在耐用性測試開始(0 小時)及其後 100 和 200 小時，分別抽取了機油樣本，以進行化學成份分析。高硫柴油和低硫柴油在耐用性測試前及後之分析結果如下：

高硫柴油耐用性測試 測試參數	規格	0 小時	100 小時	200 小時	變化(200 小 時 - 0 小時)
黏性，cSt 在 100°C 下	14.1	14.0	14.2	14.7	+0.7
總鹼值(毫克 氫氧化鉀/克)	10.1	9.2	8.0	7.8	-1.4
磨損金屬元素 (ppm)：少於 4ppm 的銀、鉬、鎳和錫並無顯示出來					
鋁	0	3	5	5	+2
鉻	0	7	18	22	+15
銅	0	5	9	9	+4
鐵	0	18	19	19	+1
鉛	0	2	4	5	+3

低硫柴油耐用性測試 測試參數	規格	0 小時	100 小時	200 小時	變化(200 小 時 - 0 小時)
黏性，cSt 在 100°C 下	14.1	14.1	14.3	14.6	+0.5
總鹼值(毫克 氫氧化鉀/克)	10.1	8.8	8.3	8.7	-0.1
磨損金屬元素 (ppm)：少於 4ppm 的銀、鉬、鎳和錫並無顯示出來					
鋁	0	1	3	4	+3
鉻	0	2	13	18	+16
銅	0	1	3	5	+4
鐵	0	4	11	16	+12
鉛	0	1	2	3	+2

以下是從分析機油而有的觀察：

(i) 黏性

黏性在 200 小時的耐用性測試中有所增加，高硫柴油和低硫柴油的黏性增幅分別是 5.0% 及 3.5%。這意味著高硫柴油對黏性增加速度比低硫柴油的高。

(ii) 總鹼值

在 200 小時的測試期間，高硫柴油的總鹼值錄得相當大的跌幅(15%)，但低硫柴油的總鹼值只微降 1%。一個合理的解釋是透過補充機油能提供額外的添加劑量，足以抵銷在燃燒低硫柴油過程中產生的硫酸(數量遠少於燃燒高硫柴油時產生的硫酸)所消耗的劑量。然而，高硫柴油和低硫柴油的 200 小時總鹼值仍屬正常範圍之內。據該機油製造商表示，當總鹼值下跌至低於原來數值的一半，機油便須更換。為此，由於低硫柴油的總鹼值耗損率較低，可減少更換機油的次數，應有利於發動機運作。而且，低硫柴油消耗較少機油，有關的好處會因而進一步提高。

(iii) 金屬元素分析

由於發動機磨損，機油在 200 小時測試期間的金屬濃度普遍增加。除了低硫柴油的鐵濃度較高外，高硫柴油和低硫柴油因磨損而產生的遞增金屬濃度大致相若。

(e) 掃描電子顯微鏡檢查

為研究燃油流量會否造成磨損/撕裂，吉拿發動機的燃油噴射器和燃油泵組(可能因燃油潤滑能力不足而出現磨損)的所有部件均是全新購置及通過檢查的。這些部件包括噴咀、空心活塞閥、泵柱塞和出油閥，全部先在進行耐用性測試前接受檢查，作為基準，然後在進行兩次耐用性測試後從發動機和燃油泵拆除出來，重新接受檢查。

從已拍攝的電子顯微鏡照片可見，在使用高硫柴油和低硫柴油的兩種情況下，噴咀的形狀和大小在進行 200 小時的耐用性測試後均保持不變。高硫柴油和低硫柴油的噴咀內發現了一些沉積物，經鑑定後證實大部分是碳和氧，可能來自未燃燒的燃油。總的來說，根據掃描電子顯微鏡觀察所得，在使用高硫柴油和低硫柴油的兩種情況下，均沒有發現發動機部件出現異常磨損情況。

(f) 低功率電子顯微鏡分析

計量泵柱塞和燃料噴射器柱塞的表面光滑度在進行測試之前和之後都進行了比較。顯微鏡檢查發現，金屬表面並沒有因為使用高硫柴油或低硫柴油後出現任何顯著變化。同時，兩個測試都沒有觀察到有磨損/撕裂的情況。

B. 康明斯發動機

(1) 柴油燃料分析

由獨立化驗所檢驗的高硫柴油及低硫柴油樣本，符合燃料供應商的品質證明書內數據。兩個批次樣本的低硫柴油淨熱值比高硫柴油分別少 1.5%和 2.2%。平均下降值為 1.8%。

(2) 性能測試

(a) 發動機最大功率

下面的表格總結了發動機使用高硫柴油和低硫柴油的最大功率輸出值及變化：

最大功率輸出	基準 1	200 小時後 (高硫柴油- 耐用性測試)	基準 2	200 小時後 (低硫柴油- 耐用性測試)	整體 平均值
高硫柴油 (千瓦)	300.7	301.2	290.2	292.6	296.4
低硫柴油 (千瓦)	302.7	303.0	289.9	293.2	297.5
相差百分比	+0.7%	+0.6%	-0.1%	+0.2%	+0.4%

低硫柴油的淨熱值雖然有輕微下降，測試結果顯示使用低硫柴油發動機的最大功率出現輕微增加，改變幅度由+0.7%至-0.1%不等，整體平均值為+0.4%。

(b) 燃油消耗率

燃油消耗率測試使用六種不同的發動機負載情況，分別為 100% (即 196 千瓦)，85%，75%，50%，25%的額定負載模式和從 83%至 87%的功率週期變化，並

在三個不同階段進行：包括基準、已完成 200 小時耐用性測試後但沒有更換機油、以及在已完成 200 小時耐用性測試後並已更換機油。下面的表格紀錄高硫柴油和低硫柴油在不同測試階段和負載條件的相對比較值。

高硫柴油耐用性測試 低硫柴油對比高硫柴油	基準 1	200 小時後	200 小時及更 換機油後	平均值
發動機負載情況				
100%	+1.0%	+1.2%	+0.8%	+1.0%
85%	+1.6%	+1.5%	+1.6%	+1.6%
75%	+1.6%	+1.4%	+1.5%	+1.5%
50%	+1.2%	+1.3%	+1.3%	+1.3%
25%	+1.4%	+1.3%	+1.1%	+1.3%
功率週期變化(83% ~ 87%負載)	+1.4%	+1.5%	+1.2%	+1.3%
			整體平均值：	+1.3%

低硫柴油耐用性測試 低硫柴油對比高硫柴油	基準 2	200 小時後	200 小時及更 換機油後	平均值
發動機負載情況				
100%	+1.4	+1.7	+1.7	+1.5
85%	+1.2	+2.0	+1.9	+1.6
75%	+0.8	+2.1	+1.9	+1.4
50%	+1.0	+2.1	+1.9	+1.5
25%	+0.9	+1.6	+1.9	+1.4
功率週期變化(83% ~ 87%負載)	+1.2	+1.4	+1.5	+1.3
			整體平均值：	+1.4%

所有燃油消耗率結果都是正常及符合發動機廠方的工作範圍。比較結果顯示在 200 小時運作後更換機油對燃油消耗率沒有明顯影響，這結果與吉拿發動機測試結果相同。

在高硫柴油耐用性測試前(基準 1)和 200 小時之後，低硫柴油於不同負載情況下的平均燃油消耗率變化由+1.0%至+1.6%不等，整體平均變化值為+1.3%。同時，在低硫柴油耐用性測試前(基準 2)和 200 小時之後，低硫柴油於不同負載情況下的平均燃油消耗率與高硫柴油相差由+1.3%至+1.6%不等，整體平均值為+1.4%。這些輕微變化(上升 1.3%至 1.4%)符合在柴油燃料分析中提到的低硫柴油與高硫柴油之淨熱值差額變化(-1.8%)。

(3) 耐用性試驗

(a) 基本操作數據

耐用性測試先高硫柴油後低硫柴油，以恆常功率輸出 186 千瓦和保持運行 200 小時的過程中，並不需要補充發動機機油。這結果與吉拿發動機測試不同。

(b) 燃油噴射器試驗

測試結果顯示在兩種耐用性測試之前和後，全部 6 個噴射器的噴射壓力和噴灑霧

化模式都符合康明斯操作及維修手冊中的廠方規定，這顯示燃油噴射器在完成兩種耐用性測試後仍然運作正常。

(c) 燃油計量泵檢查：

燃油計量泵在執行高硫柴油和低硫柴油耐用性測試之前和之後都會安排進行測試。所有的變化幅度都在±3%以內，屬於測試設備的不確定性和人為錯誤的範圍。總括而言，計量泵通過高硫柴油和低硫柴油耐用性測試之後都沒有顯著變化。

以上高硫柴油和低硫柴油的耐用性測試結果，符合噴咀、計量泵柱塞和燃料噴射器柱塞在掃描及低功率電子顯微鏡下的觀察，及燃油潤滑性遠低於 460 微米的測量結果。

(d) 機油分析

在耐用性測試開始(0 小時)及其後 100 和 200 小時，分別抽取了機油樣本，以進行化學成份分析。高硫柴油和低硫柴油在耐用性測試前及後之分析結果如下：

高硫柴油耐用性測試 測試參數	規格	0 小時	100 小時	200 小時	變化(200 小 時 - 0 小時)
黏性，cSt 在 100°C 下	15.5	14.9	14.7	15.3	+0.4
總鹼值(毫克 氫氧化鉀/克)	10	11.2	10.7	10.4	-0.8
磨損金屬元素 (ppm)：少於 2ppm 的銀、鋁、鉻、鎳和錫並無顯示出來					
銅	0	1	3	5	+4
鐵	0	3	17	27	+24
鉬	0	35	39	38	+3
鉛	0	0	0	2	+2

低硫柴油耐用性測試 測試參數	規格	0 小時	100 小時	200 小時	變化(200 小 時 - 0 小時)
黏性，cSt 在 100°C 下	15.5	15.0	14.8	15.2	+0.2
總鹼值(毫克 氫氧化鉀/克)	10	11.4	11.5	11.6	+0.2
磨損金屬元素 (ppm)：少於 2ppm 的銀、鋁、鉻、鎳和錫並無顯示出來					
銅	0	0	1	2	+2
鐵	0	2	12	18	+16
鉬	0	35	38	37	+2
鉛	0	0	0	1	+1

以下是從分析機油而得到的觀察結果：

(i) 黏性

黏性在 200 小時的耐用性測試中有所增加，高硫柴油和低硫柴油的黏性增幅分別是 2.7% 及 1.3%。這意味著高硫柴油對黏性增加速度相對比低硫柴油的高。

(ii) 總鹼值

在 200 小時的測試期間，高硫柴油的總鹼值錄得相當大的跌幅(7.1%)，但低硫柴油的總鹼值卻可以保持(+1.8%)。然而，高硫柴油和低硫柴油的 200 小時總鹼值仍屬正常範圍之內。正如上文所述，當總鹼值下跌至低於原來數值的一半時機油才需要更換。由於低硫柴油能維持總鹼值，可減少更換機油的次數，因此可能有利發動機運作。減少更換機油次數也需視乎黏性增加速度，從上述(i)可見低硫柴油可使機油黏性增加速度減慢，因此低硫柴油的好處應可進一步增大。

(iii) 金屬元素分析

由於發動機磨損，機油在 200 小時測試期間的金屬濃度普遍增加。除了高硫柴油的鐵濃度較高外，高硫柴油和低硫柴油因磨損而產生的遞增金屬濃度大致相若。

(e) 掃描電子顯微鏡檢查

從已拍攝的電子顯微鏡照片可見，在使用高硫柴油和低硫柴油的兩種情況下，噴咀的形狀和大小在進行 200 小時的耐用性測試後均保持不變。高硫柴油和低硫柴油的噴咀內發現了一些沉積物，經鑑定後證實大部分是碳和氧，可能來自未燃燒的燃油。總的來說，根據掃描電子顯微鏡觀察所得，在使用高硫柴油和低硫柴油的兩種情況下，均沒有發現發動機部件出現異常磨損情況。

(f) 低功率電子顯微鏡分析

計量泵柱塞和燃料噴射器柱塞的表面光滑度在進行測試之前和之後都進行了比較。顯微鏡檢查發現，金屬表面並沒有因為使用高硫柴油或低硫柴油後出現任何顯著變化。同時，兩個測試都沒有觀察到有磨損/撕裂的情況。

結論

(a) 當使用低硫柴油時，吉拿和康明斯發動機的最大輸出功率與使用高硫柴油時相近。吉拿發動機有輕微的下降 (-1.8%) 而康明斯發動機則有輕微增加 (+0.4%)。然而，這些變化都是非常少，在實際操作過程中不會輕易被察覺到。

(b) 測試結果顯示低硫柴油的燃油消耗率與高硫柴油比較有少幅增加，吉拿發動機和康明斯發動機的變化幅度分別為+0.5%~+1.7%和+1.3%~+1.4%，這結果符合低硫柴油的淨熱值有少幅減少。

(c) 在執行功率週期變化的過程中，低硫柴油比高硫柴油的燃油消耗率有輕微變化。吉拿發動機和康明斯發動機的燃油消耗率的變化幅度分別為 1.0%~1.8% 和 1.3%。

(d) 最大功率測試和燃油消耗率的估計誤差值分別是 $\pm 4.4\%$ 和 $\pm 1.7\%$ ，這顯示測試在準確度高的情況下進行。

(e) 吉拿和康明斯發動機完成 200 小時耐用性試驗後，燃油噴射器和燃油泵內的相關零件都已進行掃描和低功率電子顯微鏡分析，顯示兩種燃油都沒有引致不正常的磨損。

(f) 機油特性化驗分析結果表明由高硫柴油切換到低硫柴油後可以獲得以下效益：總鹼值下降速度較慢，和黏性上升速度減少。但金屬元素卻沒有顯著的變化。

(g) 吉拿發動機使用低硫柴油後可以減少機油消耗量，但康明斯發動機測試結果並沒有明顯的變化。

(h) 從機油消耗量和化學分析等所得到的觀察結果，符合美國環保局聲稱轉用低硫柴油比使用高硫柴油可以獲得的好處。

1. 前言

1.1 背景

過去數十年，船舶排放持續增加，成為香港二氧化硫、可吸入懸浮粒子和氮氧化物最大的排放源。香港特區政府已研究如何減少船舶排放，其中一個方法是改善本地供應的船用柴油質素，以減少遠洋船、內河船和本地船隻的廢氣排放。香港特區政府環境保護署(環保署)建議把船用輕質柴油的含硫量上限由 0.5%降低至 0.05%，這可使個別船隻的二氧化硫和可吸入懸浮粒子排放量分別減少約 90%及 30%。環保署於二零一二年五月成立了一個工作小組，成員包括來自多個政府部門的官員、本地船舶營運商代表和學術界專家(有關工作小組的職權範圍和成員名單，請參閱附錄 I)。工作小組成員在第一次和第二次會議上同意對兩款使用高硫柴油(按重量計最高含硫量為 0.5%)和低硫柴油(按重量計最高含硫量為 0.05%)的常用輪船用發動機進行測試，以確定低硫柴油與現有船隻發動機是否兼容及其性能。

二零一二年七月，環保署委託香港大學機械工程系進行一項名為「在實驗室環境下輪船用發動機測試」的研究，以回應工作小組成員的要求。該項研究將採用度身訂造的實驗室儀器，以評估兩款輪船用柴油發動機在不同模擬運作環境下的性能表現。工作小組已於二零一二年六月五日舉行的第二次會議上確認性能測試及耐用性測試的方法。在二零一二年九月二十一日的工作小組第三次會議上，成員認為應以議定方法測試耐用性，並同意以機油分析作為參考。工作小組分別在二零一二年十一月七日和二零一三年一月二十三日前往吉拿及康明斯發動機測試實驗室，了解其設施和運作。吉拿 6LXB 發動機測試所得的初步結果已在二零一三年一月提交之中期報告敘述。本最終報告詳述吉拿 6LXB 及康明斯 NTA855(M)發動機所得的測試結果。此最終版本集合了工作小組成員於二零一三年三月十四日第四次會議中提出的意見，即在結論中包括測量範圍。

1.2 目標

研究目標概述如下：

- 對低硫柴油(按重量計含硫量不超過 0.05%)進行測試，以評估：

- (1) 在實驗室控制環境下，測試兩款在用輪船用發動機(即吉拿6LXB和康明斯NTA855(M))的性能，測試範圍包括發動機功率輸出和耗油量；及
 - (2) 發動機的耐用性，包括燃油潤滑性和低硫柴油與發動機的兼容性；以及
- 對高硫柴油(按重量計，標稱含硫量最高為 0.5% (5 000 ppm)的本地供應輪船用輕柴油)進行相同測試，作為與低硫柴油比較的基準。

1.3 報告大綱

本最終報告分為 8 節，並包括 8 個附錄，載述與主體報告有關的補充資料。

第 1 和第 2 節是前言和測試範圍，第 3 和第 4 節闡釋測試方法及介紹測試台的組件和量度儀器。前數節的大部分內容同時適用於吉拿和康明斯發動機，第 5 和 6 節則分別闡述吉拿和康明斯發動機測試的結果。第 7 節分析測試儀器的不確定因素而第 8 節則總結整個測試的結果和觀察分析。

2. 測試範圍：

這項研究的測試範圍包括：

- **評估兩款在用輪船用柴油發動機在使用高硫柴油和低硫柴油時的性能表現**

每種測試燃油將在特定間隔接受三項相同的性能測試，即基準測試(前)、經過 200 小時及更換機油前和後之測試及基準測試(後)。兩款輪船用發動機均接駁了交流發電機，以產生電力。電阻負載組可用來更改發動機的輸出功率，以測定在穩定狀態下的最大功率輸出。

- **評估兩款在用輪船用柴油發動機使用高硫柴油和低硫柴油的能耗效益**
安裝燃油流量探測器於發動機的燃油管上，以測定發動機在不同負載狀態下的燃油耗用率。

- **評估使用高硫柴油和低硫柴油對兩款輪船用柴油發動機造成的損耗影響而進行的耐用性研究**

評估及比較使用高硫和低硫柴油對兩款發動機造成的損耗影響。發動機會以額定功率的 80%至 90%輸出量連續運作 200 小時。噴射器的針閥和噴嘴及燃油泵活動部件的損耗情況、機油和主要燃油成分等在每段測試之前和之後進行分析。

有關上述測試範圍的詳情，請參閱第3節「測試方法」。

3. 測試方法

3.1 測試台裝置

- 工作小組挑選了兩款發動機(吉拿 6LXB 和康明斯 NTA855(M))作為合適的樣本，以代表所有本港在用輪船柴油發動機。
 - 吉拿 6LXB 被揀選代表低額定功率和機齡舊（於 1980 年或之前生產）的發動機。這種發動機普遍被用來生產電力及推動漁船；
 - 康明斯 NTA855(M) 被揀選代表中至高額定功率和中位機齡（於 1990 年或之前生產）的發動機。這種發動機普遍被用來推動拖船及在駁船上搬運貨物。
 - 以上兩款測試用的發動機均與交流發電機接駁，以產生電力。
 - 香港大學是基於實際理由，提議使用交流發電機代替發動機測功機進行測試，因為沒有一部測功機可隨時供他們長時間借用。由於排放量並不是是次測試的目標，能調較發動機速度的測功機並非必要。事實上，使用交流發電機以控制固定負載亦比較容易，惟一考慮就是要控制機房溫度，因為發動機在高負載情況下所散發的熱量會較實際在用環境所產生為高。
- 度身設計的測試台被放置於一個隔聲罩內，以減少發出聲響。測試用的發動機經過一個合適的接駁機件接駁到交流發電機，另有一台水冷型散熱器作冷卻之用(見第 4 節的圖片)。
- 在完成發動機安裝後進行了試行運作測試，確保其後的測試在滿意的運作狀態下進行。
- 使用自動化記錄儀器監察發動機在性能測試期間的燃油耗量和功率輸出，並提供發動機運作參數，以監測發動機的性能表現。
- 使用設有選擇性遞增／減值的電阻負載組，以改變發動機的功率輸出。研究人員安排了一個特製負載組，可以在約 85%的額定發動機功率輸出情況下再以 2%的幅度遞增／減負載值。

3.2 燃油供應系統

- 測試用的燃油(即高硫柴油和歐盟 V 期柴油)是經環保署的合約承辦商提供，並暫時存放於容量 200 升的油桶內。高硫柴油事前沒有經過處理，而低硫柴油則由高硫柴油和歐盟 V 期柴油以 1:10 的容量比例混合而成，兩者均由中石化（香港）有限公司供應。
- 有關進行性能及耐用性測試時的燃油供應和混合處理方法，詳情見下文。
- 性能測試: 使用裝有流量測量儀的燃油傳送泵來混合燃油，期間定時記錄耗油量。此外，燃油流量感應器亦裝置於發動機の入油處，以確保能夠準確測定輸送往發動機的燃油總量。
- 耐用性測試: 測試用的燃油先由儲存桶輸送至容量 400 升的燃油缸，然後才輸送往測試用的發動機。
- 燃油供應商就高硫柴油和歐盟 V 期柴油的物理及化學特性發出的品質證書或同等文書(如有)，可用以比較由環保署委聘的合資格實驗室(即香港通用公證行有限公司)所測試的燃油品質結果。

3.3 性能測試

- 兩款測試發動機合共進行了六次性能測試(三次用低硫柴油，三次則用高硫柴油)。為降低實驗的誤差，每種燃油都會重複進行三次性能測試，並計算該三次測試的平均值。該三次測試分別在以下時段進行: 1) 進行耐用性測試前，作為基準; 2) 進行耐用性測試後但在更換機油前，以顯示發動機損耗和耐用性合併產生的影響; 3) 進行耐用性測試及更換機油後，以顯示耐用程度的影響。
- 每次性能測試均會使用高硫柴油和低硫柴油。先測試高硫柴油作為基準，之後再測試低硫柴油。由於高硫柴油是本地業內人士普遍用於船隻

的燃油，因此先測試高硫柴油以確保它對發動機沒有不良影響。

- 測試步驟撮述如下：
 - i. 先進行十五分鐘暖身程序，過程中會應用不同發動機功率輸出；
 - ii. 在船用連續功率轉速(發動機額定轉速)設定，分別控制發動機的額定輸出量在 100% (最高) 的功率 (可能會出現功率效能下降)、85%、75%、50% 和 25% 情況下運行十五分鐘，以測量耗油量；
 - iii. 測量在功率週期變化(83% -> 85% -> 87% -> 85% -> 83%) 時的耗油量，每一輸出量運行三分鐘，以模擬變化不定的負載運行情況；
 - iv. 十五分鐘急速冷卻程序；
 - v. 重複上述第 ii 及 iii 項程序兩次，並採用該三次測試的平均值作為結果。

- 就每個發動機和燃油的組合，在首次性能測試開始前、耐用性測試完結後及其後第二次和第三次性能測試時更換機油，並同時更換燃油和進氣過濾器。就該兩台發動機的高硫柴油和低硫柴油測試，研究人員分別採用了相應的廠方建議機油。

3.4 200 小時耐用性測試

- 200 小時耐用性測試是在性能測試完成後進行。200 小時是參考外地經驗而選定的。

- 每次耐用性測試均使用高硫柴油和低硫柴油，並把兩者作出比較。測試是按吉拿-高硫柴油為先而吉拿-低硫柴油為後的次序進行。

- 吉拿 6LXB 發動機船用連續功率的額定功率輸出量為 94 千瓦，而在是項研究中，交流發電機的選定運行輸出功率為 68 千瓦。這個數值是基於老舊發動機效能下降所致的損失 (約廠方額定功率的 20%) 及動力傳動系統組件所致的功率損失 (約廠方額定發動機功率的 10%) 而選定。估計發動機實輸出功率約為額定發動機功率的 80%。

- 康明斯 NTA855(M) 發動機船用連續功率的額定功率輸出量為 261 千瓦，而在是項研究中，交流發電機的選定運行輸出功率為 186 千瓦。這個數值是基於老舊發動機效能下降所致的損失（約廠方額定功率的 20%）及動力傳動系統組件所致的功率損失（約廠方額定發動機功率的 10%）而選定。估計發動機輸出功率約為額定發動機功率的 80%。
- 測試順序概述如下：
 - i. 先進行 15 分鐘怠速暖身程序；
 - ii. 每天連續以海上連續運行速度時的額定功率輸出量之 80%（即 68 千瓦），運行約 12 小時；
 - iii. 進行 15 分鐘怠速冷卻程序後結束測試；
 - iv. 重複上述步驟 i 至 iii，直至累積 200 小時的運行時間；
- 在順序進行兩種發動機燃料組合（即吉拿-高硫柴油及吉拿-低硫柴油）的耐用性測試之前和之後，分別利用掃描電子顯微鏡和低功率電子顯微鏡檢查燃油噴射器的噴咀以及燃油噴射器和燃料泵活動部件的磨損情況，亦即就吉拿發動機（詳見第 3.5 項）共進行 4 次檢查。同樣，在進行耐用性測試前後，在測試台進行燃油噴射器的霧化模式檢驗、工作壓力測試及燃料泵輸出量測試，以檢查零件經過測試後是否仍符合製造商就燃油噴射器和燃料泵所定下的建議操作限值。
- 在進行耐用性測試期間的三個階段分別收集機油樣本。由於吉拿的機油添加的量多，所以難以進行科學分析，因此該等樣本的分析結果只可作為參考資料。康明斯在測試過程中無需添加機油，詳見下文第 3.6 項。

3.5 柴油分析及潤滑能力評估

- 使用玻璃瓶（取樣前徹底清潔）收集兩個含適量（~500 毫升）並具代表性的燃料樣本（包括高硫柴油和低硫柴油及其複樣，即每種燃料共 2 個樣本）。上述取樣程序是在首次和最後一次性能測試期間進行。一套樣本送交合資格的化驗所香港通用公證行有限公司（SGS Hong Kong

Ltd.) 進行物理及成份分析(包括潤滑性分析)，以確保樣本符合下文表 3.1 所列高硫柴油及低硫柴油的規格。該複樣是備用品，萬一測試結果引起任何疑問或爭議，便會用於重複測試。

表 3.1 柴油的測試參數

測試參數	測試方法或 相等標準	高硫柴油 規格	低硫柴油 規格
淨熱值	ASTMD240	不適用	不適用
密度 (克/升)	ASTMD4052	0.82-0.87	0.82-0.86
含硫量 (wt%)	ASTMD4294	最高 0.5%	最高 0.05%
十六烷指數	ASTMD4737	最低 48	最低 48
潤滑性, 在 60°C 的校正	ENISO12156-	不適用	最高 460
磨痕直徑(wsd1.4) (μ m)	1:2006 HFRR		

- 進行顯微鏡檢查（包括掃描電子顯微鏡及低功率電子顯微鏡）和燃油系統測試，該等檢測有助確定燃油噴射器的針閥和噴咀以及燃料泵活動部分在進行兩種發動機燃料組合（即吉拿-高硫柴油及吉拿-低硫柴油）的耐用性測試之前和後的磨損情況。掃描電子顯微鏡可以顯露金屬表面(包括其成分)的細微狀況，主要用於燃油噴射器的噴咀。低功率顯微鏡的作用是補足掃描電子顯微鏡，用以檢查針閥和泵柱塞的表面粗糙狀況。主要配件的表面影像被記錄下來，用作與其全新時的狀況作比較。相關部件送交先進公司進行工作測試和整修。

3.6 機油選擇及質量下降評估

- 吉拿 6LXB 發動機使用美孚 Delvac 1340 (SAE Grade 40) 柴油機油，其典型特質載列於表 3.2。船運業一直把美孚 Delvac 1330 或 1340 用於吉拿 6LXB 發動機，是次測試基於保守的考慮最終選用較高級的 1340 機油。

表 3.2 Mobil Delvac 1340 發動機燃油的典型特質

測試參數	Delvac 1340
級別	SAE 40
黏度，ASTM D445	
在 40°C 下的 cSt	146
在 100°C 下的 cSt	14.1
黏度指數，ASTM D2270	99
硫酸鹽灰份，wt%, ASTM D874	1.1
總鹼值，ASTM D2896	10.1
傾點，°C，ASTM D97	-21
閃點，°C，ASTM D92	254
在 15°C 下的密度，千克/升，ASTM D4052	0.8875

*產品說明書所列的黏性是 14.6，但並不代表實際數字，數值可能隨製造過程中使用的原油而變化。實際數值以運往香港大學的產品之生產商分析證明書內顯示 14.1 為準。

- 機油美孚 Delvac MX 15W-40 (SAE Grade 15W-40)是供康明斯 NTA855(M) 發動機使用，其典型特質載於表 3.3。船運業普遍使用美孚 Delvac MX 15W-40，等同於康明斯所推薦 Valvoline Premium Blue E。

表 3.3 Mobil Delvac MX 15W-40 發動機燃油的典型特質

測試參數	Delvac MX 15W-40
級別	SAE 15W-40
黏度，ASTM D445	
在 40°C 下的 cSt	105
在 100°C 下的 cSt	15.5*
黏度指數，ASTM D2270	138
硫酸鹽灰份，wt%, ASTM D874	1.1
總鹼值，ASTM D2896	10
傾點，°C，ASTM D97	-33
閃點，°C，ASTM D92	215
在 15°C 下的密度，千克/升，ASTM D4052	0.8685

*產品說明書所列的黏性是 14.2，但並不代表實際數字，數值可能隨製造過程中使用的原油而變化。實際數值以運往香港大學的產品之生產商分析證明書內顯示 15.5 為準

- 在進行耐用性測試的三個階段，使用採樣瓶（取樣前徹底清潔）就兩種組合（即吉拿-高硫柴油及吉拿-低硫柴油）收集三個含適量（~200 毫升）並具代表性機油的複樣（即共 6 個樣本）。一套樣本經合資格化驗所達石油公司送交 Signum 進行物理及成份分析，有關檢查項目不少於下文表 3.4 所列。該三個階段為 1) 完成性能測試後但開始耐用性測試前（「0-小時」）；2) 耐用性測試中段（「100-小時」）；及 3) 完成耐用性測試後（「200-小時」）。該複樣是備用品，萬一測試結果引起任何疑問或爭議，便會用於重複測試。可從表 3.4 所列的三項測試參數的結果對在用機油狀況和磨損情況進行數值比較和分析。視乎所得出的結果，會嘗試量化因不同機油更換頻密程度所引致的成本效益和成本。

表 3.4. 機油的測試參數

測試參數	測試方法或 相等標準	機油污染指引
在 100°C cSt 下的 黏度	ASTM D445	與新油比較+/-SAE 黏度級別或 5cSt
總鹼值	ASTM D2896	最低 2.5 或新油值的一半或相等於 總酸值
金屬元素分析： ppm 鋁、鉻、銅、 鐵、鎳和錫	ASTM D5185	視乎金屬和發動機磨損而有不同，參見埃克森美孚的「有關重型 柴油發動機燃油的廢油詮釋指引」 (2005 年 6 月版)

- 已就 Signum 提供的品質測試結果向達石油公司取得新機油物理及成份特徵的分析證明書或同等證明。
- 消耗品（例如機油過濾器、燃油過濾器、進氣過濾器）按照發動機製造

商的規定或採用行內常用的產品。兩部發動機在進行第一次和第三次效能測試前都已更換新過濾器濾心。

3.7 數據收集及監察

性能及耐用性測試會被監察及記錄如下：

- 性能測試
 - 發動機的耗油量由 Oval M-III 燃油流量感應器 和 DATAQ 數據記錄儀作出記錄；
 - 發動機轉速由 Deep Sea Electronics 控制器及磁性傳感器量度；
 - 交流發電機／發動機的功率輸出由 Fluke 電力記錄儀作出記錄。

- 耐用性測試
 - 發動機轉速、發動機冷卻水溫度、機油油壓及交流發電機／發動機功率輸出均被監察和定期記錄在記錄表內，記錄資料用作判斷發動機在耐用性測試中的運行狀態是否正常；
 - 採用低功率電子顯微鏡檢查燃油泵組合和噴射器柱塞；
 - 燃油噴咀和剩餘成分會由掃描電子顯微鏡檢查；
 - 霧化模式、工作壓力及噴射器和燃油泵的狀況均由檢定測試工作台進行測試；
 - 高硫柴油和低硫柴油的成份和物理特性由合資格的實驗室進行分析；
 - 機油在不同階段的特性由合資格的實驗室進行分析；
 - 另外，由工作組成員在第一次實地考察吉拿發動機測試後，增加定期記錄入氣口和排氣溫度，以監測發動機的工作狀況。這建議在康明斯測試中已被實行，這是在第二次工作小組會議中同意的原先測試方法的新增項目。

4. 測試台部件和檢測儀器的說明

測試用的發動機 - 吉拿 6LXB (圖 4.1)

規格

額定功率輸出 150 匹制動功率 @ 1,650 轉速

船用持續功率 127 匹制動功率 @ 1,500 轉速

缸徑 120.6 毫米

衝程 152.4 毫米

容量 10.45 公升

吸氣方式 自然式

構造 直列 6 缸

耗油量 (額定) 約 25.1 公升/小時 @ 1,650 轉速

耗油量 (持續) 約 23.1 公升/小時 @ 1,500 轉速



圖 4.1. 吉拿 6LXB 發動機

測試用的發動機 - 康明斯 NTA855-M (圖 4.2)

規格

額定功率輸出 400 匹制動功率 @ 2,100 轉速

船用持續功率 350 匹制動功率 @ 1,800 轉速

缸徑 140 毫米

衝程 152 毫米

容量 14 公升

吸氣方式 渦輪增壓式

構造 直列 6 缸

耗油量 (額定) 約 79.0 公升/小時 @ 2,100 轉速

耗油量 (持續) 約 66.4 公升/小時 @ 1,800 轉速



圖 4.2. 康明斯 NTA855-M 發動機

測試台 - 吉拿 6LXB 發動機

測試用的發動機和交流發電機（圖 4.3）擺放在一個鋼架上。鋼架放在隔音罩內（體積為 6,100（長）x 2,500（闊）x 2,500（高）毫米）。隔音罩以 100 毫米厚（傳音級別不超過 40）的隔音板來建造，以減低發動機的噪音。發動機由水泵（圖 4.4）和相關的散熱器（圖 4.5）冷卻。電阻負載組使用 PLC 控制系統（圖 4.6），以控制交流發電機的功率輸出。



圖 4.3 安裝在測試台之吉拿發動機



圖 4.4 冷卻發動機之水泵



圖 4.5 遠程散熱器



圖 4.6 負載組的 PLC 控制系統

測試台 - 康明斯 NTA855-M 發動機

測試用的發動機和交流發電機（圖 4.7）擺放在一個鋼架上。而發動機則放置在一個 20 英尺的集裝箱內（圖 4.8）。與吉拿發動器相同，隔音罩以 100 毫米厚（傳音級別不超過 40）的隔音板來建造，以減低發動機的噪音。電阻負載組（圖 4.9）使用 PLC 控制系統（圖 4.6）來控制交流發電機的輸出功率。康明斯發動機獨有之洗滌器（圖 4.10）以清除發動機排出廢氣的污染物。因應一位工作小組成員在第一次參觀實驗室後的意見，本測試已定期紀錄入氣及排氣的溫度，以監察燃燒性能。



圖 4.7. 安裝在測試台之康明斯發動機



圖 4.8. 發動機裝置在一個 20 英尺的集裝箱



圖 4.9. 電阻負載中心



圖 4.10. 散熱器和廢氣洗滌器

交流發電機

測試採用 Stamford D66-2158 交流發電機（電流量不低於 600 安培）及機械接駁器（圖 4.11）。機械接駁器使測試用的發動機易於安裝，方便校準及具防震功能。電力輸出由監測電路（圖 4.12）監控調節。



圖 4.11：交流發電機連機械接駁器



圖 4.12：發電機的自動電壓調節器

量度燃油流速

燃油管裝有 Oval M-III LSF45L0-R1 燃油流量感應器（圖 4.13），以測定燃油流量。有關數據會儲存在 DATAQ DI-160 數據記錄儀內（圖 4.13）。



圖 4.13：燃油流動感應器連數據記錄儀

量度發動機速度

Deep Sea Electronics 控制組件（圖 4.14）裝有磁力感應器，量度發動機的速度。感應器可記錄飛輪的轉動次數，所顯示的數據有助準確調校發動機的速度。



圖 4.14：Deep Sea Electronics 控制組件

量度發電機的電力輸出

電阻負載組（圖 4.15）設有不同的遞增／減負載值，為交流發電機提供輸電量。測試採用特製負載組，方便微調電力。Fluke 1735 電力記錄儀（圖 4.16）記錄交流發電機的功率輸出、電壓及電流，有關數據可用以估算測試用的發動機的功率輸出。



圖 4.15. 電阻負載組



圖 4.16. 電力記錄儀

掃描電子顯微鏡

透過日立 S3400N VP 7060 掃描電子顯微鏡（圖 4.17），可觀察金屬表面微細狀況（包括結構），主要用於燃料噴咀。



圖 4.17. 掃描電子顯微鏡

低功率電子顯微鏡

透過 Olympus SZ（圖 4.18）及 Supereyes A005+（圖 4.19）低功率顯微鏡，可得知針閥和泵柱塞的表面粗糙狀況。

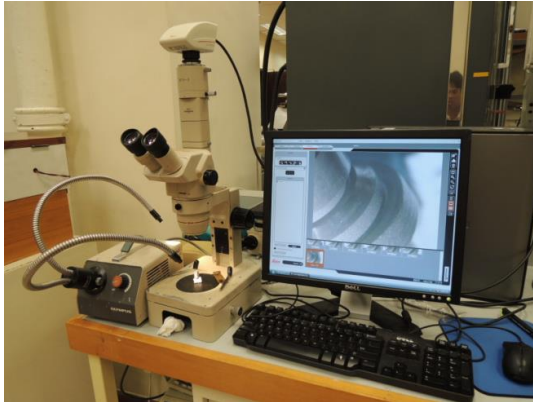


圖 4.18. Olympus 低功率顯微鏡



圖 4.19. Supereyes 低功率顯微鏡

設備清單及儀器裝置設計圖，請分別參閱附錄 II 及 IV。

5. 吉拿發動機測試結果及討論

5.1 柴油分析

中石化(燃料供應商)定期提供高硫柴油及歐盟 V 期柴油的品質證明書。每個批次高硫柴油及低硫柴油的物理特性 (按照證明書上的測試日期排列) 分別撮述於表 5.1 及表 5.2。有關特性符合在工作小組第二次會議上議定的規格。

表 5.1. 高硫柴油的特性

測試參數	測試方法或等效方法	22-07-12	11-08-12	08-09-12
在 15°C 的密度(千克/公升)	ASTMD4052	0.8446	0.8553	0.8540
含硫量 (% wt.)	ASTMD4294	0.370	0.416	0.419
十六烷指數	ASTMD4737	53.2	50.5	51.0
潤滑性, 在 60°C 的校正磨痕直徑(wsd1.4) (μ m)	ENISO12156-1:2006 HFRR	不適用	不適用	不適用

測試參數	10-09-12
在 15°C 的密度(千克/公升)	0.8540
含硫量(% wt.)	0.431
十六烷指數	51.0
潤滑性, 在 60°C 的校正磨痕直徑(wsd1.4) (μ m)	不適用

表 5.2. 歐盟 V 期柴油的特性

測試參數	測試方法或 等效方法	29-07-12	15-09-12	08-10-12
在 15°C 的密度(千克/公升)	ASTMD4052	0.8241	0.8369	0.8226
含硫量(ppm wt.)	ASTMD4294	9.0	5.2	2.5
十六烷指數	ASTMD4737	57.7	55.6	52.9
潤滑性, 在 60°C 的校正磨 痕直徑(wsd1.4) (μ m)	ENISO12156-1:2 006 HFRR	<400	< 350	< 400

測試參數	17-10-12	30-10-12
在 15°C 的密度(千克/公升)	0.8281	0.825
含硫量(ppm wt.)	5.4	3.8
十六烷指數	56.1	54.0
潤滑性, 在 60°C 的校正磨痕 直徑(wsd1.4) (μ m)	< 350	< 400

表 5.1 及表 5.2 載列的高硫柴油及歐盟 V 期柴油的特性都分別符合中石化和香港特區政府所訂立的規格。除了參考燃料供應商所提供的品質證明書報告外，兩種測試用燃料(高硫柴油及低硫柴油)的物理特性亦送交獨立化驗所進行複檢。

兩種柴油燃料的測試結果 (按照報告上的測試日期排列) 分別撮述於表 5.3 及表 5.4。測試結果顯示，低硫柴油的特性符合由香港特區建議的低硫柴油規格。在兩次性能測試中，該兩種燃料 (高硫柴油及低硫柴油)的特性分析結果只有少許差別。在兩項分析中，高硫柴油及低硫柴油的淨熱值差別百分比分別為 -1.6% 和 -2.2%。

表 5.3. 高硫柴油的測試參數

測試參數	測試方法或 等效方法	規格	27-08-12	27-11-12
淨熱值 (千焦耳/公升)	ASTMD240	不適用	36,197	36,315
密度(千克/公升)	ASTMD4052	0.82-0.87	0.8506	0.8565
含硫量(% wt.)	ASTMD4294	最高 0.5%	0.399	0.418
十六烷指數	ASTMD4737	最低48	51.6	50.1
潤滑性, 在 60°C 的校正 磨痕直徑(wsd1.4) (μ m)	ENISO12156- 1:2006 HFRR	不適用	350	344

表 5.4. 低硫柴油的測試參數

測試參數	測試方法或 等效方法	規格	27-08-12	28-11-12
淨熱值(千焦耳/公升) (與高硫柴油的淨熱值差 別百分比)	ASTMD240	不適用	35,608 (-1.6%)	35,530 (-2.2%)
密度(千克/公升)	ASTMD4052	0.82-0.86	0.8281	0.8278
含硫量(% wt.)	ASTMD4294	最高0.05%	0.0421	0.0411
十六烷指數	ASTMD4737	最低 48	56.8	53.5
潤滑性, 在 60°C 的校正 磨痕直徑(wsd1.4) (μ m)	ENISO12156- 1:2006 HFRR	最高 460	322	358

雖然只就燃料特性進行了兩次化驗所測試，但從燃料供應商獲得的品質證明書數據和由計算高硫柴油及低硫柴油的性質數據所得到的細小差異，足以反映整段期間的燃料燃燒效能和消耗情況都沒有明顯分別，詳情見表 5.5。

表 5.5. 計算及測試高硫柴油及低硫柴油的數據時出現的差異

有關燃燒和使用燃料的測試參數	高硫柴油耐用性測試前第一次性能測試		低硫柴油耐用性測試後第二／三次性能測試	
	高硫柴油	低硫柴油	高硫柴油	低硫柴油
淨熱值 (千焦耳/公升)	-0.4%	-0.2%	+0.1%	+0.2%
密度(千克/公升)	-0.7%	-0.3%	-0.3%	+0.0%
十六烷指數	+3.1%	+0.8%	+1.8%	+0.4%

5.2 性能測試

(a) 最高發動機功率

為測定發動機的最大功率輸出，首先進行了一項加載功率測試，以得出發動機負載曲線，而從得到發動機在額定轉速（每分鐘 1,650 轉）時的最大功率。表 5.6 列出最大功率輸出在以下四個測試階段使用低硫柴油及高硫柴油時的變化：進行高硫柴油耐用性測試前(基準 1)、進行高硫柴油耐用性測試後、進行低硫柴油耐用性測試前(基準 2)，以及進行低硫柴油耐用性測試後。結果顯示，最大功率的變化幅度由+0.1%至-5%不等，整體平均值為-1.8%。這些差異可能是由於測試使用的燃油來自不同批次，淨熱值並不一致，發動機的日常變化亦會對實驗造成不確定性。儘管如此，低硫柴油的最大功率輸出平均比高硫柴油低 1.8%，數值與兩者淨熱值的差額相稱，如表 5.7 所示，低硫柴油的淨熱值比高硫柴油低 1.9%。

表 5.6. 最大功率輸出量測試結果 - 低硫柴油與高硫柴油相比

最大功率輸出量	基準 1	200 小時後 (高硫柴油耐用性測試)	基準 2	200 小時後 (高硫柴油耐用性測試)	整體 平均值
高硫柴油 (千瓦)	106.2	116.3	115.3	117.7	113.9
低硫柴油 (千瓦)	104.9	115.0	109.5	117.8	111.8
相差百分比	-1.3%	-1.1%	-5.0%	+0.1%	-1.8%

表 5.7. 低硫柴油與高硫柴油熱值的比較

	高硫柴油	低硫柴油	相差百分比
平均熱值(千焦耳/公升)	36,256	35,569	-1.9%

(b) 單位燃油消耗量

單位燃油消耗量是在不同發動機負載情況下測定，以燃油感應器所讀得的實際燃油消耗量及電能量輸出記錄為準，其方程式如下：

$$\text{單位燃油消耗量 (公升/千瓦小時)} = \frac{\text{燃油消耗率 (公升)}}{\text{電能量輸出 (千瓦/小時)}}$$

測試包括六種發動機負載情況(例如 100%、85%、75%、50%、25%負載量)及 83% 至 87% 的功率週期變化。100%負載量是指發電機輸出值約 89 千瓦，即生產商的額定功率數值 (111.9 千瓦) 並減去在用發動機老化所導致的功率效能下降的估計值 (額定發動機功率的 20%)。表 5.8 比較低硫柴油及高硫柴油在以下三個不同負載情況下的單位燃油消耗量：基準、在完成 200 小時高硫柴油耐用性測試後但沒有更換發動機機油、以及完成 200 小時高硫柴油耐用性測試並已更換發動機機油後。200 小時低硫柴油耐用性測試的相應結果則列於表 5.9。整組單位燃油消耗量的測定資料載於附錄 VII 以供參考。資料顯示高硫柴油及低硫柴油測試所得的單位燃油消耗量數據相當正常，屬發動機手冊提供的範圍以內。

測試結果同時顯示，單位燃油消耗量的差異並沒有因為更換機油而出現明顯變化，反映更換機油對發動機運行 200 小時後的單位燃油消耗量沒有重大影響。故此，其後的分析結果採用了兩者的平均值。表 5.8 顯示，在高硫柴油耐用性測試之前(基準 1)和之後，低硫柴油於不同負載情況下的平均單位燃油消耗量由 -0.1% 至 +1.0% 不等，整體平均值為 +0.5%。同時，表 5.9 顯示，在低硫柴油耐用性測試之前(基準 2)和之後，低硫柴油於不同負載情況下的平均單位燃油消耗量由 +1.0%至 +1.9%不等，整體平均值為 +1.7%。如比較表 5.8 及表 5.9，可見低硫柴油平均單位燃油消耗量的上升比率輕微增加，符合上文提及低硫柴油與高硫柴油淨熱值差額擴大的情況 (由 +1.6%增至 +2.2%) (見表5.4)。

注意: 由於本地海上貿易以公升為入油基礎，上述淨熱值和單位燃油消耗量的討論是以容積為量度單位。如果入油是以重量計算，情況會扭轉。相對於高硫柴油，低硫柴油的淨熱值 (千焦耳/公斤) 會稍高，而單位燃油消耗量 (克/千瓦) 則較少。

表 5.8. 高硫柴油耐用性測試之前和之後的單位燃油消耗量結果比較(低硫柴油與高硫柴油相比)

發動機負載情況	基準 1	200 小時後	200 小時後 (有更換機油)	平均值
100% (低硫柴油與高硫柴油相比)	-1.3%	+0.7%	+1.4%	-0.1%
85% (低硫柴油與高硫柴油相比)	+0.1%	+0.6%	+0.9%	+0.4%
75% (低硫柴油與高硫柴油相比)	+1.2%	+0.6%	+1.1%	+1.0%
50% (低硫柴油與高硫柴油相比)	-0.3%	+1.9%	+1.2%	+0.6%
25% (低硫柴油與高硫柴油相比)	-1.0%	+2.0%	+1.2%	+0.3%
浮動負載(負載量 83%至 87%) (低硫柴油與高硫柴油相比)	+0.9%	+1.0%	+1.3%	+1.0%
整體平均值：				+0.5%

表 5.9. 低硫柴油耐用性測試之前和之後的單位燃油消耗量結果比較(低硫柴油與高硫柴油相比)

發動機負載情況	基準 2	200 小時後	200 小時後 (有更換機油)	平均值
100% (低硫柴油與高硫柴油相比)	+1.1%	+2.6%	+2.9%	+1.9%
85% (低硫柴油與高硫柴油相比)	+1.2%	+2.7%	+2.6%	+1.9%
75% (低硫柴油與高硫柴油相比)	+1.1%	+2.6%	+2.5%	+1.8%
50% (低硫柴油與高硫柴油相比)	+1.1%	+1.9%	+2.0%	+1.5%
25% (低硫柴油與高硫柴油相比)	+0.6%	+1.3%	+1.6%	+1.0%
浮動負載(負載量 83%至 87%) (低硫柴油與高硫柴油相比)	+0.8%	+2.7%	+3.0%	+1.8%
整體平均值：				+1.7%

5.3 耐用性測試

(a) 基本操作資料

每小時的發動機運行數據，包括輸出功率，冷卻水溫度等均被記錄，以監察發動機的運行情況。結果表明，200 小時耐用性測試期間，測試發動機在正常情況下運作。

表 5.10 列出耐用性測試的操作數據，包括機油耗用量。正如工作小組在第三次會議中指出，耐用性測試耗用大量機油，尤其在最初測試高硫柴油耐用性時。高、低硫柴油的測試結果可以相差 10.5 公升。兩者的機油耗

用量有如此大差距，原因可能是：

- (i) 最初測試高硫柴油耐用性時，發動機漏出較多燃油，而加油控制亦不理想；
- (ii) 在高硫柴油測試初期，發動機內部部件需要磨合；
- (iii) 使用低硫柴油的自然結果。

關於第(iii)點，有海外研究員解釋，低硫柴油燃燒時相對高硫柴油會產生較少二氧化硫，而二氧化硫會轉化為硫酸；因此，使用低硫柴油會有較少點狀銹蝕，對汽缸套損害較少，從而可減少機油耗量。不過，這效果仍有待確定，方可排除耗油量減少是其他兩個原因所導致。因此，在往後康明斯發動機的測試，我們加強監測它的機油耗量，並且控制好加油工序，以免出現上述第(i)點的情況。至於第(ii)點，由於康明斯與吉拿發動機的設計各異，兩者無法直接比較。粗略估計額外的 10.5 升機油消耗分別是第(i)和(ii)點的 4.0 公升及第(iii) 點的 6.5 公升。

表 5.10. 耐用性測試基本資料

測試參數	高硫柴油	低硫柴油
測試期	2012/09/04~ 2012/09/24	2012/10/12~ 2012/11/03
總運行時數	200	200
固定發動機輸出（千瓦）	68	68
總機油補充量（公升）	33.5	23.0

(b) 燃油噴射器測試

在進行兩種燃油耐用性測試之前和後，各燃油噴射器的起始壓力都分別被測定。透過檢查工作壓力及燃油霧化模式，確保燃油在耐用性測試期間可適當輸送及噴灑。如噴射器的霧化模式未如理想，可能是因為噴咀磨損，原因可能是燃油潤滑性不足。

表 5.11、5.12 是完成高、低硫柴油耐用性測試後燃油噴射器的測試結果。有關測試旨在顯示噴射器輸送及霧化燃油時的狀況。根據吉拿的操作及維修手冊，噴射器的起始壓力最少約為每平方吋 1764 至 1778 磅。測試結果顯示，各噴射器的起始壓力均符合這規定，亦即是說，兩個耐用性測試中燃油輸送正常。無論是高硫或低硫柴油，全部 6 個噴射器的噴灑霧化模式均屬理想。這結果符合：(1) 泵柱塞及噴咀在掃描電子顯微鏡及低功率電子顯微鏡下的觀察結果；及(2) 表 5.3 及表 5.4 顯示燃油潤滑性遠低於 460 微米。

表 5.11. 燃油噴射器測試（高硫柴油耐用性測試）

噴射器#	起始壓力是否符合操作限制？	噴咀霧化模式
噴射器 1	是	正常
噴射器 2	是	正常
噴射器 3	是	正常
噴射器 4	是	正常
噴射器 5	是	正常
噴射器 6	是	正常

表 5.12. 燃油噴射器測試（低硫柴油耐用性測試）

噴射器#	起始壓力是否符合操作限制？	噴咀霧化模式
噴射器 1	是	正常
噴射器 2	是	正常
噴射器 3	是	正常
噴射器 4	是	正常
噴射器 5	是	正常
噴射器 6	是	正常

(c) 燃油噴射泵測試

燃油噴射泵在高、低硫柴油耐用性測試之前和後均經過測試，測試報告見附錄 VII。最高燃油設定測試及噴射泵在每分鐘轉動速 200 衝程下的燃油輸送量，均以標準測試設備量度，再以肉眼觀察及人手記錄。測試結果的誤差為 ± 0.2 立方厘米，可視作並未超出測試設備不確定性與人為錯誤的

綜合誤差區間。由此可見，燃油噴射泵在完成高、低硫柴油耐用性測後對部件並無大影響。這結果符合：(1)泵柱塞及噴咀在掃瞄電子顯微鏡及低功率電子顯微鏡下的觀察結果（見第 5.5 段）；及(2)表 5.3 及表 5.4 顯示燃油潤滑性遠低於 460 微米。

5.4. 發動機潤滑油分析

在耐用性測試期間的0、100和200小時，分別抽取了機油樣本，以進行化學分析。「0小時」表示耐用性測試剛開始時發動機內的機油狀態。機油分析由Signum進行。表5.13和表5.14分別顯示在高硫柴油和低硫柴油耐用性測試中，於測試開始後的0、100和200小時進行的機油分析結果，報告全文載於附錄VII。根據分析結果得出以下幾點：

(a) 黏性

從表中可見，黏性在200小時的耐用性測試中有所增加，高硫柴油和低硫柴油的黏性增幅分別是5.0% 及3.5%。即如果不考慮添補發動機燃油量之不同，高硫柴油的黏性增幅比低硫柴油多1.5%。

(b) 總鹼值

在200小時的測試期間，高硫柴油的總鹼值錄得相當大的跌幅(15%)，但低硫柴油的總鹼值只微降1%。一個相對合理的解釋是補充添加劑(即給機油作最後潤飾)正取代足夠的添加劑，以抵銷在燃燒低硫柴油過程中產生的硫酸(數量遠少於燃燒高硫柴油時產生的硫酸)所消耗的劑量。然而，高硫柴油和低硫柴油的200小時總鹼值仍屬正常範圍之內。據該機油製造商表示，當總鹼值下跌至低於原來數值的一半，機油便須更換。由於低硫柴油的總鹼值耗損率較低，可減少更換機油的次數，因此在採用補給發動機燃油情況下，可能有利於發動機運作。不過，低硫柴油的總鹼值耗損率能否降低，仍須取決於可能在200小時後出現的機油黏性耗損率。有一觀點認為，200小時的黏性變化有利於進一步支持低硫柴油優勢。在任何情況下，目前200小時的測試均未能對此觀點作出結論。

(c) 金屬元素分析

由於發動機磨損，機油在 200 小時測試期間的金屬濃度普遍增加。從表 5.13 和表 5.14 可見，除了低硫柴油的鐵濃度較高外，高硫柴油和低硫柴油因磨損而產生的遞增金屬濃度大致相若。須指出的是，機油在耐用性測試期間不斷補給，致使機油特性不斷變化。因此，觀察所得的機油特性只可視作參考。我們亦注意到，在高硫柴油耐用性測試開始後的 0 小時，機油樣本中發現若干金屬，這可能是在耐用性測試開始前首次更換機油後留下的殘餘金屬。雖然我們把遞增值用作分析，但仍建議隨後進行康明斯測試時，在補充機油期間增加沖洗次數，以減少機油留下的殘餘金屬量。

表 5.13. Mobil Delvac 1340 機油的典型特性(高硫柴油耐用性測試)

測試參數	規格	0小時	100小時	200小時	變化(200小時 - 0小時)
黏性， 在 100°C下 的cST	14.1#	14.0	14.2	14.7	+0.7
總鹼值(毫克 KOH/克)	10.1	9.2	8.0	7.8	-1.4
磨損金屬元素 (ppm)：少於4ppm的銀、鋁、鎳和錫並無顯示出來					
鋁	0	3	5	5	+2
鉻	0	7	18	22	+15
銅	0	5	9	9	+4
鐵	0	18	19	19	+1
鉛	0	2	4	5	+3

產品說明書所列的黏性是 14.6，但並不代表實際數字，後者可能隨產品製造過程中使用的原油而變化。運往香港大學的產品的分析證明書則顯示 14.1，與 0 小時的數字一致。

表 5.14. Mobil Delvac 1340 機油的典型特性(低硫柴油耐用性測試)

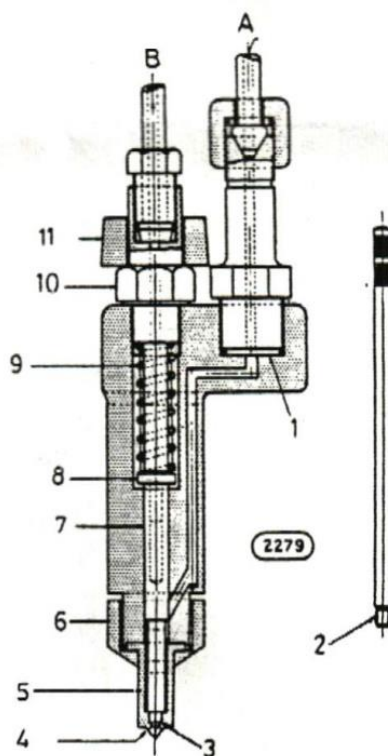
測試參數	規格	0小時	100小時	200小時	變化(200小時 - 0小時)
黏性， 在 100°C 下 的cSt	14.1#	14.1	14.3	14.6	+0.5
總鹼值(毫克 KOH/克)	10.1	8.8	8.3	8.7	-0.1
磨損金屬元素 (ppm)：少於4ppm的銀、鉬、鎳和錫並無顯示出來					
鋁	0	1	3	4	+3
鉻	0	2	13	18	+16
銅	0	1	3	5	+4
鐵	0	4	11	16	+12
鉛	0	1	2	3	+2

5.5. 掃描電子顯微鏡檢查

為研究兩種測試燃油的潤滑能力會否對發動機供油系統造成磨損問題，吉拿發動機的燃油噴射器和燃油泵組內的相關部件均是全新購置及通過檢查的。這些部件包括噴咀、空心活塞閥、柱塞和出油閥，全部在進行耐性測試前都會先接受檢查作為基準，然後在完成兩次耐性測試後從發動機和燃油泵拆除出來，然後再次接受檢查。

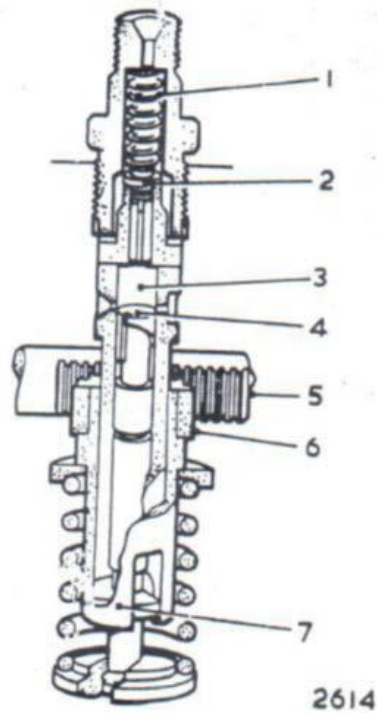
吉拿輸油系統的噴射器組件和燃油泵元件分別載於圖5.1和圖5.2。

1. 洗濾器
 2. 工具
 3. 閥座
 4. 噴孔
 5. 噴咀
 6. 螺絲母
 7. 空心活塞閥
 8. 彈簧圓盤
 9. 彈簧
 10. 閥擋
 11. 夾鉗
- A 自燃油泵
B 往放油管



噴射器組件

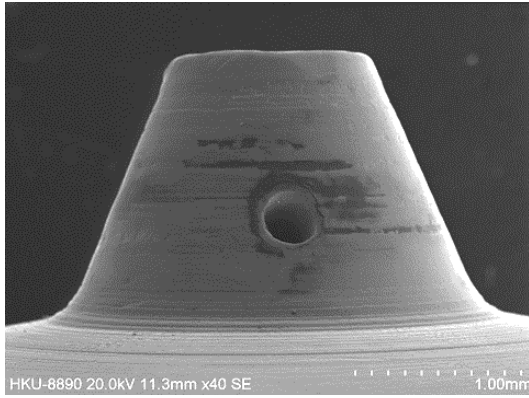
圖5.1 吉拿輸油系統的噴射器組件



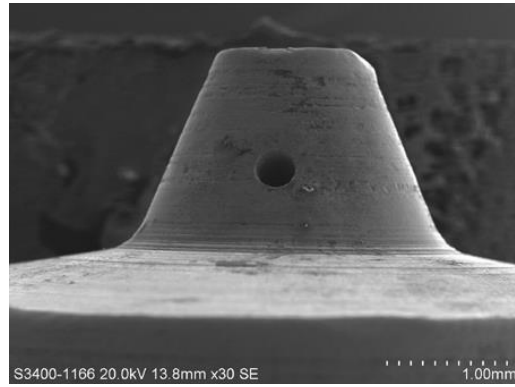
1. 閥簧
2. 出油閥座
3. 泵筒
4. 泵柱塞
5. 控制杆
6. 弧形齒板
7. 油量調節套

圖5.2 吉拿輸油系統的燃油泵元件

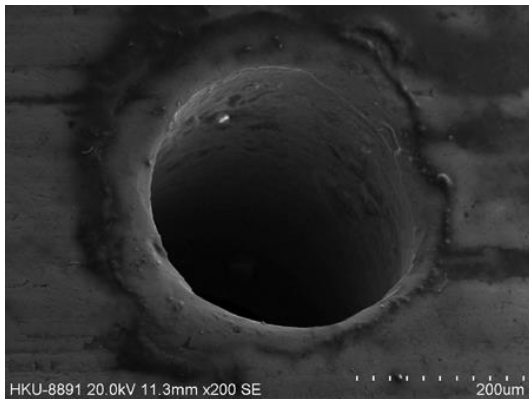
這項目採用日立S3400N VP掃描電子顯微鏡檢查了噴咀，照片5.1至5.5提供一些耐用性測試的樣本照片影像。而整套已拍攝的照片可於以下網頁下載：www.hktscl.com.hk/Temp/Microscope.rar。從這些照片可見，噴咀的形狀和大小在進行200小時的高硫柴油和低硫柴油耐用性測試後均保持不變。高硫柴油和低硫柴油的噴咀內發現了一些沉積物，經鑑定後證實大部分是碳和氧(照片5.5)，可能來自沉積於噴咀內的未燃燒燃油元素。總括來說，根據掃描電子顯微鏡觀測所得，在使用高硫柴油和低硫柴油後均沒有發現發動機部件出現異常情況及明顯磨損。



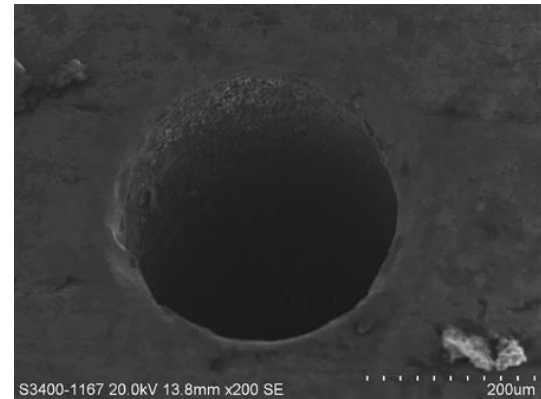
照片 5.1 噴射器噴咀孔的影像
(低硫柴油測試前)



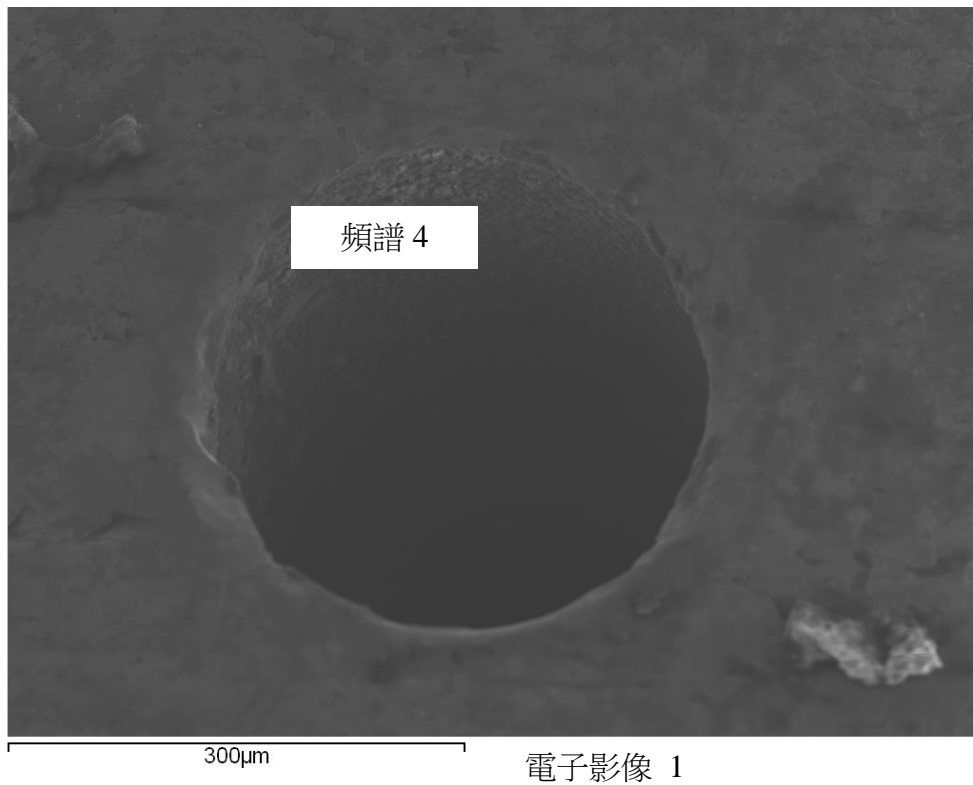
照片 5.2 噴射器噴咀孔的影像
(低硫柴油測試後)



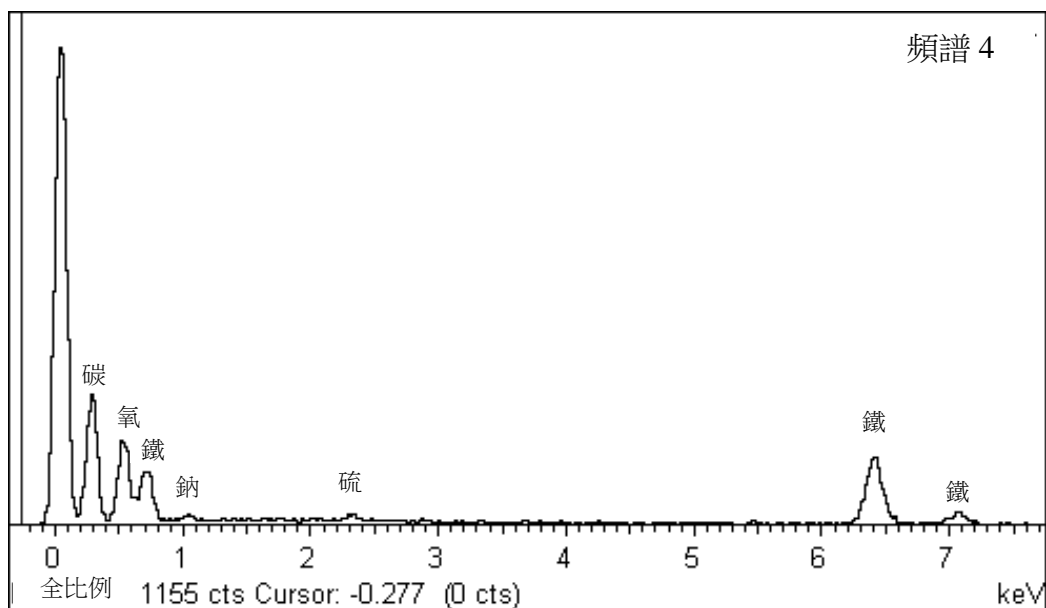
照片 5.3 噴射器噴咀孔的放大圖
像(低硫柴油測試前)



照片 5.4 噴射器噴咀孔的放大圖
像(低硫柴油測試後)



元素	近似濃度	強度校正值	重量%	重量% Sigma	原子%
碳鉀	35.38	0.8338	44.82	1.31	59.33
氧鉀	22.32	0.6811	34.60	1.27	34.39
鈉鉀	0.47	0.6201	0.80	0.26	0.56
硫鉀	0.40	0.9292	0.46	0.12	0.23



照片 5.5 200小時耐用性測試後噴射器的噴咀孔內物質的元素分析

5.6 低功率電子顯微鏡檢查

本測試同時使用低功率電子顯微鏡觀察柱塞和噴射器柱塞的磨損情況，並比較分別使用高硫柴油和低硫柴油後柱塞的表面光潔度之改變。圖5.6至5.11為噴射器內的空心活塞閥、柱塞和燃油泵內組件的部分高硫柴油耐用性照片，而圖5.12至5.17則顯示使用低硫柴油後的相同組件。有關吉拿的噴射器柱塞和燃油泵柱塞的全套照片，可參見以下網址：www.hktscl.com.hk/Temp/Microscope.rar。從該等照片可見，所檢查組件的表面光潔度在進行高硫柴油和低硫柴油的耐用性測試前和後，並無任何顯著改變。

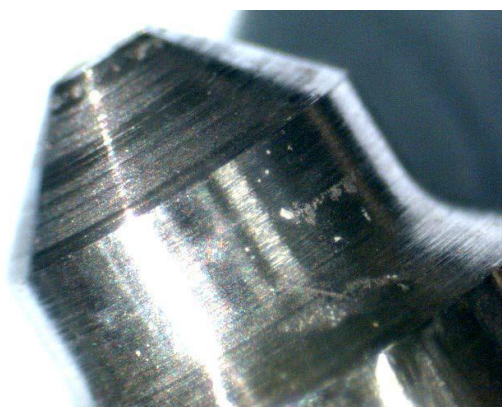


圖 5.6. 空心活塞閥的放大圖
(進行高硫柴油測試前)

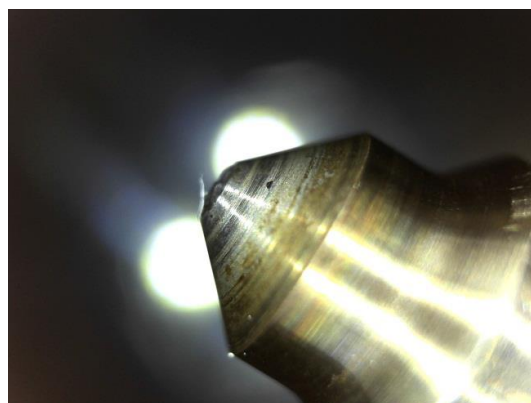


圖 5.7. 空心活塞閥的放大圖
(進行高硫柴油測試後)



圖 5.8. 燃油泵柱塞的放大圖
(進行高硫柴油測試前)

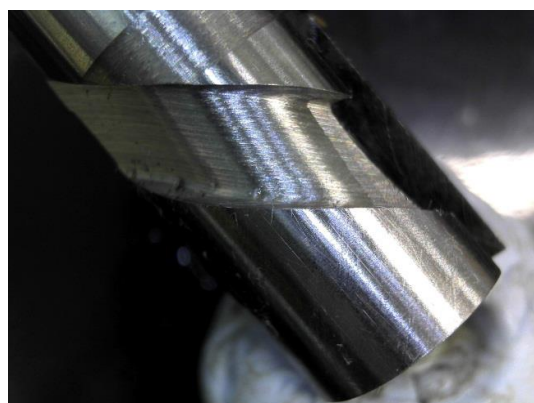


圖 5.9. 燃油泵柱塞的放大圖
(進行高硫柴油測試後)



圖 5.10. 燃油泵輸送的放大圖
(進行高硫柴油測試前)

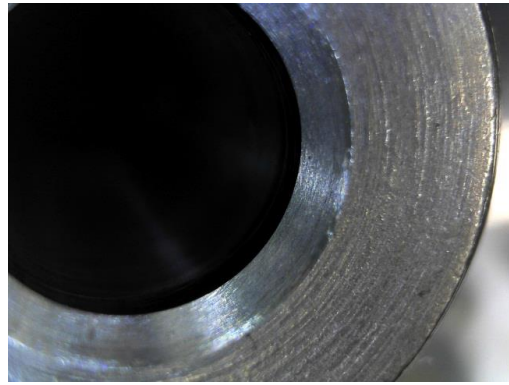


圖 5.11. 燃油泵輸送的放大圖
(進行高硫柴油測試後)

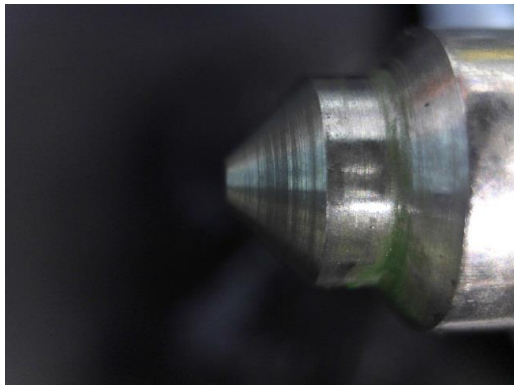


圖 5.12. 空心活塞閥的放大圖
(進行低硫柴油測試前)



圖 5.13. 空心活塞閥的放大圖
(進行低硫柴油測試後)

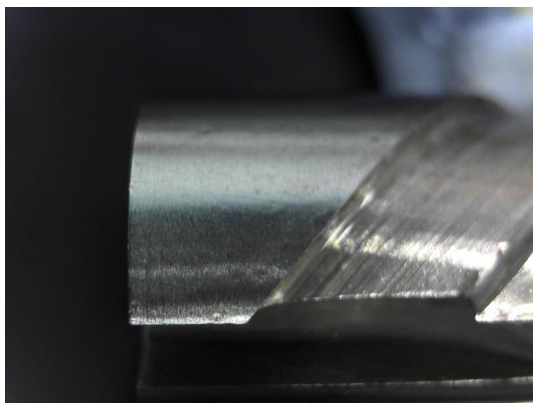


圖 5.14. 燃油泵柱塞的放大圖
(進行低硫柴油測試前)

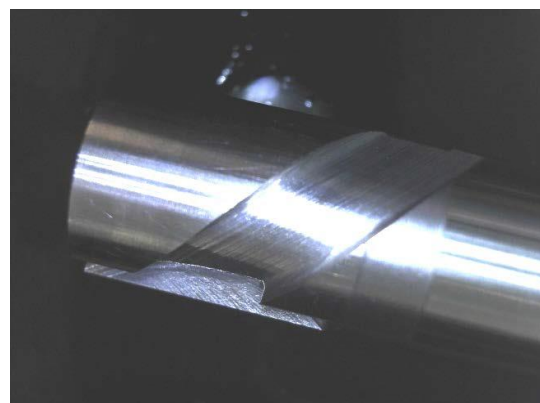


圖 5.15. 燃油泵柱塞的放大圖
(進行低硫柴油測試後)

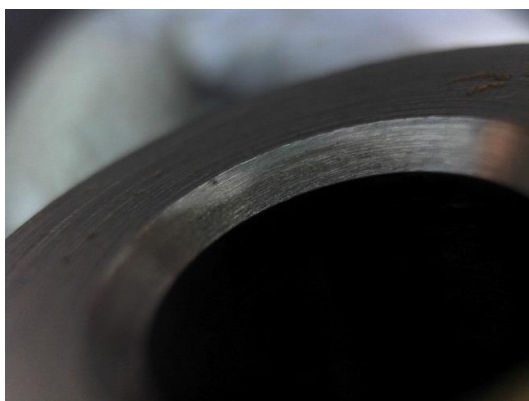


圖 5.16. 燃油泵輸送的放大圖
(進行低硫柴油測試前)

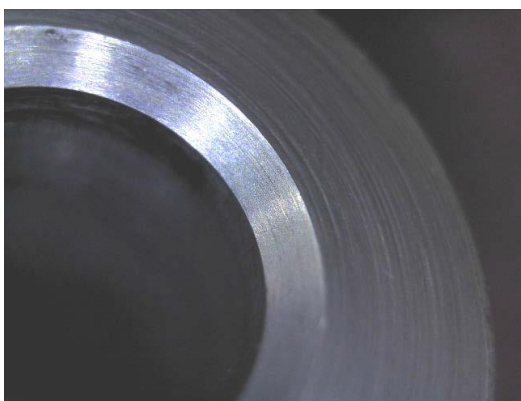


圖 5.17. 燃油泵輸送的放大圖(進
行低硫柴油測試後)

6. 康明斯發動機測試結果及討論

6.1 柴油分析

每個批次高硫柴油及低硫柴油的物理特性(按照證明書上的測試日期排列)分別撮述於表 6.1 及表 6.2。其顯示高硫柴油的含硫量由 0.057%到 0.455%不等。部份批次的含硫量更遠低於特定規格。這是由於燃料供應情況，是一不可控制的因素。無論如何，後期將指出高硫柴油在性能測試中的含硫量經常比低硫柴油高出 10 倍 (高硫柴油和歐盟 V 期柴油混合比例為 1:10)。然而，表 6.1 和表 6.2 顯示的高硫柴油和歐盟 V 期柴油 (EVD) 燃料屬性，分別符合中石化及香港特區政府的規格。

表 6.1. 高硫柴油的特性

測試參數	測試方法或 等效方法	9-11-12	6-12-12	11-12-12
在 15°C 的密度 (千克/公 升)	ASTMD4052	0.8563	0.8497	0.8515
含硫量(% wt.)	ASTMD4294	0.455	0.298	0.196
十六烷指數	ASTMD4737	50.58	52.8	52.2
潤滑性, 在 60°C 的校正 磨痕直徑(wsd1.4) (μ m)	ENISO12156- 1:2006 HFRR	不適用	不適用	不適用
測試參數	17-12-12	19-12-12	9-1-13	
在 15°C 的密度 (千克/公 升)	0.8477	0.8540	0.8540	
含硫量(% wt.)	0.057	0.116	0.238	
十六烷指數	52.3	50.4	48.4	
潤滑性, 在 60°C 的校正 磨痕直徑(wsd1.4) (μ m)	不適用	不適用	不適用	

表 6.2. 歐盟 V 期柴油的特性

測試參數	測試方法或等效方法	30-10-12	13-11-12	25-12-12
在 15°C 的密度 (千克/公升)	ASTMD4052	0.8250	0.8255	0.8361
含硫量 (ppm wt.)	ASTMD4294	3.8	7.5	7.7
十六烷指數	ASTMD4737	54.0	55.8	54.4
潤滑性, 在 60°C 的校正磨痕直徑(wsd1.4) (μ m)	ENISO12156-1:2006 HFRR	<400	<350	<420

測試參數	31-12-12	15-1-13
在 15°C 的密度 (千克/公升)	0.8253	0.8266
含硫量 (ppm wt.)	4.2	7.5
十六烷指數	54.9	54.2
潤滑性, 在 60°C 的校正磨痕直徑(wsd1.4) (μ m)	<420	<460

兩種測試用燃料 (高硫柴油及低硫柴油) 的物理特性亦送交獨立化驗所進行複檢。兩種燃料的測試結果 (按報告日期排列) 分別撮述於表 6.3 及表 6.4。測試結果顯示, 低硫柴油的特性符合香港特區政府建議的低硫柴油規格。在兩項分析中, 高硫柴油及低硫柴油的淨熱值差別百分比分別為 -1.5% 和 -2.2% 及平均值為 -1.8%。

表 6.3. 高硫柴油的測試參數

測試參數	測試方法或等效方法	規格	24-12-12	6-2-13
淨熱值 (千焦耳/公升)	ASTMD240	不適用	36,325	36,485
密度(千克/公升)	ASTMD4052	0.82-0.87	0.8543	0.8569
含硫量(% wt.)	ASTMD4294	最高 0.5%	0.455	0.170
十六烷指數	ASTMD4737	最低 48	49.7	50.5
潤滑性, 在 60°C 的校正磨痕直徑(wsd1.4) (μ m)	ENISO12156-1:2006 HFRR	不適用	369	349

表 6.4. 低硫柴油的測試參數

測試參數	測試方法或 等效方法	規格	24-12-12	6-2-13
淨熱值(千焦耳/公升) (與高硫柴油的淨熱值差 別百分比)	ASTMD240	不適用	35,790 (-1.5%)	35,685 (-2.2%)
密度(千克/公升)	ASTMD4052	0.82-0.86	0.8320	0.8274
含硫量(% wt.)	ASTMD4294	最高 0.05%	0.0434	0.0165
十六烷指數	ASTMD4737	最低 48	55.7	54.3
潤滑性, 在 60°C 的校正磨 痕直徑(wsd1.4) (μ m)	ENISO12156- 1:2006 HFRR	最高 460	384	349

正如在 5.1 和表 5.5 所示，從燃料供應商獲得的品質證明書數據能夠代表燃料參數，尤其是於上述香港通用公證行有限公司的測試期間。

6.2 性能測試

(c) 最大發動機功率

表 6.5 列出最大功率輸出在使用低硫柴油及高硫柴油時的變化：最大功率的變化幅度由+0.7%至-0.1%不等，整體平均值為+0.4%。如表 6.6 所示，不同批次高、低硫柴油的整體淨熱值的相差百分比為-1.8%。結果指出，燃料的淨熱值小幅減少，同時低硫柴油最大功率亦會小幅增加。

表 6.5. 最大功率輸出量測試結果 - 低硫柴油與高硫柴油相比

最大功率 輸出量	基準 1	200 小時後 (高硫柴油 耐用性測試)	基準 2	200 小時後 (高硫柴油 耐用性測試)	整體 平均值
高硫柴油 (千瓦)	300.7	301.2	290.2	292.6	296.4
低硫柴油 (千瓦)	302.7	303.0	289.9	293.2	297.5
相差百分比	+0.7%	+0.6%	-0.1%	+0.2%	+0.4%

表 6.6. 低硫柴油與高硫柴油熱值的比較

	高硫柴油	低硫柴油	相差百分比
平均熱值(千焦耳/公升)	36,405	35,738	-1.8%

(d) 單位燃油消耗量

測試包括六種發動機負載情況(例如 100%、85%、75%、50%、25%負載量)及 83%至 87%的功率週期變化。在此，100%負載量是指發電機輸出值約 196 千瓦，即生產商的額定功率數值 (261 千瓦@1800rpm) 並減去在用發動機老化所導致的功率效能下降的估計值 (額定發動機功率的 20%)。表 6.7 比較低硫柴油及高硫柴油在以下三個不同負載情況下的單位燃油消耗量：基準、在完成 200 小時高硫柴油耐用性測試後但沒有更換發動機機油、以及完成 200 小時高硫柴油耐用性測試並已更換發動機機油後。200 小時低硫柴油耐用性測試的相應結果則列於表 6.8。整組單位燃油消耗量的測定資料載於附錄 VII，以供參考。資料顯示高硫柴油及低硫柴油測試所得的單位燃油消耗量數據相當正常，屬發動機手冊提供的範圍以內。

測試結果同時顯示，單位燃油消耗量的差異並沒有因為更換機油而出現明顯變化，反映更換機油對發動機運行 200 小時後的單位燃油消耗量沒有重大影響。故此，其後的分析結果採用了兩者的平均值。表 6.7 顯示，在高硫柴油耐用性測試之前 (基準 1) 和之後，低硫柴油於不同負載情況下的平均單位燃油消耗量由 +1.0%至 +1.6%不等，整體平均值為 +1.3%。同時，表 6.8 顯示，在低硫柴油耐用性測試之前 (基準 2) 和之後，低硫柴油於不同負載情況下的平均單位燃油消耗量由 +1.3% 至 +1.6% 不等，整體平均值為 +1.4%。如比較表 6.7 及表 6.8，可見低硫柴油平均單位燃油消耗量的上升比率輕微增加，符合上文提及低硫柴油與高硫柴油淨熱值差額擴大的情況(由 1.3% 增至 1.4%) (見表6.6)。

注意: 由於本地海上貿易以公升為入油基礎，上述淨熱值和單位燃油消耗量的討論是以體積為量度單位。如果入油是以重量計算，情況會扭轉。相對於高硫柴油，低硫柴油的淨熱值 (千焦耳/公斤) 會稍高，而單位燃油消耗量 (克/千瓦) 則較少。

表 6.7. 高硫柴油耐用性測試之前和之後的單位燃油消耗量結果比較(低硫柴油與高硫柴油相比)

發動機負載情況	基準 1	200 小時後	200 小時後 (有更換機油)	平均值
100% (低硫柴油與高硫柴油相比)	+1.0%	+1.2%	+0.8%	+1.0%
85% (低硫柴油與高硫柴油相比)	+1.6%	+1.5%	+1.6%	+1.6%
75% (低硫柴油與高硫柴油相比)	+1.6%	+1.4%	+1.5%	+1.5%
50% (低硫柴油與高硫柴油相比)	+1.2%	+1.3%	+1.3%	+1.3%
25% (低硫柴油與高硫柴油相比)	+1.4%	+1.3%	+1.1%	+1.3%
浮動負載(負載量 83%至 87%) (低硫柴油與高硫柴油相比)	+1.4%	+1.5%	+1.2%	+1.3%
整體平均值：				+1.3%

表 6.8. 低硫柴油耐用性測試之前和之後的單位燃油消耗量結果比較(低硫柴油與高硫柴油相比)

發動機負載情況	基準 2	200 小時後	200 小時後 (有更換機油)	平均值
100% (低硫柴油與高硫柴油相比)	+1.4%	+1.7%	+1.7%	+1.5%
85% (低硫柴油與高硫柴油相比)	+1.2%	+2.0%	+1.9%	+1.6%
75% (低硫柴油與高硫柴油相比)	+0.8%	+2.1%	+1.9%	+1.4%
50% (低硫柴油與高硫柴油相比)	+1.0%	+2.1%	+1.9%	+1.5%
25% (低硫柴油與高硫柴油相比)	+0.9%	+1.6%	+1.9%	+1.4%
浮動負載(負載量 83%至 87%) (低硫柴油與高硫柴油相比)	+1.2%	+1.4%	+1.5%	+1.3%
整體平均值：				+1.4%

6.3 耐用性測試

(a) 基本操作資料

每小時發動機運行數據，包括功率輸出、冷卻水溫度、入氣及排氣的溫度等均被記錄，以監察發動機的運行情況。結果表明，測試發動機在 200 小時的耐久性試驗中運作正常。表 6.9 列出耐用性測試的操作數據及機油耗用量。康明斯發動機能完成 200 小時的性能而無須補充燃油。這是與吉拿發動機不同之處(見表 5.10)。根據發動機油錶標示，發動機的高硫柴油消耗較低硫柴油為高，而兩種燃油在測試中均不用補充燃油。

表 6.9. 耐用性測試基本資料

測試參數	高硫柴油	低硫柴油
測試期	2012/12/12~ 2012/12/25	2013/01/08~ 2013/01/23
總運行時數	200	200
固定發動機輸出（千瓦）	186	186

於二零一三年一月十九日，當康明斯發動機使用低硫柴油運行 163 小時後曾出現故障，發現燃料計量泵失靈。於二零一三年一月二十一日檢查相關部件，燃料計量泵被拆除後，發現所有計量泵的活塞被一層蠟質卡住，懷疑這是燃料質量問題引至。這層蠟質應該來自燃料中的雜質，但可用稀釋劑輕易清除。從表面觀察，沒有因燃料的潤滑性能不足而導致相關部件有任何磨損或撕裂的跡象。清潔乾淨活塞和重新安裝在康明斯發動機後，確認計量泵重新正常運作，發動機的輸出功率和燃油消耗都沒有出現異常，耐用性測試於二零一三年一月二十一日下午四時左右恢復。一些使用相同燃料供應商的公司，也發生類似的事件。

由於沒有主要部份須作修復或更替(除橡膠密封件和墊圈外)，計量泵在事後和耐久性試驗結束後(即完成餘下 37 小時的運行和兩組性能測試後)的測試結果都是正常，沒有顯著的性能偏移。掃描電子顯微鏡和低功率電子顯微鏡檢查也顯示，泵的金屬表面沒有異常磨損、損壞或外觀上的變化(見第 6.6 節)。

基於上述結果，可以總結今次為個別事件，燃料雜質中的蠟並沒有對計量泵或燃料系統中的主要組件造成損害。

(b) 燃油噴射器測試

表 6.10、6.11 是完成高、低硫柴油耐用性測試後燃油噴射器的測試結果。有關測試旨在顯示噴射器輸送及霧化燃油時的狀況。測試結果顯示，各噴

射器的起始壓力均符合這規定，亦即是說，兩個耐用性測試中燃油輸送正常。是次測試的目的為檢測燃料噴射器狀態和燃料霧化情況。無論是高硫或低硫柴油，全部 6 個噴射器的噴灑霧化模式均屬理想。這結果符合：(1) 泵柱塞及噴咀在掃描電子顯微鏡及低功率電子顯微鏡下的觀察結果；及(2) 表 6.3 及表 6.4 顯示燃油潤滑性遠低於 460 微米。

表 6.10. 燃油噴射器測試（高硫柴油耐用性測試）

噴射器#	起始壓力是否符合操作限制？	噴咀霧化模式
噴射器 1	是	正常
噴射器 2	是	正常
噴射器 3	是	正常
噴射器 4	是	正常
噴射器 5	是	正常
噴射器 6	是	正常

表 6.11. 燃油噴射器測試（低硫柴油耐用性測試）

噴射器#	起始壓力是否符合操作限制？	噴咀霧化模式
噴射器 1	是	正常
噴射器 2	是	正常
噴射器 3	是	正常
噴射器 4	是	正常
噴射器 5	是	正常
噴射器 6	是	正常

(c) 燃油噴射泵測試

燃油噴射泵在高、低硫柴油耐用性測試之前和後均經過測試，測試報告見附錄 VII。最高燃油設定測試及噴射泵在每分鐘轉動速 200 衝程下的燃油輸送量，均以標準測試設備量度，再以肉眼觀察及人手記錄。測試結果的誤差為 $\pm 3\%$ ，可視作並未超出測試設備不確定性與人為錯誤的綜合誤差區間。由此可見，燃油噴射泵在完成高、低硫柴油耐用性測試後對部件並無大影響。這結果符合：(1) 泵柱塞及噴咀在掃描電子顯微鏡及低功率電子顯微鏡下的觀察結果（見第 6.5 段）；及(2) 表 6.3 及表 6.4 顯示燃油潤滑性遠低於 460 微米。

6.4. 發動機潤滑油分析

在耐用性測試期間的0、100和200小時，分別抽取了機油樣本，以進行化學分析。「0小時」表示耐用性測試剛開始時發動機內的機油狀態。機油分析由Signum進行。表6.12和表6.13分別顯示在高硫柴油和低硫柴油耐用性測試中，於測試開始後的0、100和200小時進行的機油分析結果，報告全文載於附錄VII。根據分析結果得出以下幾點：

(a) 黏性

從表中可見，黏性在200小時的耐用性測試中有所增加，高硫柴油和低硫柴油的黏性增幅分別是2.7% 及1.3%。換句話說，低硫柴油的黏性增幅大約是高硫柴油一半。

(b) 總鹼值

在200小時的測試期間，高硫柴油的總鹼值錄得相當大的跌幅(7.1%)，但低硫柴油的總鹼值只微降1.8%。高硫柴油和低硫柴油的200小時總鹼值仍屬正常範圍之內。據該機油製造商表示，當總鹼值下跌至低於原來數值的一半，機油便須更換。由於低硫柴油的總鹼值耗損率並不存在，可減少更換機油的次數。不過，低硫柴油的總鹼值耗損率能否降低，仍須取決於可能在200小時後出現的機油黏性耗損率。有一觀點認為，200小時的黏性變化有利於進一步支持低硫柴油優勢。在任何情況下，目前200小時的測試均未能對此觀點作出結論。

(c) 金屬元素分析

由於發動機磨損，機油在 200 小時測試期間的金屬濃度普遍增加。從表 6.12 和表 6.13 可見，除了高硫柴油的鐵濃度較高外，高硫柴油和低硫柴油因磨損而產生的遞增金屬濃度大致相若。我們亦注意到，在高硫柴油耐用性測試開始後的 0 小時，機油樣本中發現若干金屬，這可能是在耐用性測試開始前首次更換機油後留下的殘餘金屬。

(d) 與吉拿發動機測試結果比較

相對於表 5.13/5.14 所列的吉拿發動機的機油分析，康明斯發動機於表 6.12/6.13 的機油分析顯示，康明斯發動機的機油質量較好，即使在 200 小時後，黏性上升、總鹼值消耗和組件磨損都較吉拿發動機少(除鐵外)，這與 5.3 節同樣可解釋為，含硫量低的柴油所產生的二氧化硫/硫酸較少。基於 5.1 節和 6.1 節的柴油分析，高硫和低硫柴油的平均含硫量在 200 小時後（發動機油的分析測定時）的比重如下：

吉拿高硫柴油: 0.41% (正常: 標準含硫量上限 0.5%)

吉拿低硫柴油: 0.04%

康明斯高硫柴油: 0.17% (異常地低: 由於 2012 年 12 月含硫量較低的批次)

康明斯低硫柴油: 0.01%

表 6.12. Mobil Delvac MX 15W40 機油的典型特性(高硫柴油耐用性測試)

測試參數	規格	0小時	100小時	200小時	變化 (200 - 0小時)
黏性，在 100°C 下的 cST	15.5	14.9	14.7	15.3	+0.4
總鹼值(毫克 KOH/克)	10	11.2	10.7	10.4	-0.8
磨損金屬元素 (ppm)：少於 2 ppm 的銀、鋁、鉻、鎳和錫並無顯示出來					
銅	0	1	3	5	+4
鐵	0	3	17	27	+24
鉬	0	35	39	38	+3
鉛	0	0	0	2	+2

表 6.13. Mobil Delvac MX 15W40 機油的典型特性(低硫柴油耐用性測試)

測試參數	規格	0小時	100小時	200小時	變化(200 - 0小時)
黏性，在 100°C 下的 cSt	15.5	15.0	14.8	15.2	+0.2
總鹼值(毫克 KOH/克)	10	11.4	11.5	11.6	+0.2
磨損金屬元素 (ppm)：少於 2ppm 的銀、鋁、鉻、鎳和錫並無顯示出來					
銅	0	0	1	2	+2
鐵	0	2	12	18	+16
鉬	0	35	38	37	+2
鉛	0	0	0	1	+1

6.5. 掃描電子顯微鏡檢查

發動機噴射器部件包括噴咀、空心活塞閥和柱塞，全部在進行耐性測試前接受掃描電子顯微鏡檢查，以此影像作為基準。然後在進行兩次耐性測試後，從噴射器和燃油輸送泵拆出來相同部件再接受檢查。

康明斯輸油系統的噴射器組件和燃油輸送泵元件分別載於圖6.1和圖6.2。

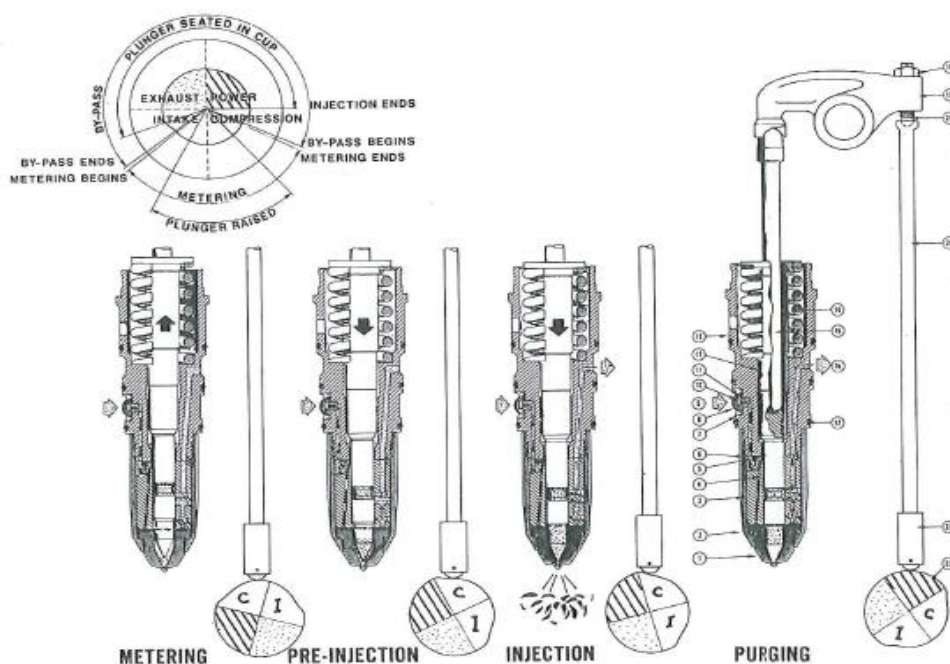


Figure 9-8
Sequence of Events in Injecting Fuel.
(Courtesy of Cummins Engine Co.)

Index:

- 1—Cup
- 2—Cup retainer
- 3—Barrel
- 4—Plunger
- 5—Check ball
- 6—Gasket
- 7—Clip
- 8—Screen

- 9—Fuel in
- 10—Orifice
- 11—Orifice gasket
- 12—Coupling
- 13—Adapter
- 14—Spring
- 15—Link
- 16—Fuel out

- 17—O ring
- 18—Nut
- 19—Rocker lever
- 20—Adjusting screw
- 21—Push rod
- 22—Tappet
- 23—Camshaft lobe

圖6.1 康明斯輸油系統的噴射器組件

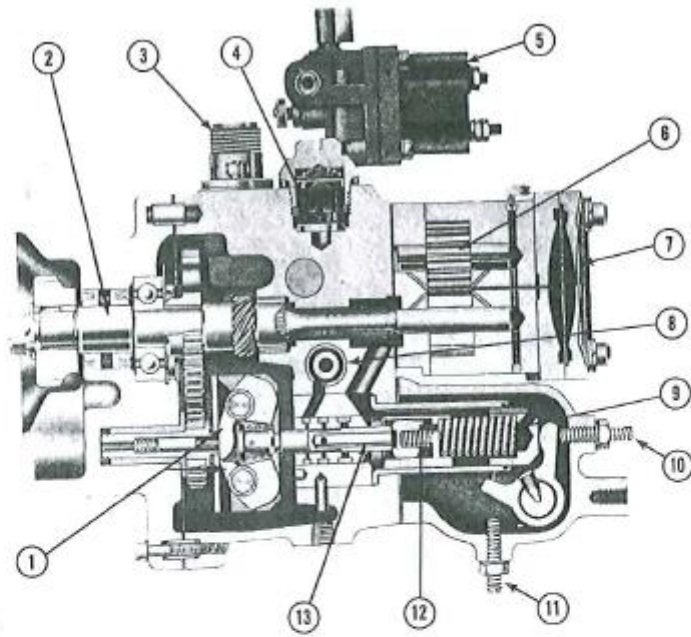


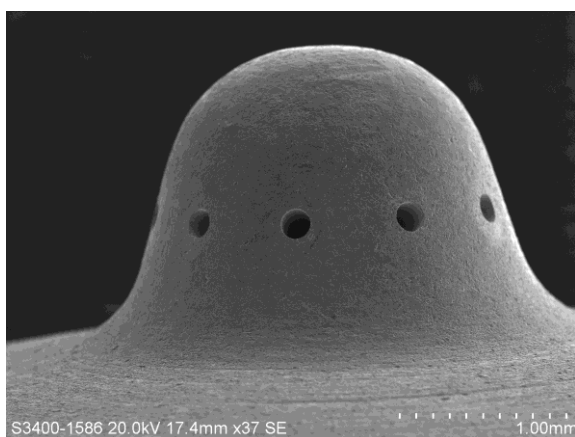
Figure 9-1
PT (Type G) Fuel Pump Cross Section.
(Courtesy of Cummins Engine Co.)

Index:

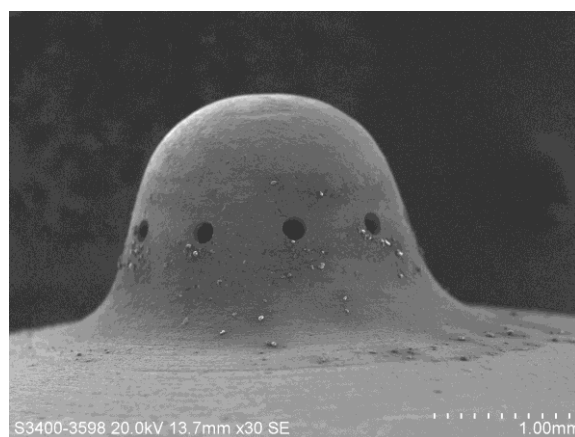
- | | |
|-------------------------|----------------------------------|
| 1—Governor weights | 8—Throttle shaft |
| 2—Main shaft | 9—Governor spring |
| 3—Tachometer connection | 10—Idle speed adjusting screw |
| 4—Filter screen | 11—Maximum speed adjusting screw |
| 5—Shut-down valve | 12—Idle spring |
| 6—Gear pump | 13—Governor plunger |
| 7—Pulsation damper | |

圖6.2 康明斯輸油系統的燃油輸送泵元件

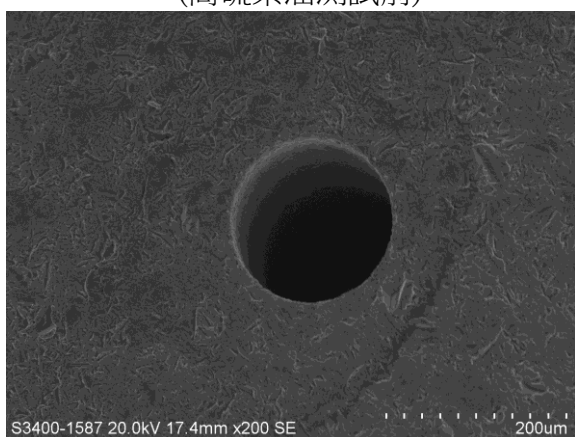
這項目採用日立S3400N VP掃描電子顯微鏡檢查了噴咀，照片6.1至6.5提供一些高硫柴油耐用性測試的樣本照片影像。而整套已拍攝的照片可於以下網頁下載：www.hktscl.com.hk/Temp/Microscope.rar。從這些照片可見，噴咀的形狀和大小在進行200小時的高硫柴油和低硫柴油耐用性測試後均保持不變。高硫柴油和低硫柴油的噴咀內發現了一些沉積物，經鑑定後證實大部分是碳和氧(照片6.5)，可能來自沉積於噴咀內的未燃燒燃油元素。總括來說，根據掃描電子顯微鏡觀測所得，在使用高硫柴油和低硫柴油後均沒有發現發動機部件出現異常情況及明顯磨損。



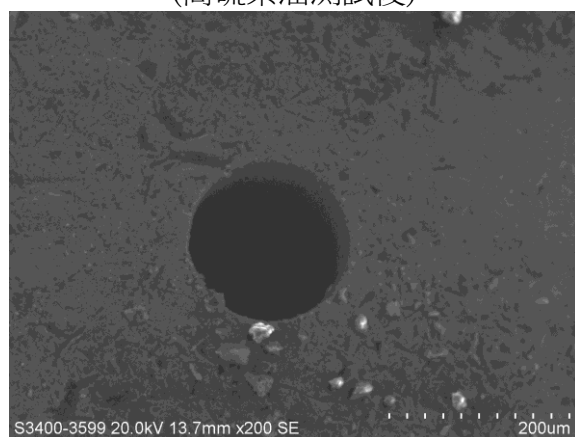
照片 6.1 噴射器噴咀孔的影像
(高硫柴油測試前)



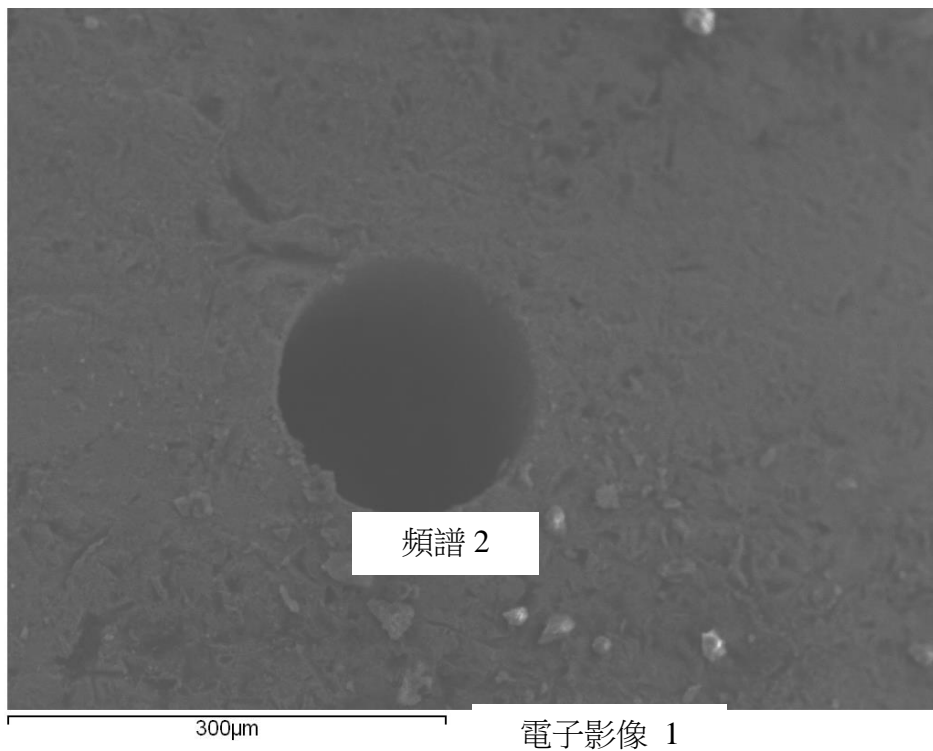
照片 6.2 噴射器噴咀孔的影像
(高硫柴油測試後)



照片 6.3 噴射器噴咀孔的放大圖像
(高硫柴油測試前)

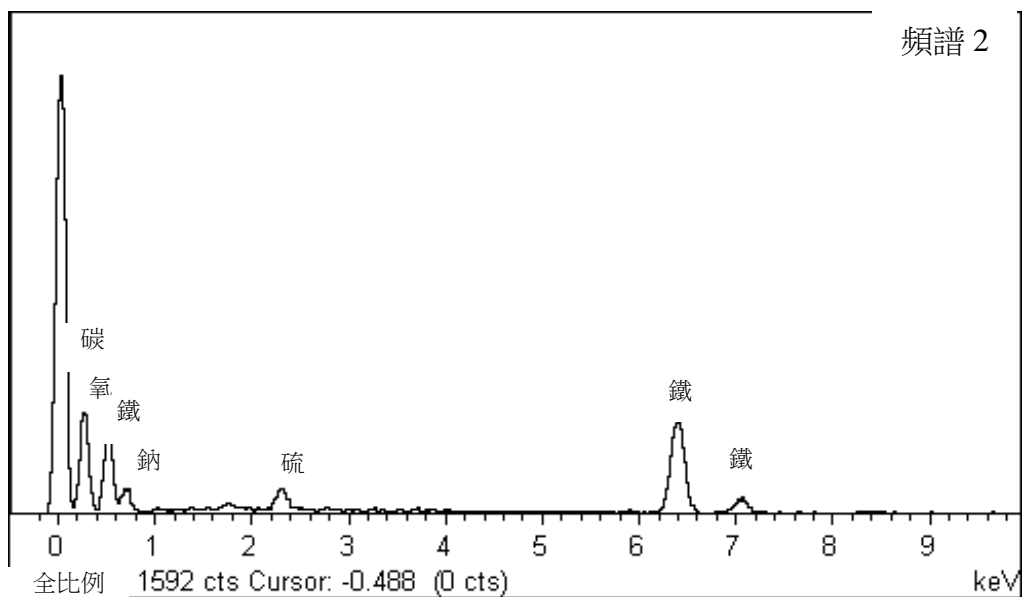


照片 6.4 噴射器噴咀孔的放大圖像
(高硫柴油測試後)



元素	近似濃度	強度校正值	重量%	重量% Sigma	原子%
碳鉀	34.94	0.7023	41.17	1.12	58.30
氧鉀	26.73	0.7160	30.87	0.96	32.82
鈉鉀	1.80	0.9248	1.61	0.14	0.85
硫鉀	27.05	0.8491	26.35	0.70	8.03

照片 6.5 200小時高硫柴油的耐用性測試後噴射器的噴咀孔內物質的元素分析



6.6 低功率電子顯微鏡檢查

本測試同時使用低功率電子顯微鏡觀察柴油輸送泵柱塞和噴射器柱塞的磨損情況，並比較分別使用高硫柴油和低硫柴油後柱塞的表面光潔度之改變。圖6.6至6.11為噴射器內的空心活塞閥、噴射器柱塞和燃油輸送泵內組件的部分高硫柴油耐用性照片，而圖6.12至6.17則顯示使用低硫柴油後的相同組件。有關康明斯的噴射器柱塞和燃油輸送泵柱塞的全套照片，可參見以下網址：www.hktscl.com.hk/Temp/Microscope.rar。從該等照片可見，所檢查組件的表面光潔度在進行高硫柴油和低硫柴油的耐用性測試前和後，並無任何顯著改變。



圖 6.6. 空心活塞閥的放大圖
(進行高硫柴油測試前)



圖 6.7. 空心活塞閥的放大圖
(完成進行高硫柴油測試後)



圖 6.8. 燃油泵柱塞的放大圖
(進行高硫柴油測試前)

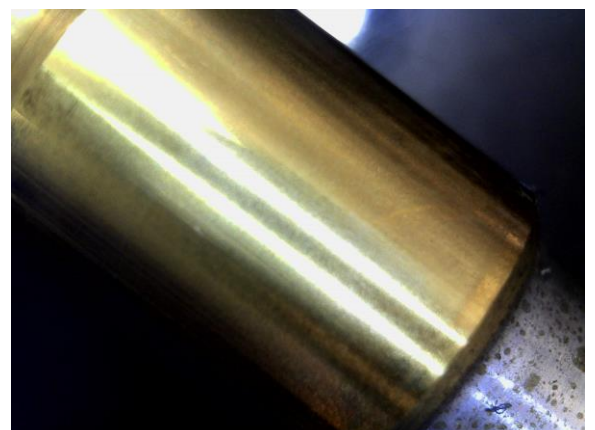


圖 6.9. 燃油泵柱塞的放大圖
(完成進行高硫柴油測試後)



圖 6.10. 燃油泵輸送的放大圖
(進行高硫柴油測試前)

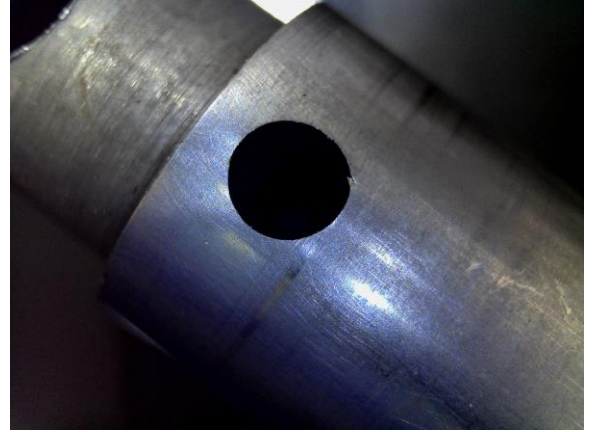


圖 6.11. 燃油泵輸送的放大圖
(完成進行高硫柴油測試後)

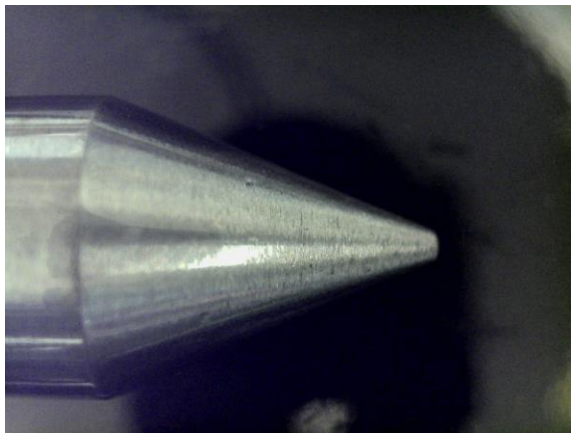


圖 6.12. 空心活塞閥的放大圖
(進行低硫柴油測試前)

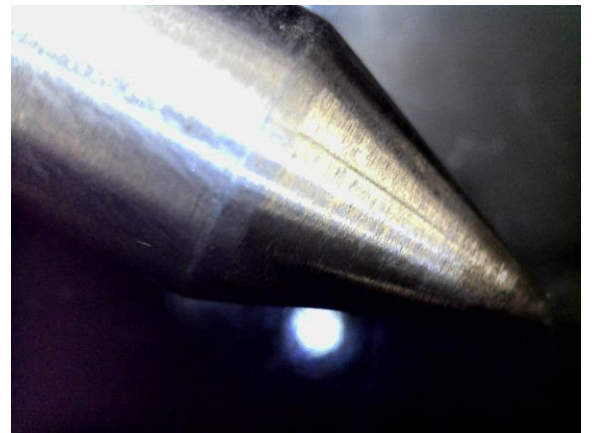


圖 6.13. 空心活塞閥的放大圖
(完成進行低硫柴油測試後)

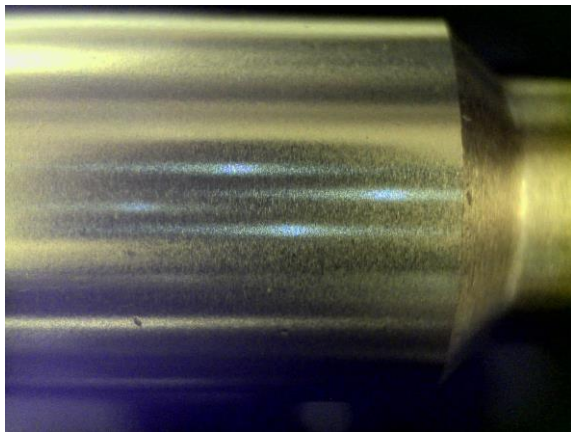


圖 6.14. 燃油泵柱塞的放大圖
(進行低硫柴油測試前)

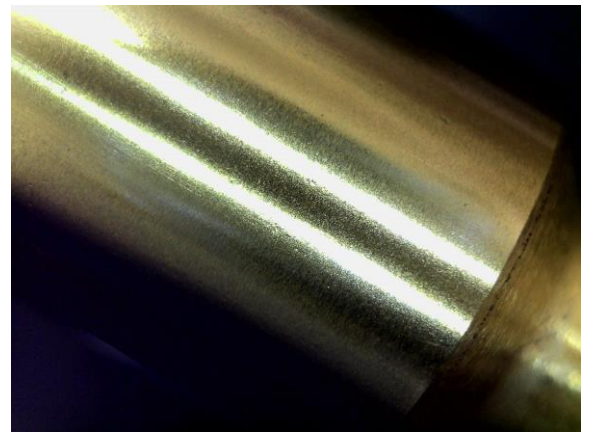


圖 6.15. 燃油泵柱塞的放大圖
(完成進行低硫柴油測試後)



圖 6.16. 燃油泵輸送的放大圖
(進行低硫柴油測試前)

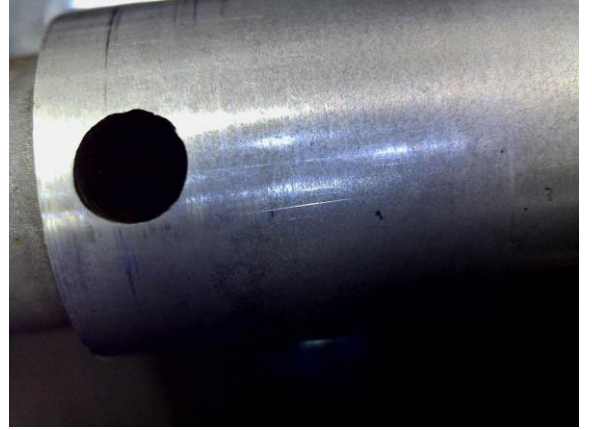


圖 6.17. 燃油泵輸送的放大圖
(完成進行低硫柴油測試後)

7. 誤差分析

實驗室實驗涉及測量物理質量，而物理質量的測量必然會和不可避免地出現誤差，其測量值和實際值之間的差異可來自不同方面。無論在小心測量或測量儀器有多精準情況下，誤差亦不能完全被消除，但通過細心和精心策劃的測量方法，能減少誤差的幅度。

7.1 誤差類型

測量過程中有三種誤差：人為的，系統的和隨機的。

人為誤差可能來自在閱讀儀器，記錄觀測，或計算中的個人偏見或疏忽。在本次研究中使用了四種測量儀器：一個電流和一個電壓傳感器來測量發電機輸出的電流和電壓，一個能量記錄儀和一個液體流量計測量燃料流速。電流和電壓傳感器的輸出連接到能量記錄儀，而流量計的信號被連接到薄型電腦。由於在此研究中，所有的測量儀器之輸出是用電腦或記錄器所記錄的實際數字，所以並不涉及閱讀上和人為的誤差。

系統誤差與特定的儀器或技術有關。不正確地校準儀器是誤差來源之一。即使所有用於記錄結果的儀器已校準，但儀器仍會具有工具性的誤差，這通常顯示在儀器的規格上。

隨機誤差的存在，是實驗中未知的和不可預測的變化所導致的。不可預測的溫度或線路電壓的波動便是隨機誤差的實例(亦稱為偶然誤差)。由於上述的不可預測的變化或波動，通常發生在一個短的時間內，只要通過足夠的重複測量次數，或通過改善實驗技術，隨機誤差可被減少。在這項研究中，功率和燃料流速的測量被重複一定的次數，從而減少隨機誤差。

7.2 不確定性評估

測量的不確定性是指測量數值與實際數值的差距，即測量數值的準確性。此研究估計其測量的不確定程度，將顯示如下。

下表顯示了在研究中使用的所有相關儀器設備的準確度：

儀器	型號	準確度
功率記錄器	Fluke power logger 1735	固定±0.7%; 運作±1.5%
電流傳感器	Fluke power logger 1735	±2% (估計)
電壓傳感器	Fluke power logger 1735	±2% (估計)
燃料流速傳感器	Oval M-III LSF45L0-R1	±1%

燃油消耗率(SFC) 之測定:

燃油消耗率= 燃料用量/ 功率

使用燃料流速傳感器時每個燃料流速數據評定有±1%的誤差

重複的測量以及平均測量數值，可以提高準確性，而多次重複的測量(n)可將誤差確定為^{2,3}:

每一次測量誤差/ \sqrt{n}

每個燃料流速讀數為180個數據的平均值，所以每個燃料流速測量的誤差= $\pm 1\% / \sqrt{n} = \pm 1\% / \sqrt{180} = \pm 0.07\%$

每個功率測量的誤差=電流傳感器的誤差+電壓傳感器的誤差+功率記錄儀的誤差
= 2% + 2% + 0.7% + 1.5% = 6.2%

為了確定發動機的最大功率，測試記錄兩至三個瞬時測量值。在採用兩次最差的測量情況下，最大功率之誤差= $(\pm 6.2\%) / \sqrt{2} = \pm 4.4\%$ 。

在100%功率情況下測定之燃油消耗率(SFC) 採用了40個數據，而在測量可變功率時（87%~83%負載）則採用了20個數據。因此，在最壞之不確定程度評估所取得的20個數據量，燃油消耗率(SFC)的評定誤差= $\pm 6.2\% / \sqrt{20} = \pm 1.39\%$ (or $\pm 1.4\%$)。

由於除法運算中的誤差 $A/B = \text{誤差}A + \text{誤差} B$ ，因此，在每個燃油消耗率(SFC)

的測量誤差 = $\pm (0.07\% + 1.39\%) = \pm 1.46\%$ 。

由於在此報告中燃油消耗率(SFC) 採用了3個讀數的平均值，所以燃油消耗率(SFC)平均值的誤差 = $\pm 1.46\%/\sqrt{3} = \pm 0.84\%$ 。

燃油消耗率(SFC)低硫柴油相對於高硫柴油變化誤差的計算公式為:

燃油消耗率(SFC)的變化百份比 = $(SFC_{LSD} - SFC_{HSD})/SFC_{HSD} \times 100\% = [(SFC_{LSD})/SFC_{HSD} - 1] \times 100\%$

因此，SFC百份比變化之誤差 = $\pm (0.84 + 0.84\%) = \pm 1.7\%$ 。

8. 結語

(a) 當使用低硫柴油時，吉拿和康明斯發動機的最大輸出功率與使用高硫柴油時相近。吉拿發動機有輕微的下降（由+0.1%至-5%，平均為 -1.8%）而康明斯發動機則有輕微增加（由-0.1%至+0.7%，平均為 +0.4%）。然而，這些微少的變化微不足道，在實際操作過程中不會輕易被察覺到。

(b) 在穩定負載情況下，低硫柴油的燃油消耗率都比高硫柴油輕微增加，吉拿發動機和康明斯發動機的變化幅度分別為+1.1%（由-1.3% 至 +2.9%）和+1.4%（由+0.8% 至 +2.1%），這結果符合低硫柴油的淨熱值相對較低。

(c) 在進行功率週期變化的過程中，低硫柴油的燃油消耗率比高硫柴油有輕微的增加，吉拿發動機和康明斯發動機的燃油消耗率的變化幅度分別為+1.4%（由+0.8% 至 +3.0%）和 +1.3%（由+1.2% 至 +1.5%）。

(d) 最大功率測試和燃油消耗率的估計誤差值分別是±4.4%和±1.7%，這顯示測試在準確度高的情況下進行。

(e) 吉拿和康明斯發動機完成 200 小時耐用性試驗後，燃油噴射器和燃油泵內的相關零件都已進行掃描式和低功率電子顯微鏡分析，結果顯示使用兩種柴油都沒有造成不正常的磨損。

(f) 機油特性化驗分析結果表明由高硫柴油切換到低硫柴油後可以獲得以下潛在效益：機油總鹼值下降速度較慢和黏性上升速度減少，但金屬元素卻沒有顯著的變化。

(g) 吉拿發動機使用低硫柴油後顯示機油消耗量有減少的趨勢，但康明斯發動機測試結果卻沒有明顯的變化。

(h) 從機油消耗量和機油化學分析等所得到的觀察結果，符合美國環保局⁴聲稱轉用低硫柴油比使用高硫柴油可以獲得的好處。

參考文件

1. 梁耀彰、鄭永權 (2012)。在實驗室環境下輪船用發動機測試中期報告。香港大學 2012 年 12 月 5 日
2. 實驗數據分析師文檔第 3 章 - 實驗誤差及誤差分析
<http://Reference.wolfram.com/applications/eda/ExperimentalErrorsAndErrorAnalysis.html>
3. 美國田納西大學。實驗誤差和數據分析
<http://www.utc.edu/Faculty/Harold-Climer/oldlaberr.html>
4. 美國國家環境保護局 (2001) 非道路柴油發動機及燃油方案摘要 P.45 http://www.walshcarlines.com/pdf/control_of_emissions_of.d2f.pdf，及檔案編號:II-A-194; 文件: A-2001-28