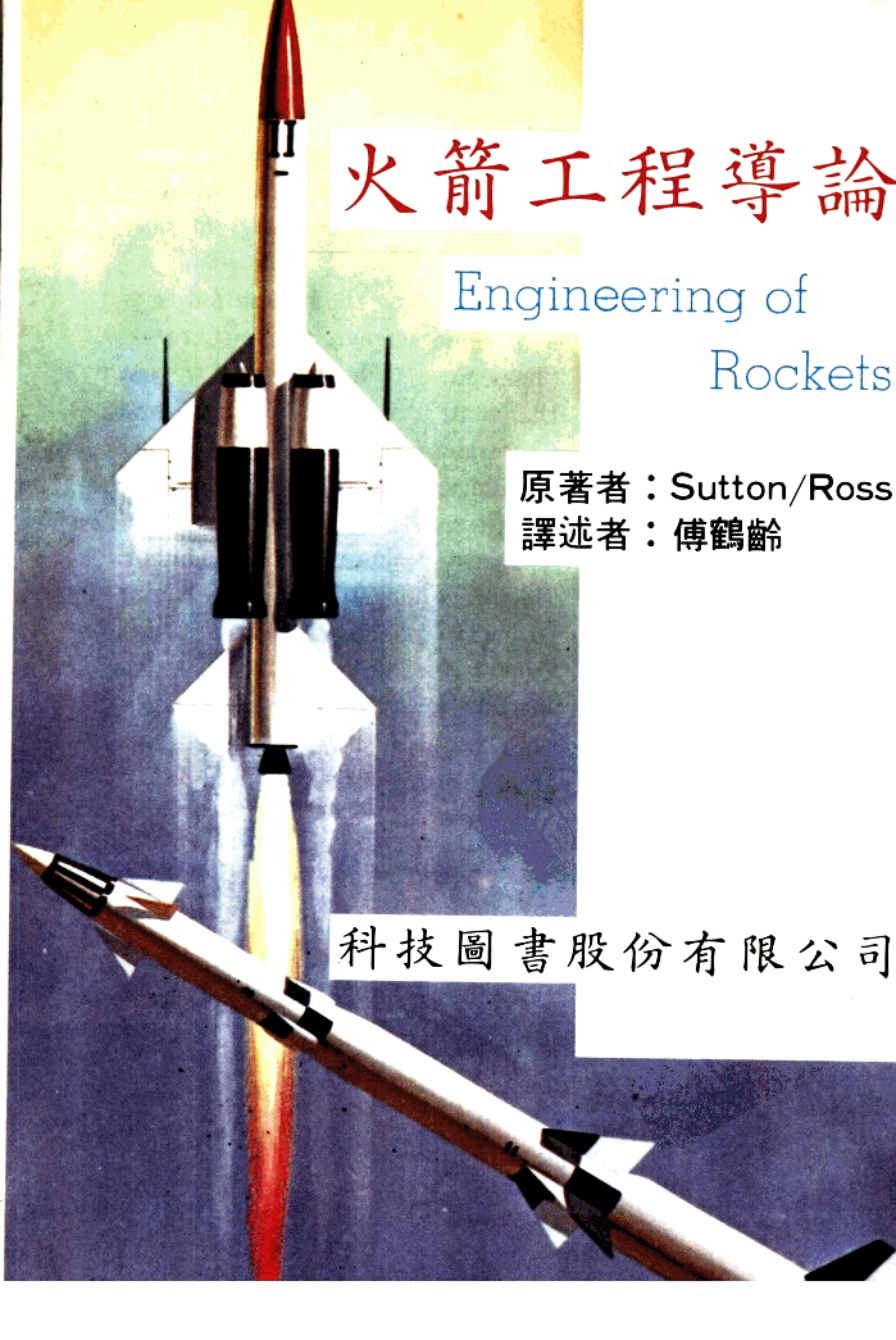




火箭工程導論

Engineering of
Rockets

原著者：Sutton/Ross

譯述者：傅鶴齡

科技圖書股份有限公司

第四版原序

本書為前三版主要修訂及增訂後的版本，其目的是希望能跟上技術的快速改變，日新月異的研究發展。但本書的基本內容仍保持不變。換言之，仍為一本介紹火箭推進工程的基本原理，以及說明其物理力學、機械、硬體與原理應用的書籍。

在火箭推進裝具上的設計、選擇、發展與應用，為了許多考慮因素，本書集合了許多不同的工程概念，其中包括熱力學、熱傳遞、飛行力學、化學反應、材料性能，配合實際與經驗參數，諸如，先前幾次已證明其成功的火箭設計、安全觀點、分件及整體實驗、燃燒穩定率等，在設計與應用上的衝突須要兩者間作比較，以及有形的價格等集而為一。

本書重點放在包括液體與固體推進劑在內的化學火箭上。因為，在近代太空航具及飛彈的應用上，它們仍被廣泛的使用着。另有分章介紹電力火箭推進，這種新器具，於最近才應用在某些特殊太空船上。書中仍有諸如核能火箭，混合火箭以及其它正在實驗與分析上作廣泛研究，但仍未付諸實現的各種推進系的討論。

前六章為基礎篇，可應用至數種不同型的火箭。第一章為分類，除原有資料外，還加添新的資料在內。在第四章熱傳遞內，對不同的熱傳方法較前三版有更多詳細的資料加入。在第五章的飛行性能中，在航道修正、航具迴轉控制上，說的較以往更為安全。

在液體¹¹¹推進劑火箭引擎上，新加入了姿態控制火箭及渦輪泵送系設備環諸章節（第七章）。第八章中有液體推進劑的新資料，與較長篇幅討論燃燒穩定性。在第九章中，討論最新的液體推進劑火箭引擎及其分件的第一手資料。在十、十一、十二等三章中討論固體推進劑發動機，這幾章與以前三版迥然不同。近代火箭發動機的新資料、推進劑、藥柱外形、推進劑應力、排氣特性、燃燒現象、混合火箭以及發動機分件，均為前三版中未有的新資料。

第十三章為前三版電力推進的增訂部分。第十四章為一新增章，內中包含數種頗具潛力的火箭推進器（核能、光子、太陽帆、以及一些新奇概念）。在該章中視其為新近的化學火箭一樣。在最後一章火箭實驗裏，毒

火箭工程導論

性氣體的監視控制，亦為一種新的資料。

在此新版中，列有許多新的參考資料，新的問題以及若干新的例題，使學生們能實際體會本書的原理、新資料、圖片以及從分件到整個實際火箭用的表格。繼前三版之後，每章均經改進，並在前版（第三版）中有二章被完全刪去。本書較第三版增加了四分之一的篇幅，包括有百分之四十的修改、增訂、以及由實驗證明其可行的特殊內容。

作者們希望本書對學院學生仍將繼續有用。誠如本書對太空工程師所作太空航具與飛彈的推進介紹，作初次從事火箭推進事業新秀的指南針以及那些推進工程專家用作基本公式及數據查詢的參考書。本書以前三版（1949，1956，1963）及其它已譯成多種外國文的翻譯本，而遍及世界各地。

這是我與杜納德 M. 羅斯（Donald M. Ross）初次携手，他不但在第一、十、十一、十二、十三、十四及十五諸章的增訂內容貢獻良多，且在其他各章中亦提供資料。我倆非常感謝得自許多助手及機構的贊助，尤其是空軍推進實驗所（AFRPL）以及洛克威爾國際公司火箭動力部（Rock-etydyne Division of Rockwell International Corporation）的坦誠合作，在此深表謝意。

喬治 P. 薩登（George P. Sutton）

杜納德 M. 羅斯（Donald M. Ross）

譯者言

飛躍的科技帶動了今日尖端科學的火箭與飛機工業，技術與理論的融合已使此二者在現代的航空太空工程上成為各國競相發展的目標，薩登教授寫的這本書，就是爲此行及有興趣而志於此者所著的工具書。值得慶幸的是，能在薩登教授允諾下，將此書譯成中文而與大家見面。

在本書第三版中共 464 頁，到了此 1976 年的第四版中，却增訂爲 557 頁，在此近百頁的增刪中，我已將之作成下表，以爲大家比較：

章次	第三版頁數	第四版 頁 數	已刪內容 (第4版)	增訂內容 (第4版)
1	18	28	無	太空梭，土星五號推進系，吸氣式噴射引擎
2	18	12	無	無
3	47	53	能量可用效率 之符號由 $\nu \rightarrow e$	雙相流與面積、壓力之關係
4	32	46	無	(1)熱傳新法 (2)材料與加工製造 (3)習題增加四題
5	36	43	無	(1)太空飛行與航道修正 (2)航道擾動因素 (3)習題增加四題
6	29	29	無	習題多五
7	23	31	驅動式泵注系	(1)渦輪泵動循環 (2)太空梭主引擎系 (3)習題多二
8	23	37	無	(1)燃燒及其不穩定分析法 (2)不穩定控制法
9	73	84	/	(1)冷卻襯套新技術 (2)低推力燃燒室 (9.1.5) (3)第九項 (9.6)

火箭工程導論

章次	第三版 頁數	第四版 頁數	已刪內容 (第4版)	增訂內容 (第4版)
10	25	40		(1)表 10.1 (2)10.3 與 10.4 節 (3)習題多二
11	23	31	幾乎全改	(1)11.2 及 11.3 節 (2)習題多五
12	30	39	全改	全新
13	17	43	(爲原第三版之 第 15 章)	幾乎全新
14	原第三版之第 13 章(15頁) 14 章(19頁) 合併	25	全部改	全新
15	21	19	實驗措施	

綜上表所敘，浸淫於火箭工程由理論走至實驗確不止此區區數百頁，但驚人的却是，從 1967 年（第三版）至 1975 年（第四版）近乎十年時間內西方的科技，在此方面的進步，至少已能寫出這多出百餘頁的內容。

本書作者薩登及洛斯二位專家，在發動機引擎的設計上對本書貢獻確是不少，尤其是，在第三版中的幾個筆誤，在第四版中已徹底不見，由此可見其敬業的精神，確有讓別人學習的必要。閱畢全書，除噴射外的幾個大主題如火箭或飛彈外型設計，飛控等均講得不多。火箭，誠如前敘，爲一尖端集各門知識爲一體的科學。故書中文字包含有限，只能說是一株大樹的主幹，而書中各章後的各參考資料才真是構成其婆婆樹蔭的整體。

本書譯寫時承 先祖母的鼓勵，並得科技圖書公司的趙教授以航寄新版書交譯而得以趕上時代。感謝朱信教授與賀俊老師的代爲校訂；何志强、王玉玲及其姊，張治魯、洪濤亮、舍妹鶴琴等的協助繕稿，方能使此書在最短時間內完成譯稿，並順利出版。

傅鶴齡 謹識

本書簡介

這是一本反映近十餘年來夢幻般進展的火箭推進工程方面的入門書。內容含工程經驗數據、熱力學、熱傳遞、飛行力學與材料性能等。著者提供多方面的基本知識、物理觀念以及應用發展。本書所述雖以固、液兩種火箭為主旨，但對太空航具、飛彈、電子、核能與混合火箭等均有提及。

第四版的內容較第三版增加了四分之一的篇幅，約有百分之四十的修改與增訂。

本書被美國航空及太空委員會推為太空工程最佳著作。

作者簡介

喬治 P. 薩登：加州理工學院（CIT）學士、碩士。在洛克威爾公司服務 23 年。1958 ~ 1959 任麻省理工學院（MIT）太空工程教授。曾任美國防部高級專案計劃處首席科學家。

杜納德 M. 洛斯：華盛頓大學機械工程系畢業。曾任美國空軍火箭推進實驗所副主任 11 年。

目 錄

第一章 分類

1.1 導管式噴射推進.....	2
1.2 火箭引擎.....	6
1.3 火箭之應用.....	15
參考書目.....	28

第二章 基本定義與原理

2.1 定義.....	29
2.2 推力.....	34
習題.....	44
參考書目.....	46

第三章 噴嘴理論與相關的熱力基礎

3.1 理想火箭.....	47
3.2 熱力學相關理論摘要.....	49
3.3 通過噴嘴的等熵流.....	53
3.4 實際噴嘴.....	73
3.5 兩相氣流.....	80
3.6 可變推力.....	80
3.7 在燃燒室中的高速熱流.....	81
習題.....	88
參考書目.....	93

第四章 熱傳遞

4.1 穩態下熱傳遞的一般關係.....	98
4.2 火箭燃燒室及噴嘴熱傳遞討論.....	103

火箭工程導論

4.3 熱傳損壞.....	106
4.4 無冷却燃燒室裝置.....	107
4.5 在冷却襯套中液體的穩態傳遞.....	118
4.6 熱氣體的輻射作用.....	122
4.7 熱傳導對飛行航具的影響.....	124
4.8 噴射焰.....	125
習題.....	126
參考書目.....	128

第五章 飛行性能

5.1 作用在航具上諸力.....	130
5.2 飛行基本關係式.....	134
5.3 簡化後的垂直彈道軌跡.....	136
5.4 複式航具.....	141
5.5 太空飛行.....	143
5.6 轉動及最小軌道修正操作.....	155
5.7 航具飛行特性.....	162
5.8 噴射焰的空氣動力效應.....	165
5.9 飛行穩定度.....	166
習題.....	167
參考書目.....	172

第六章 化學能火箭推進劑性能計算

6.1 定義.....	173
6.2 性能計算法.....	180
習題.....	199
參考書目.....	201

第七章 液態推進劑火箭概述

7.1 推進劑.....	204
7.2 基本性能參數.....	206
7.3 推進劑輸送系統.....	209

7.4 推進劑容槽·····	221
7.5 推進劑的輔助用途·····	222
7.6 整體火箭引擎系的性能·····	223
7.7 推力方向的控制·····	225
7.8 姿態控制火箭·····	227
習題·····	229
參考書目·····	

第八章 液態推進劑及其燃燒

8.1 推進劑性能與特性·····	233
8.2 液體氧化劑·····	243
8.3 液體燃料·····	248
8.4 液態單推進劑·····	253
8.5 其他推進劑·····	255
8.6 燃燒·····	255
8.7 不穩定燃燒·····	257
習題·····	268
參考書目·····	268

第九章 液體推進劑火箭引擎

9.1 推力艙·····	270
9.2 啟動及點火·····	299
9.3 推力室設計的實例計算·····	301
9.4 氣體壓力式饋送系統·····	309
9.5 渦輪泵動輸送系統·····	314
9.6 控制·····	333
9.7 瓣系·····	339
9.8 引擎系的校正·····	343
9.9 推力可變式火箭引擎·····	348
習題·····	349
參考書目·····	353

第十章 固體推進劑火箭之基本原理

10.1 推進劑燃燒率	358
10.2 相關的基本性能	367
10.3 推進劑藥柱蕊及柱蕊設計	373
10.4 推進劑藥柱蕊之應力與應變	382
習題	390
參考書目	392

第十一章 固體推進劑及其燃燒

11.1 固體推進劑之分類及其要點	394
11.2 火箭排氣性能	408
11.3 固體推進劑的燃燒	413
11.4 混合式火箭	418
習題	421
參考書目	423

第十二章 固體火箭分件

12.1 點火器	425
12.2 發動機機體	433
12.3 推力的終止	441
12.4 噴嘴	442
12.5 推力向量控制系統	447
12.6 實例計算	457
習題	461
參考書目	463

第十三章 電力推動

13.1 電熱式推進子	468
13.2 靜電推進器	472
13.3 電磁推進器	484
13.4 理想飛行性能	491

13.5 任務應用.....	494
13.6 電力太空能量供應系統.....	495
習題.....	503
參考書目.....	505

第十四章 高級推進觀念

14.1 化學能火箭.....	508
14.2 核能火箭.....	514
14.3 雷射火箭.....	526
14.4 太陽帆.....	528
14.5 其他概念.....	529
參考書目.....	530

第十五章 火箭測試

15.1 測試種類與型別.....	532
15.2 實驗設備與安全措施.....	534
15.3 測量儀器.....	541
15.4 飛行試驗.....	547
參考書目.....	548

分類

Classification

「推進」(propulsion) 以廣義而言是指一種改變一物體運動的動作。而推進器(propulsion mechanisms) 則提供一股使靜止物體移動，速度改變，或是一物體藉某種介質推進時，所賦與其克服介質中某種阻抗的力量。噴射推進(jet propulsion)，是指一種以噴出物質的動量為媒介，傳給某種裝置的轉移反應。

一具「火箭引擎」(rocket engine)。藉儲存物質的噴出以產生推力的噴射推進器為第一種。其儲存之物質我們稱為推進劑(propellant)。導管推進(duct propulsion)是噴射推進裝置的第二類，它包括渦輪噴射(turbojets)、渦輪風扇(turbofans)、間歇噴射(pulse jets)以及衝壓噴射(ramjets)。這些航空引擎普通也稱為吸氣式引擎(air-breathing engine)。導管推進裝置，是利用相當於儲存式推進劑的周圍介質作為其“工作流體”(working fluid)。另外，渦輪螺旋槳引擎(turboprop engines)，雖然，它的總推力值中有15%到30%的量來自排氣噴射，並沒有算在噴射推進裝置中，在本章中對結合火箭與導管推進之裝置，一體應用亦有引人入勝許多實際之說明。

最常用的火箭噴射三種能源分別為：(1)化學燃燒(chemical combustion)，(2)核能反應(nuclear reaction)，(3)太陽輻射能(solar radiation)。依此而分，則種種不同的噴射裝置可分別列為：化學性推進(chemical propulsion)、核能推進(nuclear propulsion)與太陽能推進(solar propulsion)。表1-1中所列為許多按其能源、推進劑型別或工作流體而分類的多種重要噴射系。所謂輻射能亦可來自除太陽外的其它能源，在理論上，包括有藉雷射光(laser beams)、電磁波、以及光子(proton)與其他由發射器傳至某一飛行接收器等之能量傳送。核能藉原子核內原子質點(atomic particles)能的轉移而釋出。其原子轉移之方式可分成好幾種，包括分裂(fission)、熔合(fusion)、以及

表 1-1 多種推進系的不同能源和推進劑一覽表

噴射裝置	化學能	核能	太陽能	推進劑或工作流體
渦輪噴射	D / P	TFD		環流空氣
渦輪風扇	D / P	TFD		環流空氣
渦輪 - 衝壓噴射	TFD			環流空氣
衝壓噴射	D / P			環流空氣
間歇噴射	D / P			環流空氣
火箭	D / P	TFD		儲存式推進劑
導管式火箭	TFD			儲存 + 環流空氣
水下導管式火箭	D / P			儲存 + 環流流體 (推進劑 + 水)
空氣渦輪火箭	TFD			儲存 + 環流空氣
電能火箭	D / P	D / P	D / P	儲存式推進劑
太陽熱能火箭			TFD	儲存式推進劑
光子火箭		TFND		光子擠射 (非儲存式推進劑)
太陽帆船			TFD	光子吸收 (非儲存式推進劑)

註：D / P 表示已發展 / 或已考慮其實用性；TFD 按工業技術的潛能，可能辦到，但發展未到成熟階段；TFND 目前工業技術無法實現。

某一特別核種之放射性蛻變 (decay of radioactive species) 等三種。其它則對太空船外與內的能源亦均予討論。在一力場 (重力或磁力) 中有效的潛能，在某些情況中，均可產生有用的噴射效果，由火箭引擎中輸出的能量，是來自自由火箭出口噴出物質的動能；而引擎的作用就是把輸入的能源轉換成這種形式。

噴射出的物質，呈固態，液態，或氣態。在極高溫度下它也可能是電漿 (plasma)，即一種帶電的氣體。通常這些都是成雙或多體相連一起噴出。

1.1. 導管式噴射推進

此類包含有，渦輪噴射、衝壓噴射和間歇噴射等三種。本文把火箭推

表 1-2 典型化學火箭與幾種導管引擎性能比較

特 徵	火箭引擎	渦輪噴射引擎	衝壓噴射引擎
1. 推力對重量比	75 : 1 渦輪泵注引擎	5 : 1 渦輪推進及後燃器	在 30000 ft 3 馬赫下其值 為 7 : 1
2. 比燃消耗 (每磅 推力在每小時內 所消耗燃料或推 進劑之磅數)	8 ~ 14	0.5 ~ 1.5	2.5 ~ 3.5
3. 推力比 : (前方 面積每方呎的推 力磅數)	7500 磅 (液態推進劑)	2500 磅 (在 海平面 0 馬赫)	2700 磅 (在 海平面時為 2 馬赫)
4. 推力, 高度座標 關係	近乎常數	隨高度減低	隨高度減低
5. 推力、飛行速率 關係	近乎常數	隨速率增加	隨速率增加
6. 推力、空氣溫度 關係	常數	隨溫度減少	隨溫度減少
7. 飛行速率、排氣 速率關係	無關、飛行速率還較大	飛行速率常低 於排氣速率	飛行速率小於 排氣速度
8. 高度限制	不受限制, 用於太空航 行		
		45000 ft ~ 55000 ft	在 65000 ft 為 3 馬赫 在 95000 ft 為 5 馬赫 在 150000 ft 為 12 馬赫

進以及火箭與導管式引擎相配合使用再加以比較說明。在本章後列的參考書 1-1 與 1-2 是有關導管、噴射推進原理的書籍。在表 1-2 中, 為各種渦輪噴射與衝壓噴射及化學火箭, 特殊性能的比較:

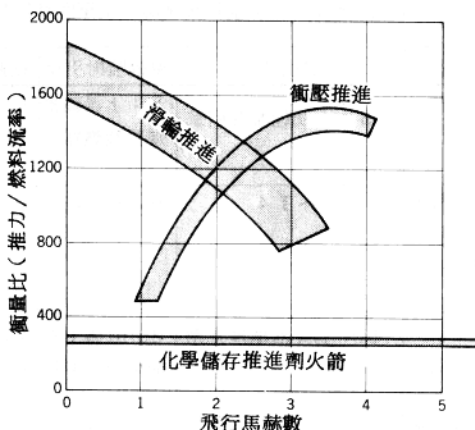


圖 1-1 三種不同引擎在影響飛行速率之推進劑，或燃料單位重量流，性能比較圖

圖 1-1 中提供一套在地球大氣層內不同飛行速率變化的進一步比較。高的比衝值（specific impulse）可直接影響一長飛行域，而在相當高度的低空中（海平面至 8 萬呎間）吸氣式引擎的卓越性，遠超過化學能火箭。例如，以火箭為例，高的推力重量比，高推力與前面積比、和推力均與高度無關，有能力在空氣稀薄的大氣或太空中，通行無阻。

1.1.1 渦輪噴射與渦輪風扇噴射引擎

這二種渦輪引擎均因係引擎設計或有包括引擎與短艙（nacelle）混合設計之故。而列入導管式引擎中，圖 1-2 與圖 1-3 告訴諸位渦輪噴射與渦輪風扇噴射的基本原理、渦輪風扇的主要特徵是空氣流，經過壓縮加速後才輸入主級渦輪壓縮器和燃燒室內。談到飛機的渦輪引擎，同樣也有配合傳統螺旋槳而使用的渦輪螺旋槳引擎。另外，也有昇力引擎，用於飛機垂直起飛。還有直昇機所使用的渦輪軸傳式引擎（turboshaft），也是一種形式。

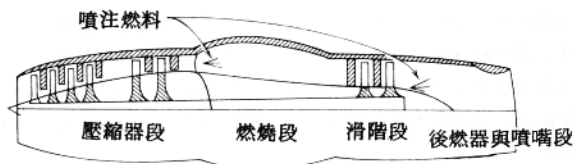


圖 1-2 渦輪噴射元件剖析

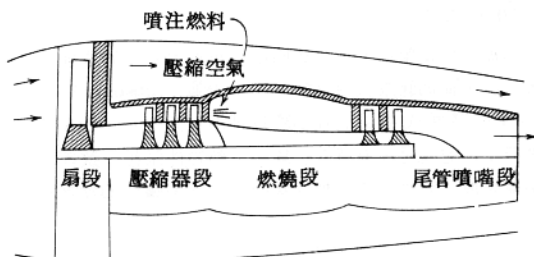


圖 1-3 渦輪風扇元

1.1.2 衝壓噴射

在高過 2 馬赫之超音速飛行時，衝壓噴射引擎（一種純導管引擎）在大氣層中的飛行，就極有用。推力因經過衝壓噴射之空氣動量增加而造成，而其基本原理與渦輪噴射、渦輪風扇一樣。圖 1-4 中顯示衝壓噴射的基本組件。當然這二種引擎的主要不同點，是衝壓噴射缺少渦輪和壓縮器二種東西，它的燃燒或可在次音速或超音速燃燒室中產生，就全要看燃燒

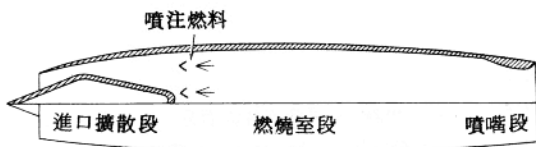


圖 1-4 超音速衝壓噴射元件

與艙室的配合設計了。衝壓噴射在次音速下的燃燒，可達到近乎5馬赫的速度，而在超音速下燃燒（空氣與氧）可將速度提昇至2馬赫，故衝壓噴射全靠火箭或其它近于設計飛行速度下加速的方法，其主要的應用是在艦艇甲板上，以及由地面發射昇空的反飛機飛彈（antiaircraft missiles）上使用。

1.1.3 間歇噴射

圖1-5顯示間歇噴射（或脈動噴射 pulse-jet）的原理。這種原理過去曾用於二次大戰間低飛次音速的V-1飛彈（subsonic V-1 missile）上由德國科學家發展成功。此種引擎只能用在低空（10000英尺下）之次音速下飛行，但它也是所有導管引擎中，熱力性保持一致者。所以其在增壓下之中繼燃燒比降壓下之燃燒情況要好。它有極佳的耗燃料比，價廉而

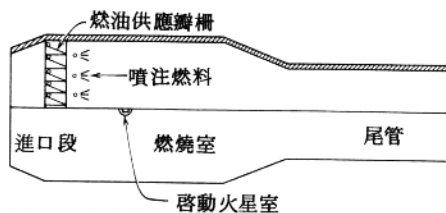


圖1-5 衝壓噴射原理

簡單，但噪音太大。與衝壓噴射相反，它可由靜態開始操作，而產生高的推力。在飛行速度增加下，推力逐減，而比燃料消耗增大。這種特性可用在導管或空氣罩（aerodynamic shroud）中加裝間歇噴射來加強其特性。

1.2. 火箭引擎

火箭引擎（rocket engine）可依其能源而分，（化學、核能、太陽能）；又可依基本功用而分成加力（booster）、續航（sustainer）、姿態控制（attitude control）、定位（station keeping）等作用。又可依航