



· 魏楞傑 · 百年來的飛機結構演進 (下)

二次大戰時期飛機結構

除了少數例外者，二次大戰時期出現的戰機和轟炸機大都是半硬殼式結構，材料大多是鋁和鋼，例外者之一是當時頗富盛名的英國蚊式機，時速六百七十公里、雙引擎、中置單翼戰鬥轟炸機，一九四〇年十一月首飛，是架輕重量、敏捷的全木製飛機。它的機身為兩層杉木夾板中間夾輕質木料構成的硬殼式結構，這是歷史上三明治結構的首次應用實例之一。蚊式機到一九五〇年為止，共生產七千八百架，是最後一架生產型全木製飛機。

在航空史上，由一九三九到一九四七年是渦輪噴射革命的年代，除了極少數例外，這段期間所出廠的飛機，不論外形有多大的差異，內部基本結構和DC-3幾乎沒什麼不同。能對飛機結構設計帶來新意的，是一九三〇年代晚期分別由英國的韋特(Frank White)和德國的歐漢(Hans J. P. von Ohain)發明的渦輪噴射引擎。一九三九年八月二十七日，一架德國的祕密實驗飛機He-178首飛成功；一九四一年五月十五日，韋特的八百六十磅推力離心式渦輪噴射推動格羅斯特(Gloster)飛機公司的E-28/39飛行十七分鐘，帶領英國進入噴射時代。

全世界第一架噴射戰鬥機是德國梅賽斯密特(Messerschmitt)設計的Me-262，一九四四年進入德國空軍服役，一個月之後，格羅斯特飛機公司的流星戰機(Meteor)也加入英國皇家空軍。這兩型飛機的渦輪噴射引擎都裝在機翼，時速超過九百公里，比最快的螺旋槳飛機還快。Me-262的軸流式引擎裝在後掠式機翼的引擎艙，而流星戰機的離心式引擎直接裝在機翼內，和往復式引擎的安裝方式一樣。Me-262是第一架後掠翼生產型戰鬥機，機翼



全世界第一架噴射戰鬥機Me-262。

後掠的目的在將超重的Jumo 004渦輪噴射引擎的重心後移，而巧合的是後掠翼能降低高速時的風阻，但在一九四〇年年初期的當時，人們不明瞭其原因何在。為了減少風阻，Me-262的機翼很薄，雖然主起落架能放進翼根內，但機腹就得較寬以容納輪胎，飛機的剖面就像鯊魚一樣，上窄下寬。早期生產的Me-262後起落架擺在機尾，後來前移到機鼻的位置，那兒有足夠的空間來容納輪子。

美國第一架噴射機是貝爾飛機公司(Bell Aircraft)的XP-59A，一九四二年十月首飛，由兩具奇異公司的噴射引擎推動，時速接近七百四十公里，總共生產不到一百架，之後被時速九百公里的洛克希德P-80流星號(Shooting Star)所取代，這是美國第一架噴射戰鬥機，一九四五年初開始生產。

二次大戰後的飛機結構

由於擄獲了許多德國渦輪噴射引擎、文件和技術人員，因此二次大戰後蘇聯很快推出第一型噴射戰鬥機，分別是雅克列夫(Yakovlev)設計的Yak-15和米高揚、格列維屈(Mikoyan-Gurevich)兩人設計的MiG-9，兩架原型機都在一九四六年四月二十



全世界第一架後掠翼噴射轟炸機B-47。

四日首飛，它們和P-80都採用直翼設計，事實上二次大戰後急著把戰機由螺旋槳轉換到噴射推進時，結構仍是採用傳統的設計，飛機的外形修改是因為噴射引擎的截面積較小，並利用以往被往復式引擎所佔用的機鼻空間。

由一九四五年到一九四八年出現的噴射戰機，結構設計上並沒有任何創新之處，最初有將渦輪噴射引擎「埋」進機身或機翼的趨勢，這樣做的主要動機是氣動力需求，但卻得犧牲維修方便性，同時還得加強機翼結構，以傳遞引擎負載。噴射運輸機最後是將引擎以艙外掛於機身上，或以引擎艙置於機翼下，以方便維修時的進手性。

一九三五年在羅馬舉辦的高速空氣動力學研討會中，德國的俾斯曼(Adolf Busemann)首先提出後掠翼可降低風阻，一九四五年一月在NACA的藍利研究院(Langley Laboratory)，一位研究員瓊斯(Robert T. Jones)對俾斯曼理論毫無所悉下，在設計導向飛彈的過程中提出「次音速後掠」的理論，經過幾個月的超音速風洞吹試，證實此理論是正確的。二次大戰快結束時，瓊斯建議他的主管，以後高

速飛機都應該採用後掠翼。戰後俾斯曼攜帶後掠翼模型豐富的風洞數據來到美國，加入藍利研究院的團隊，而這也立即影響到全世界第一架後掠翼噴射轟炸機——波音於一九四七年推出的六引擎B-47同溫層噴射轟炸機(Stratojet)和北美公司(North American)F-86軍刀(F-86 Sabre)噴射戰鬥機的設計。B-47和F-86的機翼都是後掠三十五度。蘇聯則是根據擄獲自德國人的資料，推出也是後掠翼的MiG-15，它首飛於一九四七年十二月，只比F-86慢三個月，F-86和MiG-15開創了第二代的噴射戰機。

進入一九五〇年代後，NACA、美國海、空軍開始進行研究超音速飛行，蒐集資料以及設計超音速飛機，並研製了一系列的驗證飛機：貝爾公司子彈型、火箭推動的X-1，是全世界第一架超音速飛機；先進型X-1飛到兩倍音速；後掠翼、不鏽鋼製的X-2則飛過三倍音速；道格拉斯公司的X-3C首號(Suicero)是用來研究慣性耦合的試驗平臺，也是早期超音速戰機的典型設計構型；雙引擎的諾斯洛普X-4是後掠翼、無尾翼構型，用來研究後掠翼的



全世界第一架超音速飛機X-1。

特性；貝爾的X-5則是美國在大戰結束時，由擄獲的梅賽斯密特P-1011可變幾何研究機所得到的靈感，驗證了由二十度到六十度的可變機翼後掠角。雖然這些X系列的飛機對超音速設計並無任何幫助，但卻證明後掠機翼、降低厚度／弦線比、全動式尾翼的優點，促成穿越音速的限制，並使飛機設計時能完全利用渦輪噴射引擎的全部優點。

一九五二年在NACA的研究備忘錄152H08，由費特康(Richard T. Whitcomb)執筆的「近音速時機翼／機身結合之零升力阻力特性之研究」，對突破超音速有重大的影響。費特康根據風洞吹試的結果，證明他所謂的「面積法則」可以降低穿音速時的波阻。根據面積法則，在飛機上機翼和機身相結合的位置，機身的截面面積應減小，以容納機翼的截面面積，對迎面而來的氣流而言，機翼加上機身的總面積必需維持不變，因此機身的外形變成所謂的「可口可樂瓶」的樣子。康維爾(Convair)公司的工程師，立即根據此法則重新設計首飛於一九五三年，但性能不佳的三角翼F-102短劍號(Dagger)戰機，將平直的機身腰部內縮，此帶有腰身的F-102A首飛於一九五四年十二月，速度增加了百分之二十，輕易地飛過超音速。「面積法則」是噴射機時代最重要的工程發展項目之一，直到今天，幾乎所有的穿音速或超音速飛機，多少都應用了這個法則。

到一九五〇年代中期時，生產型的噴射戰機，如：由北美公司製造的F-100超級軍刀機(Super Sabre)，已經能在平飛時到達超音速。一九五六年的洛克希德F-104星式戰鬥機(Starfighter)是第一架能持續飛行兩倍音速的飛機，它具備了優良超音速氣動力所應有的外形——尖銳的鼻端、纖細的機身、薄且銳利的機翼，這種設計的目的在減弱機鼻和翼前緣的震波強度，藉以降低超音速時的波阻。F-104的機翼厚度／弦長比只有百分之四，機翼前緣非常尖銳，停在地面時得加上防護夾，才不會傷到在附近工作的維修人員。

F-104的機翼無後掠，展弦比很低，和一般超音速飛機採用後掠、高展弦比機翼的方式大異其趣，這是因為直掠、低展弦比機翼的波阻，和後掠、高展弦比機翼的波阻約略相同，這種機翼的次音速

性能當然很差，但F-104追求的是在兩倍音速時有最佳的性能，只好犧牲次音速性能。

這種第二代噴射戰機的機翼很薄，翼負荷很高，設計時通常採用多翼梁、翼肋的設計，機身蒙皮和加強條通常由板件生料一體加工機製成形。

超音速飛行結構

伴隨著飛機超音速飛行而來的，則是由於空氣摩擦產生高熱所衍生的機體結構強度退化問題。首先，當溫度到達攝氏一百度時，輕合金的靜力強度會大幅度衰退；其次，在攝氏一百二十度的環境下待滿一百小時後，輕合金抵抗潛變的能力會大幅度降低。當飛機的超音速飛行時間很短暫時，外蒙皮產生的熱還來不及傳到內部主結構，這些都不是問題，一旦需要長時間的超音速飛行，為了防止因高熱使結構喪失強度，結構的設計就得有所因應。

為使機體擁有足夠的強度和剛性，又不至於超重，解決方法之一是使用蜂巢三明治結構。一九五六年美國第一架超音速轟炸機，通用動力公司的(General Dynamics) B-58行動者號(Fusley)，就大量使用此種結構解決超音速摩擦熱。這架飛機能持續



美國第一架超音速轟炸機B-58。



美國高空戰略偵察機SR-71。



波音B-787夢幻客機。

超音速飛行兩小時以上，最高飛行速度將近兩馬赫，此時部分外蒙皮的溫度超過攝氏一百二十度。

B-58蜂巢三明治結構的外層是厚度僅有零點零一五英吋的高強度不鏽鋼蒙皮，內層夾心則是輕質的六角形鋁薄片蜂巢心，使用區域占機翼面積的百分之九十，機體面積的百分之八十。這種結構重量輕，只占全機最大起飛重量的百分之十六點五；它的剛性足，即使到達攝氏兩百六十度，也依然能夠維持設計的強度。不過相對的，製造成本就很貴，每平方英尺約需一千兩百美元，因此B-58的機體造價比同重量的金子還貴。而在部隊使用時，三明治結構的外層蒙皮很容易因為維修或腐蝕而有損傷，修理耗時並得在高溫下加壓膠合，維修上有諸多困擾，造成B-58在一九六九年就提早退休。

著名的SR-71黑鳥(Blackbird)三倍音速高空戰略偵察機，為因應高速飛行時機身局部超過攝氏五百度的高溫，大量使用耐熱的鈦合金，比例高達百分之九十三，主翼上還有許多為應付熱漲冷縮的細長溝紋，此外全機並採用自CJ以來即已使用的黑

色塗裝，因為黑色是最佳的輻射散熱介質。本機採取無尾翼之雙三角翼構型，以及自翼根前緣兩側延伸的前翼，形成極佳的舉升體，這種設計也成為日後戰鬥機上習見的機身／機翼融合體的濫觴。

複合材料結構

為了延長飛機結構的疲勞壽命，提升飛機的性能，選用抗疲勞性較佳的新材料是必然的趨勢。由一九六〇年代開始，飛機上曾選用的替代材料包括合金鋼、鈦合金……等，但這些材料的重量重、施工困難，不符合飛機工業輕、薄的需求，除非必要不會輕易選用，到了一九八〇年代，飛機結構的材料發展走向高級複合材料。

採用複合材料的最主要原因是減重，增強飛機的性能，其次是抵抗疲勞和腐蝕的能力佳，可以延長飛機的壽命，現在則又因為能滿足匿蹤的需要而成為熱門的材料。高級複合材料的比強度（單位重量的強度）、比勁度都比傳統金屬要好。在強度相同的條件下，採用複合材料可以較鋁合金節省約百分之三十的重量；它耐熱、耐腐蝕，有絕佳的抗疲

勞性，結構疲勞壽命比傳統的鋁合金強上好幾倍；而它又可讓雷達波穿透，不易被敵機追蹤，因此是新型飛機不可或缺的使用材料之一，不過飛機結構的設計並沒有因此而有任何的改變。

最典型的例子就是二〇〇七年七月八日問世的波音B-787夢幻客機(Dreamliner)，這型號稱可以降低燃油消耗率至少百分之二十，維護成本降低百分之三十的新時代客機，大量使用複合材料以減輕飛機重量，因此複合材料重量占全機重量的百分之五十，例如它的機翼、機身就全部使用碳纖維複合材料，但機翼結構安排仍然是傳統的多翼梁、翼肋、蒙皮的設計，機身結構也一如以往採多縱向桁條與蒙皮搭接的安排，由此可清楚看見複合材料對飛機結構的設計方式，幾乎沒有什麼影響。

未來發展

為降低飛機的壽期成本，目前飛機工業正在發展智能結構，它結合微電子技術、先進的飛機設計概念與複合材料的製程技術，把微型感測器、微處理器、光纖、壓電材料植入飛機的複合材料蒙皮和承載結構中，讓它能感受外界的聲音、溫、壓、電、磁……等的變化，並做出反應。譬如美國正發展「靈敏機翼」，借助密布於機翼蒙皮上的感測器，感覺翼面上各部位的壓力，然後把數據傳送給計算機，經過計算後控制安裝在機翼內的致動器，不斷改變機翼上、下表面的曲率，讓它根據飛機的速度、流場的變化，自動改變翼形，以降低飛行阻力。

另外還有一種智能結構是在飛機的機翼、控制面、機身……等位置安裝感測器，即時監測飛機於服役期間，結構是否由於過載、疲勞、腐蝕……等原因，產生疲勞裂紋或初期損傷，使維修人員能在第一時間內修復，避免因疏失或未及时發現損傷，導致後續巨大的損失，並增進飛行安全。

隨著高級複合材料在飛機結構上的應用越來越廣泛，智能結構未來的發展是自動修復，飛機出廠時複材結構內層安置整排的小型光纖感測器，並預置化學修補素材，一旦結構發生損傷，素材會自動釋放，填補結構內層的孔洞或脫層，進一步免除維修的工作，屆時，不但增加飛機結構的壽命，也能避免地面維修人員疏失造成的飛安事件。（完）