

國產飛機剎車崛起 屢破美歐技術壟斷

點讚中國

莽山之下、渭水之畔的航空工業制動，是新中國航空制動事業的發源地，也是國家唯一一家航空工業機輪及剎車系統研製的專業化企業。71年來，航空制動事業從測繪仿製起步，逐步實現自主創新，在部分領域走到世界前列。制動系統隱身於飛機起落架之間，是航空工業體系中幾乎「看不見」卻至關重要的一環；長期佔據細分領域領先地位的航空工業制動，在公眾視野中同樣鮮為人知。香港文匯報記者日前走進航空工業制動，揭開這位「隱形冠軍」背後成長的奧秘。

●文：香港文匯報記者 劉凝哲 陝西報道 圖：航空工業制動供圖



●航空工業制動的機輪產品精益生產線。

飛機的每一次飛行，都從地面開始，也終將回到地面。研究顯示，起飛、著陸雖然僅佔飛行總時間的2%，卻帶來58%的一般事故和10%的災難性事故。人們總是希望飛得更高、更快、更遠，而制動系統，卻是保證飛機從速度回歸安全、從藍天回歸大地的一道硬核屏障。

香港文匯報記者日前來到位於陝西咸陽市興平市的航空工業制動，深入研發試驗中心和生產現場採訪。在高溫碳基複合剎車材料生產基地裏，熱浪撲面，一片片深灰色的剎車盤坯體在高溫工序中流轉。在制動萬噸機輪鍛造生產基地裏，萬噸級鍛壓設備每一次落下都發出沉悶轟鳴，鋁合金坯料在高溫中反覆鍛造成型。在機輪及剎車系統試驗中心，設有世界唯一的多輪系電慣量綜合動力試驗台，可以模擬多起落架、多機輪、多通道剎車系統起飛滑行及著陸剎車的全過程。

飛行百萬小時無一次致命故障

這些點位只是航空制動龐大技術體系的幾個切面。航空制動真的只是通常理解的「一塊剎車片」嗎？當然不是。剎車盤只是飛機剎車整個鏈條中的環節之一，真正讓飛機安全停下來，是材料、摩擦、機械、液壓、傳感、控制、試驗和適航等多個專業共同作用的結果。一架80餘噸、接地速度約200公里每小時的客機在著陸時，動能可達上百兆焦，制動系統必須在極短時間和有限的跑道距離內吸收、消耗掉其中一大部分。航空制動，是圍繞飛機巨大著陸動能進行安全轉換和精確控制的一項系統工程。

「必須在極端工況下依然可靠，在多時空擾動中依然穩定，在『機電液熱振』高度耦合的複雜環境中依然精確、快速響應。」航空工業制動黨委書記、董事長付鵬鋒告訴香港文匯報記者。其安全等級為A級，「這意味着每個飛行小時的失效概率要低於10的負九次方，相當於飛行百萬小時都不出現一次致命故障。」航空工業制動副總經理、總工程師劉勁松說。正是這一嚴苛標準，支撐起中國戰鷹的每一次起降，也為干、支線客機等各類民用航空裝備提供可靠配套。

航空制動材料從跟跑走向領跑

在航空工業制動的發展文化教育中心，一份特殊的文件靜靜陳列，這是由中國民航局於2009年頒發的空客A320系列飛機剎車盤PMA零部件製造人證書。這一紙批准書，記錄着中國制動民機產品打破國外壟斷的寶貴第一步。「這是中國首個進入航線主力民航客機剎車供應體系的國產產品，成功走過完全自主的技術路線，這離不開材料、工藝、適航、工程多支隊伍幾十年的技術接力。」航空工業制動副總經理、民機事業部負責人王學鋒說。

此前，全球民航剎車盤市場被美英法少數企業壟斷，單套剎車盤售價高達幾十萬元人民幣，國內航空公司沒有任何議價權。國產碳剎車盤入市後，進口同類產品的報價直接下調70%以上，推動整個中國民航剎車材料市場進入合理競爭階段。

航空制動，本質上是一門關於能量管理的學問，能量轉換的核心載體正是材料。中國航空制動材料歷經樹脂、半金屬、粉末冶金到碳基材料的迭代，從跟跑走向領跑。在西方技術封鎖下，航空工業制動逐步攻克碳/碳、碳陶複合剎車材料，中國成為世界上第四個掌握碳基剎車材料製備技術的國家，也是全球首個將碳陶剎車材料批量應用於飛機的國家。

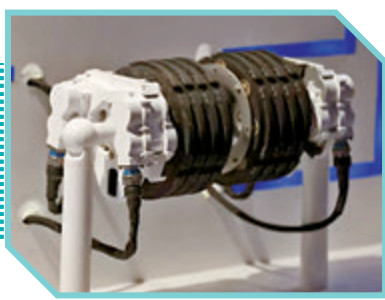
繼美法之後中國掌握全電剎車技術

在控制系統領域，全電剎車代表着剎車系統的最新發展方向。航空工業制動已掌握全電剎車技術並應用於多個型號無人機剎車系統，使中國成為繼美國、法國之後第三個掌握該技術的國家。在民機領域，碳剎車盤壽命已達到與國外先進廠家相當的水平，累計安全運行超過數百萬起落。

如今，航空工業制動已掌握碳基剎車材料、全電剎車系統等關鍵技術，形成覆蓋材料、機輪、控制系統、試驗驗證的完整能力。據介紹，其下一步將在地面綜合運動控制、自主起降、智能剎車、能量回收等方向持續投入，目標是從「隱形冠軍」走向「世界一流飛行器制動系統產品供應商」。



●飛機機輪及剎車裝置



●全電剎車裝置



●記者們參觀航空工業制動的高溫碳基複合剎車材料生產基地。

材料代代升級

樹脂基

時間：航空工業制動建廠初期
特點：早期剎車材料

粉末冶金

時間：1962年首次應用
特點：最高耐受溫度約500℃，重量大

碳/碳

時間：1998年裝機首飛
特點：較上代材料減重60%以上，耐熱提升一倍、達1,000℃以上

碳陶

時間：2008年裝機首飛
特點：解決高溫氧化、濕態衰減痛點；自重僅為傳統材料的四分之一，剎車裝置減重30%至40%，磨損率為粉末冶金的五分之一至四分之一

新型高溫碳基

時間：2016年以來
特點：向高鐵、汽車等更多領域延伸



●記者們參觀航空工業制動公司的萬噸機輪鍛造生產基地。



●航空工業制動「一五」期間建廠老照片



●航空工業制動西安研發中心大樓

研前沿技術 踏入「無人區」

中國航空制動已在剎車材料、控制系統等關鍵技術領域達到國際領先水平，但技術的邊界並未停止延伸。低空經濟讓飛行器頻繁起降，智能飛機對地面運行提出新要求，綠色製造倒逼材料變革。面對這些新課題，航空工業制動把目光投向尚未有人走通的「無人區」。

「能量回收、自主滑行、自主起降、地面綜合運動控制等前沿技術，正在成為下一代制動系統的方向。」航空工業制動副總經理、總工程師劉勁松說。高效自適應剎車控制技術也在同步推進，以高效剎車從源頭提升本質安全。

向智能化全電化輕量化升級

航空工業一級技術專家、航空工業制動副總經理李曉猛介紹，全電剎車和電靜液剎車正在逐步替代傳統液壓剎車，在減少失效風險的同時減輕系統重量；未來航空制動技術將沿着「材料輕量化、控制全電化、系統智能化」三條主線協同推進，制動系統正從單純的「能量消耗裝置」轉變為「能量管理節點」。「我們的目標是讓制動系統不僅適應未來航空器的形態變化，更能成為新型航空器安全運行和能量管理的關鍵支撐。」李曉猛說，企業還將在這些新興領域形成自主的技術標準和適航能力，為全球航空制動技術的發展貢獻中國方案。

「下一代剎車材料將圍繞高導熱、高耐磨、綠色、可回收、極端工況等方向開展研究，優化材料結構，提升極端工況下的性能穩定性和服役壽命。」陝西省勞動模範、航空工業制動勞模工作室帶頭人周蕊介紹，廢舊剎車盤的資源化再生技術也在攻關之列，目標是從原材料到產品實現全生命周期綠色發展。在輕量化主線上，碳/碳、碳陶等先進複合材料的減重增效仍在繼續。

特稿

1955年9月29日，國務院批准在陝西興平建設航空機輪剎車附件廠，這是國家「一五」計劃156項重點工程之一。156項工程中，具備機載能力的企業僅5家，航空制動位列其中。國家在經濟困難年代優先發展制動專業，足見其在航空工業中的分量。中國航空制動事業由此起步。

建廠之初，一缺資料，二缺設備，技術人員從測繪仿製剎車塊起步，在「一張白紙」上搭建專業體系。1959年，工廠通過國家驗收。1962年，粉末冶金剎車盤首次應用，國產飛機裝上第一代自主剎車產品。

二十世紀七十年代，碳/碳複合材料成為世界航空剎車新方向，技術卻被西方少數國家壟斷。1972年，航空工業制動自力更生立項攻關，1977年研製出首套碳基扇形片。此後20餘年，從材料突破到工程應用，1998年碳/碳剎車盤裝機首飛，中國躋身世界第四個掌握碳基剎車材料製備技術的國家。

改革開放後，企業一邊轉行探索，「華興」品牌汽車制動產品走向市場；一邊叩開民航大門，二十世紀九十年代為國154飛機研製剎車盤，取得國內首個PMA證書。2008年碳陶剎車盤裝機首飛，中國成為全球首個將碳陶剎車材料批量應用於飛機的國家；2009年，空客A320碳剎車盤取得PMA證書，國產剎車產品進入國際主流航線客機供應鏈。

2013年，全電剎車系統首次裝機，中國成為繼美國、法國之後第三個掌握該技術的國家。兩項技術分獲2016年度國家技術發明獎二等獎、2021年度國家科技進步獎二等獎，2016年世界唯一多輪系電慣量綜合動力試驗台投用。此後，碳基剎車材料、全電剎車等核心技術不斷向民航、軌道交通、低空經濟等領域延伸。

七十一年來，航空工業制動從「一五」重點工程中走出，完成從測繪仿製到自主創新、從單一軍品到軍民航並舉的躍遷。正如航空工業制動黨委副書記、新聞發言人蔡坤所言，中國航空制動已從「望塵莫及」走向「並駕齊驅」和「部分領先」。

71載從「望塵莫及」走向「部分領先」

跨界賦能高鐵新能源車等多領域

飛機剎車技術，正在越來越多地出現在飛機之外的地方。軌道交通與航空制動共享同一套技術邏輯：高速之下的能量管理。航空工業制動的碳基剎車材料已應用於時速400公里跨國互聯互通動車組；2022年，其配套的新型復興號檢測列車試驗時速達435公里。2025年，時速600公里的高溫超導磁懸浮列車首次亮相，航空制動技術首次系統應用於軌道車輛。高速、重載、安全，高鐵對制動的要求與航空幾乎同源。

低空經濟是航空制動「出圈」的新戰場。沃

飛AE200電動垂直起降飛行器的起降系統集成由航空工業制動完成；電剎車技術已在西飛民機鴻鵠100、鴻鵠200無人貨運飛機上應用。針對eVTOL高頻次、短間隔的運行特點，企業正在研製無源應急剎車系統與異構冗餘安全架構，並將預測與健康管理技術引入制動系統，通過實時監測與數字孿生，把傳統的「定期維修」轉變為「視情維修」。

在地面交通領域，航空制動技術從飛機起落架走向賽道。新型高溫碳基複合剎車材料，成

為法拉利、保時捷、奔馳等方程式賽車的剎車選擇。賽車對剎車的苛求不亞於飛機：數百公里時速要在瞬間降下來，剎車盤須承受上千攝氏度高溫，還要盡可能輕。航空級碳陶材料正是為這種極端工況而生，以輕、耐高溫、摩擦性能穩定的特質，在賽道上延續了空中的表現。在國產新能源汽車方面，航空工業制動與小鵬、吉利等主車廠聯合研發，用碳陶制動盤為國產新能源汽車保駕護航，讓航空技術進入普通人的日常出行。

航空工業制動的非航觸角，還伸向了新能源。甘肅瓜州戈壁灘上，全球首座「雙塔一機」光熱儲能電站正在運行，其聚光集熱系統的定日鏡，由航空工業制動承接組裝。為完成這項任務，團隊駐守戈壁堅守，用航空級精度標準重新編寫12份工藝文件，提出「模塊化預裝法」，把單台組裝時間壓縮35%。2024年底，第2萬片定日鏡交付並精準追日運行。從航空制動到光熱發電，這家企業把「安全制動與精確控制」的本事，用到了逐日追光的新領域。