

人形機器人的材料革命： 散熱、封裝、仿生皮膚

編輯部整理

很多人討論人形機器人，焦點都放在大模型、晶片、馬達上，但容易忽略一件事：再好的晶片與演算法，最後都要靠材料才能真正跑起來。機器人要輕、要扛得住反覆跳動撞擊、要把高熱散出去、還要有像人類皮膚一樣的觸覺，這些全部依賴電子功能材料的突破。

在傳統工業機械臂的設計思維中，結構設計在於追求極致的剛性、抗彎曲彈性模量 ($E > 200 \text{ GPa}$) 與靜態負載變形抑制，其本體重量並非核心約束指標，各部件多採用厚重的高強度鑄鐵、高剛性結構鋼或鑄造鋁合金。然而，人形機器人作為具備自主雙足行走、動態姿態平衡以及多自由度 (DOF) 高頻伺服響應的離散移動智算實體，其機身自重直接與電池負載能力、電機輸出扭矩儲備以及續航時間掛鉤。高頻電磁輻射干擾、嚴重的內部熱島效應、高動態反覆熱震以及寄生電容效應，迫使材料從「機械剛性優先」躍遷至「電子功能、極限散熱通道構建與電磁屏蔽

一體化優先」的新高度。

在這種全新的工程哲學下，材料不僅需要作為維持人形機器人骨骼姿態的承重骨架，更必須承擔起作為微觀散熱導體、高頻介電絕緣層、電磁兼容 (EMC) 法拉第籠以及防靜電 (ESD) 消散介質的多重電子功能。以分佈在四肢關節內部的伺服驅動模組為例，當系統全面導入第三代半導體 (GaN/SiC) 後，功率器件以超過 100V/ns 的極限電壓變化率 (dv/dt) 和高達數千安培每微秒的電流變化率 (di/dt) 高速開關。這種強烈的電磁暫態會在電機殼體周圍產生寬頻帶、高密度的空間輻射電磁波與強大的共模噪聲。若機殼材料僅僅具備結構強度而缺乏電磁屏蔽與接地耗散能力，高頻噪聲將直接耦合穿透至關節內部的磁性編碼器、24 位元高精類比前端 (AFE) 以及局部運控微控制器中，導致傳感器數據失真、時序錯位，甚至直接引發小腦微控制器的死機或復位。

與此同時，機器人下肢關節馬達在頻繁加減速、跳躍觸

地與負載搬運時，電機轉子與減速機接觸面會產生持續的摩擦生熱與瞬態溫升，若外圍結構件材料的熱導率極低，局部熱量將被死死封裝在關節封閉腔體內，直接引發電機退磁與驅動晶片過溫保護降頻。因此，人形機器人材料的底層篩選標準，已演化為屈服強度、抗疲勞極限、密度、介電常數、電導率與熱導率六維一體的綜合熱物理博弈。

材料思維大轉變：不只要夠硬，還要會散熱、抗干擾

傳統工業機械臂優先追求硬度，大量使用鑄鐵、鋁合金，不怕重。但人形雙足機器人完全不一樣：機身越重，電機負荷就越大，續航跟動態靈敏度都會被拖垮。再加上軀幹塞著千瓦級大算力晶片、關節裡裝上 GaN/SiC 第三代半導體，運行時會產生大量熱量，還會釋放很強的電磁雜訊。如果材料只顧結構強度，會出現兩大麻煩：

1. 電磁干擾亂掉感測數據：雜訊滲進編碼器、高精度類比晶片，造成傳感器讀數錯亂，甚至 MCU 直接死機重啓；

2. 熱散不出去：關節密閉空間積熱，電機退磁、晶片過熱降頻，機器人直接性能打折。

所以現在選材料不能只看強度，要同時權衡：強度、抗疲勞、重量密度、導熱、導電、

絕緣防靜電六大指標。

1、改性 PEEK 複合材料：關節減重耐磨的好幫手

鋼材密度高，會加大關節轉動慣量，讓動作變遲鈍。現在流行三元改性 PEEK，摻入奈米碳纖維、石墨、PTFE。

■密度只有鋼的 1/5 不到，比鈦合金還輕 65% 以上；

■不用潤滑油也能維持低摩擦，不怕潤滑劑滲出來弄髒光學、觸覺感測器；

■幾百萬次往復運動也不容易磨損，很適合靈巧手、諧波減速機的襯套零件。

2、熱塑性碳纖 CFRTPE：外殼同時做防電磁屏蔽

普通塑膠外殼擋不住電磁

表 1：功率陶瓷基板性能對比

特性與測試指標	傳統直接覆銅氧化鋁基板 (Al ₂ O ₃ DCB)	活性金屬焊接氮化鋁基板 (AlN AMB)	活性金屬焊接氮化矽基板 (Si ₃ N ₄ AMB)	人形機器人關節伺服逆變器影響評估
抗彎強度 (Bending Strength)	350 ~ 450 MPa	300 ~ 400 MPa (質脆，極易崩邊)	> 650 ~ 850 MPa (機械韌性極致突破)	承受關節跳躍、急停撞擊的高動態機械剪切力，抗開裂能力提升 2 倍以上。
斷裂韌性 (KIC)	3.5 ~ 4.0 MPa·m ^{1/2}	2.5 ~ 3.0 MPa·m ^{1/2} (極易產生微觀裂紋)	> 6.5 ~ 7.5 MPa·m ^{1/2} (高韌性陶瓷旗艦)	徹底終結陶瓷基板在高頻脈衝震動下裂紋向銅層內部擴展的致命失效路徑。
室溫熱導率 (Thermal Conductivity)	20 ~ 24 W/m K (散熱瓶頸明顯)	170 ~ 190 W/m K (高導熱但機械性能差)	> 90 ~ 100 W/m K (高導熱製程全面量產)	解決狹小關節腔體內熱流密度破百瓦時的傳熱瓶頸，使晶片結溫降低 15~20°C。
熱膨脹係數 (CTE, 25~300°C)	7.0 ~ 7.4 ppm/K	4.5 ~ 4.7 ppm/K	3.0 ~ 3.4 ppm/K (極度貼近 SiC 晶片)	與第三代半導體晶片 (SiC: 4.0 ppm/K) 熱膨脹係數完美匹配，熱應力失配降低 60%。
極限熱震循環壽命 (-40°C~175°C)	<300 ~ 500 次循環 (焊點與銅層龜裂)	~ 1,000 次循環 (陶瓷內部應力裂紋)	> 5,000 次循環無分層開裂	完美覆蓋機器人關節全生命週期內數萬小時的高頻加減速交變熱負荷工況。
主要供應商與代表產品	羅傑斯 (Rogers)、富樂德 (FerroTec)	日本同和金屬 (DOWA)、丸和 (Maruwa) DOWA、	日本電化 (Denka)、富樂德	Si ₃ N ₄ AMB 成為車規與機器人高端第三代半導體功率模組的絕對統治級標準。
適合場景	僅適用於低端低壓輔助驅動	散熱優異但抗震能力差，無法用於高動態關節	綜合性能最優解，高功率密度一體化必選	實現驅動器與電機端蓋結構合一，將單關節電控體積直接壓縮 40% 以上。

波。新一代 CF RTP 連續碳纖維複合材料，在基材內加入碳奈米管、石墨烯，或是內層濺射銅鎳合金薄膜。

■幾分鐘就能壓製出複雜外殼，可回收，不像舊式熱固碳纖維成型要花數小時；

■寬頻電磁屏蔽效果可達 65 80dB，隔絕 99.99% 輻射干擾；

■表面電阻控制在防靜電黃金區間，運動摩擦產生的靜電可以及時導走，避免靜電擊穿精密晶片。

3、功率陶瓷基板對比：機器人關節底下的散熱底座

伺服逆變器的晶片不是直接貼在殼體，是墊一層陶瓷基板，它負責絕緣 + 傳熱，對可靠性影響極大。

封裝材料大進化：從錫焊、銀燒結走到微米銅燒結

人形機器人關節動作劇烈，深蹲、跳躍瞬間電流可以衝到額定的 5-8 倍。SiC/GaN 晶片幾十毫秒內溫度暴升一百多度，又快速降溫，反覆熱脹冷縮。如果晶片和基板之間的焊接材料不行，就會慢慢出現裂縫、脫焊，驅動器直接報廢。

■傳統錫焊 SAC305：溫度一高就容易蠕變變形，導熱也一般，高階機器人正在逐步淘汰。

■奈米銀燒結：導熱很強，但銀很貴；而且潮濕加電場環境下會出現銀遷移長晶鬚，造成短路，只適合不計成本的特種機器人。

■抗氧化微米銅燒結（現在的主流）不用昂貴銀粉，改用微米銅顆粒，透過特殊有機配方解決銅容易氧化的老問題。

1. 常溫存放不容易氧化，不需要冷凍保存；
2. 導熱能力追上銀燒結，抗電遷移能力遠勝銀；
3. 耐高溫、抗熱疲勞，壽命是傳統錫焊的 10 倍以上；
4. 材料成本比銀燒結下降 80% 以上。

這一技術突破很關鍵，它解決了高可靠伺服驅動「貴」的痛點，是未來機器人走向量產降本的重要基礎。

感知類核心電子材料：柔性觸覺與電子皮膚

過去機器人的力感測器都是硬邦邦的金屬元件，只能裝在手腕關節，沒辦法鋪滿彎曲的手指外殼。想要靈巧用手輕柔拿玻璃杯、水果，就需要柔性電子皮膚 (Electronic Skin, E-Skin)。

1. 碳奈米管 (CNT, Carbon Nanotubes)、石墨烯 (Graphene) 導電薄膜把碳奈米管 / 石墨烯摻進彈性高分子，形成導電網絡。按壓、

彎曲的時候，內部碳材料之間距離改變，電阻就會跟著變化，藉此感知壓力大小。現在製程可以做到每平方公分 400 個感測像素，靈敏度很高，可以捕捉很輕微的觸碰與滑動。

2. 微結構 PDMS 矽膠基底 PDMS 是現在電子皮膚最主流的彈性基材。工程師會在表面做出金字塔、柱狀微結構，放大微小壓力帶來的變形，提升觸覺靈敏度。經過 200 萬次反覆擠壓摩擦，性能漂移也很小。
3. 可自修復 PU 防護膜 工廠、家庭環境裡，機器人皮膚很容易被金屬毛刺、刀具劃破。新一代自修復聚氨酯 PU，分子鏈帶有動態可逆化學鍵。薄膜被切開後，把斷面貼合，室溫放置十幾個小時，強度跟絕緣能力可以恢復 95% 以上。不用直接更換整塊皮膚，降低維護成本。

極限散熱、電池與原材料供應鏈

1、機器人不同部位的散熱方案

人形機器人不同模組的散熱難題完全不一樣：

■軀幹大腦 (Thor 這類千瓦級晶片)：靠超薄微型均溫板 VC + PCM 相變導熱墊。VC 利用液體蒸發液化快速把熱量擴散開；PCM 相變材料吸

收瞬間爆發的熱突波，防止晶片短時間衝過溫度上限。

■ 四肢關節伺服驅動：空間狹小裝不了大散熱鰭片，主要靠氮化矽陶瓷基板 + 銅燒結製程，透過關節金屬殼體向外散熱，重點抗反覆熱震。

■ 電池包：氣凝膠隔熱墊做防火牆，搭配微通道液冷板，控制每顆電芯溫差，阻止熱失控連鎖蔓延。

■ 靈巧手觸覺模組：使用柔性石墨烯散熱膜，又要導熱又要能跟隨手指彎曲。

2、高能量密度電池：矽碳負極電芯

傳統石墨電池已經接近極限。矽材料儲電能力是石墨的十倍，但充放電會膨脹 300%，很容易粉化報廢。現在透過奈米矽顆粒外裹碳殼、嵌入多孔碳骨架緩衝膨脹，做出矽碳負極電芯，體積能量密度衝破 800Wh/L，還支援 4C-5C 大倍率瞬間放電，滿足機器人跳躍、負重時的大電流需求。當然也要搭配氣凝膠隔熱、eFuse、火工熔斷器，防範熱失控風險。

傳統的石墨負極鋰離子電池在體積能量密度上已逼近其理論極限，無法滿足機器人動輒數千瓦的瞬間放電以及長達數小時的續航要求。近兩年，產業界迎來了 800Wh/L 高倍率矽碳負極 (Silicon-Carbon Anode) 電芯材料的歷史性量產

圖說：寧德時代 2026 年最新發佈的濃縮電池採用高鎳正極和低膨脹矽碳負極實現了 350 Wh/kg 單體電池能量密度



圖片來源：寧德時代官網

突破。純矽材料的理論比容量高達 4200 mAh/g，是傳統石墨的十倍以上，但其在充放電鋰化過程中會產生高達 300% 的劇烈體積膨脹，導致固體電解質界面膜 (SEI) 持續破裂重組，電芯內部粉化失效。為了解決這一致命缺陷，最新的高密電芯採用了奈米級矽顆粒包覆與多孔碳骨架支撐技術。透過化學氣相沉積 (CVD) 在奈米矽表面生長出具有優異韌性的導電碳殼，並將其嵌入至具有豐富緩衝孔隙的三維石墨烯或碳奈米管網絡中。這種矽碳複合架構完美吸收了矽的體積膨脹應力，並大幅提升了鋰離子的固相擴散動力學，使得這顆匹配高鎳三元正極 (如 NCM811) 的電池包不僅體積能量密度突破 800Wh/L，更具備了 4C 甚至 5C 的超高倍率放電能力，足以支撐機器人在瞬間爆發巨大力

矩進行跳躍或接住重物。然而，高密度的代價是極為嚴苛的熱失控 (Thermal Runaway) 風險。為此，電池包內部全面引入了奈米氣凝膠 (Aerogel) 隔熱墊與陶瓷塗覆隔膜，配合固態電子保險絲 (eFuse) 與智慧火工斷路器，構築了能夠在 1200°C 極端高溫下保證相鄰電芯不發生熱蔓延的極限防護體系。

小結

大模型決定機器人「會不會思考」，晶片決定「運算快不快」，但先進結構材料、陶瓷基板、銅燒結封裝、散熱方案、柔性觸覺基材，決定機器人能不能扛住真實世界的撞擊、高熱、磨損，實現商業量產。 CTA