



# 先進功能性金屬材料創新應用趨勢

財團法人金屬工業研究發展中心副工程師 / 莊文碩  
財團法人金屬工業研究發展中心副工程師 / 蔡和霖  
財團法人金屬工業研究發展中心副執行長 / 王俊傑  
財團法人金屬工業研究發展中心副工程師 / 陳柏堯  
柏林股份有限公司總經理 / 陳哲生  
元祥金屬工業股份有限公司工程師 / 張家榜

關鍵字：先進金屬材料、先進高強度鋼、先進鋁材、新型銅合金、金屬基複合材料

## 摘要

金屬材料具備優異機械性質、輕量化、耐蝕、磁遮蔽、可循環...等功能性設計，隨著全球產業發展朝向環境永續、資通訊發展、航太科技、防疫科技布署...等，以運輸產業電動化車輛為例，其結構件需要同時具備輕量化、高強度及制震特性，達到降低車身重量、安全性、續航力以及大功率快速充電...等功效。本文收集整理國內外先進金屬材料發展需求及應用趨勢，提供產學研相關研發人員快速獲得新材料研究方向，掌握未來新興產業應用發展需求。

## 一、前言

隨著全球暖化造成越來越惡劣的極端氣候，像是越來越強的颱風/颶風，越來越頻繁發生的乾旱及野火，越來越劇烈的強降雨，以及隨著南北極升溫越來越抓不住極地渦旋造成的暴風雪等等，使得國際間的環保意識逐漸抬頭，大聲疾呼產業應用發展應快速朝向發展綠能，達到減少溫室氣體排放，同時要進行節能，期望各國能在2030完減碳50%，並在2050完成碳中和的目標。永續發展，成了當前產業最需要考量的議題；輕量化，正是金屬產業目前發展最主要的目標。

另一方面，全球正經歷著製造業區域化、碳中和、大規模傳染病...等，造成像是供應鏈中斷、原物料價格上漲、資通訊產業加速發展、防疫抗菌受到重視、太空相關產業快速興起等等，都使得功能性金屬材料的開發需求大增。

全球減碳政策帶動車輛產業朝向低耗能、低排放及低汙染，更進一步禁售燃油車輛，車輛電動化趨勢成為全球車廠產業布局重點。就運輸產業來說，除了傳統的安全性之外，由於節能減排的趨勢，使高強度、耐碰撞且輕量化之金屬材料需求蓬勃發展。此外，由於汽車產業電動化的趨勢，材料開發需求不僅止於應用在車體結構，電池殼件、充電樁材料等等也成了重要的創新應用；就通訊產業來說，疫情的影響加速了遠距辦公、遠距教學等等的產業應用，使得5G快速地落地發展，具電磁遮蔽、高散熱、耐腐蝕之金屬基複材就成了理想的材料；就太空產業來說，SpaceX提出星鏈計畫是最吸引人的應用，透過低軌道衛星之鋪設，讓地球被上萬顆低軌通訊衛星圍繞，藉此達到不受地形影響的資通訊網路，其中最關鍵的低軌衛星同樣需要輕量化、高強度、高剛性、低熱膨脹係數的材料，此外，為了因應大範圍溫度熱循環且具高量輻射線的外太空環境，耐疲勞、抗輻射材料性質更是不可或缺；就海洋科技產業來說，不論是國防相關的國艦國造政策，還是能源相關的風電綠能政策，高強度耐腐蝕的金屬材料開發是不可或缺的

一環。就醫療產業來說，由於抗生素濫用造成的問題，使得抗菌醫材的開發需求再次浮上檯面。目前功能性金屬材料開發與種類主要分成先進鋼材、高強度鋁合金、新型銅合金、非鐵金屬混成材料，以下便逐一介紹近年來相關的創新應用趨勢。

## 二、先進鋼材

鋼材可應用於環境溫度-196°C~650°C、機械強度100~5,000 MPa及耐蝕特性，是目前運用最普遍金屬材料，常見應用於結構材料，包括建築、車輛、能源、工具機、石化、國防、民生...等產業，屬於國家產業經濟發展基礎材料[1]。依據ENERGY社群網站報導顯示2020年全球鋼產量約為18.64億公噸，瑞典將於2024年完成建置全球最大氫能煉鋼廠，朝向綠色鋼材目標發展[2]。先進鋼材開發朝向輕量化高強度、嚴苛操作環境、易加工成形、低成本...等目標，以下介紹先進高強度鋼及高氮鋼兩項具應用發展潛力鋼材。

### (一) 先進高強度鋼

先進高強度鋼種類眾多，包括雙相鋼 (Dual Phase, DP)、複相鋼 (Complex-Phase, CP)、麻田散鐵鋼 (Martensitic, MS)、相變誘發塑性鋼 (Transformation-Induced Plasticity, TRIP)、熱沖壓鋼 (Hot-Formed, HF)、雙晶誘發塑性鋼 (Twining-



表 1 先進高強度鋼種類之特性比較與應用說明

項目	種類	特徵及性質	缺點
第一代先進高強度鋼 (AHSS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DP (Dual Phase)</li> <li>• CP (Complex-Phase)</li> <li>• TRIP (Transformation-Induced Plasticity)</li> <li>• MS (Martensitic)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 相成份：肥粒鐵母相、麻田散鐵、變韌鐵...等多種微結構相</li> <li>• 特性：強塑積 (強度 × 延性) 性能小於 25 GPa%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 低延展性</li> <li>• 不易加工成形</li> </ul>
第二代先進高強度鋼 (U-AHSS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• L-IP (lightweight with induced plasticity)</li> <li>• TWIP</li> <li>• SIP (shear band formation-induced plasticity)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 相成份：沃斯田鐵穩定相，含高錳含量及其他合金相</li> <li>• 特性：兼具良好強度與加工成形特性，強塑積性能大於 50 GPa%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 合金添加造成成本高</li> <li>• 產生延遲開裂</li> <li>• 難銲接</li> </ul>
第三代先進高強度鋼 (X-AHSS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enhanced DP</li> <li>• Enhanced TRIP</li> <li>• Low cost TWIP</li> <li>• TPN (Three-Phase steel with Nano-precipitation)</li> <li>• QP (Quenching and Partitioning)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 相成份：透過晶粒細化提升第一代高強度鋼性質</li> <li>• 特性：合金添加少成本低，適用於多種成形製程技術，強塑積性能大於 25 GPa%</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 需搭配特殊製程步驟 (如快速冷卻步驟)，仍在研發階段</li> </ul>

Induced Plasticity, TWIP) ...等。先進高強度鋼特性比較與汽車產業應用如表1所示 [3, 4]，從第一代及第二代先進高強度鋼開發，透過材料成份設計及製程溫度條件控制，達到控制鋼材內微組織，獲得所需強度、延性、韌性及疲勞特性，實現新能源車體所需薄型輕量化及高強度複雜結構設計，於車體撞擊區 (Crash zone) 提高撞擊能量吸收，以及乘客空間 (Passenger compartment) 提升結構強度，讓先進高強度鋼材功能設計應用超過傳統碳鋼表現，已經成功降低鋼板厚度同時兼具安全性，成功讓車體結構減重39%。全世界先進鋼廠正如火如荼投入第三代先進高強度鋼研發，目標瞄準同時具有拉伸強度超過1,000 MPa、延展性30%以上、容易加工成型...等特性[4]，利用特殊合金化與熱機成形製程技術，改善強度與延展性之材料特性整合。與第一代相比，透過

製程優化使得其延展性及成形性大幅提升，例如：將中錳鋼透過沃斯田鐵反轉回火製程 (Austenite Reversion Tempering-annealing, ART-annealing)，可達到拉伸強度800-1,500 MPa及延展性30-45%[5]；此外，第三代先進高強度鋼與第二代相比更強調使用較少合金元素，進一步壓低生產成本以及提升接合效率。為了加速材料開發效率，國內外學研機構已經將數位材料設計方法 (如Integrated computational materials engineering, ICME) 導入[6]，現階段除了先進高強度鋼成功應用於車輛產業外，未來更可加速擴延應用於軌道運輸產業、能源、基礎建設、船舶、航太...等產業。

## (二) 高氮鋼

高氮鋼材料內氮含量0.4~1.0 wt%，其

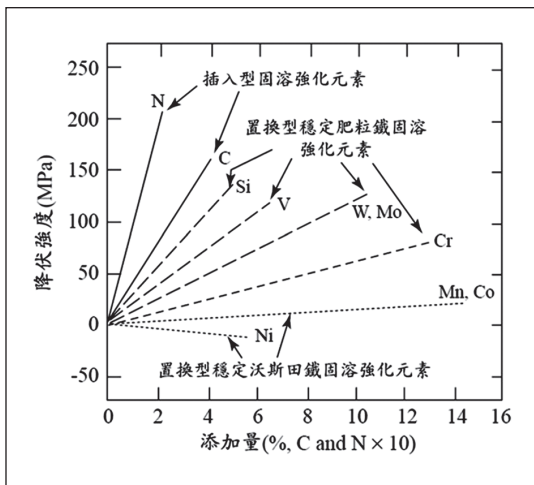


圖 1 元素添加對鋼材料之機械性質影響

中種類包括低鎳高氮與無鎳高氮不銹鋼及合金鋼，可應用於高溫耐磨耗機械軸承與襯套、耐高壓低溫容器及耐蝕無過敏反應醫材...等。氮元素可以提升鋼材機械、腐蝕及耐候特性，增加氮含量主要以高壓冶煉技術及常壓氮化物添加兩種方式進行，氮原子可以插入鐵晶格形成穩定固溶相。添加合金成分鉻、鉬、釩、矽...等，可幫助鋼水提升氮含量如圖1所示[7]，再藉由熱機處理技術控制相變化，將氮原子固定於鐵晶格內，達到固溶強化使差排及晶界不易移動，提升材料硬度、降伏強度與抗潛變能力，特別是耐局部腐蝕、晶界腐蝕、孔蝕及間隙腐蝕等耐蝕特性同步提升；藉由銲接製程條件與氮氣保護氣氛控制，可以提升鋼材銲接性與維持鋼材接合強度。由於鎳添加量減少，應用於生醫產業解決人體過敏問題，高氮含量添加亦提升材料整體機械性能，突破嚴苛環境限制

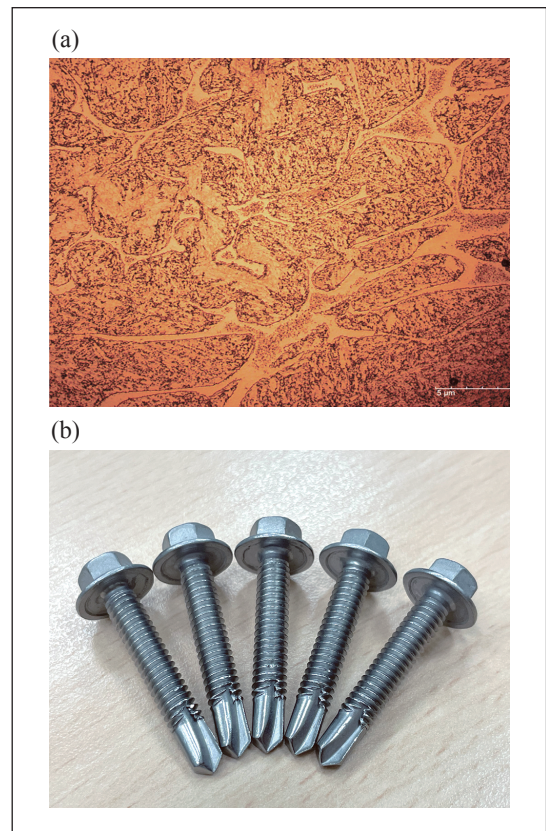


圖 2 (a) 高氮耐蝕高強度不銹鋼材料之顯微組織金相照片；(b) 一體型建築用鑽尾螺絲

大幅增加結構材料應用之可靠度。德國研究團隊將P2000 (nickel-free, high-nitrogen austenitic steel X13CrMnMoN18-14-3) 高強度、高延展性與耐蝕之高氮沃斯田鐵相鋼，應用於骨手術醫材，其價格與品質均優於傳統316L、Ti6Al4V或CoCrMo醫用材料[8]。國內已成功開發含氮量0.09 wt%之麻田散鐵相組織耐蝕高強度不銹鋼材料[9]，機械強度530~545 MPa，耐蝕試驗達1,200小時以上無鏽蝕 (SUS420及SUS304於鹽霧600



小時皆產生鏽蝕)；此材料可用於生產一體型建築用鑽尾螺絲如圖2所示，螺絲中心硬度(HV)達到605、外部硬度(HV)達到642，減少傳統兩截式鑽尾螺絲生產製程(銲接、電鍍)，加工成本降低20%以上，不銹鋼扣件使用壽命延長50%以上，未來應用端如太陽能面板固定於農業附屬設施。

### 三、先進鋁材

鋁為地球上含量最多金屬元素，其密度為 $2.7\text{g/cm}^3$  (只有鋼鐵1/3)。鋁具有強度高、耐腐蝕、容易加工、無低溫脆性、導熱/導電性佳、反射性強、無磁性、無臭、無毒、不易燃、抗輻射性等特性；依據全球鋁材市場應用市場趨勢分析，工業用鋁應用於交通、建築、包裝...等如圖3所示，交通及建築為主要需求各佔25%，其次是包裝(17%)及電子(12%) [10]。全球鋁資源來源包括原生鋁

及循環鋁材，對於生產原生鋁材及鋁製品循環再利用，世界各國已朝向低耗能及低碳排趨勢發展。低耗能：生產原生鋁錠過程所需能源從 $17.5\text{ kwh/kg}$ 下降至 $11.5\text{ kwh/kg}$ ；而再生鋁錠所需能源僅原生鋁5%以下( $0.6\text{ kwh/kg}$ )；低碳排：Rio Tinto推出的世界上首次通過認證的低二氧化碳原生鋁Renew AlTM，俄鋁推出的低碳鋁品牌ALLOW，都可以實現每生產一噸鋁排放二氧化碳約3噸，遠低於世界平均水準。

#### (一) 中/高強度鋁合金

中/高強度鋁合金拉伸強度大於 $480\text{ MPa}$ ，主要是2系列Al-Cu-Mg、5系列Al-Mg、6系列Al-Mg-Si及7系列Al-Zn合金 [10]。以6系列鋁合金為例，此合金屬於熱處理型耐蝕材料，經過二次加工製程後進行固溶與時效處理提升強度；Space X開發

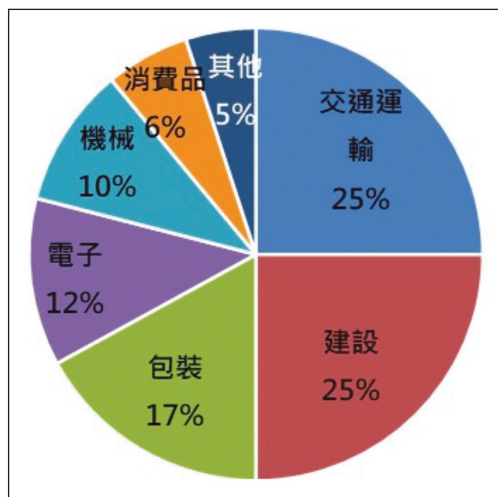


圖 3 全球工業用鋁比例



高強度高硬度Al-Mg合金於先進火箭，解決低軌道衛星火箭發射使用環保型高濃度過氧化氫（ $H_2O_2$ ）燃料（取代聯胺（ $N_2H_4$ ））產生材料相容性問題，6063鋁合金對於過氧化氫相容性高且可耐高壓，可應用於新型燃料槽設計開發。此外，國際電動車大廠Tesla為合理控制產品製造成本，開發大型一體成形壓鑄製程搭配新型高導電高強度鋁合金材料，成功將製程化繁為簡，提升整體壓鑄鋁合金車架性能與安全性，使得電動車輛售價可更親民。

隨著國際標竿業者如3C廠Apple、家俱廠IKEA、飲料廠Coca-Cola等，因為回收鋁料循環過程僅需要生產原生鋁材（鋁礬土精煉與電解）電力需求5% [11]，逐漸要求供應鏈提高回收鋁料使用比例，朝向節能減碳之產品訴求。其中7系列航太級鋁合金強度超過700 MPa，鐵及矽為兩大關鍵影響元素，隨著加工與循環過程造成鐵含量累積，鐵含量必須控制低於0.15wt%以下，藉由除鐵技術避免富鐵相（ $Al_3Fe$ 、 $\alpha-AlFeSi$ 、 $\beta-AlFeSi$ ）形成，維持材料成形性與機械性質[12]，即可將大量航太加工回收料應用於高階低碳排綠色產品。此外，歐盟CORDIS研發循環鋁材除鐵技術，解決車輛產業於5系列及6系列報廢產品，回收循環後可再回到產業應用[13]。

## （二）多孔鋁材

超輕量化多孔鋁材相對於實體材料，具

備輕量化（密度 $0.07\sim 1.0\text{ g/cm}^3$ ）、吸收震動衝擊能量（吸收衝擊能量 $1.0\text{ MJ/m}^3$ ）以及絕熱隔音（熱導率 $0.3\sim 35.0\text{ W/mK}$ ）...等功能性[14]。多孔鋁材於內部孔洞分布特徵，可分為開放式（Open cell）及封閉式（Close cell）兩種，其製程方式有直接發泡製程（Direct foaming）及間接發泡製程（Indirect foaming）兩大類；直接發泡製程是將高壓氣體通入熔融金屬液中，將細微氣泡分散入金屬液內，而間接發泡製程則是放入發泡劑（如 $TiH_2$ ），預先製作出預發泡材料，再進行加熱發泡。日本Shiko Wire公司利用砂模鑄造開發制震降躁橫樑應用於工具機，此橫樑結構外殼為 $AlZn10Si8Mg$ 合金，內部填充ALPORAS封閉式多孔鋁芯材 $AlCa1.5Ti1.5$ 合金，雖然結構件製造成本微幅增加，但是於370 Hz振動頻率下，可吸收衰減震動達到降低噪音60%，已成功應用於七百多台工具機內[15]。此外，奧地利理工學院與BMW合作，同樣利用鑄造方式，開發出引擎支架內複合多孔鋁材，達到輕量化特性及吸收衝擊特性；近期亦整合多孔鋁材輕量化、制震及穩定電池溫度等特性，於電動車電池殼體設計應用如圖4所示[16]。

## 四、新型銅合金

銅金屬具備良好導電/熱特性、延展性佳、易加工成形及抗菌效果（僅次於銀），但其缺點強度低易變形及硬度低不耐磨耗；但可透過合金設計及製程控制來改善。依

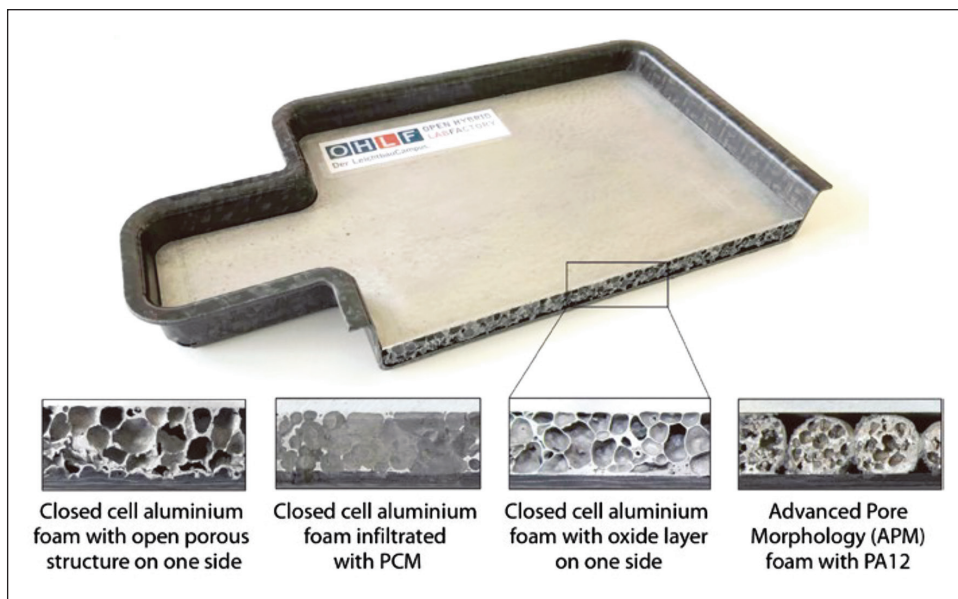


圖 4 新型電動車用電池殼體設計，上層為鋁板，內層為多種多孔鋁材，外殼為有機高分子材料（©TU BS IWF | Fraunhofer IWU@OHLF）

據2019年銅應用需求統計分析，包括設備（31%如電腦）、建築（28%如通訊系統）、基礎設施（16%如電力裝置）、運輸（13%如電動車輛）及工業（12%如馬達）[17]。銅導電性質好常用於電子產業製作高導電線路，銅合金則是添加不同元素成分，調整材料結構強度、散熱及抗腐蝕特性，符合能源、石化及船舶產業應用需求。隨著產業型態與生活環境變化，工業4.0朝向無人工廠及車輛電動化，高性能銅合金性能隨之被開發應用，以下介紹兩類銅合金發展趨勢。

### （一）高強高導銅合金

鈹銅為最早開發出來同時兼具高強度與

高導電性質，透過少量（1-2 wt%）鈹元素的添加，經過均質化、熱軋、固溶、冷軋及時效等步驟，可以得到與一般銅合金相比相當優異的機械性質，像是抗拉強度1,200-1,400 MPa及硬度354-390 VHN；此外，鈹銅導電率為22-28%IACS（鋼鐵為2-3%IACS）及導熱率為105 W/mK（鋼鐵為80 W/mK）[18]。由於兼具強度及導電導熱性，常被應用在電子元件、航空及車輛產業上，然而鈹具毒性被列在歐盟的有害物質限制（Restriction of Hazardous Substances, RoHS）規範中[19]，美國職業安全衛生署（Occupational Safety and Health Administration, OSHA）聲明提到接觸鈹的工作人員會增加罹患慢性鈹病，鈹中毒和肺癌的風險[20]。



為了取代具毒性的鈹銅，一系列高強高導銅合金的研發因此展開。有學者提出將鐵與銅去進行結合，希望將鐵的強度、硬度及磁性引入銅合金中，得到兼具高導電、導熱以及高強度，同時又保有抗腐蝕特性的材料。從相圖來看，鐵在銅合金中的固溶度不到3 wt%，因此多餘的鐵會在凝固過程中析出，得到雙相結構的銅鐵合金（Copper Ferro Alloy, CFA），然而由於其偏析特性，使得製造整體成分及微結構均勻的銅鐵合金相當困難。幸好，隨著冶煉技術的提升，實現了銅鐵合金的商業化，像是CFA95、CFA90及CFA70分別代表5 wt%、10 wt%及30 wt%鐵含量之銅鐵合金，透過鐵含量控制合金導電性、導熱性、電磁屏蔽性能及強度，得到適當之應用性質。例如：CFA95的導電性為47%IACS，拉伸強度約為550 MPa，電磁屏蔽效應在1-1,000 MHz區間（為影響電腦設備的頻率範圍）可達70 dB [21]，可應用於汽車、電氣、電子、通訊等產業中。像是CFA95的銅箔可包覆在電纜上當作電磁屏蔽及保護材料，其高導電、具強度及電磁屏蔽性的線材可做成電器、電子、通訊產品甚至是機器人的連接端子。

高強度高導電的銅合金特性指標抗伸強度500-900 MPa及導電率45-80%，其設計方法及熱機處理手段逐漸明朗。以Cu-Ni-Si系統為例，添加Cr或者是Fe且在低溫下時效熱處理，可有效得到大量且細小之析出相，大

幅降低銅母相中的Ni及Si之固溶量，使其強度及導電性大幅提升[22]。此一系列的學理探討由QuesTek公司發揚光大，透過電腦模擬以及人工智慧運算，快速預測設計出可應用於航太產業之高強度無鈹銅合金Cuprium合金；藉由十幾奈米析出相強化，降伏強度980 MPa、延展性15% [23]。相關銅合金系統之拉伸強度及導電性分布如圖5所整理[24]，其中像是Cu-Fe-P系統、Cu-Ni-Si系統、Cu-Cr-Zr系統，國外皆已開發出商用合金，例如美國環球金屬開發的C19400及C70250分別為CuFeP及CuNiSi系統，日本三菱材料開發的TAMAC194及MZC1分別為CuFeZnP及CuCrZr系統。目前此類新型高強度高導電銅合金可應用於電力、電子、機械以及汽車的端子連接器。在車輛產業方面，由於節能減排的全球浪潮，電動車成為了未來的趨勢，其所需的快速充電技術需要高的電壓（預計提升至400 V）才能完成，因此充電裝置連接器材料的導電性就格外重要，避免電流大幅提升造成材料溫度過熱。除了高導電性之外，由於充電裝置須經常性插拔，連接器材料的高強度及耐磨性亦是未來的發展趨勢。在電子產業方面，隨著產業迅速發展，IC封裝用的導線架需要更輕薄短小的材料，需要能具有保護晶片支撐內部結構的強度（強度需落在550-650 MPa），並同時不能影響電及熱的傳輸（導電性須達80-85%IACS）。目前常用在導線架的材料為CuFeP及CuCrZr系列的高強高導銅合金 [25]。



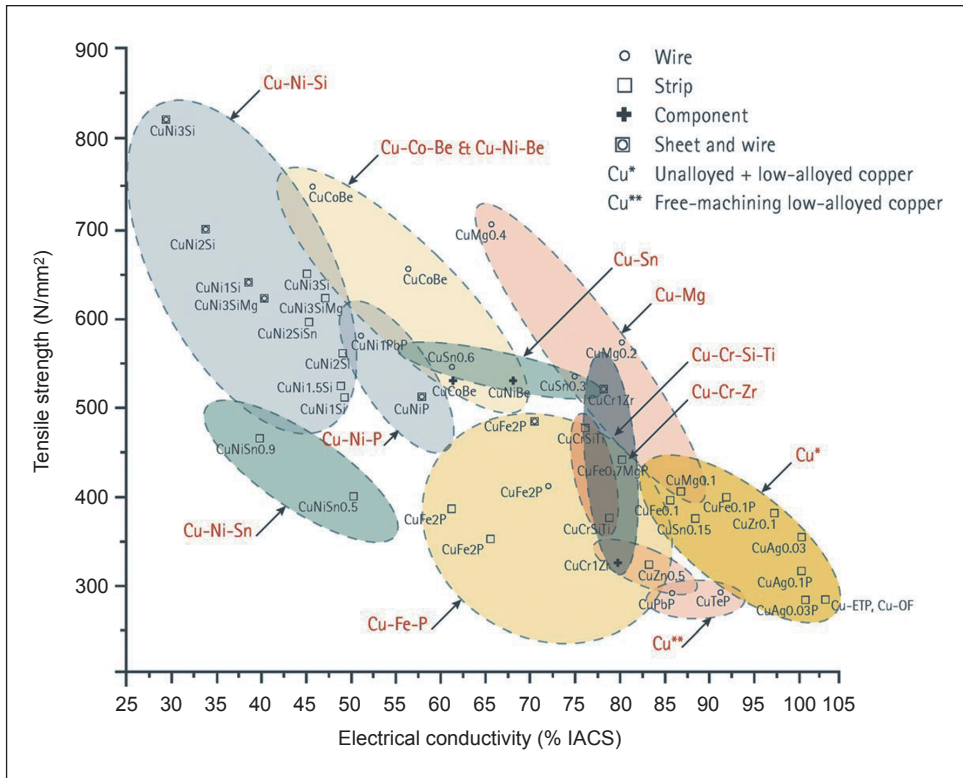


圖 5 銅合金之拉伸強度 - 導電性質圖

## (二) 抗菌銅合金

長效型抗菌銅合金應用於居家防疫用品，包括常接觸開關/按鍵/握把/扶手、盥洗用具及織品；此外，應用於船舶（如船底）與養殖產業（如箱網）可延緩生物附著（如藤壺），達到降低人力維護成本。銅合金滅菌理論是由多種因素組成，銅合金中所釋出之銅離子，分別為Cu<sup>+</sup>及Cu<sup>2+</sup>，都具備干擾幾種微生物（Microbial）之代謝活性及破壞細胞 DNA之完整性[26]。根據國外研究單位實驗發現暴露於銅及不銹鋼表面之冠狀病毒

（HuCoV-229E）形態變化，於不銹鋼上病毒株存活於表面上10分鐘後，仍可見到完整病毒株存在；而病毒株於銅表面上，卻看到成團受損病毒株，更於30分鐘後，觀察到病毒損傷程度劇增，證實銅確實具有破壞病毒之功效[27]。此外，目前銅離子也逐漸開始取代銀離子在抗菌上的應用，雖然銀抗菌效果最好，但是銀離子或奈米銀通過皮膚會進入人體內，會造成體內重金屬累積，長期會有損健康；銅是人體必要元素僅次於鐵及鋅，而人體並不需要銀元素，銅元素進入人體內可隨著新陳代謝排出體外。因此，銅合金人

體親和性較佳與材料價格相較於銀，更適合導入民生產業高值化防疫科技應用。

## 五、金屬基複合材料

根據全球金屬基複合材料（Metal Matrix Composites, MMC）及纖維金屬層壓板（Fiber Metal Laminate, FML）市場調查報告，MMC產業需求量5千公噸（2012年產值2.3億美元）增加至7千公噸（2019年產值4億美元）[28]，FML於2022年產值200萬美元至2027年產值達330萬美元（年複合成長率10%）；金屬基複合材料是指將兩種以上異質材料進行混合，常用方法將強化體與金屬母材混合而成，強化體材料包括碳化物（如碳化矽）、氧化物（如氧化鋁）、氮化物（如氮化鋁）以及碳材料（如石墨）以不同比例添加，均勻分散於金屬母材之中[28]；另一種方式以板材堆疊方式，將金屬板與纖維板（如碳纖維）透過接面接合方式，製作出複合式層狀板材[29]。將兩種以上材料複合應用，突破單一金屬材料無法達到特性，提升產品性能，以下以鋁基與銅基兩種材料說明產業應用趨勢。

### （一）鋁基複合材料

汽車產業開發耐磨耗活塞零組件，將原本鑄鐵材料，改為鋁合金材料，同時加入石墨粉末，利用離心鑄造技術讓石墨粒子可以均勻分布於引擎活塞套筒內壁，當活塞系統

運作時石墨粒子可增加活塞與內壁間磨潤效果，同時改用輕量化鋁合金材料亦增加燃料轉換效率，Al-Graphite材料改善整體引擎活塞系統導熱性、高溫、高壓、抗腐蝕、低熱膨脹以及磨潤性，讓汽車省油順暢穩定。Al-SiC系列材料被開發應用於耐磨耗及散熱產品，高效能工具機由於加工效率、精準度及可靠度產業應用需求，Al-SiC被應用於工具機內部結構件，可以改善設備運作過程震動，避免加工刀具長時間操作時溫度升高及結構件熱變形問題，運作過程中零組件材料往復移動不易磨耗，例如：日本精密陶瓷株式會社Japan Fine Ceramics Co., Ltd.（JFC）以鑄造法製備鋁合金代號為SA301、SA401，布局應用於高可靠度結構件開發。絕緣柵雙極電晶體（Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT）於電動車及軌道車輛大量使用，為了滿足快速充放電需求，高可靠散熱模組已無法使用銅做為散熱材料，Al-SiC材料提供低密度 $2.9 \text{ g/cm}^3$ 、低熱膨脹係數 $13 \times 10^{-6}/\text{K}$ 及散熱性 $155 \text{ W/mK}$ ，可提升電力系統交流電電動機之輸出控制電子零件壽命。

電子通訊產業隨著頻率28 GHz（5G毫米波）及電磁波輻射增益（Gain） $\geq 5.0 \text{ dBi}$ ，必須突破金屬殼件造成訊號屏蔽困境，透過異質混成板材設計出兼具金屬機械性能、質感及熱塑複材質輕、可回收利用特性之混成板材（Hybrid Laminated Material），金屬板與複材層間夾帶陣列天線之設計示意圖如圖6所示，可用於解決5G毫米波通訊時金屬訊

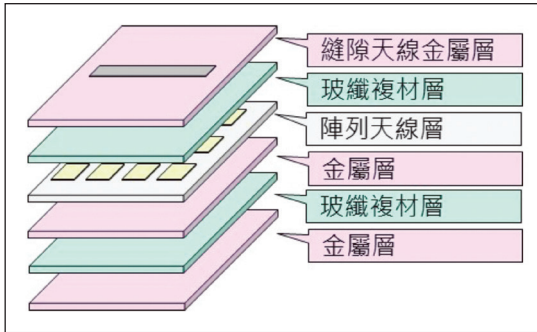


圖 6 異質混成板材結合陣列天線於資通訊設備應用設計示意圖

號屏蔽 (Signal Shielding) 問題。觀察全球混成材料發展及其應用概況，纖維金屬層壓板 (Fiber Metal Laminate, FML) 材質包含金屬 (鋁/鈦/鋼/鎂等)、纖維 (玻纖/碳纖等)、樹脂等材料，應用領域以運輸航太為主，惟近年消費性電子產品等新興應用亦逐漸起步；此外，在纖維金屬層壓板部分，其中，複材的樹脂材料多以熱固高分子為主，考量環保等因素影響，逐漸由熱塑高分子替代熱固高分子，而複材的纖維材料多以聚丙烯睛系 (PAN) 為主，惟對於高剛性結構材料之補強功能下，則多採用瀝青系 (Pitch) 為主。

## (二) 銅基複合材料

根據許多文獻研究結果顯示，為了突破純銅材料熱傳導率同時提升機械性質，可於銅母材加入高導熱率碳材料，包括單層結構奈米碳管約  $3,500 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、多層結構奈米碳管約  $3,000 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、碳纖維約  $1,000 \text{ W}/$

$(\text{m}\cdot\text{K})$ 、石墨烯為  $1,500\sim 5,300 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  及石墨約  $2,000 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  [30]；其中成本最低石墨材料具發展潛力，添加片狀石墨  $30\sim 70 \text{ vol}\%$  於銅箔中，熱導率可達  $503\sim 741 \text{ W/mK}$  (純銅  $400 \text{ W/mK}$ )；此外，銅-碳基材料熱膨脹係數約  $3\sim 10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (純銅  $16.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )，可解決熱變形問題[31]。由於銅基複合材料具備優異熱管理功能，可因應未來電子產品及電動化運輸工具之大功率快速充放電所需高散熱需求；然而，目前此銅基複合材料仍在開發階段，相關學理機制尚未釐清。現有主要添加添加石墨烯或奈米碳管於銅基金屬製程方法，包括熱均壓製程 (Hot Isostatic Pressure, HIP)、粉末冶金 (Powder Metallurgy, PM) 及火花電漿燒結 (Spark Plasma Sintering, SPS)，正如如火如荼展開當中，散熱效率倍增之材料將是熱管理工程中重要突破。

## 六、結論

整體而言，金屬材料的開發以及應用與全球的產業趨勢息息相關，隨著像是全球暖化、5G落地、低軌衛星布局、疫情控制等等新興議題，朝向特定或複數功能性快速發展。因此，除了新型合金材料的開發，添加入陶瓷或高分子強化體的金屬基複合及混成材料也如火如荼的發展，其目的都是為了服務新興的產業議題，達到節能、減碳、吸震、輕量化、具優異機械及物理性質、耐環境腐蝕、抗菌等等之成效。本篇回顧性文章



透過盤點，介紹了先進鋼材、先進鋁材、新型銅合金與非鐵基金屬複合性材料的開發，得到的性質及應用領域，期望使讀者快速了解到最近的產業發展趨勢及相關金屬材料的應用。

#### 參考文獻

1. Y. Gan, "Advanced Steel and Our Society: Better Steel, Better World", Opening Address and the Introduction of the Specific Proceedings, Advanced Steels. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 3-7, 2011.
2. L. Blain, "World's largest hydrogen "green steel" plant to open in Sweden by 2024", available on web: February 26, 2021, <https://newatlas.com/energy/h2gs-green-hydrogen-steel/>.
3. S. Keeler, M. Kimchi, P. J. Mooney, "Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 6.0", WorldAutoSteel 2017
4. T. Nanda, V. Singh, V. Singh, A. Chakraborty and S. Sharma, "Third generation of advanced high-strength steels: Processing routes and properties", Journal of Materials: Design and Applications, Vol. 233, pp. 209-238, 2019.
5. Y. Weng, D. Han, Y. Gan, "Advanced steels: the recent scenario in steel science and technology", Springer-Verlag Berlin Heidelberg and Metallurgical Industry Press, Ch 22, pp. 209-227, 2011.
6. D. Raabe, B. Sun, A. K. Da Silva, B. Gault, H.-W. YEN, K. Sedighiani, P. T. Sukumar, I. R. Souza Filho, S. Katnagallu, E. Jägler, P. Kürnstener, N. Kusampudi, L. Stephenson, M. Herbig, C. H. Liebscher, H. Springer, S. Zaefferer, V. Shan, S.-L. Wong, C. Baron, M. Diehl, F. Roters, D. Ponge, "Current Challenges and Opportunities in Microstructure-Related Properties of Advanced High-Strength Steels", Metallurgical and Materials Transactions A, 51A, pp. 5517-5586, 2020.
7. 謝之駿、林東毅,「全球熱門新鋼鐵材料的發展」,工業材料雜誌,第274期,P.168-P.174,98年10月。
8. M. Becerikli, H. Jaurich, C. Wallner, J. M. Wagner, M. Dadras, B. Jettkant, F. Pöhl, M. Seifert, O. Jung, B. Mitevski, A. Karkar, M. Lehnhardt, A. Fischer, M. D. Kauther, B. Behr, "P2000 - A high-nitrogen austenitic steel for application in bone surgery", PLoS ONE, Vol. 14, e0214384, 2019.
9. 黃偉成, "高性能麻田散鐵 / 沃斯田鐵系不銹鋼", 2017.03.18 發布, <https://www.mirdc.org.tw/TechnologyView.aspx?Cond=A408110002>
10. 劉文海、蔡培軒,「鋁合金篇」,2018 金屬材料產業年鑑, pp. 3-18, 107 年 7 月。
11. P. Ashtari, K. Tetley-Gerard, K. Sadayappan, "Removal of iron from recycled aluminium alloys", Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 51, pp. 75-80, 2012.
12. L. Zhang, J. Gao, L. Nana, W. Damoah, D. G. Robertson, "Removal of Iron From Aluminum: A Review", Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, Vol. 33, pp. 99-157, 2012.
13. D. Griffiths, "Final Report Summary - RECYCAL (High Shear Processing of Recycled Aluminium Scrap for Manufacturing High Performance Aluminium Alloys)", available on web: December 18, 2017, <https://cordis.europa.eu/project/id/603577/reporting/de>.
14. B. Bauer, S. Kralj, M. Bušić, "Production and Application of Metal Foams in Casting Technology", Technical Gazette, Vol. 20, pp. 1095-1102, 2013.
15. J. Banhart, "Metal foams - From fundamental research to applications", Frontiers in the Design of Materials, pp. 279-289, Published January 29, 2007 by CRC Press.
16. R. Schmerler, T. Gebken, S. Kalka, T. Reincke, "Multi-functional battery housing for electric vehicles", Lightweight des worldw, Vol. 10, pp. 26-31, 2017.
17. Distribution of global copper consumption by end use 2019, Published by M. Garside, Oct 13, 2020, <https://www.statista.com/statistics/605463/distribution-of-copper-consumption-worldwide-by-end-use/>
18. High strength copper beryllium Alloys 25, M 25 and M 165 for heavy duty applications", Materion data sheets, Alloy 25 data sheets, <https://materion.com/products/high-performance-alloys/copper-beryllium-alloys/alloy-25-m25-165>
19. T. Akada, H. Izumida, T. Watanabe and K. Iwamoto, "High-strength and high-conductive material to replace beryllium-copper alloys", SEI Technical Review, Vol. 84, pp. 156-159, 2017.
20. 鈹 (Beryllium) 暴露風險：美國新法規修正內容總覽, 3M 臺灣, 2018, [https://www.3m.com.tw/3M/zh\\_TW/worker-health-safety-tw/safety-resources-training-news/osha-beryllium-exposure-limit-regulation/](https://www.3m.com.tw/3M/zh_TW/worker-health-safety-tw/safety-resources-training-news/osha-beryllium-exposure-limit-regulation/)
21. The mechanical and physical properties of Copper Ferro Alloys and their applications, [http://www.cfametal.com/eng/sub02/sub0204\\_01.html](http://www.cfametal.com/eng/sub02/sub0204_01.html)
22. S. Sajadi, S. Hocker, A. Mora, P. Binkele, J. Seeger and S. Schmauder, "Precipitation in a copper matrix modeled by ab initio calculations and atomistic kinetic Monte Carlo simulations", Physica Status Solidi B, Vol. 254, pp. 1600407, 2017.
23. "Be-free, high-strength Cuprium Cu alloy", Questek Innovations, <https://pdf.aeroexpo.online/pdf/questek-innovations-llc/be-free-high-strength-cuprium-cu>



alloy/185379-9399.html

24. "Introduction to the copper conductivity materials database", <https://copperalliance.org.uk/about-copper/conductivity-materials/>
25. Z.D. Li, C.G. Lin, S. Cui, "Development of research and application of copper alloys with high strength and high conductivity", *Advanced Materials Research*, Vol. 1053, pp. 61-68, 2014.
26. M. Vincent, R.E. Duval, P. Hartemann, M. Engels-Deutsch, "Contact killing and antimicrobial properties of copper", *Journal of Applied Microbiology*, Vol. 124, pp. 1032-1046, 2017.
27. S. L. Warnes, Z. R. Little, C. W. Keevil, "Human coronavirus 229E remains infectious on common touch surface materials", *mBio*, Vol. 6, pp. e01697-15, 2015.
28. P.A. Kumar, P. Rohatgi and D. Weiss, "50 years of foundry-produced metal matrix composites and future opportunities", *International Journal of Metalcasting*, Vol. 14, No. 2, pp. 291-317, 2020.
29. M. S. Saveleva, K. Eftekhari, A. Abalymov, T. E. L. Douglas, D. Volodkin, B. V. Parakhonskiy, A. G. Skirtach, "Hierarchy of Hybrid Materials—The Place of Inorganics-in-Organics in it, Their Composition and Applications", *Frontiers in Chemistry*, Vol. 7, 179, 2019.
30. F. Zeng, C. Xue, H. Ma, C.-T. Lin, J. Yu, N. Jiang, "High Thermal Conductivity and Anisotropy Values of Aligned Graphite Flakes/Copper Foil Composites", *Materials*, Vol. 13, 46, 2020.
31. A. Mazloun, J. Kováčik, S. Emmer, I. Sevostianov, "Copper-graphite composites: thermal expansion, thermal and electrical conductivities, and cross-property connections", *Journal of Materials Science*, Vol. 51, pp. 7977-7990, 2016.