

鎂合金在軌道客車上的應用及展望

發布日期：2015 年 01 月 23 日 13:45 採編：www.cnfeol.com

近年來我國軌道交通裝備行業發展迅速，軌道客車速度快、能耗低、舒適性設計、環境友好、以人為本的設計特點，具有其他交通方式無法比擬的優勢。輕量化設計可以實現軌道客車多方面的優化，是軌道客車關鍵技術之一。鎂合金是目前工程應用中密度最小、比強度最高的結構金屬材料，在軌道客車輕量化應用中具有非常好的前景。

一、鎂合金的特點

鎂在元素週期表中排在第十二位，屬於第二主族鹼土金屬。鎂在地殼中的蘊藏量極其豐富，其含量約占地殼總重量的 2.1%，僅次於氧、矽、鋁和鐵等元素而占第八位元。鎂的密度為 1.738g/cm³，鎂合金比鋁合金輕 36%，比鋅合金輕 73%，比鋼輕 77%，是目前工程應用中密度最小、比強度最高的結構金屬材料。鎂合金在材料減重方面的優勢使得它在交通運輸領域備受關注。鎂合金主要具有以下優點：

(1) 高比強度、比剛度和比彈性模量。鎂合金的比強度高於鋁合金，遠高於鋼；比彈性模量和比剛度近似於高強度鋁合金。日本的 Inoue 等人用快冷粉末冶金方法得到的 Mg97Zn1Y2 合金，其屈服強度達到 480MPa~610MPa，同時根據固結溫度的不同有 5%~16% 的大伸長率，是目前世界上強度最高的鎂合金。

(2) 優秀的阻尼和減振性能。與鋁合金相比，鎂合金擁有更優秀的衰減振動和降低雜訊的能力。例如在 20MPa 應力下，常用鎂合金 AZ91D 的衰減係數為 20%，而鋁合金 A380 只有 1%。在 100MPa 應力作用下 AZ91D 的衰減係數可達 55%，AS41 鎂合金的衰減係數更是高達 70%，而同樣情況下鋁合金 A380 的衰減係數只有 4%。鎂合金還具有良好的承受衝擊載荷性能，彈性範圍內鎂合金受到衝擊載荷時，吸收的能量可以比鋁合金件多 50%，而且由於有更好的延伸率，鎂合金收到衝擊後可以吸收更多的能量而不至於斷裂。所以鎂合金是非常好的減振降噪材料。

(3) 優良的機械加工性能和鑄造性能。鎂合金在金屬中屬於非常易於加工的材料，切削阻力小可以滿足高速切削加工，並且加工完成後表面十分光潔，基本不需要磨削和拋光。鎂合金液流動性好，可以鑄造出壁厚很薄、形狀複雜的零

件，而且不容易粘模具，清理模具的費用較低。鎂合金壓鑄件尺寸精度比鋁合金壓鑄件精度高 50%，同時壓鑄週期短，生產效率比鋁合金高 25%，鎂合金加工耗能比鋁合金低 50%。

(4) 良好的導熱、電磁遮罩性能。鎂合金的散熱性能不但比塑膠高的多，比鋁合金也要好。由於鎂合金壓鑄件可以比鋁合金壓鑄件的壁厚做的更薄，所以散熱比鋁合金件更快，同時形狀也可以做得更複雜。鎂合金具有很好的遮罩電磁干擾的性能，適合製作對電磁干擾標準要求嚴格的部件。

(5) 鎂合金材料可以迴圈使用，保護環境。鎂合金比熱較小，與其它金屬相比熔點較低，在迴圈利用熔解時所消耗的能源非常低，還不到新材料製造所消耗的能源的 5%。

二、鎂合金的開發和應用

現在廣泛應用的鎂合金主要可以分為兩種，一種是鑄造鎂合金，另一種是變形鎂合金。目前壓鑄鎂合金在工業已經得到廣泛應用，鎂合金經過變形之後，可以得到更加優秀的綜合力學性能，從而滿足不同的場合需求，所以發展變形鎂合金非常有前景。

鎂合金的特點可滿足航空航太等高科技領域對輕質材料降噪、減振、防輻射的要求，同時可大大改善飛行器的氣體動力學性能和明顯減輕結構重量。目前鎂合金在航空工業上應用很廣泛，其中包括 AZ91、AZ31、ZE41、QE22、WE43 等。

節能與環保的新要求使汽車公司都設法減輕汽車的重量，從而達到降低汽油消耗和溫室氣體排放量的新標準，鎂合金的減重效果可以最大限度滿足日益嚴格的節能的溫室氣體排放的要求。鎂合金具有良好的阻尼係數，減振性能好於鋁合金和鑄鐵。在座椅、方向盤、輪轂上應用可以減少振動，在車門等殼體上應用可以降低雜訊，提高汽車的安全性和舒適性。目前，汽車儀錶、座椅架、方向操縱系統部件、引擎蓋、變速箱、進氣歧管、輪轂、發動機和安全部件上都有壓鑄和變形鎂合金產品的應用。

三、軌道客車的輕量化設計

軌道客車輕量化設計主要是通過優化結構、採用新材料來實現，它主要包括列車車體、車內設備、車外吊掛安裝設備的輕量化。在考慮減輕列車重量的時候，必須在確保車體強度、剛度、動力學和動應力等滿足要求的前提下，儘量實現列車的輕量化。

軌道客車輕量化設計主要考慮軸重限制、節省能源和加速制動等方面的因素。由於鐵路軌道的承受能力有限，因此必須對列車的最大軸重做出限制。列車速度越高，對軌道的衝擊力越大，當運行速度高於 250km/h 及以上時，對軌道的衝擊力就會變得很大，所以速度高於 120km/h 的車輛軸重必須隨車輛速度的升高而降低。軸重超過規定的車輛（包括機車、動車和拖車）不允許上線運行。軌道客車運行時阻力很大一部分是輪軌摩擦阻力，減小列車重量可以有效減小輪軌摩擦阻力，改善轉向架等重要部件的運行條件，同時可以減小所需的牽引功率，節省能源。另外列車較重時慣性較大，減輕重量可以更安全快捷地起動加速和減速制動。因此，輕量化設計可以實現軌道客車多方面的優化，是提升軌道客車綜合競爭力非常有效的途徑。

綜上分析，減輕軌道客車自重對減少線路損害、減少動力消耗、節約能源以及減少制動系統的負擔，都具有十分重要的意義。軌道客車實際線路運行的環境和工況非常複雜，所以軌道客車材料必須保證在各種環境和工況下都能滿足機械強度、疲勞強度、振動模態、理化性質、環境友好等標準要求。要想實現軌道客車的輕量化設計，材料必須符合以下要求：低密度，屈服極限及強度極限，彈性模量及剛度較高，溫度穩定性較好等。鎂合金的性能和特點比較適合軌道客車輕量化的要求，通過推廣鎂合金技術和產品在軌道客車上的應用，不僅可以減輕重量、節約能源，還可提高列車的安全性、可靠性和舒適性。

四、鎂合金在軌道客車上的應用

目前常用的鎂合金按照添加合金元素的不同可以大致分為 Mg-Al 系合金、Mg-Mn 系合金、Mg-Zn 系合金；按成型方法可以大致分為鑄造鎂合金和變形鎂合金，其中應用鑄造鎂合金中絕大部分是壓鑄鎂合金。工業常用的鎂合金包括 AZ31B、AZ61A、AZ91D、AM60B 等。

常用變形鎂合金和壓鑄鎂合金與鋁合金的力學性能相近，非常有潛力在軌道客車替代鋁合金，實現輕量化減重的目的。

現代軌道客車設計必須考慮的幾個頂層指標分別是安全性設計、節能環保設計和舒適性設計。鎂合金有良好的吸收能量性質，應用在列車座椅上可以在列車出現碰撞事故時使座椅吸收更多的能量，從而保護乘客的安全。比如 AM60 合金具有突出的吸能性，同時兼有良好的強度和韌性，已經在國外直升飛機座椅上得到應用。鎂合金在列車減重節約能源方面優勢明顯，而同時鎂合金具有優良的模壓加工性能，可以壓鑄成為複雜的外形，從而滿足座椅的人體工程學和外觀美學設計。使用鎂合金製作列車座椅上可以把美學、人體工程學、輕量化和成型性這幾種設計很好地結合在一起。

國外軌道客車上已經有許多鎂合金應用的報導。法國 TGV 高速列車已經在 TGVDuplex 雙層高速列車座椅上應用了鎂合金件，採用鎂合金件的座椅總數量超過了 45000 個，應用鎂合金的部件包括座椅小桌面板、座椅扶手、腳踏板、座椅側面面板。採用鎂合金的座椅重量明顯減輕，和原先的鋁合金座椅相比每個雙人座椅由 36kg 減輕到 30kg。鎂合金件所需成本不高，減重之後節約了列車運行成本。TGV 列車鎂合金在座椅上的應用實現了減重、節約成本和應用功能的良好結合。韓國 KTX 特快列車在座椅基座上使用了鎂合金板材零件，鎂合金比之前採用鋁合金和玻璃鋼每個座椅減重 5kg，並且可以節省 8%~10% 的成本。

日本新幹線列車在輕量化減重技術方面一直處於領先地位。目前日本新幹線 N700 系列高速列車座椅骨架已經採用鎂合金，包括座椅扶手、中央支撐架、底墊、底座、扶手座、背靠等。使用效果良好，實現了整車減重目的，提升了動車組的動力性能並減少了能耗。

輕量化材料中的優勢使鎂合金在我國軌道客車應用潛力巨大，我國某些研究機構和主機廠也對鎂合金在列車上的應用做了許多研究和試驗。比如使用 AZ91D 鎂合金替代動車組 PA 塑膠製作小桌支臂減輕列車重量。動車組原始 PA 塑膠小桌支臂強度較低，現車使用中斷裂損壞的風險，使用鎂合金製作小桌支臂，不僅強度完全滿足使用需求，並且可以明顯提升承載能力、斷裂伸長率和衝擊韌性等性能。首先，經過測試鎂合金小桌支臂的抗拉強度和彈性模量完全優於 PA 塑膠小桌支臂，對兩種材料的小桌支臂做 20kg 載荷變形量試驗，結果顯示鎂合金支臂變形量明顯小於 PA 塑膠支臂。PA 塑膠支臂為實心結構，而鎂合金支臂結構設計得更薄更合理，所以每個 AZ91D 鎂合金支臂可以比原來實心 PA 塑膠支臂減輕約 35% 的重量。疲勞強度試驗結果顯示鎂合金小桌支臂完全符合疲勞耐久設計。儘管重量有所減輕，但由於材料性能出眾，使用鎂合金材料的小桌支臂最大承載能力比以前有明顯的提升。綜合評價得出，鎂合金小桌支臂可以完全滿足國內動車組使用需求，使用 AZ91D 鎂合金替代 PA 塑膠製作小桌支臂可以滿足動車組的輕量化設計。

現階段軌道客車鎂合金應用的主要研究目標是在大部分非承載零部件上使用鎂合金材料替代鋁合金，在使用成熟後再發展到承載零部件的應用。根據鎂合金的性能和特點，目前鎂合金可以在列車以下結構上進行使用：

- ?列車內裝型材、車窗內框架、小桌板及支臂；
- ?行李架邊框、座椅骨架、臥鋪框架、內部儀錶盤框架；
- ?車下裙板、車內間壁面板、車下設備艙底板。

國內有研究機構已經試製出了鎂合金臥鋪框架樣品和鎂合金間壁面板樣品，有相關廠家小批量試製了在行李架、座椅骨架、小桌板支臂等部位應用的鎂合金零件，需要在列車上進行進一步的使用性能驗證。

五、技術難點及展望

儘管鎂合金有許多其他材料不具備的優勢，但如果想進一步擴大在高速列車上的應用，主要還需要解決一下一些問題：

(1) 鎂合金是密排六方晶體結構，經過軋製或者定向擠壓等變形加工後容易產生基面織構而導致力學性能在各個方向上不一致，需要研究如何消除內應力分佈不均勻。

(2) 鎂合金化學性質活潑，易被氧化和腐蝕，與異種金屬表面接觸容易產生電化學腐蝕。需要進一步研究表面防腐技術和鎂合金裝配防腐方法。

(3) 常規焊接方法不適用於鎂合金焊接，使用新型的固相焊接方法（攪拌摩擦焊等）焊接鎂合金的性能還需要做許多驗證。

(4) 鎂合金寬幅擠壓工藝還不成熟，難以製造大斷面擠壓型材。需要對鎂合金擠壓設備和擠壓工藝加以改進。

(5) 鎂合金在高溫與在室溫下強度差別較大，大多數鎂合金工作溫度不超過 150°C。目前有添加稀土的耐熱鎂合金的研究，但成本較高，應儘快研製成本較低的耐熱鎂合金。

我國軌道交通裝備的快速發展，對輕量化的要求也會越來越高。我國鎂資源儲量約占全球的 50% 以上，菱鎂礦、白雲石資源豐富，這為我國的鎂合金發展提供了巨大的資源和成本優勢。隨著鎂合金開發和應用研究的發展，鎂合金的性能會得到不斷提升，未來趨勢是進一步拓展應用範圍，從高速列車上的非承載零部件逐漸發展應用到承載零部件，使鎂合金成為高速列車輕量化關鍵材料。