

## 鎂合金在汽車製造業的應用

2016-01-24 材料科學與工程

為了提高汽車的燃油效率和降低其廢氣排放，減輕汽車的重量至關重要。為了達到這一目的，用鎂合金來製造合適的汽車零部件似乎是一種顯而易見的明智之舉。作為一種最輕的結構金屬，鎂比鋼輕 75%，比鋁輕 33% 左右。

美國汽車研究理事會的一個社團組織“美國汽車材料合作夥伴”在其研究報告“2020 年鎂的應用前景展望：北美汽車業對鎂的戰略構想”中指出，與鋁相比，鎂具有更高的比強度、延展性和抗衝擊性；與鋼相比，鎂可以提供更好的緩衝阻尼和耐衝擊性；與塑膠相比，鎂具有更高的強度和剛度，以及更好的熱穩定性和導熱性。

此外，該報告指出，為了提高燃油經濟性和減少廢氣排放，鎂的材料特性還可以提供許多好處，其中包括：

- (1) 通過使汽車重心後移，減輕前部重量，可以提高汽車的加速/減速、操控/轉向回應性能。
- (2) 由於鎂合金可以鑄造出完整的大尺寸部件，而不必像鋼件那樣需由眾多單個零件組合而成（這些零件容易相互摩擦，並引起振動），從而可將汽車雜訊減至最小。
- (3) 由於鎂鑄件可能比同樣的鋼制零件更廉價（尤其當年產量小於 20 萬件時），因此可以降低製造成本。鎂鑄件的加工成本要低於由多部分構成的鋼制衝壓件，因為加工衝壓件的每個部分都需要相應的模具。例如，加工一件由 30 個部分構成的鋼制儀錶盤橫樑需要 30 套工裝，而鑄鎂件橫樑只需要 6 套工裝。

然而，在美國汽車製造商生產的汽車中，鎂合金零部件的重量平均只有大約 12 磅，僅占一輛汽車全部材料的 0.3% 左右。實際上，鎂在汽車上的應用並不很普遍，因為它的成本比一些競爭性材料更高。由於企業的競爭本質，它們會更多地使用價格比較低廉的材料。鎂合金零部件使用率的下降，部分也是因為北美市場的模鑄企業因關閉和合併而不斷減少，幾年前發生的金融危機和汽車行業遭遇的困境產生了很大的影響。

諮詢企業 **Ducker Worldwide** 公司發表的一份預測平均每輛輕型車所用材料淨重量變化（見表 1）的報告時估計，鎂合金零部件將從 2008 年的每車 8 磅左右增加到 2025 年的 22 磅。這種用量的增加將全部集中在傳動零部件上（主要是進氣歧管）。鎂合金傳動件和傳動箱可能最終將會取代鋁合金傳動件和傳動箱，但不會用於製造結構件。

表 1 平均每輛輕型車所用材料淨重量的變化趨勢（單位：磅）

材料类别	2008 年	2010 年	2012 年	2015 年	2025 年
轻质钢板	999	976	861	650	408
烘烤硬化和高强度低碳钢板	489	496	513	516	240
先进高强度钢板	124	156	194	251	375
所有其他钢种（长线产品）	602	606	596	580	542
轧制铝板	29	31	34	67	156
铝型材	10	12	14	19	30
铸铝结构件	20	20	22	25	60
所有其他铝制件	266	267	273	289	304
铁	307	305	295	290	270
铜	52	52	52	52	52
其他金属（镁、钛、铅、锌、铂金）	101	103	104	105	115
聚合物	340	345	350	355	400
其他非金属材料	494	493	492	490	475

到 2025 年，汽車材料的這種變化，加上製造足跡減少 2%，將使汽車的平均慣性重量和平均整備品質（淨重）比 2008 年分別減輕 10% 和 10.6%。該公司估計，到 2025 年，鎂的用量將增加到每車 22 磅。如果綜合考慮混合動力電動汽車 44% 的普及率，以及對發動機尺寸的適當調整，到 2025 年，在不降低安全性能、使用性能、功能性或舒適性的前提下，汽車的燃油經濟性將能達到 51 英里/加侖。

在美國汽車上，目前主要有以下鎂合金零部件：

- （1）底盤（如剎車支架和支架總成、剎車踏板支架、安全氣囊機架、離合器踏板支架和總成）；
- （2）內部設施（如座椅基座、IP 支撐柱和支架、方向盤骨架、轉向柱支架和輪轂）；
- （3）外部設施（如天窗蓋總成、外後視鏡骨架和頂棚框架）；
- （4）動力傳動系統（如交流發電機支架、閥蓋、凸輪蓋和變速箱）。

歐洲汽車往往使用更多的鎂合金零部件，增加的應用包括幾個車輪、底盤前端框架、坐墊和靠背，以及動力傳動系統的齒輪箱（手動和自動），甚至還包括汽缸體（可以大大降低發動機重量）。由於歐洲山路較多，因此歐洲人對汽車的操縱性能更感興趣。”

在美國，鎂的價格比在歐洲更昂貴，因為美國控制原材料進口的國際貿易委員會對從中國進口的鎂徵收反補貼關稅，而絕大部分鎂都產自中國。全世界的鎂大約有 85% 都是在中國生產的。徵收關稅有效地將產自中國的鎂擋在美國市場門外。而在北美，只有美國鎂業公司一家生產商。美國鎂業公司位於鹽湖城。由於鎂主要來自天然氯化鎂，因此，那些擁有高濃度鹽水資源的地方（如大鹽湖和死海）是生產鎂的理想地點。

如果一輛採用直列六缸發動機的汽車用鎂代替鋁、鋼、鐵、鋅或塑膠來製造所有合適的零部件，則鎂的總用量將達到 380 磅左右，而該車重量可以減輕 300 磅。汽車製造商通過改進動力總成、變速箱和停止/啟動技術，可以實現提高燃效標準目標的 75%，其餘 25% 則需要通過汽車輕量化來實現，而鎂將在汽車輕量化中發揮作用。

這種作用到底有多大，仍然是一個存在爭議的問題。在一項由能源基金會（由一些對可持續能源解決方案感興趣的重要基金會聯合組成）資助的研究中，路特斯工程(美國)公司(Lotus Engineering USA)試圖確定對一種選定的基準型汽車——2009 款豐田 Venza（代表 CUV 多用途車）進行減重的可能性。據該公司報告，它已研發出兩種該車的基本架構：採用 2014 年計畫啟用的適用技術和 2017 年投產的“低發展水準”汽車可通過動力總成輕量化實現減重 21%（611 磅），其鎂合金材料使用量可達 2%；採用 2017 年計畫啟用的技術和 2020 年投產的“高發展水準”汽車（圖 1）可實現減重 38%（1,093 磅），其鎂合金使用量達到 16%。



圖 1 “高發展水準” Venza CUV 的車身設計

Lotus 公司分別從技術和商業的角度開展了此項研究，技術方面主要針對汽車的結構完整性和防撞性等，而商業方面則重點關注加工、零部件和裝配成本。Lotus

公司從最高的層面（即系統層面）來研究汽車的基本架構，材料的選擇是基於其實現技術和商業目標的能力，圍繞汽車結構來配置的。為了在合適的部位採用合適的材料，對汽車結構和架構策略進行了優化。

Lotus 公司已將鎂合金應用於所有的汽車開閉件，在市售的汽車（如林肯 MKT）上也能發現其身影。據子午線輕量化技術公司（Meridian Lightweight Technologies）估計，用鎂合金鑄件（與林肯 MKT 掀背式車門所用鑄件類似）和鋁合金外面板組成的開閉件比 Venza CUV 用鋼衝壓件製成的相同部件重量減輕了大約 40%（圖 2）。



圖 2 林肯 MKT 多用途 SUV 掀背式鑄鎂車門框的重量比相同的衝壓鋼門框輕 40 %

採用鎂合金的優點是可以大幅降低結構的複雜性。例如，儀錶盤結構通常由許多鋼制構件焊接而成，我們可以用一個鎂合金鑄件來替代整個部件。Lotus 公司一直通過輕量化和優雅、簡潔的設計來提高汽車性能。這是自 Colin Chapman 在 1952 年創立 Lotus 公司以來一直秉持的理念，也是該公司在這項特定研究中所採用來降低 Venza 複雜性的主要架構方法之一。

以 Venza 的車身結構為例，Lotus 公司已將其零部件數量從 400 多個減少到 221 個。零部件的削減也減少了相關的加工量。Lotus 公司通過優化車身結構系統的零部件，也附帶減少了其他系統（如懸掛系統和內飾系統）的零部件數量。

與鋼制衝壓件相比，鎂合金鑄件除了能將多個構件整合為一體外，還使零件設計師可以減小零件的尺寸（如厚度）。鎂合金鑄件還能最大限度地減少加工時廢棄的材料。當沖裁大尺寸構件（如車門框架或車體側面窗框）時，約有 20%—30% 的材料變成廢料。而鎂合金鑄件可以最大限度地減少廢料。

當然，通過使用鎂等材料，汽車重量的減輕也會降低燃油消耗。根據美國能源部的估算，汽車重量減輕 10%，可以節省 7% 的燃油。Lotus 公司表示，其 2020 年投產的“高發展水準” Venza CUV 實現總重量（包括動力總成）減輕 38% 的目標後，將使油耗降低 23%。

鎂合金零部件除了比其他競爭性輕質材料的原材料成本更高以外，通常還需要進行表面塗層以避免電化學腐蝕，從而會增加其製造成本。據輕量化戰略諮詢公司的 Cole 博士介紹，電化學腐蝕是限制鎂合金用於汽車零部件的關鍵問題之一。當鎂與其他金屬接觸並存在電解質（如鹽水）時，就會遭受電化學腐蝕。

電化學腐蝕的另一種形式是由某種其他金屬的細小顆粒引起的表面污染，它會造成嚴重的點蝕。含有二硫化鉬和碳的模具潤滑劑、存在于噴砂清理介質中的重金屬顆粒以及在鑄造、鍛造、擠壓、軋製和衝壓加工時從模具中轉移出來的鐵粒子都有可能造成這種腐蝕，必須確保用多種材料製造的汽車不會出現腐蝕問題。

在緊固件（尤其是鋼制緊固件）上最容易發生電化學腐蝕。最有效的補救方法是選擇具有相容性的連接件材料和減小陰極表面積。不過，有時汽車製造商還必須發明一些獨具特色的設計方案。例如，福特 F-150 卡車的前端裝配支架和通用 Corvette 跑車的發動機託盤都需要對連接件及墊圈、墊片和螺栓材料進行大量現場設計工作。他還指出，由於歐洲汽車允許使用鋁合金緊固件，因此較少出現此類問題。

據子午線輕量化技術公司介紹，AZ91D 鎂合金具有非常好的耐腐蝕性。這種最常見的高壓模鑄鎂合金通常用於製造動力總成和其韌性比變形能力更重要的機械零部件。

在被裝配到汽車上之前，即使是近淨成形的鎂合金鑄件也需要進行切削加工。雖然人們並不認為鎂是一種難加工金屬材料，但鎂合金零件的切屑卻具有易燃性，而且在精加工時產生的切屑可能比粗加工切屑更容易著火，因為這些切屑更薄，具有更大的表面體積比。此外，鎂在不含抑制劑的水溶性切削液中可能會生成易燃的氫氣，而過長的停機時間和低進給率也會增加發生火災的可能性。

切削加工鎂合金零件時，可能需要配備專用滅火器材，因為切削時存在產生火花的可能性（尤其在工件沒有接地的情況下）。企業可採用一種光學裝置來監測鎂

屑燃燒發出的亮光，並在著火的小切屑掉進切屑堆使火災蔓延之前對其進行處理。

由於鎂可溶于水（生成氫氣）和容易氧化，從而增大了易燃性，因此最好採用幹式切削，或使用添加有氫抑制劑或抗氧化劑的冷卻液。此外，必須對篩檢程式進行精心維護，防止冷卻液中鎂微粒越積越多。必須持續監測冷卻液中氫抑制劑的濃度。所有機床隔離罩內都需要安裝氫濃度監測儀。只要正確進行維護管理，鎂合金的切削加工就並不困難。

儘管目前鎂在汽車製造業的使用量還遠遠少於鋁和鋼，但鎂材料業正躍躍欲試，準備大舉進入該行業。這是因為與其他含鎂的商品相比，汽車的生產批量巨大，材料用量可觀。汽車行業其產品性質決定了鎂合金使用量迅猛增長的潛力最大。

最終，市場將會決定有助於滿足未來汽車廢氣排放和燃油效率標準（如前不久奧巴馬政府提出的到 2025 年，將在美國銷售的轎車和輕型卡車的“企業平均燃油經濟性”標準提高到 54.5 英里/加侖）的適當材料組合。

Lotus 公司的目標是採用最合適的材料來製造汽車零部件，不在乎它是鋼、鋁、鎂或其他什麼材料，只要它確實有效並具有商業可行性。解決這個問題的真正訣竅是設計出成本效益更好、重量更輕的汽車，並確保對零部件進行一體化設計，同時設計所有的系統。如果採用零敲碎打的方式，就不可能實現整體優化設計，例如，由於減輕了汽車的重量，就可以改變懸掛系統的設計。

德國夫琅和費汽車生產聯盟正在幫助汽車製造商生產重量更輕、經濟性更好的零部件。例如，夫琅和費機床和成形技術研究所（IWU）開發的鎂合金車門（圖 3）重量僅為 4.7 公斤，而同樣的鋼制車門重量為 10.7 公斤。



圖 3 夫琅和費 IWU 開發的鎂合金車門

雖然鎂比鋼和鋁更輕，但其成形加工的難度也更大。夫琅和費 IWU 的研究團隊目前還沒有成熟的鎂合金成形技術。生產這種車門表明其可以對鎂合金進行成形加工。不過，雖然作為一種示範，該研究所能對 AZ31 鎂合金車門進行成形加工，

但還沒有找到該工藝的正確潤滑方法。

由於需要對成形工具表面進行加熱，因此該工藝耗能很高。為了使鎂合金成型，要求工具溫度達到 250°C，該研究所的目標是將溫度降低到 200°C。另一個困難是缺少寬度大於 700mm 的鎂合金板（700mm 寬的板材用於加工車門時太窄）。為此，該所開發了一種鎂合金鐳射焊接新工藝。鎂合金的表面塗覆也具有一定挑戰性，與鋁合金相比，需要增加一道工藝步驟。

儘管存在各種挑戰，但將鎂合金應用於汽車行業可以獲得各種好處。世界上的鎂資源十分豐富。鎂制零部件可以進行鑄模加工。例如，鎂制車門具有與鋼制車門幾乎相同的性能，比如說，它們的剛性就不相上下。

除了鎂合金以外，一些非金屬材料也對汽車的輕量化發揮了重要作用。Lotus 公司在關於豐田 Venza CUV（多用途車）減重可能性的研究報告中指出，複合材料已被用在大批量生產的多種車型上（如土星汽車和通用汽車早期的小型貨車），而這種應用正被拓展到利基車型和專用車輛的結構領域。這些材料包括複合板材、在發泡芯板的正面或背面採用疊層材料（如鋁或玻璃纖維）的多層複合材料和碳纖維複合材料。



圖 4 阿斯頓·馬丁 Vanquish 跑車的前部緩衝結構主要採用碳纖維複合材料製成

其他可能的應用還包括用長纖維增強聚丙烯材料製造行李廂地板和用長纖維增強聚氨酯材料製造貨廂地板，以減少零件數量、縮短裝配時間，同時保持結構剛度。Lotus 公司在此項研究中主要使用了玻璃纖維增強複合材料。

Lotus 公司設計的複合材料零件形狀比較簡單，但包括了一些彎曲的結構特徵，如模塑成型的後排座椅彎曲形狀。並採用了輕質結構材料，並去掉了一些在後排座位常見的、非常重的零部件，如座椅升降裝置和座椅支架。