



作者：徐業良(2003-07-16)；推薦：徐業良(2003-07-16)。

附註：本文發表於汽車購買指南雜誌，2003年八月號，史丹福專欄。

鎂合金輪圈「研究報告」

上個禮拜接到一封某科技公司人員傳來的電子郵件，希望來拜訪我討論一些該公司新產品的問題。像這種百無一用的書生大學教授，向來視解決產業界的問題為重要挑戰，當下便回電話約了時間。見面詳談一番，瞭解該科技公司為鎂合金專業廠商，該公司在鎂合金之研發及製造原本是以電腦、消費性電子產品、通訊產品—所謂3C產品的外殼為主，但是最近想要擴展公司產品領域，正在評估跨行到汽車業，生產鎂合金輪圈的可行性。聽說本人對鋁合金輪圈小有研究，想要聽聽我對鎂合金輪圈設計、分析、製造上的看法。

哈哈，鎂合金輪圈我可是完全莫宰羊，一點兒看法也沒有。

支支吾吾送走客人，正好又接到雜誌社催稿電話，當下靈光一閃，兩檔事兒乾脆湊在一塊兒，發揮大學教授研究的本事兒，上山下海滿地找鎂合金輪圈的資料，狼吞虎嚥消化一番，在酷熱的夏夜裡沒有冷氣的書房中熬了兩晚上，寫出這麼一份鎂合金輪圈的「研究報告」，一方面自我充實一番，一方面向雜誌社交稿，也算是對該科技公司作一次免費 consulting，一舉三得呢！

話說從頭。在一般常用來作結構件的金屬材料中，鎂的比重是最低的，用鎂合金作輪圈，重量只有同樣外型鋼製輪圈的四分之一，也比鋁合金輪圈重量要輕30%以上。鎂合金吸收衝擊的能力也很好，結構強度與重量的比值更是所有常用的結構金屬最佳的。

輪圈輕有什麼好處？輕量化、省油當然是優點之一，更重要的是輕質輪圈轉動慣量小，加速、減速反應都比較敏捷，因此目前來說，鎂合金輪圈最主要的銷售對象，反而是高性能車、方程式賽車之類的。

但是畢竟輪圈的重量在整部車來說比例並不大，關鍵還不完全是減輕車體重量。

如果您懂一些懸載系統的動力學，就會知道懸載系統以上稱作「懸載質量(sprung mass)」，意思是被懸載系統支撐的質量，包括車體、乘客等等，懸載系統以下則叫做「未懸載質量(unsprung mass)」，意思是沒有被懸載系統支撐的質量，主要就是輪圈和輪胎。

翻翻教科書，懸載系統的動力學推導了一大堆式子，最後的結論是，如果未懸載質量越輕，懸載系統對於懸載質量（也就是車體和乘客）所提供的振動隔絕性就越好，相對的整部車操控性、行路性都更佳。這一點，才是汽車輪圈一路從使用鋼鐵材料，轉變成使用鋁合金，再用上更輕的鎂合金的關鍵原因。

鎂合金輪圈有這麼多節省的重量、提升操控性、行路性、和其他潛在的優勢，生產鎂合金輪圈當然也不可能是現在才想出來的新點子，早在 1930 年代中期便被提出來，而且引起廣泛的興趣。1950 年左右鎂合金輪圈正式在市場上出現，當時歐洲賽車製造廠開始嘗試將飛機科技應用在賽車上，當時鎂合金輪圈也是專門應用在賽車上，還開始得到個暱稱叫做“Mag wheel”。

行家到汽車精品店都是這麼說，“老闆，你們這兒有沒有 Mag wheel？”

不過要作輪圈材料，光是輕還不夠，工程師們也急於開發新的輪圈設計及製造程序，可以達到顧客需求的品質和滿足成本要求。

那麼，鎂合金輪圈是怎麼被製造出來的？

輪圈的製造有兩種可能的程序：鑄造和鍛造。鑄造是將熔融成為液態的金屬澆注到輪圈模具裡，金屬模具模穴的形狀就是最後輪圈大致上的形狀，液態的金屬充填在模穴中以後逐漸冷卻，凝結成固體之後再把模具打開一輪圈作出來了！接下來只需要稍微表面修整、磨光、鑽孔之類的處理就可以上架賣了。

鍛造則是把一大塊金屬加熱，到稍微軟化，然後用幾百噸的力去敲打、擠壓這塊金屬，強迫這塊金屬形成自己所希望的形狀。講白一些就是「打鐵」。

這樣敲敲打打可以把一塊金屬敲成一個輪圈？您非常懷疑。您的直覺是正確的，鍛造只能將金屬塊打成一個類似甜甜圈的形狀，還要把輪圈分成兩片或三片，分好幾道程序把精確的形狀逐一作出來，顯然比鑄造麻煩、昂貴得多，所以目前鎂合金輪圈或鋁合金輪圈的製造，都還是以鑄造為主。

更仔細一點兒談輪圈鑄造程序的話，輪圈鑄造還可以分成兩種不同的鑄造製程，一個是重力鑄造製程，另一個是低壓鑄造製程。重力鑄造就像前面的描述，熔融成為液態的金屬澆注到輪圈模具裡，依靠重力自然地充填在模穴中以後逐漸冷卻。低壓鑄造是比較理想的製程，熔融成為液態的金屬澆注到輪圈模具後，從外界施加壓力，或將模具內抽成真空，使得液態金屬充填更完整、紮實，空氣不會留在模具內，而鑄造完成的輪圈內產生氣孔的機會也越小，品質自然也比較好。

瞭解了輪圈鑄造程序之後，便可以接下去談鎂合金輪圈在鑄造上的優勢。鎂的「比熱」，也就是單位體積包含熱能比較低，在鑄造過程中冷卻、凝固的速度快，因此鎂合金鑄造速率是鋁合金鑄造速率的 1.5 倍。實際一點兒的意思是說，同樣一套輪圈鑄造設備，採用鎂合金的產能是採用鋁合金的 1.5 倍。而且鎂和鋼鐵製模具反應性低，鑄造過程中模具耗損低，因此模具壽命是類似鋁零件的兩倍。

此外鎂在半固體狀態下外加一些壓力就有很好的流動性，一般金屬在鑄造時都要將金屬加熱至完全熔解成液體，澆注的時候才有比較好的流動性，鎂只需要加熱至半固體狀態，所需溫度比一般鋁見鑄造低上攝氏一百度。實際一點兒的意思是說，鎂合金鑄造過程中需要加熱的能量也比較低，生產成本低之外，製造過程還比較環保。最後鎂在鑄造冷卻、凝固時的收縮率很一致，因此尺寸也很穩定，鑄造精度也不錯。

鎂合金輪圈，怎麼看都是優點，現在為什麼沒有看見滿街鎂合金輪圈，取代當道的鋁合金輪圈，成為輪圈的主流呢？

除了輪圈之外，鎂合金在汽車上其他的應用也越來越廣泛，但是成本和其他技術上的挑戰仍然限制其普遍使用。首先還是對鑄造品質掌握還不夠成熟，鎂合金鑄造件的品質差異非常大，鑄造廠總是嘗試控制鑄造過程中許多重要參數以控制其品質，但是許多參數往往超出可以控制的範圍，像是周圍大氣溫度甚至濕度。前面提到鑄造件裡的這些氣孔，或者是液態金屬凝固的過程中因為熱漲冷縮而在輪圈內部產生的縮孔，是鑄造輪圈品質上最大的問題，大的縮孔會造成輪圈漏氣，小的縮孔也會是輪圈未來產生裂隙、破壞的起源。

其實隨著經驗的累積，鑄造的工程技術一定會逐漸成熟。鎂合金輪圈比較「先天」的缺點，是國中化學課學的，鎂這個元素的「活性」比較大，是一個活潑的金屬，很容易氧化或形成其他化合物。白話一點兒的說法是，鎂合金輪圈抗腐蝕的能力比較差。到學術期刊的資料庫裡隨便查查，許多研究都在希望開發新的鎂合金材料，能有更好的成型性、結構強度、以及防腐蝕的能力，

鎂合金最「致命」的缺點則是鎂金屬礦源少，簡而言之，鎂不能廣泛被使用主要問題是成本。完全從材料成本來看，所有輕材料的成本和鋼鐵材料比起來都高了許多。要平衡材料成本的方法，得要靠更好的設計和更有效率的製造。

這些問題完全沒有嚇退汽車廠，除了輪圈之外，鎂合金在汽車上目前主要應用在內裝，如方向盤、儀表版、座椅架、門板、天窗組合，而且項目越來越增加。1990 年的時後，一部典型的汽車上只有區區 1.4 公斤的重量是鎂合金，十年之後的 2000 年，這個數字成長至 3.6 公斤。雖然十年內成長一倍半，但是比起鋁合金在 2000 年每部車鋁用量是 112 公斤，鎂合金在汽車上的使用量還有很大成長空間。聽起來有些誇張的預測是，未來十年每部汽車上的鎂合金用量將會達到 50~60 公斤。

這麼大量的鎂合金，將要被用在汽車的哪裡呢？工程師們能夠比較清楚地掌握鎂合金在高熱下的材料性質之後，未來的應用可能會擴展至引擎蓋下的高溫度區域，像是自動排檔箱蓋或是引擎相關組件，如引擎汽缸頭、排檔箱機殼、機油盤、進氣歧管、水幫浦機殼等。有六個歐洲車廠正在評估鎂合金引擎汽缸頭，已經有公司做出原型在測試之中，三到五年內應該可以看到產品。未來甚至車體結構、汽車底盤等，在一些製造上的減少氣孔的實務問題獲得解決後，都將可能改用鎂合金製造。

對於使用鎂合金材料最積極的車廠該算是福特汽車公司。為了希望能有穩定及低成本的鎂來源福特公司 1996 年乾脆自己投資成立澳洲鎂公司(Australian Magnesium Corp., AMC)。AMC 公司已經在 2002 年開始生產，福特公司可以保證以一特別優惠價格獲得 50% 的生產。福特的這個計畫希望能將目前每部車 2.3 公斤鎂用量在未來二十年提高到每部車 113 公斤鎂用量。2004/2005 年福特車便將大量使用鎂合金在車體結構和儀表版結構。

寫到這裡，說是「研究報告」可能內容太淺了些，倒是自己對鎂合金輪圈有了比較完整的整理，不知道史丹福專欄的讀友們是不是滿意呢？