



作者：徐業良(2006-11-13)；推薦：徐業良(2006-11-13)。

附註：本文發表於汽車購買指南雜誌，2006年十二月號，史丹福專欄。

## 鋁合金材料的出頭天

每年年底，汽車新聞的焦點就在 2007 年、甚至 2008 年份的新車又有些什麼新花樣。這幾年汽車科技的焦點都在於電子、通訊科技，可能不太會有人注意到這一則汽車科技新聞，2008 年式的 Audi TT 將要採用結合鋁合金和鋼鐵材料的第二代空間結構設計。

結構設計的細節姑且不去討論。這裡的重點是，不是早已經有全鋁合金車體了，結合鋁合金和鋼鐵材料，技術上不是反而退後了一步嗎？

這個例子也正可以說明，在汽車車體材料的選擇上，鋁合金材料和鋼鐵材料之間的論戰，還正方興未艾呢！

打從汽車從被發明以來，就是鋼鐵製造的，原因也很簡單，煉鋼的技術歷史悠久，從大約 1860 年左右，人類的工程技術就有能力大批煉鋼，能夠製造很多不同等級的鋼材，工程師對鋼鐵材料的特性也有充分瞭解。鋼鐵材料相對而言比較便宜，汽車業界對於使用鋼板為生產材料，早已累積了非常豐富的經驗，鋼板材料很容易成形，可以被沖壓印成複雜的形狀，也可以很容易用焊接方式結合，其強度、耐久性、耐衝擊性都經過時間的證實，加上汽車廠在現有鋼板成形、組裝、回收設備上早已作了大量投資，所以鋼板至今仍是現代汽車車體結構的材料最佳選擇。

然而輕量化仍然是汽車工程師在車體結構設計上不變的訴求，輕量化固然可以透過更精細地結構設計來達成，然而汽車結構輕量化設計最根本的手段還是在其材料，汽車廠還是逐漸轉向鋁合金材料以減輕汽車重量。輕量化像是一個連鎖反應，如果車體結構可以設計得越輕，懸載、底盤必須承載的重量減少，也可以作得更輕，同時汽

車引擎要拉動的重量減少，又可以搭配排氣量較小、較輕的引擎。輕量化具體達到的效果，第一是可以降低整體耗油量，第二則是可以進一步改進汽車性能，所有其他因素都相同的話，比較輕的車子加速比較快、極速比較高、煞車所需的距離也比較短等等。

OK，輕量化，採用鋁合金材料，打開電腦繪圖軟體，調出汽車零件圖，把材料一欄鋼鐵材料改為鋁合金就結了。

當然沒有那麼簡單。

金屬材料有兩個很基本的性質，材料的強度和剛性。所謂材料的“強度”，概念上是說，材料承受多大的外力時會發生破壞。鋼鐵材料有非常多種，同樣是鋼板，含碳的成分、合金的成分、製造或熱處理的方式不一樣，鋼板承載負荷的強度便會差異非常大。像是中強度低合金鋼(Medium-strength low-alloy, MSLA)在融化過程中加入了較多的磷和錳合金成分，強度便大幅提昇（當然成本也提高了些），常被用來作車體外殼。高強度低合金鋼(High-strength low-alloy, HSLA)則摻入了稀有金屬鈦和鈮，強度可以達到中強度低合金鋼的兩倍。

不過不管是什麼鋼，金屬的本質還都是鐵，強度可以差好幾倍，密度卻是完全一樣的，意思是說，同樣的體積不管是什麼鋼，重量完全一樣。因此前面提到採用高強度的鋼料，更細、更薄的結構也能達成同樣的強度，材料就可以用的更少，重量就可以更輕一些。

材料的「剛性」英文是“stiffness”，而在描述汽車結構時常用的英文字則是“rigidity”，主要的概念是結構受到外力時產生變形量的大小，簡單的說，受到同樣外力變形量很大，表示結構剛性差，變形量小則表示結構剛性好。剛性設計是現代汽車車體結構設計上真正的焦點，除了提升安全性之外，車體剛性提升還可以改進汽車的操控性和行路性，減低引擎或路面不平造成的振動。

金屬材料的剛性是由其「彈性模數(modulus of elasticity)」來代表，就像彈簧都有一個「彈簧常數」，彈簧常數越大，表示彈簧越“硬”，施力時的變形量越小，也就是剛性越大。這裡要提出另外一個重要的概念是，鋼鐵材料強度的變化範圍非常大，但是不管什麼鋼，彈性模數都是一樣的，也就是剛性都是一樣的。

另外一個有趣的現象是，鋁的密度大約是鋼的三分之一，但是鋁的彈性模數大約也只是鋼的三分之一。意思是說，同樣的結構採用鋁合金材料重量會是採用鋼鐵材料的三分之一，但是結構剛性也只是採用鋼鐵材料的三分之一，因此如果同時希望提升

剛性和減輕重量的話，要不要改採鋁合金材料，這個算盤可就得好好撥一撥了，鋁板要和鋼板有同樣的剛性，重量可能一點也不會省。

這也是為什麼鋁合金材料最早在汽車上的應用，主要是用在引擎蓋、車門板等不太需要高剛性的地方。早在 1940 年代 Land Rover 開始，便採用部分鋁板取代鋼板，以達成特定的重量目標。接下來的五六十年，汽車的引擎、傳動系統、煞車卡鉗、輪圈，也逐步改採鋁合金取代鑄鐵為材料。

汽車底盤和車體改採鋁合金，是下一個困難的大步。汽車底盤和車體基本上都是由鋼板成形，折疊成管狀或其他形狀來增加其剛性。要減輕重量的話必須得減小鋼板厚度，但是可以減少的厚度有限。這個限制倒不是在於減小厚度的話結構強度或剛性不足，而是現在汽車結構上鋼板已經很薄了，汽車車體鋼板最薄甚至只有 1mm。低於這個厚度，鋼板很容易側潰，英文叫做“buckle”。舉例來說，您拿一支喝飲料的吸管彎折一下，您會看到管壁很薄的吸管並沒有斷裂，而是 buckle 了。此外鋼板太薄的話沖壓成形時也容易發生皺折。

如果改用鋁板的話，一張 3mm 厚度的鋁板和同樣大小厚度 1mm 的鋼板重量相同，也因為厚度比較厚的緣故，鋁板抵抗 buckle 的能力好得多，輕量化的空間也比較大。例如說可以用 1.5mm 厚的鋁板來成形，重量只有 1mm 厚鋼板的一半，仍然有適當的強度和剛性，但是抵抗 buckle 的能力比鋼板結構還更好。

已經有好幾部汽車成功地使用鋁合金的車體或底盤。例如 Audi A8 的車體空間結構，看起來就像是一個鋁桁架作的鳥籠，重量只有鋼鐵作的 46%；Chevrolet Corvette Z06 採用鋁製底盤，比鋼鐵結構重量省了 30%。

除了輕量化之外，鋁合金材料另外一個最大的優勢是其抗鏽蝕的能力。鋼鐵材料很容易鏽蝕，需要進行許多道防鏽蝕的處理，然而鋁合金材料表面會形成氧化鋁保護層，可以說天生就是防鏽的。此外鋁材回收也比較簡單，因為鋁材不會鏽蝕，回收的鋁材通常很乾淨，熔點又比鋼鐵材料低。

當然使用鋁合金材料還有幾個製造上的問題，例如鋁板沖壓成形時延展性不如鋼板，碰到尖銳彎角可能會裂，沖壓完成後，鋁製鈹金件還會發生回彈(spring back)的現象，幾何尺寸精確度不容易掌握等等，這些都需要長期累積經驗來解決。此外鋁合金材料的價格是鋼鐵材料的好幾倍，也是汽車廠對鋁合金材料步不前的原因，目前也只有頂級車種用得起鋁合金的底盤和車體。像是 Audi TT 把鋼材和鋁材混合使用，還是大多數車廠思考的方向。

愛好賽車的讀友們會知道賽車結構材料基本上沒有考慮過鋁合金，而是直接從鋼管材料底盤直接跳到碳纖維複合材料。所以您也許會問，汽車結構材料為何不走同樣的路線，乾脆完全放棄金屬材料呢？碳纖維複合材料所需要的生產和機具成本是最主要的原因。目前來說，碳纖維負荷材料製造上需要很多手工，材料也很昂貴，製程中還包括一項真空高溫燻考過程，並不適合大量生產的車子。相對而言，鋁合金則不需要在生產方法上作革命性的整體改變，對於減輕車體重量來說，是更吸引人負擔得起的選擇。

鋁合金材料的出頭天，就快到了！