



作者：徐業良(2002-07-17)，推薦：徐業良(2002-07-17)。

附註：本文發表於汽車購買指南雜誌，2002年八月號，史丹福專欄。

## 淺談汽車結構設計

雜誌社老闆林先生是認識快二十年的老學長了，這幾年雖然不那麼經常見面，但林先生總是會不時打個電話來噓寒問暖一番。這天又接到林先生的電話，哈拉一陣之後聊到最近史丹福專欄有沒有什麼好題目，林先生提到最近看到許多新車報導，都在強調車體結構設計，重量變輕、剛性增強等等，其中有許多技術性的概念一般讀友們其實不是那麼清楚。

老闆都這麼說了，我自然不敢不怠慢，當下蒐集了許多車體結構設計相關資料，這個月的史丹福專欄就來為大家剖析一下車體結構設計的問題。

### 汽車的長期減重計畫

您的 BMI 指數如何？需要減重嗎？

談到車體結構設計，汽車工程師們最高指導原則便是減重。打從自從 1970 年代石油危機開始，幾十年來汽車一直持續在進行減重計畫，再加上汽車相關的環保標準越來越嚴格，汽車工程師一直在尋找方法將汽車減重，以求得更佳的省油性，並且減少廢氣排放。

過去這三十年減重的努力，一部典型轎車車重減少了大約 250 公斤，而耗油也減少了大約一半。然而汽車減重的努力路途依然遙遠，一方面政府對於省油性和廢氣排

放的標準只會越來越嚴，不可能放鬆，另一方面車廠之間彼此在汽車省油性上的競爭也越來越激烈，汽車工程師仍然必須繼續尋找減輕車重的新方法。

汽車工程師們為車體結構減重主要有兩種策略，一是從結構設計著手，希望尋找更有效率的結構設計概念。另一方面則是從材料著手，尋求更高品質、更穩定的鋼鐵材料和更經濟的製程，或者是更輕的替代材料。

## 車體結構輕量化

汽車減重像是一個連鎖反應，起源便是車體結構的輕量化，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，也可以作得越輕，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。

舊式的汽車是採用所謂“全車架式(full frame)”，以車架為承載負荷的主體，板金件只是附加在車架上的鐵皮而已，在結構上承載負荷的功能較小。近年來車體結構設計的思考已經轉變成所謂“單體化(unibody)”架構，“unibody”是從“unitized-body”單元化車體簡化而來的，概念上是說車體結構由折疊的槽化鋼樑和壓製的板金件焊接結合為一個整體剛性的車殼，特別是板金件也共同承載車體結構負荷。

這個單體化架構不只是幾根大樑而已，看起來已經像是一整個車殼，只是還沒上色而已，汽車業把這個剛性的車殼叫做“白色車體(body in white)”，行話就簡單叫做“BIW”。BIW 通常佔了車體重量三分之一左右，但是前面提到這是汽車減重連鎖反應的源頭，在這個部分減重對於最終車體重量的減輕可以達到加倍的效果。

## 在車體中使用更輕的材料

汽車工程師們也都知道車體結構減重的重要，長期投入結構設計研究的結果，現代汽車的結構設計都已經非常成熟，要從中間再擠出改進的空間也已經越來越難。在結構設計上減重的策略逐漸達到極限時，汽車工程師開始轉向第二個策略，注意如何在鋼製的車體中使用密度較小的材料，像是塑膠或鋁合金。

汽車材料的改變首先從內裝開始，像是現在幾乎所有汽車儀表板都使用塑膠材料，此外引擎汽缸頭也逐漸從沈重的鑄鐵改採鋁合金製造，特別是講究輕量化的高性

能車種。與 1975 年的車子比起來，現代車子上非鐵材料的重量平均增加了一倍，鋼鐵材料的重量佔全車重量的比例從四分之三下降到車重的三分之二。

鋼鐵材料使用的減少另一個原因是高強度的鋼板被廣泛使用，高強度的鋼板其強度大約是一般低碳鋼兩倍，目前車體上大約五分之一的鋼鐵材料是這種高強度鋼，使用比例還在繼續穩定增加中。採用高強度材料因為其強度較高，較少的材料也可以達成原先相同的結構強度，對於減輕整體重量自然也有幫助。

不過儘管汽車工程師們嘗試尋找替代材料，鋼板仍是現代汽車車體結構的材料最佳選擇，在可預見的未來大概也一直會是如此。理由很簡單，鋼板仍是汽車製造最符合成本的材料，如果論磅計算的話，一般鋼板材料的成本大約是鋁合金的五分之一強，要用到複合材料的話成本更要貴上十幾倍，而即使是使用高強度鋼料，材料成本也只增加 10%~15%。除了原材料成本低之外，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，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，除非突然有嚴厲的新法規出現，或者材料科技有重大的創新，不然很難看出鋼鐵製的車子近期內會有什麼大改變。

### 高強度的鋼鐵材料

OK，汽車終究還是要用鋼來製造。鋼製的車子想要減重，唯一可做的是就是，用比較少的鋼。前面提到實務上的作法之一，就是改採高強度的鋼鐵材料。

這裡必須先解釋一下，所謂材料的“強度”，概念上是說，材料承受多大的力時會發生破壞。鋼鐵材料有非常多，同樣是鐵，含碳的成分、合金的成分、或者製造、熱處理的方式不一樣，承載負荷的強度變會差異非常大。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) steel 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一些些，重量就可以減少一些。

高強度低合金鋼已經被發現幾十年了，但是用在汽車上只是最近十幾年的事，在現代汽車中百分之六十的鋼鐵材料都是 MSLA 和 HSLA。HSLA 鋼板成形的可塑性較差是重要的缺點，也是目前材料工程師研究的重點。HSLA 還不是強度最高的，再往上去還有強度更高的鋼鐵材料，比 MSLA 強上五倍，但是這些材料不是成本過高，就是可塑性過差，或者有焊接、鍍鋅困難等問題，因此在汽車工業上採用不多。

### 強度設計或是剛性設計？

您會問，既然這些高強度的鋼料可以進一步減輕車體重量，材料成本也增加不多，如果製造上的問題可以克服，那麼何不整部車都採用高強度的材料呢？

Mmmm，這個問題其實很深刻，機械科系畢業的學生都不見得有清楚的概念。

這裡首先要釐清一個觀念，強度其實不是結構設計上的唯一考量，甚至不是主要考量，在汽車結構設計上，最主要的考量因素是“剛性”。

結構的強度和剛性字面上感覺起來似乎沒什麼不同，但在結構設計專業上可是完全兩碼子事兒。前面提到結構“強度”的概念是結構受到多大外力時會產生破壞，在汽車結構上只有大約 20% 的結構件以強度為最重要考量，主要是車體結構上處理衝擊負荷的部分，像是衝擊樑、保險桿柱、車體 B 柱補強等，通常我們希望在這些主要承受衝擊的零件採用高強度鋼。

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。

早先車體設計上對剛性的考慮只要不要讓汽車過度變形，門還可以關上就好。現代汽車提升剛性則成為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。

材料的剛性是由其“彈性模數(modulus of elasticity)”來代表，就像彈簧都有“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—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。

### 提升車體結構的鋼性

所以如果結構設計的設計目標是提升剛性，使用高強度鋼板不會有任何幫助，因為材料的彈性模數不會改變，如果你要將車子現有的單體結構 BIW 剛性提高，唯一可以用的策略是增加鋼料，其中的學問是如何把鋼料補強在最關鍵的部位，增加少量鋼料即能大幅提昇剛性。

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。

扯了這麼多，不曉得對讀友們概念上有沒有一些幫助。

最後給您一個家庭作業，實驗題，測量一下您的愛車剛性夠不夠。找一個路邊人行道之類的，把車子開上去，但是只有一個輪子掛在人行道上。這時候車體重量不是平均向下壓，一定會造成車體結構的變形，試試看開關您的車門，如果車子剛性不好，門框變形量太大，車門可能會關不起來。

家庭作業，下個月要交喔！