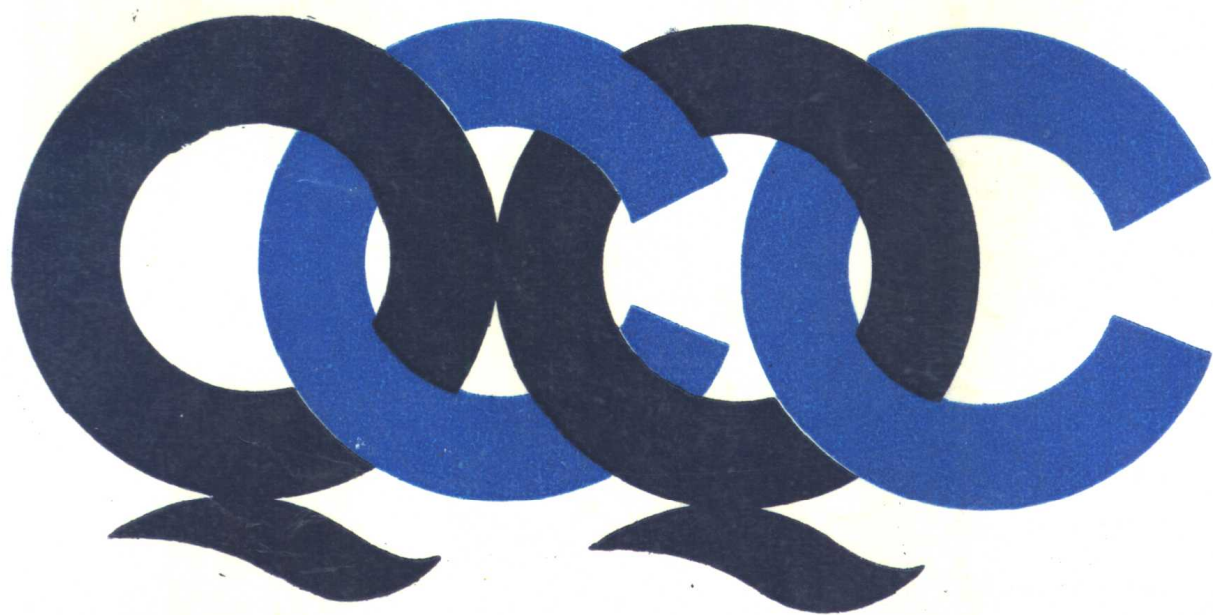


羊秋林 李尹熙 吕莉雯 李子卿 编译

# 汽车用轻量化材料



机械工业出版社

# 汽车用轻量化材料

羊秋林 李尹熙 编译  
吕莉雯 李子卿



机械工业出版社

本书讲述了汽车轻量化的意义及发展动向,较详细地介绍了铝、镁、FRP复合材料、塑料、高强度钢板、玻璃、蜂窝夹层材料的性能、制造工艺及其在汽车上的应用。还就近年来国外精细陶瓷材料的开发和在汽车上的应用现状及前景加以综述。

本书是汽车行业从事设计、制造、材料、工艺、使用等方面的工程技术人员的参考书,也可供教学、科研人员使用。

## 汽车用轻量化材料

羊秋林 李尹熙 编译  
吕莉雯 李子卿

责任编辑:张绪江、董薇薇 版式设计:胡金瑛  
封面设计:姚毅 责任校对:郝凤玲  
责任印制:卢子祥

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)  
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)  
机械工业出版社京丰印刷厂印刷  
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张16·字数390千字  
1991年9月北京第一版·1991年9月北京第一次印刷  
印数 0,001-1,150·定价:13.40元

ISBN 7-111-01237-2/U·32

## 前 言

近10多年来世界汽车工业面临三大问题：能源、公害和安全，因而各国政府先后制订能源保护、废气排放、噪声和安全的有关法规，汽车技术的发展主要是围绕这三大问题进行的。其中能源问题尤为突出，可以说是汽车工业发展与变革的动力。节约能源首先是提高汽车的燃油经济性，而降低车辆重量是其重要的措施之一。以轿车而论，按现在的轿车重量计，每减重10%，燃油消耗可降低8~10%，以载货车（16~20t级）而论，每降低车辆重量1000kg，燃油消耗可降低6~7%。因而制造经济性的车辆，便成为近年来各国汽车工业互相竞争的主要手段。

为了降低汽车重量，轻量化材料的用量有较大的增长。所谓轻量化材料是指轻合金（铝、镁合金）、塑料和高强度钢板。由于轻量化材料的扩大应用，使原材料的制造技术、汽车零件的设计和制造工艺都相应地得到了很大发展，在今后10多年内轻量化材料用量将会急剧增加。从长远看，纤维增强复合塑料用来制造汽车结构件和运动件有其广阔的前景，有朝一日大部分汽车零件将可能用纤维增强复合塑料代替金属材料来制造。因而这种发展趋势不能不引起人们的关注。此外，精细陶瓷材料的开发和在汽车上的应用已展示了美好的前景。

国产汽车上轻量化材料的用量还很低，直接影响油耗和车辆重量的降低。因而应向国外学习，结合我国的实际情况，更多更好地采用各种轻量化材料。

日本富士技术公司出版部出版的“自動車轻量化技术资料集成（材料编）”一书，比较详尽地搜集了汽车轻量化材料的性能、原材料的制造方法、汽车零件的设计、制造工艺及使用特性等方面的资料。但原书内容繁复、篇幅较多，我们取其有实用意义的内容，编译出版。此外，还就近年来国外精细陶瓷材料的开发和在汽车上的应用现状及前景加以综述，以供汽车行业的设计、材料、工艺、使用等方面工作人员参考。希望能引起各方面对轻量化材料的重视和促进在汽车上的实际应用。以使国产汽车在提高品质、减轻重量、降低油耗等方面有所得益。

本书第一、四、五、七章由李尹熙编译，第二、九章由吕莉雯编译，第八章由吕莉雯编写，第三章由李子卿编译，第六章由羊秋林编译，附录1国产汽车的轻量化与轻量化材料的应用由李子卿、羊秋林编写，全书经羊秋林审校，由吕莉雯加以充实、整理并进行了终审。由于我们水平有限，书中错误之处在所难免，望读者给予指正。

编者 1985

# 目 录

## 前言

第一章 绪论 .....	1
一、汽车轻量化的意义 .....	1
二、汽车材料构成及轻量化的发展趋向 .....	6
第二章 铝 .....	12
一、概述 .....	12
二、铝在汽车轻量化中的作用 .....	14
(一) 生产过程中的节能 .....	14
(二) 在运行中的节能 .....	14
(三) 节能的综合评价 .....	16
三、汽车用铝及其合金 .....	18
(一) 铝合金的种类及一般特性 .....	18
(二) 汽车用形变铝合金 .....	23
(三) 汽车用铝铸件及压铸件 .....	39
四、铝制零件的成形加工 .....	45
(一) 铝合金的成形性 .....	48
(二) 铝锻件在汽车上的应用 .....	58
五、铝制零件的接合 .....	61
(一) 铝合金的接合 .....	61
(二) 熔化焊 .....	62
(三) 电阻焊 .....	64
(四) 钎焊 .....	64
(五) 铝与钢的接合 .....	67
六、铝合金零件的表面处理和腐蚀特性 .....	68
(一) 铝合金的耐蚀性 .....	68
(二) 铝合金的表面处理特征及概要 .....	68
(三) 铝制零件的表面处理和耐蚀性 .....	71
七、铝件的修补与再生 .....	73
(一) 修补 .....	73
(二) 再生 .....	73
八、铝在汽车上的应用及今后展望 .....	74
(一) 在轿车上的应用及今后展望 .....	74
(二) 在载货车、客车上的应用及今后的对策 .....	81
第三章 镁 .....	89
一、镁合金的利用动向和展望 .....	89
(一) 镁合金的利用动向 .....	89

(二) 镁的轻量化及其效果 .....	90
二、各种镁合金的性能 .....	92
(一) 铸造用镁合金 .....	92
(二) 锻造用镁合金 .....	96
三、镁合金零件的制造方法 .....	97
(一) 砂型、金属型铸造法 .....	97
(二) 压铸法 .....	101
(三) 镁合金的塑性加工法 .....	102
(四) 镁合金的接合 .....	109
(五) 镁合金的热处理 .....	109
四、镁合金制件的表面处理 .....	114
(一) 镁的化学性质 .....	114
(二) 预处理 .....	116
(三) 防腐处理 .....	117
(四) 有关防腐的设计要点 .....	123
(五) 防腐在汽车零件上的应用 .....	124
五、使用镁合金制造零件的注意事项 .....	124
(一) 设计形状 .....	124
(二) 防火措施 .....	126
第四章 FRP复合材料 .....	128
一、概述 .....	128
二、常用的FRP材料及其成形法 .....	130
(一) SMC材料 .....	130
(二) 冲压成形材料 .....	134
(三) 单丝绕制成形 .....	136
(四) 拉制成形法 .....	138
(五) 树脂注入法 .....	139
(六) 反应注射模法(RIM和RRIM法) .....	142
(七) 碳纤维增强塑料(CFRP) .....	143
(八) Kevlar复合材料 .....	145
(九) 晶须增强塑料 .....	145
三、FRP在汽车上的应用 .....	145
四、FRP汽车零件的设计 .....	153
第五章 塑料 .....	163
一、发展汽车塑料制品的必要性 .....	163
二、塑料的性能 .....	163
三、汽车用塑料 .....	166

四、塑料的成形方法 .....	168	第八章 精细陶瓷 .....	212
五、塑料在汽车上的应用 .....	170	一、工程陶瓷 .....	212
第六章 高强度钢板 .....	180	(一) 几种工程陶瓷的特性 .....	212
一、采用高强度钢板的意义 .....	180	(二) 工程陶瓷的一般成形工艺 .....	214
(一) 减轻重量的潜力 .....	180	(三) 加工技术 .....	217
(二) 采用高强度钢板的经济性 .....	182	(四) 工程陶瓷在汽车上的应用 .....	218
(三) 高强度钢板扩大应用的课题 .....	183	二、功能陶瓷 .....	221
二、钢板的高强度化技术 .....	183	三、精细陶瓷开发中的问题 .....	226
(一) 金属学原理 .....	183	第九章 蜂窝夹层材料 .....	227
(二) 高强度钢的类型 .....	185	一、概述 .....	227
三、各种高强度钢板材质上的优劣 .....	186	(一) 蜂窝夹层材料在汽车轻量化	
(一) 各钢种特征概述 .....	186	中的作用 .....	227
(二) 强度和延性的关系 .....	187	(二) 各国应用蜂窝夹层材料的动向 .....	227
四、新的高强度钢板——双相钢 .....	188	二、蜂窝夹层材料的种类和各种特性 .....	227
(一) 双相钢的组织 and 制造技术 .....	188	(一) 蜂窝夹层材料的形状和取向 .....	227
(二) 双相钢材质上的特性 .....	190	(二) 种类和特点 .....	228
五、高强度钢板的成形性 .....	192	(三) 蜂窝夹层材料的性能 .....	231
(一) 材料的 $r$ 值和 $n$ 值 .....	192	三、蜂窝夹层结构的设计 .....	232
(二) 成形上的几个问题 .....	192	(一) 机械性能 .....	232
六、高强度钢板的焊接性 .....	195	(二) 强度计算 .....	234
(一) 点焊条件 .....	195	(三) 蜂窝夹层材料的选择 .....	238
(二) 关于点焊质量 .....	196	四、细节设计 .....	239
七、高强度钢板的疲劳特性 .....	199	(一) 端部处理 .....	239
(一) 母材的疲劳特性 .....	199	(二) 表面板及蜂窝夹层材料的连接 .....	240
(二) 点焊区的疲劳特性 .....	201	(三) 蜂窝夹层板的接合方法 .....	241
八、高强度钢板的腐蚀性能 .....	203	(四) 表面处理和腐蚀特性 .....	242
(一) 汽车的腐蚀特性 .....	203	附录 .....	245
(二) 钢板的成分对腐蚀的影响 .....	203	附录1 国产汽车的轻量化与轻量化材料的	
九、高强度钢板在汽车上的实际应用 .....	206	应用 .....	245
(一) 高强度钢板应用的历程 .....	206	附录2 常用法定计量单位及其换算 .....	249
(二) 实际应用情况 .....	207		
第七章 玻璃 .....	210		

# 第一章 绪 论

## 一、汽车轻量化的意义

所谓汽车轻量化，就是减轻汽车自身重量的意思。轻量化和小型化不同，它是指同一台车在同样尺寸或同一种车型在同样的汽缸容量的前提下重量的减轻。这是根据市场和社会提出的安全、无公害、低成本及节能的要求，由汽车制造者必须解决的技术课题。这里所要讨论的轻量化是以节能为主要内容的，要达到法律规定的燃油指标限额，应首先考虑降低汽车的燃料消耗。汽车的燃料消耗和车重的关系很难用简单的数学关系式来表达，只能近似地由各种阻力因素线性加法求出。

汽车行驶阻力  $F$  可由下式求得：

$$F = \mu_0 W + W \sin \theta + a(1 + \beta)W + \lambda' W^{2/3} v^2$$

或用汽车行驶阻力系数  $\mu'$  表示

$$\mu' = F/W = \mu_0 + \sin \theta + a(1 + \beta) + \lambda' W^{-1/3} v^2$$

式中  $W$ ——汽车重量；

$\mu_0$ ——滚动阻力系数；

$\theta$ ——斜率；

$a$ ——加速度；

$\beta$ ——等价旋转重量比；

$\lambda'$ ——空气阻力系数；

$v$ ——车速。

再经过热机和动力传递、驾驶操纵的影响等各种因素的计算，一般行驶时燃料消耗  $a_0$  (km/L) 由下式表示：

$$a_0 = \frac{740 \int_{t_1}^{t_2} v dt}{\int_{t_1}^{t_2} A_1 v dt + 3600 \int_{t_1}^{t_2} B_2 dt}$$
$$A_1 = 0.223 \frac{W}{\eta_i} \left( \frac{\mu'}{\eta_m} + \frac{P_i}{4\pi} \cdot \frac{i}{R} \cdot \frac{V_d}{W} \right)$$

式中  $\eta_i$ ——图示热功率；

$\eta_m$ ——动力传递效率；

$P_i$ ——摩擦损失平均有效压力；

$i$ ——减速比；

$R$ ——轮胎有效半径；

$V_d$ ——发动机行程容积；

$B_2$ ——怠速时单位时间燃料消耗；

$\int^{t_1}$ ——行车时间积分，  
 $\int^{t_2}$ ——怠速时间积分。

根据上式计算的车重 $W$ 的变化率和行车燃料消耗 $a_0$ 之间的关系如图1-1所示。

日本生产的1976年型轿车，在平坦路面上定速（60km/h）行驶时，车重和燃料消耗之间的关系如图1-2所示。可见轻量化对节能的显著效果。

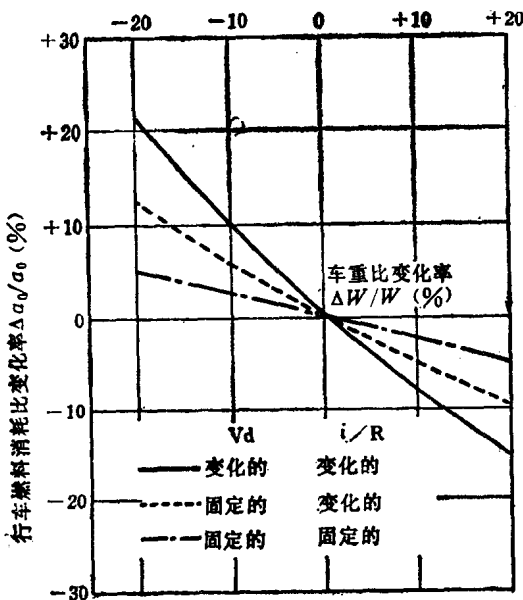


图1-1 车重 $W$ 的变化率和行车燃料消耗 $a_0$ 的关系(根据模拟计算)

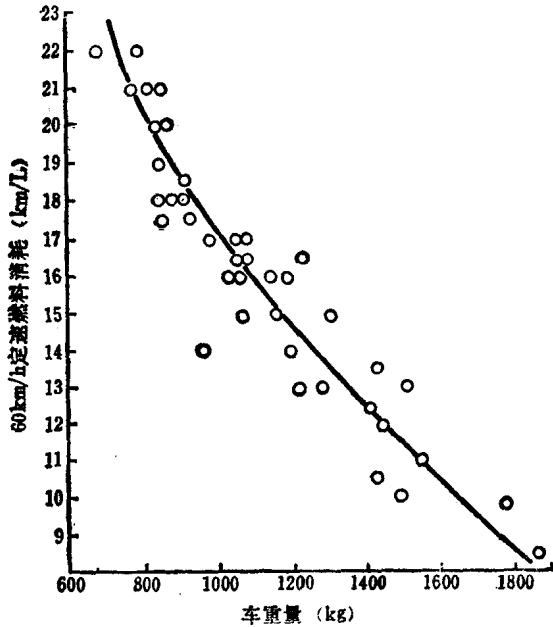


图1-2 车重和定速燃料消耗的关系

车辆正常行驶时燃料消耗的各种因素分析如图1-3。可见影响汽车燃料利用率的主要因素除发动机的热效率之外，尚有驱动系的摩擦、辅助机械消费、滚动阻力（汽车的自重和轮胎的滚动阻力）、空气阻力等。由图1-3可以看出，汽车低速行速时主要的影响因素是滚动阻力和辅助机械消费。当车速提高时，空气阻力的影响越来越大。这可理解在同等发动机的热效率下，载货汽车的燃料利用率的影响因素主要是滚动阻力，而轿车追求的是速度，故其主要影响因素是空气阻力。图1-4为轿车发动机的马力 $\ominus$ 消耗分配(百分数)实例。

汽车的行驶阻力包括空气阻力、轮胎阻力、加速阻力和爬坡阻力等四项。而空气阻力中其阻力系数主要与车身的形状、大小有关（图1-5）。特别是高速行驶时关系更大。而其它三项则均与整车的车重成正比。因此，从汽车行驶所受阻力的来看，汽车的轻量化是节能的一项有效措施。

汽车在公路上行驶时，能量消耗在克服各种阻力上，其具体情况如表1-1所示。

由此可见，汽车行驶时大部分能量消耗在克服空气阻力和轮胎滚动阻力上。这两个阻力之和在低速时为65%，高速时为90%。这就要求减轻汽车的自重，以便降低轮胎的滚动阻力。表1-2是西保莱车（1977年型）经过多方面的努力，减轻自重的一个例子。由表可见，在总减重量253.3kg中，由于更换材料减轻重量104.2kg，即占41%，零件小型化后减轻重量

$\ominus$  马力：1米制马力=0.735499kW(下同)。



144.1kg, 占了57%。

汽车工业的有关技术课题都和当时社会上提出来的要求有密切的关系。例如图1-6是日本生产的轿车几年来根据社会需求而变化的情况。

除了图中指出的技术性能、安全性、排放污染、节能方面的问题外,还有耐腐蚀、噪声、舒适性及载货车特有的一些问题。目前最迫切的是汽车节能问题。

根据1975年美国制定的能源政策和保护法,汽车燃料消耗限制如表1-3。

根据这个规定,1985年轿车耗油量应达到27.5mile/gal(11.0 km/L),如平均耗油量达不到规定的节油标准,每台罚款500~2650美元,见图1-7。

汽车燃油平均消耗量(CAFE)根据下式计算:

$$CAFE = \frac{\sum \text{出售台数} \times \text{出售车燃油消耗}}{\text{总出售台数}}$$

表1-4是各国燃油消耗规定。

在测定燃油消耗时,用市内行驶和高速公路行驶时的综合平均值来表示,即按下式计算:

$$\text{综合(MPG)} = \frac{1}{\frac{0.55}{\text{城市(MPG)}} + \frac{0.45}{\text{高速(MPG)}}$$

瑞士和澳大利亚是用L/(km·h)来表示燃油消耗值,测试方法与美国一样。燃油消耗值的测定,在欧洲是采用ECE循环法,在日本采用10点模型法。各种试验方法规定的车速见表1-5。

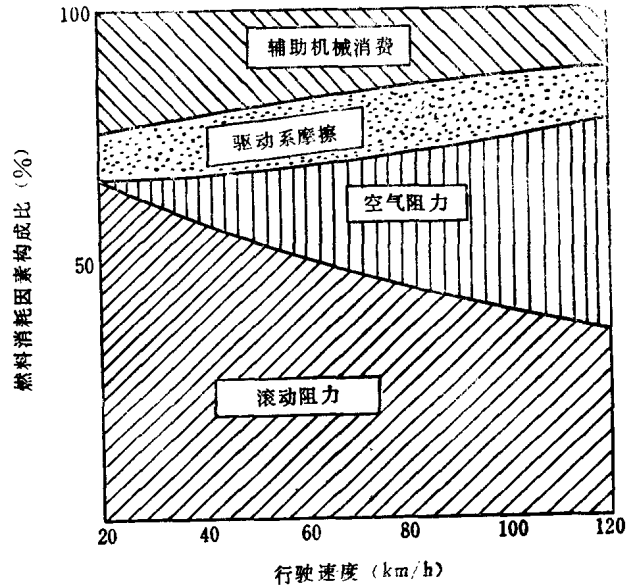


图1-3 汽车正常行驶时燃料消耗的影响因素

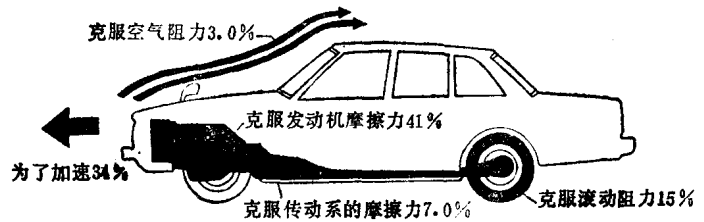


图1-4 发动机马力消耗分配

车型	空气阻力系数
1920年代敞篷汽车	0.95
1940年代轿车	0.64
1970年代轿车	0.46
大客车	0.8 ~ 1.0
拖车载货车	1.0 ~ 1.2
流线型车身	0.12 ~ 0.13

图1-5 车身形状与空气阻力系数的关系

表1-1 各部位能量消耗情况

单位: 10<sup>6</sup>J(%)

	伏克斯伐根 (Rabbit)		福特 (Fairmont)	
	城市 (LA-4)	公路(HFEA)	城市 (LA-4)	公路(HFEA)
空气阻力	1.33(27)	4.34(56)	1.58(25)	5.13(52)
轮胎滚动阻力	1.94(39)	2.69(34)	2.66(41)	3.67(38)
差速齿轮	0.20(4)	0.31(4)	0.26(4)	0.39(4)
传动(4档)	0.15(3)	0.16(2)	0.22(3)	0.20(2)
离合器打滑	0.03(1)	(—)	0.09(1)	(—)
制 动	1.26(26)	6.29(4)	1.64(26)	0.43(4)
合 计	4.91(100)	7.79(100)	6.45(100)	9.83(100)

表1-2 重量减轻例

(1977年型西保莱车1691kg)

车 身	材料替换	59.6kg
	玻璃减薄	5.0kg
	轮胎小型化	9.1kg
传 动	部件更改	129.6kg
	材料替换	5.5kg
底 盘	部件更改	5.4kg
	材料替换	39.1kg
合 计		253.3kg
轻量化后 1438.6kg		减轻率15%

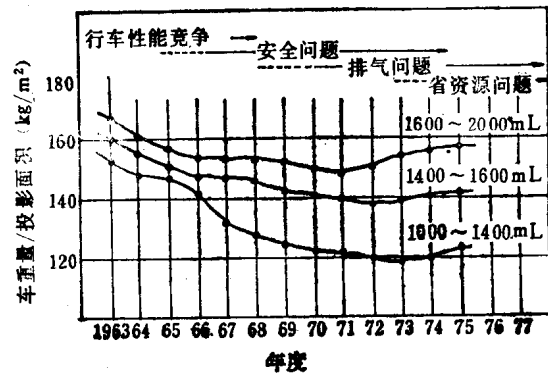


图1-6 日本对轿车需求的变迁和重量的变化

表1-3 美国汽车燃油消耗规定

年 份	轿 车		小 型 载 货 车	
	MPG(英里/加仑)	km/L(公里/升)	MPG(英里/加仑)	km/L(公里/升)
1978	18.0	7.2	—	—
1979	19.0	7.6	17.2(15.8)	6.88(6.32)
1980	20.0	8.0	16.0(14.0)	6.40(5.6)
1981	22.0	8.8	16.7(15.0)	6.68(6.0)
1982	24.0	9.6	—	—
1983	26.0	10.4	—	—
1984	27.0	10.8	—	—
1985	27.5	11.0	—	—

注: 1. 轿车适用于6000lb(2718kg)以下美国国内生产和进口的轿车。

2. 小型载货汽车( )内数据为四轮驱动车。

3. 小型载货汽车, 1979年以前为2718kg以下, 1980年以后为8500lb(3850kg)以下,

不论从用户的立场，还是从国民经济或国家政策的观点，至少目前认为节能是相当长期的任务。据估计在10~100年之间节能仍然是最迫切的问题。在此期间也可能出现一些小的反复，例如新能源供给体系的早期建立，核动力、氢动力、电动力的发展等因素有可能使能源基本满足需求。重质油处理方面的研究工作获得有效的进展之后会改变石油制品的供应状态。这就要求我们在考虑长期的节能问题的同时，要时刻注意新情况。

汽车轻量化是汽车节能的重要一环。轻量化不仅要靠汽车工业本身，还要靠各方面的广泛协作，经过长期的努力才能达到预期的目标。汽车轻量化不能只靠设计和结构的改变，还要考虑生产线的改变、材料的循环体系、出售后的修理等各种因素可能引起的问题。此外，在材料工业界也要建立稳定的供应体系及有关方面的技术开发工作。美国通用汽车公司预算200亿美元用于研究汽车轻量化所需的新材料。可见对材料研究工作的重视。

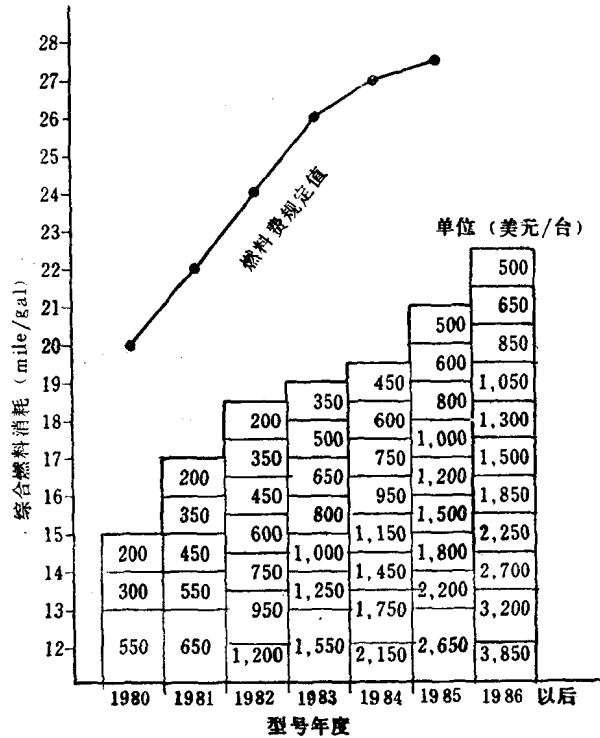


图1-7 高燃油消耗车罚款规定

表1-4 各国燃油消耗规定

国名	动向	国名	动向
日本	公布的燃油消耗值60km/h(10点方式) 节能方案在研究	英国	1978. 4. 1规定 ECE№15循环90km/h, 120km/h
法国	1976. 4. 1规定 ECE№15循环90km/h, 120km/h	瑞典	1978. 1. 1规定(综合燃料消耗)
		澳大利亚	同美国一样(在研究中)

注：ECE为欧洲经济委员会。

表1-5 各种状态行车速度

(单位, km/h)

状态	城市(LA-4)	公路(HFEA)	10点方式	ECE循环
平均速度	34.1	77.1	17.7	18.8
最高速度	90.7	95.8	40.0	50.0

汽车轻量化不仅和节能有关，还与其它因素有着密切的关系，例如操纵性、排气净化、腐蚀等问题都与轻量化直接相关。因此，轻量化并不是新近提出来的课题，但1973年石油危机以来则成了具有特殊意义的重要课题。

节能的重要性被人们普遍认识还需要一个过程。实际上石油危机之前有些人竟把石油和电的消耗量视为经济繁荣与否的标志之一。自从强调节能之后才逐渐扭转了这种看法。只有当人们普遍感到能源的浪费是犯罪行为时，轻量化问题必然成为头等重要的任务。然而，轻

量化达到了节能的目标并不意味着完全成功，因为还得考虑低公害、安全性、低成本、可靠性及舒适性等其它因素。

汽车的轻量化技术包括结构的合理设计和轻量化材料的使用两大内容。在结构设计方面，典型的例子是前轮驱动结构。目前欧洲车已有60%改成前轮驱动，日本目前只有15%，但将来逐渐向这方面发展。前轮驱动车可以节省传动系的重量。其它很多部件通过合理的结构设计能够实现轻量化，但重要的是改变结构之后不能降低部件的强度。这一点可通过有限元结构分析法加以解决。在短时间内可以分析车身刚性、噪声、振动等各项特性的大型计算机及径纬全息摄影等先进技术的应用，能够准确地选择材料厚度，达到轻量化的目的。高刚性结构、部件一体化、减少接缝、厚度的合理分配等都可以带来轻量化效果。

## 二、汽车材料构成及轻量化的发展趋向

使用轻量化材料是汽车轻量化的重要方面。从汽车上使用的各种材料的变化情况（见表1-6）来看，3/4是由钢铁材料构成。如果只看材料重量的变化，近几年来塑料的使用量变化不大，但从材料体积的变化来看，塑料的用量明显增大（见表1-7）。

表1-6 汽车材料构成比的变化（每车重量）

年 份	1965		1968		1971		1974		1980	
	重 量 (lb)	百分比 (%)	重 量 (lb)	百分比 (%)	重 量 (lb)	百分比 (%)	重 量 (lb)	百分比 (%)	重 量 (lb)	百分比 (%)
铸铁	414	12.0	440	12.1	488	12.2	467	12.2	378	11.8
可锻铸铁	55	1.6	60	1.8	84	2.1	123	3.2	96	3.0
碳钢	1.901	55.1	1.977	54.3	2.152	53.8	2.030	53.0	1.644	51.3
镀锌钢板	62	1.8	66	1.8	72	1.8	77	2.0	74	2.3
镀铝钢板	28	0.8	29	0.8	32	0.8	35	0.9	38	1.2
合金钢	131	3.8	127	3.5	132	3.3	96	2.5	61	1.9
不锈钢	11	0.3	11	0.3	12	0.3	12	0.3	13	0.4
铝	62	1.8	66	1.8	76	1.9	83	2.2	115	3.6
锌	59	1.7	58	1.6	60	1.5	34	0.9	16	0.5
铜	35	1.0	36	1.0	32	0.8	23	0.6	19	0.6
铅	97	1.0	36	1.0	40	1.0	36	0.9	26	0.8
玻璃	166	2.8	98	2.7	104	2.6	96	2.5	80	2.5
橡胶	166	4.8	182	5.0	204	5.1	199	5.2	160	5.0
塑料	35	1.0	73	2.0	104	2.6	152	4.0	190	5.9
其它 <sup>①</sup>	359	105	375	10.3	408	10.2	378	9.6	295	9.2
平均	3.450	100	3.640	100	4.060	100	3.841	100	3.205	100

① 包括：密封、润滑剂、焊剂、棉布及其它材料。

表1-7 汽车材料体积构成比的变化(美国)

单位: L/辆

材料	年份	1965	1968	1971	1974	1980
钢 铁		323	343	375	359	292
铝		23	24	28	31	43
塑 料		29	61	87	127	158

表1-8 GM公司汽车材料构成的预测

	1978年		1987年		变 化 (%)
	重 量 (lb)	百 分 比 (%)	重 量 (lb)	百 分 比 (%)	
塑料	189	5.4	255	9.06	+35
铝	121	3.46	180	6.39	+49
钢材	2066	59.05	1687	59.91	-18
铁	625	17.86	283	10.05	-55
橡胶	99	2.83	81	2.88	-18
玻璃	22	2.72	79	2.81	-17
铅	95	0.63	22	0.78	0
锌	18	0.51	9	0.32	-50
其它	264	7.55	210	7.46	-20
合计	3499	100	2816	100	-20

目前, 努力谋求用轻量材料(铝、镁、塑料、高强度钢板、陶瓷等)来代替原来的材料。用新材料代替原有材料是实现轻量化的一个长远的战略方针。这里所指的新材料包括同系列的材料, 改变化学成分、热处理、加工方法、表面处理等。更换材料得到的轻量化效果有直接的和间接的。采用高强度钢板、铝合金、镁合金等轻金属和塑料、GFRP(玻璃纤维增强塑料)、CFRP(碳纤维增强塑料), 可以达到直接轻量化的效果。不锈钢, 镀锌钢板, 铬酸锌处理钢板及铝、FRP(纤维增强塑料)等材料, 由于较高的耐蚀性和耐久性, 则间接地产生轻量化效果。

今后轻量材料的使用量将逐年扩大。在表1-8中列出了美国通用汽车GM公司预测的轿车材料构成情况。

未来美国轿车材料的重量百分比见图1-8, 其中钢铁材料仅占60%多一点。

几种轻量材料的性能比较见表1-9。一般说, 材料的刚性、强度、密度等基本特性仍按着高强度钢、铝合金、塑料的顺序依次降低, 但由于上述数值的比值不同, 则变形、纵向弯曲、断裂的顺序有所不同。因此, 设计时应考虑轻量材料的优良性能, 即表1-10中列出的弹性模量 $E$ 、抗拉强度 $\sigma_b$ 、密度 $\rho$ 的综合值及比强度 $(\sigma_b/\rho)$ 、比刚性 $(E/\rho)$ 等特性。此外, 也应当考虑疲劳断裂、应力腐蚀、老化破裂、扯裂、局部弹性纵弯曲、扭转弯曲、冲击变形等。

通过更换材料实现轻量化有两个途径: 一是使用同密度、同弹性模量的, 而强度高、工艺性好的材料代替原有的材料, 如高强度钢等。二是使用密度小、强度高的材料代替原有的材料, 如轻合金、塑料及其复合材料、陶瓷等。

在日本, 高强度钢板的技术开发和性能研究已进行了许多工作, 但在汽车上的应用尚落后于美国。为提高汽车的安全性, 高强度钢板首先用于门柱和保险杠。目前正在内板、制动、车轮等方面的研究和试制。

从冶金学角度看, 高强度钢板可分为: 固溶强化型、沉淀强化型、冷加工强化型、急冷相变强化型。最常用的是固溶强化钢和沉淀强化钢。固溶强化钢延性好, 特别是抗拉强度为  $40\sim 45\text{kgf/mm}^2$  ( $1\text{kgf/mm}^2=9.8\text{MPa}$ ) 的冷轧材  $\gamma$  值也高, 但要达到  $60\text{kgf/mm}^2$ , 只靠固溶强化是不行的。沉淀强化钢强度略高一些, 但延伸值稍差。双相钢的抗拉强度为  $50\text{kgf/mm}^2$ , 强度/延伸值也较高。高强度钢板的价格比普通钢板高  $7\sim 10\%$ , 但由于重量减轻, 估计制品的单价和原来的一样。但应当考虑它的成形性、焊接性、耐腐蚀性、涂装性等因素。

汽车上应用的轻合金主要是指铝合金和镁合金。美国积极推广铝制进气管, 动力传递用箱盖及壳体、离合器壳、电气零件, 并在探讨铝缸盖等其它零件。日本以无铅汽油代替汽油为契机, 在轿车上包括缸盖在内的许多零件都采用了铝制品。在发动机轻量化中, 缸体是关键性的零件。织女星 (Vega) 轿车曾使用共晶硅铝合金制成的发动机缸体, 但由于耐久性差, 不久就停止生产。目前, 日本和欧洲部分车上采用镶铸铁缸套的发动机。在日本, 车身的铝化还相当困难。每年一度的SAE年会上积极讨论用铝实现汽车的轻量化问题, 如铝及其合金保险杠的研究, 铝及其合金车身的生产技术、耐腐蚀性的研究, 铝散热器的实用化, 铝制车轮的实用化等。铝散热器已在部分欧洲车上正式采用。这种SOFICA公司生产的铝散热器的散热片和管子全部以机械方式铆接。美国汽车上使用的铝散热器是真空钎焊制品。

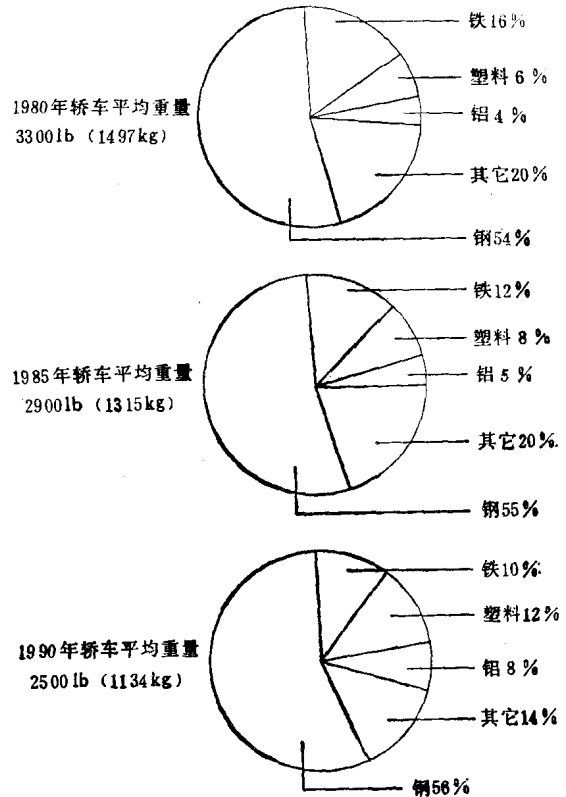


图1-8 美国轿车材料构成 (重量%) 的预测

表1-9 汽车轻量化材料的特性比较

项目	材料	铝	高强度钢板	塑料
特点		轻(密度为钢的1/3), 电阻系数小, 导热性优良, 表面光洁, 加工性好, 便于批量生产	强度高( $40\sim 80\text{kgf/mm}^2$ ①), 以强度计算的材料费比低碳钢便宜15~30%	轻(密度为 $1\sim 2\text{g/cm}^3$ ) 加工性好, 耐腐蚀, 等价弯曲强度, 重量比软钢低
应用例		铸件: 缸盖、曲轴箱、活塞、油泵、水泵、汽缸、车轮 轧制件: 格栅装饰条、热交换器的油冷却管	大梁、托架、保险杠、保险杠支架、门冲击梁等	前格栅、装饰覆盖层、保险杠内板和外板、前端板、后尾板、保险杠等

(续)

项目	材料	铝	高强度钢板	塑料
缺点		材料成本高(是钢的7~8倍),焊接、对接困难,弹性模量低,刚性差	材料费用比软钢板高10~30%,加工性能差,回火处理尚存在问题,模子寿命低,点焊强度低	材料成本比软钢板高3~5倍,生产率低(2~4min/周期),耐热性差,弹性模量低
展望		保险杠、车身板、水箱散热器、车轮、保险杠支架等可望扩大应用	在要求强度的底盘零件和吸收能量的安全对策零件上扩大应用。如:大梁、支架、横梁、臂、门框等	提高生产率和材料性能后可在加强板、顶板、发动机罩、保险杠支架、车身后板等扩大应用

①  $1 \text{ kgf/mm}^2 = 9.8 \text{ MPa}$ .

表1-10 轻量化材料的优良性能指标及使用方法

载 荷	判 断 依 据	优 良 指 标	备 注
拉伸(棒)	断裂	$\sigma_b/\rho$	强度特性
拉伸(棒)	伸长	$E/\rho$	变形特性
压缩(棒)	破坏	$(\sigma_b/\rho)$ ①	强度特性
压缩(棒)	压缩	$E/\rho$	变形特性
压缩(棒)	纵弯曲	$\sqrt{E}/\rho$	纵弯曲特性
压缩(圆筒)	纵弯曲	$\sqrt{E}/\rho$	纵弯曲特性
弯曲(棒)	折弯	$\sqrt{\sigma_b}/\rho$	强度特性
弯曲(棒)	垂度	$\sqrt{E}/\rho$	变形特性
弯曲(圆筒)	纵弯曲	$\sqrt{E}/\rho$	纵弯曲特性
扭转(圆筒)	纵弯曲	$\sqrt{E}/\rho \sim \sqrt{E}/\rho$	纵弯曲特性
压缩(平板)	纵弯曲	$\sqrt{E}/\rho$	纵弯曲特性

①  $\sigma_b$ 可用抗压强度或剪切强度。

镁作为轻量化材料是十分有前途的。它的超轻量特性和良好的导热性优于铝；在成本方面也比铝优越，1985年美国镁的售价比铝低，因而打入市场。利用镁的超轻量特性和高导热性制造汽车热室等零件的研究工作正在积极进行。

塑料在汽车上的使用量不断增多。美国杜邦(Dupont)公司甚至断言没有一个汽车零件不能用塑料制造。目前欧美各国对塑料及其复合材料进行着大量的研究工作。日本认为汽车上塑料的用量不会超过10%，这是由于成本和刚性的关系。目前正在开发的塑料件有很多。塑料及其复合材料强度低、弹性模量小，温度对其各种物理性能的影响很大，塑料对变形速度也十分敏感，因此设计时必须考虑它的特殊性。

精细陶瓷是继金属、塑料之后发展起来的第三大类材料。其发展史只有20年左右，但由于具有优良的力学性能(高温强度、高硬度、耐腐蚀、耐磨损等)和热学性能(耐热冲击、抗氧化、蠕变等)，作为工程材料已相继得到开发和应用。精细陶瓷的密度小，仅为钢铁材料的1/2，作为轻量化材料用于汽车零件，不仅直接起到轻量化的作用，更重要的是由于具有优良的耐热性、耐腐蚀性和耐磨性，如用于汽车发动机燃烧室及热交换器等零件，可使功率提高，燃油消耗大大下降，从节能角度看则间接地起到轻量化效果。目前，日本已掀起“陶瓷热”；世界各国也纷纷投入大量资金，积极进行开发研究工作，在汽车方面的应用已取得了可喜的成果。

综上所述的各种材料均能作为轻量化材料使用，但能否用这些材料代替钢铁材料还要考虑材料成本、加工性、生产效率、材料再生、修理难易、耐久性、涂装性等各种因素，只有综合平衡这些因素才能得出正确的结论。

此外，汽车轻量化还伴随着随及效果，即汽车重量减轻后，伴随着悬挂装置和发动机的小型化，而且发动机的小型化又促进驱动系等装置的小型化，即产生随及效果，被称之为轻量化多米诺效果。日本丰田汽车公司正在进行综合轻量化效果的分析。

轻量化带来许多其它方面的问题，如成本、生产率、振动及噪声特性、安全性、耐久性、操纵稳定性、居住性、机能性、排气污染、材料再利用等。因此，汽车的轻量化必须在充分考虑上述各种问题的协调和匹配的前提下才能实现。

为了克服单纯追求轻量化的盲目性，从结构力学和强度特性的立场提出如下几个值得注意的问题：

(1) 轻量化往往伴随着弹性模量或板厚的下降，因此容易出现变形，特别是纵弯曲现象。

(2) 轻量化材料硬度较低，容易划伤，易出现麻点等缺陷。

(3) 弹性模量的变化对材料裂纹特性的影响。

(4) 高强度材料塑性往往偏低，因此，成形较困难，使用时易发生事故。

(5) 高强度材料对裂纹、应力集中较敏感，尤其是金属材料的环境裂纹敏感性显著增加。

(6) 新的结构材料，需经较长时间的考核才能掌握其性能和应用效果。

(7) 由于尚有许多没搞清楚的破坏因素，因此在强度设计时要留有余地。

在评价轻量化时应考虑以下几个项目：

(1) 确保材料的供应。

(2) 材料价格。

(3) 材料和接缝的静强度和耐疲劳性。

(4) 薄板材料的延展刚性和耐凹性。

(5) 材料的综合可靠性。

(6) 纵弯曲特性（研究各种模式的弹塑性范围内静的和动的纵弯曲）。

(7) 耐腐蚀性（包括单材、不同材料接头、边角、间隙）。

(8) 生产率和综合经费。

(9) 修补。

(10) 焊接性能和接合方法的改进。

(11) 涂装性。

(12) 材料再利用。

(13) 动刚性和振动衰减特性。

(14) 特定零件的耐热性。

(15) 耐冲击性。

(16) 利用原来生产设备的可能性。

(17) 下一代产品改型是否方便。

为实现轻量化，在技术上注意以下几个方面的问题：



- (1) 开发和研究适合于汽车轻量化的新材料和评定方法。
- (2) 开发和改进适合于新材料特性的加工方法, 新型结构和接合方法。
- (3) 新的设计方案。
- (4) 薄板结构的疲劳强度和断裂韧性的评价方法。
- (5) 断裂力学在汽车上的应用。
- (6) 形状强度特性。
- (7) 引用极值统计论。
- (8) 提高可靠性。