

汽 / 车 / 先 / 进 / 技 / 术 / 译 / 丛

# 汽车轻量化

## ——材料、设计与制造

(美) P. K. 迈利克 等著  
于京诺 宋进桂 梅文征 杨占鹏 等译



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

汽车先进技术译丛

# 汽车轻量化

## ——材料、设计与制造

(美)P. K. 迈利克等著  
于京诺 宋进桂 梅文征 杨占鹏 等译



机械工业出版社

## 译者的话

随着我国汽车工业的迅速发展，2009年，我国已经成为世界第一大汽车生产和销售国。随着汽车保有量的迅猛增加，能源供给紧张和排气污染加剧的问题日益突出，因此人们在汽车的节能和减排方面进行了大量研究，采取了许多措施，其中最有效的手段之一是汽车轻量化。然而，汽车的轻量化研究在我国还比较薄弱，本书的翻译出版，将对汽车轻量化研究提供帮助。

本书由美国密歇根大学迪尔本分校轻量化汽车材料和工艺中心的 P. K. 迈利克教授以及其他专家、学者撰写。本书分两部分，第一部分共6章，主要介绍用于制造轻量化汽车结构件的先进钢材，用于制造轻量化动力传动装置和汽车结构件的铝合金、镁合金，用于制造轻量化汽车结构件的热塑性材料和热固性材料；第二部分共4章，主要介绍轻质合金的加工工艺、轻量化汽车的连接工艺、轻量化汽车的回收与寿命周期、轻量化汽车的抗撞设计等轻量化汽车结构件的设计与制造问题。

本书图文并茂，技术数据翔实，深入浅出，结合许多世界著名车型实例进行分析，为读者提供了大量的汽车轻量化材料的选择、加工工艺和设计方法的资料以及案例，可以作为汽车轻量化研究人员，汽车设计、制造工程技术人员的参考资料，也可作为高校车辆工程等相关专业的教材或教学参考书。

本书翻译人员有于京诺、宋进桂、梅文征、杨占鹏、赵万胜、姚美红、王昕彦、郭慧、杜国平、陈帅、朱晓玉、吴振国、赵凌云、司维强等。

由于译者水平有限，难免存在翻译错误之处，敬请读者指正。

译者

# 前 言

汽车的结构材料正在由以低碳钢为主转变为钢、铝和镁等轻质合金以及聚合物基复合材料的组合。其中许多材料已经用于现代汽车，尽管可能其批量很小。未来的汽车不得不轻量化，以改善燃油经济性和减少环境污染，因此这些材料将被大量使用。材料的选择不仅要考虑轻量化的潜力，而且要考虑安全、使用寿命、加工工艺、连接、循环使用和成本等因素。这些正是本书将要探讨的问题。

本书的内容包括材料种类、材料性能、工艺技术和设计以及材料的选择等与轻量化汽车设计相关的问题。每一章都由从事这些材料应用或研究、掌握第一手资料和经验丰富的工业领域或学术界的专家撰写。本书首先对轻量化汽车结构的材料 and 设计进行了简要的回顾，然后分为两个主要部分：材料 and 设计制造。材料的章节包括先进的钢、铝合金、镁合金和聚合物基复合材料。这些章节都由材料性能、工艺特性和应用实例等内容组成。设计制造部分包括轻质合金的制造工艺、连接、防撞性设计、循环利用和使用寿命等内容。真诚希望本书对于汽车工业领域的工程师和材料研究领域的学者有所裨益。

非常感谢本书的所有作者付出的艰辛，没有他们就不可能有这样一本视野广阔的专著的问世。本书的思路和轮廓源自我早在 2000 年开设和讲授的研究生课程——轻量化汽车的设计制造，但如果没有 Woodhead 出版有限公司的 Rob Sitton 在两年前给我发的那封 E-mail，问我是否愿意将有关轻量化汽车材料的资料整理出版，本书就不可能付梓。我非常感谢 Rob Sitton 和 Woodhead 出版有限公司为本书的出版而付出努力的所有编辑们。最后，我还要感谢我的妻子 Sunanda 在我撰写本书期间给我的支持和帮助。

P. K. 迈利克

密歇根大学迪尔本分校 轻量化汽车材料和加工中心

# 目 录

译者的话  
前言

## 第 1 部分 轻量化汽车结构件材料

第 1 章 概述	2
1.1 引言	2
1.2 汽车材料	4
1.2.1 钢	5
1.2.2 铝合金	8
1.2.3 镁合金	11
1.2.4 钛合金	12
1.2.5 不锈钢	13
1.2.6 铸铁	14
1.2.7 复合材料	15
1.2.8 玻璃材料	18
1.3 轻量化汽车的材料选择	19
1.3.1 车身结构	19
1.3.2 车身板件	23
1.4 结论	24
1.5 参考文献	25
第 2 章 用于制造轻量化汽车结构件的先进钢材	27
2.1 汽车用钢材的历史	27
2.2 高强度钢的类型	29
2.2.1 无间隙原子钢和烘烤硬化钢	29
2.2.2 双相钢	32
2.2.3 先进高强度钢——多相钢	35
2.2.4 冷轧马氏体钢和热处理硼钢	36
2.2.5 相变诱导塑性钢	37
2.2.6 复相钢	39
2.2.7 第二代先进高强度钢——孪晶诱导塑性(TWIP)钢	39

2.2.8 小结	40
2.3 第三代先进高强度钢	41
2.4 高强度钢的加工与成形	42
2.4.1 高强度钢成形	42
2.4.2 高强度钢的连接	48
2.5 轻量化汽车钢结构件的设计	52
2.6 结论	58
2.7 参考文献	59
<b>第3章 用于制造轻量化汽车结构件的铝合金</b>	<b>61</b>
3.1 引言	61
3.2 铝合金的国际命名系统	64
3.3 铝合金回火的国际命名系统	65
3.4 轻量化汽车所用的铝合金	66
3.4.1 轻量化汽车所用的铸造铝合金	69
3.4.2 轻量化汽车所用的铝合金板件	72
3.4.3 轻量化汽车所用的铝合金挤压件	78
3.5 用铝合金替代竞争性材料	85
3.5.1 汽车用铝合金和钢的总体比较	85
3.5.2 汽车用铝合金和玻璃纤维增强塑料的总体比较	86
3.6 参考文献	87
<b>第4章 用于制造轻量化动力传动装置和汽车结构件的镁合金</b>	<b>91</b>
4.1 引言	91
4.1.1 镁的提炼和消耗	91
4.1.2 镁合金及其性能和工艺概述	92
4.1.3 镁合金在汽车上的应用	96
4.2 铸镁	99
4.2.1 铸镁合金的命名和合金家族	99
4.2.2 镁的铸造原理	103
4.2.3 镁的铸造工艺	105
4.2.4 铸镁在汽车上的应用	112
4.3 镁板	117
4.3.1 镁板的合金家族、命名和性能	117
4.3.2 镁板成形工艺	119
4.3.3 使用镁板的成形工艺	120
4.3.4 镁板在汽车上的应用	123

---

4.4 挤压镁 .....	128
4.4.1 挤压镁的合金和性能 .....	128
4.4.2 挤压工艺 .....	129
4.4.3 镁管弯曲 .....	130
4.4.4 镁的挤压成形 .....	133
4.4.5 镁挤压件在汽车上的应用 .....	136
4.5 未来趋势 .....	136
4.5.1 材料挑战 .....	136
4.5.2 工艺挑战 .....	137
4.5.3 性能挑战 .....	138
4.6 致谢 .....	140
4.7 参考文献 .....	140
<b>第5章 用于制造轻量化汽车的热塑性塑料与热塑性复合材料 .....</b>	<b>145</b>
5.1 引言 .....	145
5.2 车用热塑性塑料 .....	146
5.2.1 一般特性 .....	146
5.2.2 热塑性聚合物的设计考虑 .....	150
5.2.3 热塑性聚合物的注射成型 .....	152
5.3 车用热塑性复合材料 .....	154
5.3.1 一般特性 .....	154
5.3.2 短纤维热塑性塑料 .....	155
5.3.3 长纤维热塑性塑料 .....	157
5.3.4 玻璃纤维毡热塑性塑料 .....	158
5.3.5 玻璃纤维织物增强热塑性塑料 .....	161
5.3.6 层压热塑性塑料复合材料 .....	163
5.3.7 天然纤维热塑性塑料 .....	164
5.3.8 自增强热塑性塑料 .....	166
5.3.9 热塑性纳米复合材料 .....	167
5.4 热塑性复合材料的连接 .....	168
5.5 结论 .....	170
5.6 参考文献 .....	171
<b>第6章 用于制造轻量化汽车结构件的热固性复合材料 .....</b>	<b>173</b>
6.1 引言 .....	173
6.2 材料 .....	174
6.2.1 材料选择应考虑的问题 .....	174

6.2.2	纤维	177
6.2.3	纤维结构	178
6.2.4	干纤维预成型件	180
6.2.5	热固性聚合物	181
6.3	加工工艺	182
6.3.1	压缩成型	183
6.3.2	树脂传递成型	185
6.3.3	结构反应注射成型	187
6.3.4	纤维缠绕	188
6.3.5	真空袋压成型	189
6.4	碳纤维增强热固性复合材料	190
6.5	结论	192
6.6	参考文献	192

## 第2部分 轻量化汽车结构设计与制造

第7章	轻合金加工工艺	194
7.1	轻合金的选择	194
7.2	有价值的材料	194
7.2.1	铝	194
7.2.2	镁	198
7.3	车辆结构设计与制造	200
7.3.1	锻造材料	200
7.3.2	车辆结构的设计与制造	200
7.3.3	轻量化材料设计问题	201
7.3.4	制造难题	202
7.3.5	影响金属产品制造成本的因素	202
7.4	结构件的成形	205
7.4.1	金属板成形工艺	207
7.4.2	散料金属成形工艺	212
7.5	铸造结构件	214
7.5.1	优点与局限性	214
7.5.2	设计要素	215
7.5.3	将铸造作为一种首选工艺	215
7.6	铸造工艺	215
7.6.1	铸型分类	215



7.6.2 可选择的一次铸型铸造工艺 .....	216
7.6.3 可选择的永久铸型铸造工艺 .....	217
7.7 轻合金应用的必备条件 .....	221
7.8 有希望用于汽车的金属成形工艺 .....	222
7.8.1 热模成形 .....	222
7.8.2 管材液压成形 .....	223
7.8.3 电磁成形 .....	224
7.9 参考文献 .....	224
<b>第8章 用于轻量化汽车的连接技术</b> .....	<b>226</b>
8.1 引言 .....	226
8.2 液相焊接 .....	227
8.2.1 电阻点焊 .....	227
8.2.2 电弧焊 .....	231
8.2.3 激光焊接 .....	233
8.3 固相焊接 .....	234
8.3.1 搅拌摩擦焊 .....	235
8.3.2 搅拌摩擦点焊 .....	238
8.4 机械连接 .....	240
8.4.1 自穿孔铆接 .....	240
8.4.2 冲铆 .....	243
8.5 粘接 .....	244
8.5.1 粘合剂粘接 .....	244
8.5.2 焊接粘接与铆钉粘接 .....	245
8.6 聚合物基复合材料的连接 .....	246
8.7 结论 .....	249
8.8 致谢 .....	249
8.9 参考文献 .....	250
<b>第9章 轻量化汽车的回收与生命周期问题</b> .....	<b>252</b>
9.1 引言 .....	252
9.2 生命周期分析 .....	253
9.3 回收 .....	255
9.4 回收对生命周期分析的重要性 .....	258
9.5 轻质材料回收的趋势与问题 .....	261
9.5.1 铝 .....	261
9.5.2 镁 .....	264

---

9.5.3 聚合物复合材料 .....	266
9.6 结论 .....	268
9.7 参考文献 .....	268
<b>第10章 轻量化汽车的碰撞性能设计问题 .....</b>	<b>271</b>
10.1 引言 .....	271
10.2 车辆碰撞安全性背景 .....	272
10.3 用轻质材料实现的汽车碰撞性能设计 .....	274
10.4 利用计算机辅助工程(CAE)进行碰撞安全性设计 .....	279
10.5 用于制造轻量化汽车车身结构的纤维增强复合材料 .....	286
10.6 各种轻量化对策 .....	289
10.7 结论 .....	290
10.8 参考文献 .....	291

# 第 1 部分

## 轻量化汽车结构件材料

# 第 1 章 概 述

**摘要：**随着对汽车的燃料经济性和排放控制要求的提高，人们将目光集中在通过替代材料、改进设计或者先进的制造工艺找到制造轻量化汽车的方法。现有的材料包括高强度钢，铝和镁等轻质合金，以及各种合成材料。本章将介绍这些材料以及它们目前和未来在汽车上的应用，另外还对轻量化汽车材料的选择提供总的指导原则。

**关键词：**轻量化汽车；钢；轻质合金；合成材料；设计；制造

## 1.1 引言

燃料经济性的改善和排放控制是当今汽车工业面临的两个最重要的挑战。在美国，汽车的平均油耗受政府颁布的 CAFE(汽车制造厂平均油耗)标准约束，CAFE 标准是指某一汽车制造厂销售的轿车或轻型卡车按不同车型销售比例计算的平均油耗(单位为英里/美国加仑,用 mile/gal 表示,1mile/gal = 0.43km/L)。对于轿车, CAFE 标准从 1978 年最初的 18mile/gal 增加到目前的 27.5mile/gal, 并且计划到 2020 年增加到 35mile/gal。在其他国家, 燃油经济性标准通常是由政府或汽车公司直接或间接制定的, 这些标准与美国标准不同, 其中有些标准更为严格, 但所有这些标准都具有相同的双重目的, 即改善燃料经济性以及减少环境污染和产生温室效应的主要因素 CO<sub>2</sub>。

汽车燃料经济性通过特定的驾驶循环[美国为 EPA(美国环境保护署)驾驶循环]进行测量。汽车燃料经济性受许多因素影响, 包括车辆动力需求、车速、发动机和变速器效率以及燃料类型等。车辆动力需求是车辆加速、爬坡以及克服轮胎与路面之间的滚动阻力、空气阻力和驱动, 如空调、暖风、音响娱乐等附属装置所需动力的总和。以上动力需求的前三项与汽车的重量成正比, 因此减轻汽车重量可以明显降低车辆的动力需求, 因而可以改善汽车的燃料经济性。空气阻力、滚动阻力系数以及附属装置/储备功率需求对燃料经济性的影响要小得多。研究表明, 汽车重量每减少 10%, 就可以节油 5% ~ 8% (Brooke and Evans, 2009)。在温室效应方面, 汽车重量每减轻 100kg, 可以减少 CO<sub>2</sub>排放 12.5g/km。

减轻汽车重量除了节油这一主要好处以外, 还有其他一些好处。例如, 当汽车的重量减轻时, 加速和制动所需要的动力也减少, 因此可以将发动机、变速器和制动系统设计得更小一些。从车辆动力学的角度看, 汽车重量的减轻不会影响

车辆的稳定性和操纵性；但从另一方面看，减轻某些部件的重量可以调节汽车轴间负荷分配以及降低汽车质心，这两方面都可以改善汽车的操纵性。汽车重量的减轻会对汽车的两种性能产生负面影响，就是乘坐舒适性和安全性。然而它们也受汽车设计和材料选择的影响。

从历史上看，汽车轻量化始于20世纪70年代的美国，当时汽车制造厂开始减小他们的汽车尺寸；以满足1978年CAFE的18mile/gal (Brooke and Evans, 2009)的油耗要求。减小汽车尺寸主要通过减小轴距以及通过将非承载式车身改成承载式车身结构(见1.3.1小节)。减轻汽车重量的其他措施包括搭载更小的发动机(用4缸发动机替代6缸或8缸发动机)，用前轮驱动变速器替代后轮驱动变速器等。由于这些设计上的改进，美国轿车的平均重量从1976年的1839kg减少到1986年的1385kg。然而，如表1-1所示，自20世纪90年代开始，汽车的平均重量又开始增加，这主要是由于增加了一些新设备的原因，例如安全装置、排放控制装置以及音响娱乐设施等。在美国市场上，尺寸较大的汽车，如运动型多用途车(SUV)和皮卡比轿车更流行，这也是汽车平均重量增加的原因。从2007年开始，美国的汽油价格上涨，SUV的销量开始下降。因此，汽车制造厂开始生产跨界车(crossover vehicle)，它比尺寸较大的SUV小，但比中等尺寸的轿车大，这导致了汽车平均重量开始出现下降的趋势。人们希望能够继续减轻汽车重量，并期待在未来汽车的轻量化方面发挥更加重要的作用。

表 1-1 美国轿车的平均重量

年 份	汽车重量	
	kg	lb
1976	1839	4059
1986	1385	3057
1996	1600	3532
1999	1683	3716
2002	1742	3846
2004	1820	4018
2007	1775	3918
2009 <sup>①</sup>	1701	3755
2015 <sup>①</sup>	1631	3600

注：来源：Brooke and Evans, 2009。

① 预计。

随着燃料价格的上涨，石油储量的不确定性以及汽车排放对环境和公众健康的危害，改善汽车的燃料经济性已经成为全世界汽车制造厂的头等大事。汽车轻

量化被认为是改善汽车燃料经济性最关键的因素之一，而减小汽车尺寸仍然是汽车轻量化重要措施，至少在近阶段，将会有不同尺寸的汽车满足消费者的需求。另外一种措施是通过替代材料、部件强化以及优化设计，减轻部件重量。本章将概括介绍制造轻量化部件的材料，对这些材料的详细介绍将在本书的其他章节进行。

## 1.2 汽车材料

低碳钢和铸铁是 20 世纪 70 年代以前汽车工业的重负荷机器材料。如表 1-2 所示，现在的汽车主要使用低碳钢和高强度钢，尽管部分低碳钢被替代，但直至今天，钢比其他任何材料用得都多。然而，随着对汽车轻量化要求的提高，材料方案迅速转变，包括了铝合金、镁合金以及聚合物基复合材料 (Powers, 2000)。表 1-3 列出了几种未来可能代替钢的材料的力学性能，它们都比钢轻，并且其中的许多材料可以为部件强化提供条件，但目前它们在价格上与钢相比没有竞争优势，特别是在大量生产时更是如此。不过，它们的使用寿命和轻量化方面的优势使其在许多概念车中得以应用，现在它们被越来越多地在量产汽车中使用。

表 1-2 典型汽车的材料构成

材 料	占汽车重量的百分比	主要应用部位
钢	55	车身结构、车身板件、发动机和变速器部件、悬架部件、传动系统部件
铸铁	9	发动机部件、制动、悬架
铝	8.5	发动机缸体、车轮
铜	1.5	导线、电器部件
聚合物(塑料)和树脂基复合材料	9	内饰件、电器和电子部件、发动机罩下部件、油管
人造橡胶	4	轮胎、装饰、密封件
玻璃	3	玻璃窗
其他	10	地毯、液体、润滑材料等

表 1-3 力学性能比较

材 料	密度 ( $\rho$ ) /( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	拉伸弹性模量 ( $E$ )/GPa	屈服强度 ( $S_y$ )/MPa	抗拉强度 ( $S_t$ ) MPa	线胀系数/ ( $10^{-6}/\text{C}$ )
DQ 低碳钢	7.87	207	186	317	11
DP 400/700 钢	7.87	207	400	700	11

(续)

材 料	密度 ( $\rho$ ) /( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	拉伸弹性模量 ( $E$ )/GPa	屈服强度 ( $S_y$ )/MPa	抗拉强度 ( $S_t$ )/ MPa	线胀系数/ ( $10^{-6}/\text{C}$ )
TRIP 450/800 钢	7.87	207	450	800	11
5182-H24 铝	2.7	70	235	310	23
6111-T62 铝	2.7	70	320	360	23
AZ91 镁	1.8	45	160	240	26
Ti-6Al-4V 钛	4.43	114	827	896	9
304 不锈钢	7.9	200	241	614	17
Nitronic 30 不锈钢	7.86	193	393	862	16
高强度 CFRE(碳纤维增强 环氧树脂)(单向)	1.55	138	—	1550	—
高拉伸弹性模量 CFRE(碳纤维 增强环氧树脂)(单向)	1.63	215	—	1240	-0.9(L) 27(T)
CFRE(玻璃纤维增强环氧 树脂)(单向)	1.85	39	—	965	6(L) 19(T)
CFRE(准各向同性)	1.55	45.5	—	579	0.9
玻璃钢(SNC-R50)	1.87	16	—	164	14.8

注: L 是纵向, T 是横向; CFRE 是碳纤维增强环氧树脂; GFRE 是玻璃纤维增强环氧树脂。

部件轻量化最有优势的部位是车身和底盘, 它们占汽车总重量的 60%。最近 20 年, 许多新材料、新工艺的应用使车身结构件、车身板件以及悬架部件的重量减轻。包括发动机和变速器的动力传动系统的重量占汽车总重量的 25%~30%, 几种新材料和加工工艺的应用也使动力传动系统的重量减轻。本节将介绍的新材料和新工艺, 都可以使汽车轻量化, 以改善其燃料经济性。这些新材料和新工艺有些已经应用, 有些具有将来应用的潜力。

### 1.2.1 钢

美国典型小型乘用车重量的约 55% 是钢材。钢应用于汽车的最大优点如下:

- 1) 低成本和高拉伸弹性模量(207GPa, 这比其他任何结构材料都高)。
- 2) 通过不同的方法可以得到宽范围的强度和塑性, 这些方法有合金炼制、加工硬化(适用于低碳钢和中碳钢)和热处理(适用于中碳钢、高碳钢和合金钢)。
- 3) 低碳钢和许多新型高强度钢具有优异的成形性能, 例如高强度低合金(HSLA)钢和双相(DP)钢, 非常适合于冲压和辊轧成形。

最近 25 年以来, 汽车的钢材料发生了巨大变化, 这主要是由于来自诸如铝合金和塑料等轻质材料的挑战。新的炼钢工艺(例如真空抽气法)可以降低生产成本, 减少钢中的杂质(仅为  $10 \sim 20 \times 10^{-6}$ , 传统方法为  $200 \sim 400 \times 10^{-6}$ )。新的不同合金技术的结合以及连续退火等热处理工艺的改进, 现在已经应用于钢板的制造, 这不仅可以得到较高的强度和塑性, 而且可以获得良好的表面质量以及稳定的性能。新型锌合金覆层(例如锌-铁和锌-镍)以及将覆层附着在钢表面上的新方法(例如用电镀法代替热浸法)的应用, 提高了材料的抗蚀性。一种被称为锌镀层退火处理的新工艺, 能够使镀锌钢板产生更好的抗蚀性以及可成形性和可焊接性。具有钢外表皮和粘弹性阻尼层(通常为 0.025mm 厚)的夹层复合钢板可用于降低噪声和减小振动(Yang *et al.*, 2001)。

用于车身板件和车身结构件的钢板正逐渐由传统的冲压用铝镇静钢(DQAK)转变为高强度钢。以前高强度钢成形性差的问题已经通过脱氧、微合金化以及杂质控制得到很好解决。目前可得到的高强度钢具有从 210 ~ 1250MPa 宽广范围的屈服强度(见表 1-4), 其中有一种烘烤硬化(BH)钢在烤漆过程中由于应变时效而使其屈服强度提高。屈服强度的提高取决于烤漆之前的冲压工艺使其应力的增大。另一种高强度钢是高强度低合金(HSLA)钢, 由于具有少量(质量分数在 0.005% 以内)的碳化物和氮化物构成合金元素, 如钒、铌、钛等, 因此具有 300 ~ 350MPa 的高屈服强度。HSLA 钢中的碳的质量分数被控制在 0.13% 以内, 以确保其具有良好的成形性能和焊接性能。另一种更高水平的高强度钢被称为先进高强度钢(AHSS), 它是一种双相钢, 包含分布在软铁素体基体中的马氏体, 而相变诱导塑性钢(TRIP)包含除马氏体以外的残余奥氏体以及分布在软铁素体基体中的贝氏体。DP 钢和 TRIP 钢在冲压过程中由于加工硬化而具有高强度, 另外它们还有在冲压以后通过烤漆使强度进一步获得提高的机会。还有一种新型的高强度钢被称为超高强度钢(UHSS), 其强度达到 1000MPa 以上。尽管 AHSS 和 UHSS 的塑性和可成形性比普通低碳钢或传统高强度钢低很多, 但它们具有很高的抗压强度, 因而越来越多地被用于汽车前端的结构件。

表 1-4 几种用于车身的钢的性能

材 料	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)	应变硬化 指数( <i>n</i> )	塑性应变率 ( $\bar{r}$ )
DQ 钢	186	317	42	0.22	1.5
BH210/340	210	340	34 ~ 39	0.18	1.8
IF300/420	300	420	29 ~ 36	0.20	1.6
HSLA350/450	350	450	23 ~ 27	0.14	1.1
DP300/500	300	500	30 ~ 34	0.16	1.0



(续)

材 料	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 (%)	应变硬化 指数( $n$ )	塑性应变率 ( $\bar{\epsilon}$ )
DP400/700	400	700	19~25	0.14	1.0
DP700/1000	700	1000	12~17	0.09	0.9
TRIP450/800	450	800	26~32	0.24	0.9
Mart950/1200	950	1200	5~7	0.07	0.9

钢部件的制造工艺也取得了许多新的进展, 拼接就是其中的一个例子, 这种新工艺在十年或者二十年以前还没有出现。所谓拼接就是将不同厚度和(或)不同等级的钢材料组合成同一个部件, 而不是用相同厚度或相同的钢材料制作某一部件。拼接可以提高材料的利用率, 并且可以通过省去加强肋或加强板而减轻重量。例如制作轻型货车的车门内板, 如果将两块不同厚度的剪裁板件用激光焊接而成, 前面一块厚 1.8mm, 后面一块厚 0.9mm, 这种方案要比采用一块 0.75mm 厚的钢板外加提高刚度的加强肋的方案重量减轻 7%。拼接不仅可以省去加强肋, 而且可以节省加工和组装成本。

用钢制造车身板件和车身结构件有许多优点, 最主要的优点是其 207GPa 的高弹性模量, 这是在被认为可用作汽车结构材料中弹性模量最高的。钢的广泛的强度范围也是其优点之一, 因为根据结构需要可以得到最优的选择。AHSS 和 UHSS 的优良性能使得它们用作汽车材料时不仅可以降低厚度, 而且可以改善汽车结构的承载能力以及防撞性能。此外, 钢的塑性优于铝合金和镁合金, 良好的可焊接性以及可重复利用性都是现代汽车使用钢材料的原因。超轻钢车身(UL-SAB)项目是 20 世纪 90 年代在美国钢铁协会的指导下进行的项目, 该项目证明通过使用高强度钢以及先进高强度钢, 采用新的制造工艺, 如拼焊技术、管件液压成形和激光焊接以及计算机辅助工程工具(AISI, 1998)等, 可以减轻汽车结构的重量, 这对于汽车轻量化意义重大。由于钢板厚度减小, 部件坚固, 设计优化, 超轻钢车身与最重的同级别参考车相比, 重量可以减轻 36%。

对用于动力传动系统、悬架和转向部件的锻钢的性能改进也取得了明显成果(Yamagata, 2005; Cho *et al.*, 1994), 成果之一是碳质量分数为 0.3%~0.6% 的微合金钢。微合金元素通常是微量(质量分数为 0.05%~0.15%) 的钒, 它能够在热锻造之后的空气冷却过程中在锻件内形成碳化钒和氮化钒沉淀物。空气冷却以后不需要回火, 因为沉淀物在相对较软的铁素体和珠光体基体可以提高钢的强度。微合金钢既具有较高的强度, 又具有良好的韧性, 通过合理控制微合金钢中的微量元素以及锻造条件, 可以获得更细微的晶粒结构, 从而进一步改进其机械强度。微合金钢的屈服强度和伸长率比碳质量分数相同的普通可锻钢高, 另外微