

轿车车身高强度钢应用进展

张志勤 何立波 高真凤 黄宝 黄维 邢娜
(鞍钢股份有限公司技术中心, 鞍山 114009)

摘要 目前轿车设计车身减重方案中高强度钢的应用明显增加, 车身减重达 20% 以上, 但仍低于铝或铝镁合金车身减重 40% 的指标。未来钢制车身的设计理念将通过开发的第 3 代高强度钢和新的车身零部件加工及成型设计, 达到车身减重 35% 的目标。文中介绍高强度钢的特点, 车身减重设计方案及材料选择, 高强度钢的钢种成分、性能、应用进展和展望。

关键词 高强度钢 轿车车身 应用进展

Progress on Application of High Strength Steel in Car Body

Zhang Zhiqin, He Libo, Gao Zhenfeng, Huang Bao, Huang Wei and Xing Na
(Technology Center, Angang Steel Co Ltd, Anshan 114009)

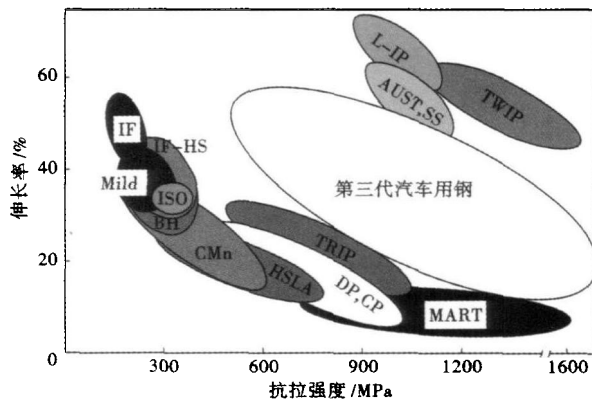
Abstract At present the application of high strength steel increases obviously in body mass reduction solution scheme of car design to decrease the body mass by more than 20%, but is still lower than the index where using aluminium or aluminium-magnesium alloy to decrease the body mass by 40%. The future design idea for steel car body is the goal to decrease the body mass by 35% in the way of development of third generation high strength steels, new body parts manufacturing process and forming design. The characteristics of high strength steels, the body mass reduction solution scheme and selection of materials, and the grades, chemical composition, properties, application progress and forecast of high strength steels are presented in this paper.

Material Index High Strength Steel, Car Body, Progress of Application

目前, 采用现代高强钢和先进高强钢的汽车减重约 25%, 采用铝的汽车减重近 50%, 采用铝及镁合金混合材料的汽车减重约 40%。由美国钢铁协会、国际钢铁协会(现为世界钢铁协会)、汽车生产商和一些钢铁公司共同研究和设计的车身方案, 都大量采用高强和超高强钢, 显著减轻了车身质量, 降低了制造成本, 为高强钢在与铝及镁合金等非钢铁材料的竞争中提供了良好的解决方案。此外, 在汽车制造中, 高强钢在温室气体排放和性价比方面与铝及镁合金等相比, 仍具有一定的综合优势。

1 高强钢的材料特点

图 1 为当代汽车用高强钢品种发展现状示意图。传统的高强度钢, 如 HSLA、BH 组织都是以铁素体为基。第 1 代先进高强度钢, 包括 DP、CP、TRIP、马氏体钢、贝氏体钢都可以看作是以铁素体为基的高强度钢。而第 2 代先进高强度钢, 如 TWIP、L-IP、奥氏体不锈钢等在常温下都是奥氏体单相组织, 可以看作是奥氏体为基的先进高强度钢^[1]。对于正在开发的下一代汽车钢- 第 3 代先进高强度钢, 基本开发思想是一种新的多相组织钢, 充分利用晶粒细化、固溶强化、析出强化及位错强化等



注: IF- 无间隙原子钢; IF-HS- 高强 IF 钢; ISO- 各向同性钢; BH- 烘烤硬化钢; Mild- 低碳钢; CMn- 碳锰钢; HSLA- 高强度低合金钢; TRIP- 相变诱发塑性钢; DP- 双相钢; CP- 复合相钢; MART- 马氏体钢; L-IP- 具有诱发塑性的轻质钢; AUST. SS- 奥氏体不锈钢; TWIP- 孪晶诱发塑性钢。

图 1 当代汽车用高强钢品种发展现状示意图
Fig. 1 Development status of steel grades for modern car

手段来提高其强度, 通过应变诱导塑性、剪切带诱导塑性和孪晶诱导塑性等机制来提高塑性及成型性能, 从而获得更高强度和伸长率的新钢种。同时, 也通过不断开发新的工艺来研制第 3 代高强钢, 如开发出的淬火-碳分配(Q&P)工艺生产淬火-碳分配钢(Q&P 钢)等。

2 车身减重设计方案及材料的选择

1993 年 9 月到 2000 年,美国三大汽车公司的 PNGV(新一代汽车伙伴计划)概念车和日本德国概念车均已基本达到减重 40% 的目标,但主要是采用铝和铝镁合金作为车身材料。表 1 为近年来国际上的主要汽车轻量化项目概况。

由于世界汽车行业接受了由超轻钢制车身项目产生的大量理念,此后的汽车生产中采用了轻量化项目中使用的传统高强钢及先进高强钢、拼焊板和拼焊管、液压成形管和液压成形板等大量用于车身设计,显著降低了质量。表 2 为近年来钢制概念车身减重设计方案^[2]。

从图 2 可以看出,与传统钢制车身相比,采用新型钢制车身可以降低成本和进一步减重;采用液压成形等新技术的钢铁材料,也可以达到降低成本和进一步减重的效果;采用铝制车身,虽然减重效果很好,但其成本代价太高^[3]。

2.1 系列钢制车身减重设计方案及材料的选择

以宝马公司的钢制车身减重设计方案为例,由于采用新 3 系列的尺寸,为满足用户需求,其尺寸已经增大,导致其车身质量增至 284 kg。但是,由于用户对功能性的需求,抗冲撞性能和刚度的要求也提高了。为了达到这一要求,修改了设计,增加了 24% 的高强度钢(没有采用多相钢)的用量,从而导致车身质量达到 296 kg,较单独满足尺寸要求的以

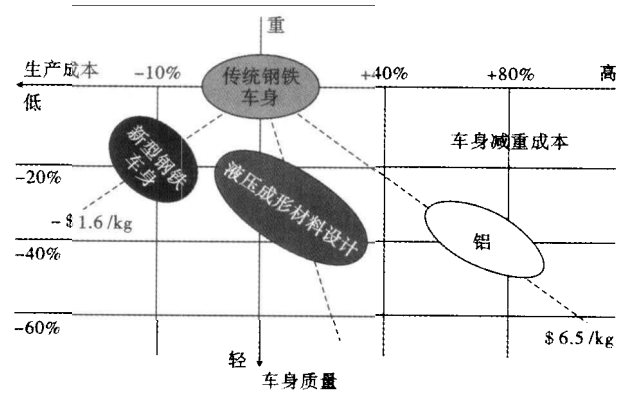


图 2 不同车身设计理念对车身质量和成本的综合影响
Fig. 2 Comprehensive effect of different body design concept on body mass and cost

前宝马 3 系列车身增加了 12 kg。而对于采用多相钢达到总重量 26% 的新 3 系列,车身质量减少到 267 kg,减重 29 kg,这说明多相钢在车身轻量化设计中的潜力很大^[4]。

2.2 概念车钢制车身减重设计方案及材料的选择

2.2.1 ULSAB 与 ULSAB-AVC 车身减重设计方案及材料的选择

ULSAB 研究项目始于 1994 年美国钢铁协会的倡议,由世界钢铁协会成立了由 18 个国家 35 家钢铁公司参加“超轻钢制车身”(ULSAB)项目组,通过以车身轻量化为目标,车身至少减重 25% 以上,而且不再需要增加补强部件,可以大幅减少制造成本,因此会给汽车制造业带来革命性的改变。

之后开展的 ULSAB-AVC 项目(表 3)则通过车辆的整体设计来获得钢板轻量化的潜能,应用了约 80% 的先进高强钢(AHSS),采用的马氏体钢最高抗拉强度达 1 520 MPa,几乎 100% 部件都应用了高强钢。在加工方面,20% 以上部件采用了液压成形技术。同时,在安全和环保方面也设定了较高的目标^[5]。

C 级车最佳车身结构的质量为 201.8 kg,与参照基准车身相比减重 24.7%。PNGV 级车的车身质量为 218.1 kg,实现减重达 24.3%。

2.2.2 NSB 车身减重设计方案及材料的选择

NSB 新型钢制车身是蒂森克虏伯公司于 2003 年开发的。该项目采用新的设计理念、材料和制造技术,使白车身减重 77 kg,减重幅度

表 1 近年来国际上的主要汽车轻量化项目

Table 1 Main body mass reduction objects in world in recent years

序号	项目名称	减重目标/%	技术路线	组织方
1	PNGV(新一代汽车伙伴计划)	30	多材料	美国政府
2	Light-Car(轻型汽车)	40	多材料	欧洲钢铁协会
3	AL(铝制汽车)	40	铝	国际铝协会
5	ULSAB(超轻钢制车身)	20	钢	国际钢铁协会
6	ULSAB-AVC(超轻钢制车身-先进概念车)	20	钢	国际钢铁协会
7	ABC(安赛乐米塔尔钢制概念车身)	30	钢	安赛乐米塔尔
8	NSB(蒂森克虏伯新型钢制车身)	20	钢	蒂森克虏伯
9	FSV(未来钢制汽车)	35	钢	世界钢铁协会

表 2 近年来钢制概念车身减重设计方案

Table 2 Body mass reduction plans for steel body concept car in recent years

概念名称	年	车等级	参照车型	参照车型车身质量/kg	新方案车身质量/kg	概念车减重率/%
ULSAB	1997	中级以上	Ford Taurus '94	271	203	25
ULSAB-AVC	2004	紧凑型	C 级车	268	202	24.7
ULSAB-AVC	2004	PNGV	PNGV 级车	288	218	24.3
NSB	2003	紧凑型	Opel Zafira '99	317	240	24.3
ABC	2004	紧凑型和中级	C/D 级车	197*	155*	21*

注:* :此处数据为 ABC 设计方案,其车身框架的 63% 采用了三明治夹层板、先进高强钢和拼焊板,而没对参照车型设计做明显改动的数据,其它 37% 的车身仍在研究之中。

表3 ULSAB-AVC 概念车采用的典型钢的牌号示例
Table 3 Examples of typical steel grades properties for ULSAB-AVC concept car

单位	内容	C 级车	PNGV 级车
质量/kg	参照车基准平均值	243	263
	ULSAB-AVC 车身结构	202	218
零部件 用量/件	冲压件	65	65
	拼焊冲压件	11	11
	钢板液压成形件	1	1
	钢管液压成形件	2	2
	拼焊钢管液压成形	2	2
	车身结构件总数	81	81
采用钢的种类 及其质量 比例/%	DP(双相钢)	74	74
	TRIP(相变诱发塑性钢)	4	2
	MS(马氏体钢)	4	4
	CP(复相钢)	1	1
	BH(烘烤硬化钢)	12	10
	HS-IF(高强无间隙原子钢)	3	4
	HSLA(高强低合金钢)	1	1
其它	2	4	
生产工艺生产 的零部件及其 质量比例/%	冲压	40	39
	拼焊冲压	38	39
	钢板液压成形冲压	5	4
	液压成形钢管	8	6
	拼焊液压成形钢管	7	8
	直缝焊管	1	1
	其它	2	2

为24%,车身的刚度和安全性能完全满足法规要求,而生产成本仅增加2%。NSB 白车身材料使用了大量的双相钢、多相钢等高强度钢,屈服强度在120~220 MPa 的深冲软钢仅占16%^[6]。

同时,在 NSB[®]的制造中还引入了许多新技术。车身构成有46%为封闭截面的高强度钢薄壁异形钢管,由于没有折边或凸缘,仅此一项可使零件减重14%。主要构件采用液压成形和辊压成形工艺加工,其中液压成形管件截面构件有前后侧梁和车顶纵梁,加上B柱、C柱和D柱等其他零件,液压成形零件所占比例达到24%(按质量计算);采用辊压成形零件的比例为20%。

随后,蒂森克虏伯又推出了与用户共同开展的InCar 汽车结构减重项目,包括为车身、底盘和传动系统设计的33个创新性解决方案。

InCar 项目着重研究汽车行业主要需求,如重量、成本、功能和CO₂ 排放。蒂森克虏伯 InCar 项目为B柱设计的减重方案中,与采用DP-W[®] 600 的基准方案相比较,选用热成形钢方案,可以实现减重17%,同时成本较低;而采用回火处理的拼焊板MBW[®] 1900 方案,可减重26%,但成本较高^[7]。

汽车驾驶舱前座和后座之间的防冲撞B柱要求不同的区域具有不同的强度和延展性,既能够充分防止冲击变形又能有效吸收能量。针对这一技术

难题,蒂森克虏伯曾开发出激光拼焊技术将不同性能的钢板焊接成一体再进行冲压,但生产成本相对较高。蒂森克虏伯公司最近又开发出热成形分区回火控制技术,即在冲压过程及冲压结束后对冲压模具的特定区域进行精确的温度控制,将模具特定区域加热到高于马氏体化的温度,降低冷却速度,使该区域获得较低的强度(600 MPa)和较高的伸长率(17%)。同时,不需要特殊处理的部件区域仍采用传统的热处理工艺,使钢板形成超高强度(1500 MPa)的马氏体组织。

2.2.3 ABC 车身减重设计方案及材料的选择

原安赛乐公司(现为安赛乐米塔尔公司)在研发和生产汽车钢板时采用用户先期介入战略,与汽车厂(战略合作伙伴)共同立项,进行新车身和钢种设计。为满足汽车的减重节能需要,该公司在其设计的ABC 概念车身上大量采用了先进高强度钢(AHSS),整个车身减重达20%^[8]。

传统的低碳钢在零部件中所占的比例很小,而主要以高强和超高强度钢为主。新车身设计采用了复层板和拼焊板,马氏体钢(Usibor1500)经热处理后抗拉强度达1500 MPa,奥氏体铁素体马氏体FeMn1000(TWIP1000)钢和铁素体马氏体双相钢(DP1200)都在ABC 概念车身上得到了应用。

2.3 未来钢制车身设计方案及材料的发展方向

各国政府对于汽车的CO₂ 排放制定了更加严格的规定,而传统的以燃油为动力驱动的汽车无法满足要求。因此,混合动力汽车、燃料电池汽车、锂电池汽车成为发展的必然趋势。而在目前的几款新型动力系统汽车中,如Honda Clarity FCX, Mercedes E cell Plus, Mercedes Fcell,汽车制造商大多选用铝作为车身的主要材料。在欧洲开发的超轻车计划中,铝的使用量达到53%,钢铁用量为36%。

为了同其它材料竞争,保持钢铁在汽车材料中所占的份额,世界汽车用钢联盟启动FSV(未来钢制汽车)项目^[9]。其采用了一些先进高强钢和激光拼焊件、激光拼焊卷、激光焊接钢管、多壁厚钢管、液压成型等先进的加工技术,具体选用钢种见表4。FSV项目可以在成本不明显增加的条件下,以钢铁为主要原料,在未来20年中满足新的动力系统条件下汽车制造商的要求。FSV项目主要分为3个阶段:(1)工程研究(2008年至2009年7月);(2)概念车设计(2009年8月至2010年);(3)对硬件进行论证(2010年至2011年)。目前正在进行的概念车设计即将完成,其中,FSV-1是一个4门掀背式BEV(电

表 4 FSV 一期项目可选用的典型钢种牌号与性能及参加 FSV 一期项目部分公司典型钢种牌号的组织、工艺状态和化学成分
Table 4 Available typical steel grades and their properties for FSV project (the 1st phase) and microstructure, process conditions and chemical composition of the typical steel grades of part steel companies for FSV project

序号	牌号	参加 FSV 一期项目部分公司典型钢种牌号的组织、工艺状态及化学成分								FSV 一期项目可选用的钢种牌号的性能				
		组织	工艺状态	化学成分(最大值)/%					厚度/mm	屈服强度 (YS)/MPa	抗拉强度 (TS)/MPa	总伸长率/%	n 值 (典型值)	
				C	Si	Mn	P	S	其它					
1	低碳 270	F	冷轧	0.08	0.20	0.50	0.015	0.008		0.6 ~ 2.3	140	270	38 ~ 44	0.23
2	BH300	F	冷轧	0.10	0.50	0.70								
3	BH340									0.64 ~ 2.79	210	340	35 ~ 41	0.19
4	IF300	F	冷轧	0.01	0.50	1.00								
5	IF410									0.6 ~ 2.3	260	410	34 ~ 48	0.20
6	DP500	F + M	冷轧	0.14	0.60	0.60	0.035	0.030	Als ≥ 0.020, 可添加 Cr、Mo、B	0.5 ~ 2.5	300	500	30 ~ 34	0.16
7	DP700	F + M	冷轧	0.12	0.30	1.60	0.015	0.010	添加 Cr 或 Mo	1.27 ~ 3.2	400	700	19 ~ 25	0.14
8	TRIP700	F + B + A	冷轧	0.18	1.50	1.60	0.015	0.010		1.0 ~ 1.6	400	700	24 ~ 28	
9	HSLA500	F + P	热轧	0.09	0.03	1.5				0.76 ~ 3.2	420	500	22 ~ 26	
10	CP800	F + B + M	热轧	0.10	0.25	2.00				0.8 ~ 1.6	500	800	10 ~ 14	
		F + B + M	冷轧	0.17	0.60	2.20								
11	CP1000	F + B + M	冷轧	0.18	0.60	2.40				0.8 ~ 3.0	800	1 000	8 ~ 13	0.11
12	MS1200	M	热轧	0.15	0.25	1.70				1.5 ~ 3.2	950	1 200	5 ~ 7	0.07
13	CP1200	F + B + M	冷轧	0.16	0.25	1.80			添加 Nb、Ti、Cr、Mo	0.8 ~ 2.3	1 000	1 200	8 ~ 10	
14	HF1500	M	成型后热处理	0.25	0.35	1.40	0.025	0.008	Als ≥ 0.015, 可添加 Ti、B	1.0 ~ 2.5	1 050	1 500	5 ~ 7	
15	MS1520	M		0.22	0.30	1.80			加 B	0.5 ~ 1.5	1 250	1 520	4 ~ 6	0.07

注:(1)F-铁素体;A-奥氏体;M-马氏体;B-贝氏体;P-珠光体。(2)序号 1、6 为鞍钢;序号 2、4、9、10、11、12、14 为安赛乐米塔尔;序号 7、8、13、15 为蒂森克虏伯。

池电动车)和 PHEV₂₀(插电式混合动力电动汽车)。FSV-2 是一个 4 门轿车,其设计采用 2 种动力方案:PHEV₄₀(插电式混合动力电动汽车)和 FCEV(燃料电池电动汽车)方案。表 4 为 FSV 一期项目部分钢种、成分和性能。

3 结束语

迄今为止,各大汽车厂和钢铁公司无论是根据自己的系列车设计的系列车钢制车身减重设计方案,还是概念车钢制车身减重设计方案,高强钢的应

用越来越多,其减重可达 20% 甚至更多,但与铝或铝镁合金材料的车身减重约 40% 相比还有一定差距。未来钢制车身解决方案将通过开发第 3 代先进高强钢和新的车身设计理念,以及新的车身零部件加工与成型技术,达到车身减重 35% 的目标,从而进一步缩小与铝和镁合金的差距。钢铁公司将继续与汽车厂合作,不断开发比铝镁等非钢铁材料性价比更好的钢铁材料及其相关加工技术,增强钢铁材料在汽车上的竞争力。

参考文献

- 1 苏连锋. 汽车用先进高强度钢开发和研究的进展. 钢铁研究, 2009, 37(5): 59
- 2 Communication Module Mass Reduction (Final Report), World Auto Steel-International Iron and Steel Institute, November, 2006; 57, http://www.worldautosteel.org/uploaded/Fka_Report_6rh0098_MassReduction_Nov2006-Final.pdf
- 3 杨雄飞. 现代车身材料. 汽车工艺与材料, 2007(7): 45
- 4 Bruno Lüdke, Markus Pfestorf. 轻型车身的功能设计—如何根据结构要求来确定车身材料//汽车用钕微合金化钢板. 北京:冶金工业出版社, 2006
- 5 ULSAB-AVC, Advance Vehicle Concepts Overview Report, January 2002; 36, http://www.worldautosteel.org/uploaded/ULSAB-AVC_Overview_Rpt.pdf
- 6 Dr. Henrik Adam, Bernhard Osburg, Lothar Patberg, et al. NSB® NewSteelBody-Auto body Weight Reduction with Steel, Thyssenkrupp Techform, 2004(1): 12-13, http://www.thyssenkrupp.com/documents/Publikationen/Techforum/techforum_e_7_2004.pdf
- 7 Incar-The Innovative Solution Kit for the Automotive Industry, ;28, http://www.thyssenkrupp.com/documents/Publikationen/TK_Magazine/in_car_en.pdf
- 8 Arcelor Body Concept; 2-3, http://www.fcs.arcelor.com/repository/Publications%20Auto/Plaque%20ABC%20exe%2001_23.pdf
- 9 Future Steel Vehicle Phase I-Executive Summary, worldautosteel; 30, http://www.worldautosteel.org/uploaded/FSV_Executive_Summary.pdf

张志勤(1964-),男,高级工程师,副所长,1986年本溪大学毕业,轧钢新工艺、新技术及钢铁新产品研究。

收稿日期:2011-06-18