

汽车轻量化用高强度钢现状及其发展趋势

叶平, 沈剑平, 王光耀, 吴剑

(上海汽车集团股份有限公司汽车工程研究院, 上海 200437)

摘要: 汽车轻量化是汽车的主要发展方向之一, 世界各国汽车及钢铁企业纷纷研制开发汽车用新型高强度钢。主要介绍了高强度钢板的特点、分类以及在汽车上的应用, 重点叙述了双相钢和相变诱发塑性钢的现状及其发展趋势。

关键词: 双相钢; 相变诱发塑性钢; 高强度钢; 汽车轻量化

中图分类号: TG142

文献标识码: A

文章编号: 1000-3738(2006)03-0004-04

Current Status and Development of Light-weighting High Strength Steel Used in Automobiles

YE Ping, SHEN Jian-ping, WANG Guang-yao, WU Jian

(Automotive Engineering Academy of Shanghai Automotive Industry Group Co.,
Shanghai 200437, China)

Abstract: Light-weighting is one of the important measures for auto's development, so auto industries and steel companies all over the world have been striving to study new high strength sheet steels used in automobiles. In this paper, the properties, classification and application of high strength steels are described; and special interest is put in the development and application of dual phase steels and transformation-induced plasticity (TRIP) steels.

Key words: dual phase steel; TRIP steel; high strength steel; auto light-weighting

1 引言

近年来, 非金属材料在汽车中的应用比例逐年增加, 但金属材料在汽车中的使用量比例仍过半, 还是汽车制造最主要的材料。目前, 节能环保成为汽车发展的主要趋势之一。为了节约能源、降低燃油消耗、减少废气排放, 国内外汽车厂家采取了一系列措施, 其中最有效的措施之一就是减轻汽车自身质量。有资料表明, 使用高强度钢板, 原厚度为 1.0~1.2 mm 的车身板可减薄至 0.7~0.8 mm, 车身质量减小 15%~20%, 节油 8%~15%^[1]。为此, 世界各国大力开发各种高强度钢板, 如冷轧含磷板、双相钢 (DP 钢) 板以及目前最先进的相变诱发塑性钢 (TRIP) 板等等。

作者主要介绍双相钢、相变诱发塑性钢两类先进高强度钢板的研究应用现状及其发展趋势。

2 双相钢

与常用的低合金高强度钢相比, 在相同强度级别下, DP 钢具有低的屈强比 ($\sigma_{0.2}/\sigma_b$)、较高的伸长率 (均匀伸长率和断裂伸长率) 以及很高的加工硬化率。其高的伸长率是由于在软的纯铁素体基体内分散细小的硬马氏体或贝氏体颗粒所致^[2]。

由图 1 可见, DP 钢在维持高强度的条件下, 其伸长率比一般微合金钢和烘烤硬化钢或含磷钢好, 因此双相钢具有良好的成型加工性能, 避免了常用的普通低碳钢成型过程中存在的形状稳定性 (弹性后效) 低的缺陷, 非常适合制造汽车零部件, 如车身

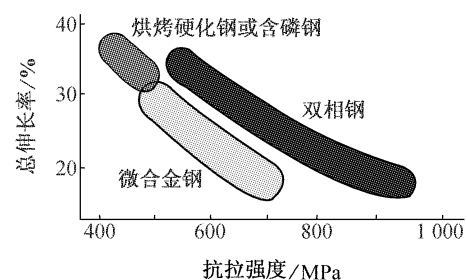


图 1 1 mm 厚冷轧退火高强度薄板钢的力学性能

Fig. 1 Mechanical properties of cold rolled and annealed high strength sheet steel with a thickness of 1 mm

收稿日期: 2004-12-02; 修订日期: 2005-01-28

作者简介: 叶平 (1976—), 男, 浙江嘉善人, 助理工程师, 硕士。

覆盖件以及底盘结构件等。

DP 钢的制造和加工技术在国外已经非常成熟,很多研究者^[3-5]对 DP 钢的焊接性能、疲劳和断裂特性、回火和时效等特性做了较为全面的研究。在 ULSAB-AVC(Ultralight Steel Auto Body—Advanced Vehicle Concept)计划中,DP 钢在其两种概念车车身用材料中位居主要地位,均达 74%^[6]。

通用及福特汽车公司用 DP 钢制造汽车轮盘后,不仅质量降低 14%,而且疲劳寿命比普通钢提高 1 倍;福特汽车公司用 DP 钢制造轿车发动机罩壳,使板厚由原来的 1.8 mm 减薄到 0.7 mm。意大利柯赛德公司已用热轧 DP 钢制成菲亚特 131 汽车车轮,其疲劳寿命是普通钢的 1~2 倍^[7]。文献^[8,9]的研究表明,新型 DP500 钢应用于汽车车门可以提高车门总体抗凹陷性约 35%,且在提高整体质量的同时,可以在很大程度上不使用结构加强件。据文献^[9,10]的报道,采用 0.8 mm 厚的 DP500 钢代替 0.9 mm 的 BH210 钢板制造轿车车门外板,具有更好的抗凹陷性能,不改变冲压和焊接工艺,通过适当改变材料规格,整车可以减少钢用量 1.044 kg;当采用 0.7 mm 的 DP500 代替 0.8 mm 的 BH210 生产车门外板时,通过 CAE 分析及实际试验表明,在其质量减少 12.5%的同时,抗凹陷性能提高约 15%;经过车门内板的结构变动,在符合噪声、振动和硬度等有关指标的前提下,采用 DP500 取得了减重 15%~30%的效果。法国、德国和英国都在研究和生产 DP 钢方面做了大量工作,并用于汽车的各种复杂形状的冲压件。神户制钢公司开发的双相组织的 590~780 MPa 级合金化热镀锌钢板不仅具有优异的延展性和涂镀性,而且作为车身用钢板具有良好的点焊性,其力学性能见表 1^[11]。

表 1 590~780 MPa 级合金化热镀锌钢板的力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of hot dip galvanized sheet alloyed steel with the grade of 590—780 MPa

材料	强度级别/MPa	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ /%
开发钢	780	440	800	23
	590	350	600	32
传统钢	590	420	600	25

美国开发出的“DUAL-TEN590”双相钢与高强度低合金钢相比,在屈服强度相同时,抗拉强度约高 20%;疲劳强度约能提高 35%,冲击吸收能力提高 20%^[12]。

我国 DP 钢的研制开发工作较晚,大部分还在

试制和试生产中。武钢生产的 RS55 型和 RS50 型 DP 钢与日本同类钢相比,强度、塑性和屈服比基本相当,已用于制造 CA141 型 5 t 载重汽车零件,其冲压性能良好;RS55 钢可用于轻型汽车的车架、横梁、纵梁、轮辐和备胎压板等。鞍钢生产的冷轧 DP 钢 SX55 和热轧 DP 钢 SX66 已用于部分汽车零部件,均取得了良好结果。上海大学和上海汇众汽车制造有限公司联合研制的汽车底盘零件用 DP 钢,用于轿车底盘中的减振支座壳体和减振器盖,效果良好,例如采用 St14 双相钢取代 08VTiRe 成功地制作了桑塔纳轿车前悬挂支架壳体,降低了成本,解决了原冲损率居高不下的问题^[13]。

我国已成功开发了抗拉强度分别为 540、590 和 640 MPa 等级别的 DP 钢,但是产量很低,大批量工业生产及应用则还未见报道,在汽车中的应用范围有待进一步扩大。

随着科技的不断进步,在 DP 钢基础上又开发出了新一代具有相变诱发塑性特性(TRIP)的 DP 钢(TDP)。该钢具有高的强度和优良的塑性,可制造几乎所有的汽车结构件,被世界各国汽车行业一致看好,应用前景极佳^[14]。

3 相变诱发塑性钢

高强度低合金系列中的 TRIP 钢是一种新型汽车结构用钢,它利用组织中存在的残余奥氏体在应力应变作用下向马氏体转变而诱发相变塑性,同时又达到强化目的,具有优异的可成型性和高强度,在汽车上具有极大的应用前景^[15]。在 ULSAB 计划中,TRIP 钢的比例达到了 4%以上^[6]。

日本是最早对 TRIP 钢进行研究的国家,早在上世纪 80 年代,日本新日铁钢铁公司就对 TRIP 钢的性能作了系统研究。早期 TRIP 钢的研究主要集中在化学成分(%)为:0.1~0.4C,1.0~2.0Si,1.0~2.0Mn 范围的低碳 Si-Mn 系汽车结构钢。为提高强度,通过加入微量的铌、钒或钛等增加碳化物的弥散强化和固溶强化,进而达到强度和塑性的合理匹配。近年来考伯钢铁公司(Kobe Steel Unit)生产的 TRIP 钢,是一种完全新型的以贝氏体为基的 TRIP 钢,据称该钢具有目前最好的强韧性配合^[16]。日本川崎钢铁公司开发成功具有世界最好成型性能的汽车用低合金高强度钢板——SUPERHSLA 钢板。钢板的平均晶粒直径在 2 μm 以下,通过添加微量的钛,其伸长率在 30%以上,扩孔加工性能提

高 30% 以上,冲击能吸收性能提高 10% 以上^[17]。同时,该公司成功开发了强度高、耐疲劳性能好、扩孔率高的 TS780 MPa 级热轧钢板,首次采用超高强度钢作车轮材料。该钢的化学成分(质量分数/%)为:0.08C,1.5Mn,0.1Ti,0.01P,0.001S,0.03Al,其力学性能见表 2^[18]。

表 2 新开发的 TS780 MPa 钢的力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of new developed TS780 MPa steel

厚度/mm	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ /%
3.2	653	816	24
4.5	638	832	22
6.0	659	834	22

浦项钢铁公司开发出了 1 000 MPa 级 TRIP 钢并已商业化^[19]。目前 590 MPa 级热轧 TRIP 钢板已经实际应用到汽车前横梁等吸收冲击能的部件和车轮总成部件。

常规碳-锰-硅系 TRIP 钢的硅含量高,易产生热镀锌不良的问题,也会造成铸态低延性。近年来,国际上研究的焦点之一是用其它合金元素代替硅,或部分取代硅,如铝、磷和钼等,降低钢中硅含量,或通过特殊的热处理工艺改变低硅的 TRIP 钢在两相区等温前渗碳体的形貌和成分,保证不因硅含量降低而影响 TRIP 钢的力学性能。Meyer^[20,21]等研究发现,以铝代硅使常规 C-Mn-Si TRIP 钢具有优良的力学性能($\sigma_b > 750$ MPa, $\delta > 26\%$);其 n 值与应变关系不大,性能稳定,能较大地提高均匀伸长率,这对拉伸成形零件特别有价值。铝合金化 TRIP 钢因其硅含量低,是连续热镀锌钢板的首选材料。Jacoues 等的研究也表明,低硅 TRIP 钢具有比现有钢或高硅 TRIP 钢优越的拉伸性能^[22]。

比利时考克利·桑布尔公司改变传统的热处理工艺,采用热轧活化扩散和渗碳体显微组织富集后使用罩式退火(一种有保护气氛的退火处理,如 HNX 气氛保护),开发成功无硅和铝的 TRIP 钢^[23]。这种新型 TRIP 钢的热轧带钢,既可以冷轧,还可适用于热镀锌和电镀锌。在热轧和冷轧之间另作一次罩式退火处理可以使残余奥氏体变得稳定,促进了铁素体中锰的扩散和渗碳体中锰的富集。在最终进行的连续退火过程中富集了锰的渗碳体也转变成稳定的残余奥氏体。最终处理后,TRIP 钢的组织为 3 μm 左右的细晶粒,晶粒内有细小的岛状组织和残余奥氏体。处理后的无硅 TRIP 钢 $\sigma_b = 640$ MPa, σ_s

$= 400$ MPa, $\delta = 28\%$, $\delta_u = 19\%$, $n = 0.18$,其厚度为 0.6~2 mm,可以进行热镀锌和电镀锌。镀锌 TRIP 钢的性能见表 3^[24,25]。

表 3 1 mm 厚热镀锌无硅 TRIP 钢带的力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of hot dip galvanized silicon free TRIP steel strip with a thickness of 1 mm

状态	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ /%	n
未平整轧制	405	591	25.9	0.206
经平整轧制	374	594	25.4	0.170

国内很多高校对 TRIP 钢也进行了研究,并取得了可喜的成果。很多研究者所一致接受的 TRIP 钢的成分大致是:碳含量约为 0.2%,硅、锰含量均为 1.5% 左右。虽然硅含量的提高对 TRIP 钢性能提高有利,但是同时也损害了钢板的表面质量,并且对焊接性能不利。上海大学通过 Tthermo-Calc 软件对 TRIP 钢的成分进行了优化设计,使得其硅含量降到了 0.6% 以下。处理后其强塑积($\sigma_b \times \delta$,反映的是材料变形时能量的吸收状况)达到了 22 000 MPa%。同时又通过大量的工艺试验,反复进行验证,最终探索出了适合我国现状的冷轧 TRIP 钢的工艺路线。

TRIP 钢不仅有极好的强韧性,在动态拉伸过程中会进一步得到强化而不损失韧性。试验证明,在高速冲击拉伸下,材料的应力应变关系、微观组织转变与静态拉伸结果有明显的差异。目前,国内仅有宝钢生产出冷轧 TRIP 钢,强度等级为 600 MPa,但在国产轿车上还没有正式采用,TRIP 钢的基础研究工作明显落后于国外,相关的加工和成型技术也必须依赖国外。表 4 为宝钢生产的 TRIP600 钢与国外同类钢的典型性能^[26]。

表 4 宝钢 TRIP600 与国外同类钢的典型性能

Tab. 4 Comparison of TRIP600 steel in Baosteel with overseas steels

厂家	σ_s /MPa	σ_b /MPa	δ /%	$\sigma_b \times \delta$	n	备注
宝钢	403.0	628.0	35.0	22 608	0.22	—
NKK	414.0	628.0	34.0	21 101	0.21	—
USS	399.7	626.7	30.5	—	—	ASTM 50 标距

上海汽车集团股份有限公司汽车工程研究院、上海汇众汽车制造有限公司以及上海大学联合研究的 ISTANA 客车横梁件,采用宝钢产 B380TR 钢,屈服强度为 400 MPa,抗拉强度为 670 MPa,伸长率达到 34%。材料的碳当量为 0.35 左右,采用熔化气体(80%Ar+20%CO₂)保护焊对接试验,板厚 6

mm,焊接间隙 0.5~1.2 mm,接头的最高硬度均小于 350 HV。焊接试板经 X 射线检查,无内在质量缺陷,质量合格,评定为 1 级焊缝;板厚为 1.8 mm 和 6 mm 的搭接试验结果表明,该 TRIP 钢的焊接性能良好。

4 结 语

TRIP 钢的开发时间不长,钢板的强度和变形性能还可有更大的改善,极具发展前景。目前国内在汽车上的应用还处于初始阶段,主要限于一些相对简单的零部件。今后,TRIP 钢的发展应该进一步扩大到结构复杂、成形要求较高的汽车零部件,并用激光拼焊材料代替现有材料,在汽车轻量化和碰撞安全性方面发挥更大的作用。

汽车用高强度钢是汽车轻量化的关键材料之一,对汽车发展起着举足轻重的作用。汽车工业的迅速发展使得环保、能源等问题日益突出,因此汽车用高强度钢发展的总趋势将是高强度化及良好的成型性。随着各种先进的成型工艺以及模拟仿真技术的快速发展,可以相信,不久的将来,性能更高的汽车用高强度钢的开发和应用必将取得更大的进展。

参考文献:

- [1] 王利. 汽车用高强度 IF 薄钢板[J]. 宝钢技术,1997,(1):58-61.
- [2] 张志勤,何立波. 阿塞勒公司汽车钢板主要品种综述及我国汽车板生产研发现状[J]. 鞍钢技术,2004,(1):7-11.
- [3] Gustavsson A, Melander A. Fatigue of a highly prestrained dual-phase sheet steel[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials & Structures,1995,18(2):201-210.
- [4] Fredriksson. Advances in fracture research[A]. Conference: ICF7. V4[C]. Houston, Texas, USA: Pergamon Press plc, 1989.
- [5] Ghosh, Prakriti Kumar, Dorn Lutz. Influence of weld thermal cycle on the properties of flash butt welded dual phase steel[J]. Schweissen und Schneided,1991,43(1):12-13.
- [6] ULSAB-AVC body structure materials. ULSAB-AVC Consortium. Technical Transfer Dispatch 6[R]. SAE,2001.
- [7] 戈晓岚,许晓静. 汽车用材料的现状与展望[J]. 汽车工程,2002,24(4):294-296.
- [8] Sriram S, Chintamani J S, Bhatnagar R S, et al. Application of dual-phase steels for automotive closure panels[R]. 2003-01-0519;21-26.
- [9] Yan B. 用于汽车车身面板的新型双相钢[J]. 世界钢,2003,(5):32-38.
- [10] Carrie Gordon, James Robin, Gary Rocheleau. Advanced high strength steel outer body panels in Ford Mustang[EB/OL]. <http://www.autosteel.org>,2003.
- [11] 朱文英. 汽车轻量化与高强度钢板的开发进展[J]. 上海金属,2003,25(4):11-15.
- [12] 美国开发出加工性能极优的双相钢[J]. 冶金信息,2002,(1):9.
- [13] 许路萍,李麟,邵光杰. 轿车用金属材料重点解析[J]. 热处理,1999,(3):1-5.
- [14] 张梅,符仁钰,许路萍. 汽车用双相钢板的发展[J]. 热处理,2001,(1):5-8.
- [15] Konieczny Alex A. Advanced High Strength Steels Formability[DB/OL]. <http://www.autosteel.org>,2003.
- [16] 许路萍,邵光杰,李麟,等. 汽车轻量化用金属材料及其发展动态[J]. 上海金属,2002,24(3):1-7.
- [17] 张凤泉,陈贵江,康永林,等. 汽车永低合金钢的现状与发展[J]. 特殊钢,2004,24(4):1-4.
- [18] 崔莘. 耐疲劳性优良的 TS780 MPa 级热轧钢板[J]. 世界金属导报,2000,21(3):25-27.
- [19] 李京成. 浦项钢铁公司技术开发现状[J]. 世界金属导报,2000,(2):18-22.
- [20] Meyer M De, Vanderschueren D, De Cooman B C. The influence of the substitution of Si by Al on the properties of cold rolled C-Mn-Si TRIP steels[J]. ISIJ International,1999,39(8):813-822.
- [21] De Meyer M. 铝代硅对冷轧 C-Si-Mn TRIP 钢性能的影响[J]. 李振贺,译,王利,校. 世界钢铁,2002,(4):32-43.
- [22] Jacques P J, Girault E, Harlet ph, et al. The developments of cold-rolled TRIP-assisted multiphase steels: low silicon TRIP-assisted multiphase steels[J]. ISIJ International,2001,41(9):1061-1067.
- [23] Eberle K, Cantinieaux P, Harlet. New family of silicon free TRIP assisted multiphase steel; development and first experience of production at cockerill sambre[J]. Steel World,1999,3(2):65-66.
- [24] 朱铮. 汽车用高强度钢板的开发应用和发展前景[J]. 钢铁,2000,35(11):66-70.
- [25] Klaus Eberle, Pierre Cantinieaux, Philippe Harlet. New thermomechanical strategies for the production of high strength low alloyed multiphase steel showing a transformation induced plasticity (TRIP) effect[J]. Steel Research,1999,(6):233-238.
- [26] 王利,陆匠心. 宝钢冷轧汽车板的发展及其应用[J]. 世界钢铁,2002,(6):2-6.

欢 迎 来 稿

欢 迎 订 阅

欢 迎 刊 登 广 告