

# 我国汽车板生产现状及展望

李光瀛<sup>1</sup>, 马鸣图<sup>2</sup>

(1. 中国钢研科技集团有限公司钢铁研究总院, 北京 100081;

2. 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401122)

**摘 要:**介绍了当前汽车业主流车型对汽车板的要求和使用情况, 新一代超轻钢和未来钢汽车在节能、环保、安全、舒适方面的结构特征, 及其对各种新型汽车材料的技术要求和近期市场需求。概述了我国汽车板生产现状和宝钢、武钢、鞍钢、首钢等主要厂家的技术和产品发展。介绍了高品质和高等级汽车板的发展趋势与关键技术, 包括冷轧汽车外板的典型表面缺陷形成机理与工艺控制, 先进高强度钢 AHSS 汽车板的强塑化机理与连续退火工艺控制, 以及热镀锌高强钢汽车板的发展。指出了利用短流程 CSP-冷轧-罩式退火工艺中 AlN 固溶析出和 {111} // RP 织构发展, 生产高  $r$  值冷轧深冲板的工艺优势。简述了汽车板深加工技术和产品开发的新进展——热冲压成形。指出我国汽车板生产面临着 3 个方面技术挑战: 产品系列化和均质化、深加工与先期介入、新技术新产品的原创发明。

**关键词:**汽车板; 冷轧汽车外板; 先进高强度钢; 镀锌板; 热冲压成形

**文献标志码:**A **文章编号:**1003-9996(2014)04-0022-11

## Auto steels production in China—status and prospect

LI Guang-ying<sup>1</sup>, MA Ming-tu<sup>2</sup>

(1. Central Iron &amp; Steel Research Institute, Central Iron &amp; Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China;

2. China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

**Abstract:** In the present paper, the technical requirements of current vehicle on auto-steels were introduced. The structural feature of new generation ULSAB & FSV in energy-saving, environment-protection, traffic-safety and amenity were explained for their technical and market demands on various new auto-materials. The production status of auto-sheet-steels in China was outlined with the new technology and products development in major enterprise Baosteel, WISCO, Ansteel and Shougang. The developing tendency of high-grade auto-steels were introduced, including outer-panel sheet-steel and its surface-defect control, advanced high-strength steel AHSS and its strengthening-plasticization mechanism, hot-dip galvanized high-strength sheet-steels. The process advantage in CSP-CR-BA line to produce deep-drawing grade with high  $r$ -value was discussed through the utilization of AlN dissolution-precipitation and {111} // RP texture development. The development of deep-working technology in hot stamping was briefly introduced. The technical challenges facing to auto-steel production in China were mainly on the products-serialization and consistency control, deep working and early vendor involvement, the original-creation and invention of new technology and new product.

**Key words:** auto sheet steels; outer-panel sheet-steel; advanced high-strength steels(AHSS); galvanized sheet-steels; hot press forming

## 1 我国汽车业和钢铁业的发展现状

我国汽车业和钢铁业在 2000—2010 年期间出现了井喷式的爆发性增长, 汽车年产量从 2000 年的 206 万辆增长到 2010 年的 1826 万辆, 平均每年增长 161.9 万辆, 年均增长率为 24.3%; 钢

产量从 2000 年的 1.285 亿 t 增长到 2010 年的 6.943 亿 t, 平均每年增长 5658 万 t, 年均增长率为 18.4%。从 2009 年起我国汽车年产量超过了美国和日本, 成为世界第 1 汽车生产大国。2010 年以来, 我国汽车业和钢铁业进入平缓增长、稳定

收稿日期: 2014-06-10

作者简介: 李光瀛(1946—), 男(汉族), 北京人, 教授级高级工程师, 中国金属学会深加工分会委员。

发展的新阶段,年产量分别保持在1800~1900万辆和7亿t左右。2013年我国汽车产量和钢产量出现新的增长,分别增加到2211.68万辆和7.79亿t,同比增长14.8%和8.8%。

但我国人口众多,即使在继续保持汽车年产量世界第1的情况下,仍有巨大的发展潜力。2012年我国每千人汽车拥有量仅为83辆,远低于汽车年产量排名第2~第4的美国(812辆)、日本(589辆)和德国(634辆)。同时我国在汽车的设计制造、材料技术和使用功能方面,特别是在汽车轻量化与节能环保方面,仍然与发达国家存在着显著差距。我国已经面临与美国相同的石油供不应求的能源危机<sup>[1]</sup>。2013年10月我国石油进口量达到每天630万桶,超过美国的每天624万桶,取代美国成为全球最大石油净进口国。预计2020年,中国对进口石油的依赖度将达到60%以上;2025年,中国石油需求将占全球总需求的40%。

同时,2013年以来我国大部分地区连续发生雾霾,北京等各大城市PM<sub>2.5</sub>严重超标。在对PM<sub>2.5</sub>污染源构成的分析中,机动车排放占22%,位居第1,煤炭燃烧占17%,其后是扬尘、工业喷涂、养殖及秸秆燃烧等其他来源。

因此我国面临从汽车大国向汽车强国转变的严峻挑战,对汽车新能源、新驱动系统和新材料的开发与应用提出了迫切需求。

在这种情况下,我国汽车业和钢铁业正在从新世纪第1个10年间在产能规模方面的竞争发展,转向未来10年在高性能、高质量、新品种和高性价比方面的技术竞争。新一代汽车在节能、环保、安全、舒适方面的竞争发展,使各类具有良好塑性和成形性能的高强度钢,尤其是先进高强度钢AHSS汽车板以及深加工技术,成为汽车板材料开发与生产应用的前沿热点。

## 2 汽车轻量化和高强度钢的应用

### 2.1 汽车轻量化和安全意义

截止2013年底,我国汽车保有量已达1.37亿辆。汽车产量和保有量增加,在给人们出行带来方便和拉动经济发展的同时,也产生了油耗、排放(雾霾)、安全3大问题。汽车轻量化是解决汽车油耗和排放最直接和最有效的手段。实验和研究表明,乘用车自质量每下降10%,其油耗和排放都会降低6%~8%。汽车运行中存在4个阻力,即空气动力学阻力、滚动阻力、爬坡阻力、加速

度阻力。除空气动力学阻力与汽车自质量无关外,其他3个阻力均和汽车自质量呈线性关系,亦即汽车自质量降低,会使汽车运动阻力降低,从而使油耗降低。而每燃烧1L汽油,会产生2.5kg的CO<sub>2</sub>和其他排放气体,因此油耗的下降也就意味着排放的下降。一系列的实验都证明,汽车的油耗和自质量大体呈线性关系,见图1<sup>[2]</sup>。汽车的排放与车身自重的关系示于图2<sup>[3]</sup>。

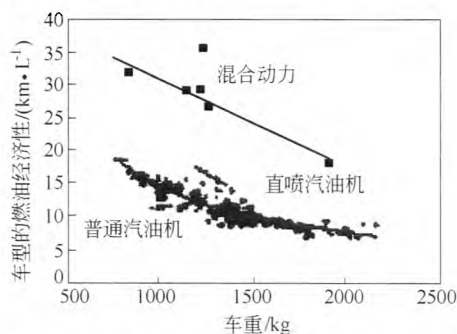


图1 各类汽车的燃油经济性与汽车自重的关系

Fig. 1 Relationship of all kinds of automobile fuel economy and vehicle weight

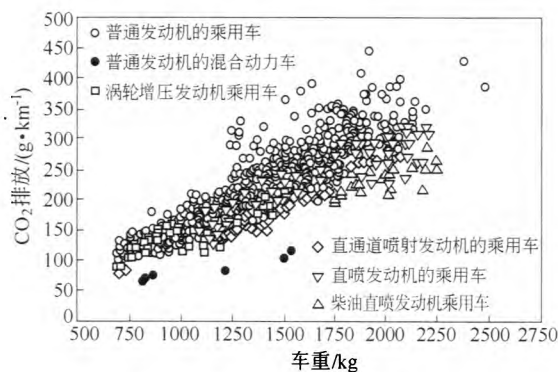


图2 车重与碳排放的关系

Fig. 2 Relationship between automobile weight and carbon emissions

对新能源汽车,由于电池的增重和电池功率比的限制,其轻量化将更为重要。因此,各国政府都十分重视汽车轻量化和节能减排,并制定了汽车节能减排的很多法规,以欧盟为例,2009年汽车的燃油消耗为百公里5.7L,也就是每公里CO<sub>2</sub>的排放为140g,2012年要达到百公里油耗4.9L,即每公里CO<sub>2</sub>的排放为120g。日本、美国也有类似的法规。汽车轻量化是达到这些法规要求的必不可少的手段。

汽车轻量化的同时必须保证汽车的安全,各国汽车工业的安全法规日益严格,如图3所示。

大力值、轧制力传感器及其控制  
(福建)莆田市力天量控有限公司  
Tel:0594-2605245 2636151 2636152



图3 世界各国日益严格的碰撞法规

Fig. 3 The increasingly stringent collision regulations around the world

汽车必须承受各种安全法规的检验,包括正碰、侧碰、追尾、偏置碰、翻滚等。欧盟采用 UNCAP 碰撞安全检测评星级的标准,作为引导用户购车意向的重要手段。

汽车既要轻量化又要保证安全,就必然导致高强度和超高强度钢的应用需求。

## 2.2 汽车轻量化和高强度钢的应用

研究表明<sup>[1-4]</sup>,高强度钢和先进高强度钢是既能保证汽车轻量化,又能提升和保证汽车安全性的性价比高的现代汽车制造材料,是其他材料难以替代的材料。由于汽车轻量化和安全技术的发展,汽车用钢的强度水平一直呈上升趋势,见图4。

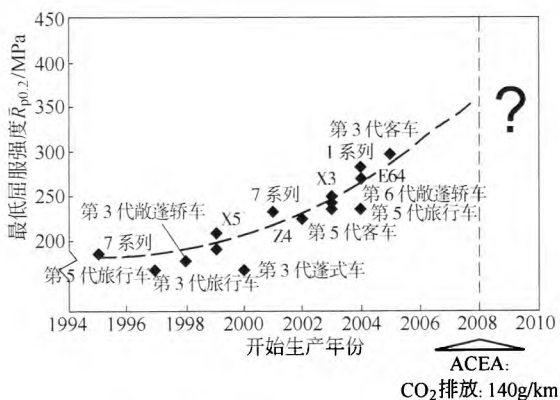


图4 车身用板材屈服强度的变化

Fig. 4 Variation of the automobile body material yield strength

国际上出现了一系列汽车轻量化工程:

(1)美国钢铁协会组织的 PNGV 计划,其轻量化目标是车身减重 30%,其技术路线是钢铁材

料和多种材料的应用;

(2)欧洲钢铁协会组织的 SuperLIGHT-Car 项目,其减重目标为 40%,技术路线是多种材料的应用;

(3)国际钢铁协会组织的 ULSAB-AVC 轻量化项目,减重目标为 20%,符合 2004 年的碰撞法规,白车身价格不能上升,其技术路线全部采用高强度钢,白车身采用高强钢的比例为 36%,采用超高强度钢的比例达到 64%;

(4)阿赛洛钢公司组织的 ABC 项目,减重目标为 30%,技术路线采用高强度钢;

(5)最近阿赛洛米塔尔公司进一步推出了新的轻量化项目“S-in motion”,其技术路线大量采用先进高强度钢和热冲压成形钢。以 C 级车为例,该项目通过优化整车 43 个零件的重量,可使车身重量较传统技术生产的车身减重 17%,使整车生命周期减少了 14%的碳排放;

(6)蒂森公司推出的轻量化车身项目 NSC,减重目标为 20%,技术路线采用高强度钢和先进高强度钢;

(7)韩国机械院、冶金企业和汽车厂联合开展的韩国国产品牌汽车轻量化工程项目,减重目标为 10%;

(8)德国新能源汽车项目在轻量化工程和车身设计中投入近 10 亿欧元。

自 2006 年以来,每年一届的欧洲车身会议都展示了轻量化、汽车安全性和高强度钢应用的先进的车身设计实例。2011 年韩国现代首次参加欧洲车身会议,设计的全钢的轻量化车身 i40 以高的性价比、高的汽车安全性而获得当年车身会议的金奖。

## 2.3 对汽车用钢的性能要求

汽车轻量化和安全性对汽车用钢的性能提出了新的、较高的要求,具体有以下 6 个方面:

(1)优良的成形性能。

板材良好的成形性是对汽车板的基本要求。成形性是指板材可承受不同的应变状态或不同载荷状态成形而不破裂的能力、较高的变形协调能力和良好的厚度方向的异性度。不同的汽车构件,有不同的成形性能要求。为满足不同构件,特别是高强度钢成形性能要求,开发了高强度 IF 钢、各类先进高强度钢及组织强化钢。

(2)在保证塑性、延性指标的同时,提高强度

降低冲压件重量。

高强度高成形性是先进汽车钢板的一个突出特点,与汽车减重、节能及保证安全紧密相关。采用高强度钢板制造汽车车身可使白车身减重 5%~20%。假设车身用钢板厚度相同,那么车身钢板厚度减少 0.05、0.10、0.15mm,将分别使车身减重 11(6%)、22(12%)、33kg(18%),因而降低车身用板厚度是汽车减重的重要方向。车身用钢板厚度的减薄量可用拇指法则进行估算。近年来日本产汽车高强度钢板使用率超过 40%,在超轻钢车身先进概念车 ULSAB-AVC 中,白车身上应用各类高中强度钢达到 100%,从而使汽车白车身由 270kg 减至 214kg,成本下降,并符合 2004 年安全法规。此外,车身减重将引起悬挂系统、制动装置和传动系统的减重,从而产生二次减重效应,二次减重效应将提高功率输出特性,并使汽车的驾驶和制动性也得到改进。

(3) 良好的表面状态和形貌、严格的尺寸精度。

目前,汽车外覆盖件采用完全无缺陷表面钢板,即 O5 板,同时规定了钢板表面形貌、粗糙度及峰值数。为此,开发了轧辊的各种表面处理技术,如喷丸毛化、激光毛化、电火花毛化、电子束毛等处理技术,以得到理想的板材表面形貌,改善薄板成形中的摩擦性能,同时使最终的构件表面更光洁美观。目前的研究表明,采用激光毛化和电子束毛化技术处理的轧辊,钢板表面状态性能较优,同时还有利于改善油漆涂层的附着性能、涂镀层长期的保护作用和光洁美观的效果。

(4) 良好的连接性能和保型性能。

连接性能主要是指焊接性能,保型性能主要是指抗回弹等能力。对于在自动生产线上生产的构件,这些性能十分重要,主要保证了构件的牢固连接、自动加工过程的通畅。

(5) 抗时效性稳定性和油漆烘烤硬化性。

在钢板冲压前,均需运输、储存和剪切、加工,因此要求汽车板具有抗时效性稳定性,以使钢板保持较好的冲压成形性,避免冲压变形时零件表面发生起皱或其他表面缺陷。但随后油漆时,冲压件应具有足够的烘烤硬化性,以提高覆盖件的抗凹性。

(6) 耐蚀性能。

扩大涂镀层钢板的应用,同时提高涂镀层钢

板的质量,特别是提高合金镀层板的生产技术和质量,以在较薄的钢板合金镀层下,提升防腐抗力和焊接的工艺性能。

从全生命周期的评估,钢板的回收利用、钢制汽车零件的维修习惯、消费者的习惯、满意度以及性价比等方面,汽车用高强度钢和先进高强度钢板在汽车轻量化方面具有较强的竞争能力。

## 2.4 高强度钢和先进高强度钢的发展

为满足汽车轻量化发展的需求以及前述汽车板的各种性能要求,高强度钢和先进高强度钢近年来发展很快。目前已有普通高强度钢、第 1 代先进高强度钢、第 2 代先进高强度钢,第 3 代先进高强度钢。在延性和强度的坐标图中,各类高强度钢和先进高强度钢在图中所处位置示于图 5。图 5 中的普通高强度钢强塑积为 15000~20000 MPa·%,包括 IF 钢(无间隙原子钢)、HSIF 钢(高强度无间隙原子钢)、IS 钢(各向同性钢)、BH 钢(烘烤硬化钢)、Mild 钢(低碳软钢)、CMn 钢(碳锰固溶强化钢)、HSLA 钢(高强度低合金钢);第 1 代先进高强度钢,其强塑积为 20000 MPa·%,包括 DP 钢(双相钢)、CP 钢(复相钢)、TRIP 钢(相变诱发塑性钢)、MART 钢(马氏体级钢)、HPF(热冲压成形钢);第 2 代先进高强度钢,其强塑积为 60000 MPa·%,该类钢为 TWIP 钢(高锰的孪晶诱发塑性钢);第 3 代先进高强度钢,其强塑积为 30000~40000 MPa·%,包括 BCC+FCC 钢(中锰的马氏体+奥氏体钢)、 $\delta$ -TRIP 钢(包含有  $\delta$  铁素体的相变诱发塑性钢)、

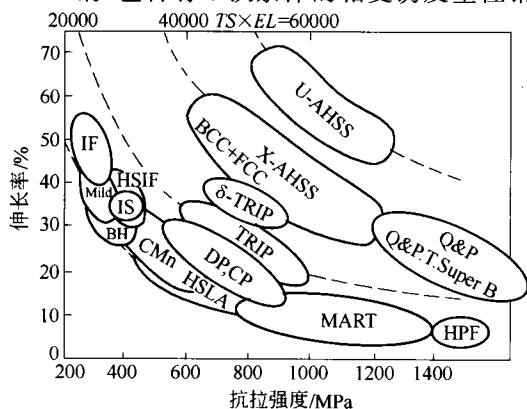


图 5 各类高强度钢和先进高强度钢伸长率和强度的示意图

Fig. 5 Elongation and strength schematic diagram of all kinds of high strength steel and advanced high strength steel

大力值、轧制力传感器及其控制  
(福建)莆田市力天量控有限公司  
Tel:0594-2695245 2636151 2636152

Q-P 钢(淬火分配处理钢或称马氏体基的相变诱发塑性钢)、Q&PT 钢(淬火-回火分配处理钢或称回火马氏体基的相变诱发塑性钢)、Super B 钢(超级贝氏体钢,又称纳米贝氏体钢)。

以上 3 代先进高强度钢中应用较多的仍然是第 1 代先进高强度钢;而在第 1 代先进高强度钢中应用较多的是 DP 钢,超高强度的 HPF 钢最近几年发展很快,用量可能会有较大的上升。第 3 代先进高强度钢目前仍在发展中,其工艺、强化原理和应用技术均有待于进一步实验研究和发展,宝钢率先进行了 Q-P 钢的产业化生产。

### 3 我国汽车板生产现状

根据近年来我国汽车产量平缓增长和 2013 年的汽车生产规模(2200 万辆/a),以及车辆类型的比例(乘用车 1800 万辆,商用车 400 万辆),我国近期对汽车用钢的需求量约为 3800 万 t,其中车身结构用汽车板 3000 万 t,传动系统用轴承齿轮等特殊钢 800 万 t。在汽车用钢板中,热轧板占 20%左右,约 600 万 t,冷轧板占 80%左右,约 2400 万 t。

目前我国的板带生产能力已经超过 3 亿 t/a,占钢材总产能的 44%,其中热轧宽厚板机组 84 套,年产能 8000 万 t;热连轧宽带钢机组 73 套,年产能 2.2 亿 t,其中热连轧宽带钢供冷连轧基料 8400 万 t;冷连轧宽带钢机组 57 套,年产能 8000 万 t;热镀锌机组 40 套,年产能 1500 万 t,为我国汽车板开发与生产提供了必要的设备技术条件。

2013 年我国汽车板实际年产能已经达到 1600 万 t,其中宝钢已超过 660 万 t,武钢 300 万 t,鞍钢 250 万 t,首钢 160 万 t,马钢 110 万 t,本钢 105 万 t,邯钢 65 万 t。在汽车板生产中,最重要的冷轧汽车板年产能已超过 1200 万 t,而在中高档轿车和各类车辆所用的高等级冷轧汽车板(约 1000 万 t)中,有 50%以上是宝钢的产品,包括各级别牌号的深冲系列和高强度冷轧、热镀锌以及电镀锌汽车板。在汽车板的开发与生产中,冷轧汽车板不仅需求数量大,而且工艺流程长、质量要求严、技术难度高,是钢铁工业整体流程、设备、技术、管理和操作水平的标志,是一个钢铁企业综合实力的象征。冷轧汽车板的开发与生产也带动了钢铁企业整体设备、技术和管理水平的提高和发展。

### 3.1 发展概况

我国汽车板生产集中在以宝钢和武钢为代表的几家大型钢铁企业,已能系列化生产各类高性能质量的汽车板,包括热轧汽车结构用钢板(汽车大梁板、汽车轮毂、轮辋、轮辐用钢板等)、冷轧普通强度冲压系列钢板(DC01~DC07)、冷轧传统高强度系列结构钢板(BH 钢、IF 钢、含磷钢、HS-LA 钢),以及先进高强度钢 AHSS(DP 钢、TRIP 钢、MP 钢、Q-P 钢等)、各强度级别的热镀锌 GI、热镀锌铁合金 GA、电镀锌 EG 和电镀锌镍合金 ZN 等汽车板<sup>[5-16]</sup>。

这些汽车板生产厂家大都采用铁水脱硫预处理—大型转炉冶炼—LF 炉精炼—RH 真空处理—宽板坯连铸—1580~2250mm 机组热连轧—1550~2230mm 机组冷连轧—连续退火处理的工艺流程,以及相应的连续热镀锌 CGL 或电镀锌 EGL 工艺,生产各种类型和级别的汽车板。这些汽车板生产线的主要技术特征是:

(1)炼钢厂在采用世界领先的工艺设备的同时,自主开发洁净钢冶炼、超低碳-氮控制、转炉计算机自动吹炼模型、负能炼钢、时刻表式生产组织模型、长寿经济炉等一系列国际领先的新技术,可以生产高精确成分、高洁净度、全系列化的汽车用钢,从超低碳无间隙原子 IF 钢到各级别牌号的先进高强度钢 AHSS,最佳洁净度可以达到  $w(P) + w(S) + w(N) + w(H) + w(O) \leq 100 \times 10^{-6}$ 。宽板坯连铸采用中间包与结晶器流场控制(挡渣堰、过滤器、结晶器电磁搅拌 M-EMS 等)、过热度与拉速稳定控制、动态轻压下 DSR、品质异常判定模型等新技术,可以为轧钢系统提供高技术含量、高附加值产品所需的优质板坯原料。

(2)热连轧和冷连轧宽带钢机组以高速化、大型化、连续化、自动化的设备生产规格齐全的热轧和冷轧汽车板产品。热连轧采用步进式加热炉与新型烧嘴、工作辊弯辊和连续可变凸度 CVC 系统、带钢张力控制和对中控制、带钢横向温度分布控制、高几何精度(板厚、板凸度、平面形状和平直度)综合控制模型,具有快速张力和秒流量控制的液压活套、微张力测量与自动矫直控制、新型全液压卷取等新技术。

(3)冷连轧采用酸洗冷轧联合机组 CDCM、浅槽紊流酸洗、连续可变凸度 CVC<sup>PLUS</sup> 技术、边部减薄控制 EDC 技术、高几何精度综合控制技术



(板厚、板凸度、平面形状和平直度)、激光测速、带钢吹扫干燥 DS 技术、旋转式带钢表面在线检测等新技术,可以生产板厚精度 $\pm 0.8\%$ 以内、平直度 $\pm 8\text{IU}$ 、边部减薄控制在 $5\mu\text{m}$ 、表面清洁度显著优于残留乳化液不大于 $250\text{mg}/\text{m}^2$ (单面)和残留铁粉不大于 $60\text{mg}/\text{m}^2$ (单面)的指标、表面粗糙度稳定控制在 $R_a=0.8\sim 1.3\mu\text{m}$ 的高质量和高均匀性冷轧宽钢带。

目前国内外对冷轧汽车板产品在品种牌号和性能质量方面的主要技术要求可以归纳为以下 4 个方面:

(1)系列化:冷轧汽车板的品种向高强度、超深冲和镀层板 3 个方面系列化发展。目前国内各大钢铁企业的冷轧普通强度(YS140MPa)级别内的不同冲压级的系列产品(DC01~DC07)约占各家冷轧汽车板产量的 $70\%\sim 80\%$ ,传统高强度汽车板(BH 钢、IF 钢、HSLA 钢等)约占 $20\%\sim 30\%$ ,先进高强度钢 AHSS 汽车板(DP 钢、TRIP 钢、Q-P 钢等)占 $1\%\sim 3\%$ 左右。

(2)成形性:以超低碳 IF 钢为基板的深冲级 DC04 以上的各级别冷轧板和镀锌板,主要用于汽车制造,其生产工艺技术的开发与优化,主要围绕成形性能的 3 个基本材料参数(伸长率 $A_{80}$ 、应变硬化指数 $n$ 值和垂直各向异性指数 $r$ 值)的提高、稳定、优化进行。

(3)高精度:冷轧汽车板产品必须满足两方面最重要的基本质量精度检验指标:一是几何精度,包括板厚精度(Thickness)、板凸度(Profile)、平直度(Flatness)和平坦度(平面形状 Contour);二是表面质量精度,包括表面缺陷(Surface Defect)控制、粗糙度(Roughness  $R_a$ )、纹理形貌(Texture)和清洁度(Surface Cleanliness),尤其是对汽车外板表面质量的要求为零缺陷控制。

(4)均质性(Consistency):各品种、各牌号、各规格产品的每一项性能和质量参数在每一炉罐号和每一带卷的全长与全宽的线度范围内保持均匀、稳定、连续和一致。

### 3.2 我国汽车板主要生产厂家

#### (1)宝钢。

宝钢汽车板生产主要集中在一冷轧 2030mm 机组、三冷轧 1550mm 机组、四冷轧 1800mm 机组(宝日汽车板)和五冷轧 1730mm 机组,装备有连续酸洗 CPL、冷连轧 TCM、连续退火 CAL、连续

热镀锌 CGL 和电镀锌 EGL 机组。这 4 条生产线的设计年产能力为冷轧板带 665 万 t,其中连续退火板带 388 万 t,热镀锌板带 225 万 t,电镀锌板带 45 万 t。目前宝钢冷轧汽车板实际年产能已超过 600 万 t,以高等级冷轧退火板、热镀锌板和电镀锌板为主,包括冷轧和镀锌汽车外板 100 万 t,先进高强度钢 AHSS 汽车板 10 万 t。宝钢汽车板产量连续多年来居我国第 1,占我国中高档轿车用高等级冷轧汽车板产量的 $50\%$ ,占先进高强度钢汽车板的 $68\%$ ,成为我国汽车用户的重要合作伙伴。

宝钢在批量生产全系列各冲压级 DC01~DC07 普通强度冷轧板方面,不仅可以生产典型超低碳 IF 钢( $w(\text{C})\leq 20\times 10^{-6}$ )为基板的 DDQ 深冲级 DC04 汽车板,还可以生产超低碳( $w(\text{C})\leq 13\times 10^{-6}$ )IF 钢,为 EDDQ 特深冲级 DC05 和 SEDDQ 超深冲级 DC06 汽车板采用低温连续退火工艺创造了条件。宝钢在生产 TS340~TS590 级传统高强度冷轧汽车板(BH 钢、IF 钢、IS 钢、HSLA 钢等)的基础上,不仅可以系列化生产 DP590~DP980 级 DP 钢和 TRIP590~TRIP980 级 TRIP 钢等第 1 代先进高强度钢汽车板,而且在世界上首先批量试制出第 3 代先进高强度 Q-P 钢,还开发出强度级别高达 1180、1500MPa 的冷轧马氏体钢。

值得注意的是,宝钢自主集成各项新技术建设的第 5 冷轧机组,对于我国和世界先进高强度钢 AHSS 汽车板的开发与生产具有重要意义。该冷轧机组设计年产 160 万 t,配备 1 套连退机组(70 万 t)、2 套热镀锌机组(70 万 t)和 1 套中试机组(20 万 t)。2009 年 3 月建成的中试机组是先进高强度钢 AHSS 和超高强度钢汽车板的专用生产线,可以生产高强度冷轧板 11 万 t 和高强度热镀锌板 9 万 t。其采用独特的高氢( $\text{H}_2$  体积分数在 $60\%$ 以上至 $75\%$ )气体喷射和新型水淬两种冷却技术,使 1mm 厚带钢最大冷却速度分别达到 $140^\circ\text{C}/\text{s}$ 和 $500^\circ\text{C}/\text{s}$ ,并解决了温度精确测量、板形控制、超高强度钢带的焊接和热镀锌等技术问题,可系列化生产 AHSS 钢和 TS1180~1500MPa 级超高强度马氏体钢汽车板。2009 年 10 月,宝钢的超高强度 980MPa 级热镀锌汽车板首次批量被上海通用汽车采用。2012 年宝钢高强度汽车板专业生产产量已超 10 万 t,并在世界上首次批量生

大力值、轧制力传感器及其控制  
(福建)莆田市力天量控有限公司  
Tel:0594-2636245 2636151 2636152

产试制出第 3 代先进高强度钢 Q-P 钢,成为具有世界先进水平的汽车板生产基地。

2013 年 9 月初,宝钢湛江钢铁基地 2030mm 冷轧工程在东海岛开工,主要定位于汽车板等高档产品。2013 年 11 月宝钢股份开工建设的宝日汽车板 4# 热镀锌铁合金 GA 生产线,2015 年投产后将增加 42 万 t/a 高等级和高强度热镀锌铁合金汽车板,包括汽车外板和 TS800MPa 级以上高强度汽车板(GA980DP 等)。

#### (2) 武钢。

武钢汽车板主要在一冷轧 1700mm 机组、二冷轧 2230mm 机组和三冷轧 1550mm 机组生产,包括 3 条连续退火生产线和 5 条热镀锌生产线,设计年生产能力为 550 万 t。目前武钢的汽车板实际年生产能力已经超过 300 万 t,其中热轧汽车板 60 万 t,冷轧汽车板 240 万 t,包括各级别普冷和深冲级(DC01~DC06)汽车板 170 万 t,汽车外板 30 万 t,镀锌板 60 万 t,传统高强度汽车板(BH 钢、高强度 IF 钢、HSLA 钢等)40 万 t,双相钢 DP600 等先进高强度钢 2 万 t。武钢汽车板已通过中国各大汽车质量体系认证,具备向法系、美系、德系、日系和各自主品牌汽车厂供货资格,包括法国雪铁龙(神龙汽车、长安标致)、美国通用(上海通用)、美国福特(长安福特)、德国戴姆勒(北京奔驰)、德国大众(一汽大众)、日产雷诺(东风日产)、日本丰田(一汽丰田、广汽丰田)、日本本田(广汽本田、东风本田)和自主品牌奇瑞、上海汽车、东风乘用车、比亚迪、吉利等。

#### (3) 鞍钢。

鞍钢汽车板年生产能力已超过 250 万 t,主要在热轧 1700、1780、2150mm 机组和冷轧 1700、1450、2130mm 机组生产,可以生产各级别冷轧板(DC01~DC06)、BH 钢、高强度 IF 钢、HSLA 钢等,并开发出热轧 DP500 和 DP800、热轧 TRIP600 和 TRIP800、冷轧 DP590~DP980 级和 TRIP590~TRIP780 级钢板,实验研制出了第 2 代 TWIP590~TWIP780 级和第 3 代 AP-QP980 钢,正在研制开发 TWIP980 钢。鞍钢与德国蒂森-克虏伯合资的 2 条热镀锌机组 TAGAL 年生产能力 80 万 t,可以生产以普冷板 DC01~DC05、BH 钢、DP 钢和 TRIP 钢为基板的热镀锌汽车板。

2013 年 10 月鞍钢与日本神户制钢合资建设

1 条年产 60 万 t 的连续退火线,采用新型水冷方式生产 TS590MPa 级以上冷轧双相钢汽车板,预计 2016 年投产。鞍钢与攀钢集团共同投资的重庆 1650mm 镀锌汽车板项目于 2013 年 8 月开工,两年后将年产 45 万 t 高强度热镀锌汽车板。2013 年 12 月,鞍钢在完成对鞍钢蒂森克虏伯汽车钢公司(TAGAL)热镀锌线技术改造并生产出热镀锌汽车板后,对广州汽车钢项目投资 25 亿元,建设年产 45 万 t 的高强度镀锌汽车板生产线。

#### (4) 其他。

2012 年首钢冷轧汽车板产量突破 120 万 t,2013 年达到 163 万 t,包括顺义冷轧 100 万 t 和京唐冷轧 63 万 t。

华菱钢铁公司将于 2014 年建成年产冷轧板 100 万 t 和热镀锌板 50 万 t 的冷轧厂,可以生产 1200MPa 级先进高强度钢 AHSS 和超高强度钢 UHSS 以及热成形钢 Usibor 1500P。

### 4 高品质和高等级汽车板的开发与生产

在各种高等级汽车板产品中,对汽车外板 O5 板的表面质量要求最严格,对先进高强度钢 AHSS 强塑性要求最新颖。它们是带动我国汽车板生产技术发展的旗舰产品,涉及钢铁生产工艺流程中最重要的前沿热点技术领域,例如超低碳 IF 钢和洁净钢冶炼技术、较高 Mn、Si、Al 含量的低合金钢连铸技术、严格控制冷却和卷取温度的热连轧技术、高几何精度冷连轧技术、具有不同级别快速冷却能力的连续退火技术等,对于全面提高我国汽车板生产技术水平具有重要意义<sup>[17]</sup>。

#### 4.1 汽车外板

目前我国汽车外板的产能为 150 万 t/a,其中宝钢 100 万 t,武钢 30 万 t。汽车外板对于表面质量的技术要求主要有 4 个方面:一是对于各种表面缺陷的控制;二是对于表面粗糙度 Ra 不同级别的要求;三是对于表面纹理(Texture)特征的不同要求;四是对于清洁度(残余乳化液和残余铁粉)的要求。汽车外板的表面质量至少应满足国家标准 GB/T5213—2008 中第 6.6 条对 FD“超高级表面”的要求,而汽车制造厂家的要求则是零缺陷,不允许存在任何表面缺陷。目前国内各汽车外板生产厂家能够基本满足汽车外板对于表面粗糙度、表面纹理和表面清洁度的技术要求,但是在表面缺陷控制方面仍然存在一些问题<sup>[17-21]</sup>。

冷轧板典型的表面缺陷按照产生来源大体可以分为3大类:

第1类来源于冶炼和连铸工艺过程,包括暗线(亮线 Sliver)、夹杂(Inclusions)、夹层(翘皮 Shell)、结疤(Scabs, 溅疤面 Spilliness)、针孔(Hole)、气泡(Blister)、暗带(Dark Line)等;

第2类来源于热轧工艺过程,最主要是氧化铁皮压入导致的麻点、麻斑缺陷(Rolled-in Scale);

第3类来源于冷轧工艺过程,包括酸洗不足(Under Pickling)、酸洗过度(Over Pickling)、辊印(Roll Mark)、刮伤(划痕 Scratch)、皱褶印(Pinch Mark)、铁粉(Iron Powder)等。

汽车外板合格率较低的主要原因集中在冶炼和连铸过程产生的第1类表面缺陷上,其中比较典型的是暗线(亮线 Sliver)、夹杂物(Inclusions)和夹层(翘皮 Shell)。大量分析结果表明,在暗线内存在着弥散分布的细小  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物颗粒(颗粒直径  $d=5\sim 10\mu\text{m}$  左右)、铝的复合氧化物夹杂和铝酸盐,或者由结晶器卷渣引起的复合非金属夹杂组成,见图6。夹层(翘皮 Shell)含有非金属夹杂物的不规则薄片状的覆盖层(铁皮),被非金属夹杂、氧化物或氧化铁皮与基体分离。

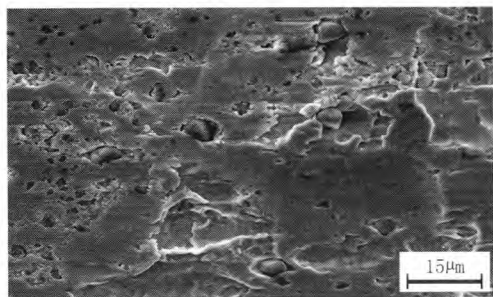


图6 冷轧板表面暗线内弥散的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂

Fig. 6 The dispersive distribution  $\text{Al}_2\text{O}_3$  inclusion within the sliver on the surface of cold rolled plate

针对汽车外板表面夹杂物的主要来源,特别是超低碳 IF 钢的脱氧产物、二次氧化物、卷渣和外生夹杂,各生产企业在精炼和连铸过程中采取相应的技术措施,包括精炼渣中  $\text{FeO}$  和  $\text{MnO}$  含量控制,中间包隔墙与流场控制,中间包液面高度、结晶器液面扰动控制,电磁制动 EMBR,板坯拉速控制等。汽车外板表面缺陷的工艺控制在很大程度上取决于连铸工艺的控制。连铸结晶器是

最后的精炼步骤,在这里,夹杂物或上浮进入顶部渣层,或卷入正在凝固的壳层形成产品缺陷。对汽车外板用的 IF 钢连铸板坯逐层进行金属原位分析(Original Position Analysis OPA),可以看到沿板坯厚度方向上各层面内的夹杂物分布,对于提高洁净度、改进连铸工艺、控制表面缺陷具有重要参考价值。

为满足新车型对节能、环保、安全的要求,我国汽车外板正在从普通强度( $\text{YS}100\sim 140\text{MPa}$ )的深冲级和超深冲级冷轧板及其镀锌板(热镀锌 GI、热镀锌铁合金 GA、电镀锌 EG)向高强度冷轧板和镀锌板发展,包括高强度 IF 钢和烘烤硬化 BH 钢等及其镀锌板。

#### 4.2 先进高强度钢 AHSS 汽车板<sup>[1,4,17,22-25]</sup>

第1代至第3代先进高强度钢 AHSS 强塑性水平不同,主要取决于它们的塑性应变机理。一方面,基体组织、晶体结构和滑移系不同,导致基体的塑性应变能力不同。第1代 DP 钢和 TRIP 钢以体心立方铁素体为基体,可以在几个较低密排指数面上(包括  $\{110\}$ 、 $\{112\}$ 、 $\{123\}$  等)的密排方向  $\langle 111 \rangle$  发生塑性滑移。第2代 TWIP 钢和不锈钢均以面心立方奥氏体为基体,具有沿密排面和密排方向  $\{111\} \langle 110 \rangle$  的 12 个滑移系,因此具有良好塑性。第3代 Q-P 钢以体心正方马氏体和不同百分比奥氏体为基体,强塑性可在一定范围内调节。

另一方面,在不同的基体组织、晶体结构和不同滑移系的基础上,第1代和第3代 AHSS 钢引入了不同数量的残余奥氏体,利用钢板在塑性变形过程中的相变诱导塑性 TRIP 效应,显著提高了均匀塑性应变能力和抗拉强度。第2代 AHSS 钢则在充分发挥奥氏体基体良好的密排面滑移系作用的同时,进一步引入孪晶诱导塑性 TWIP 机制,使高锰 TWIP 钢获得接近奥氏体不锈钢的塑性水平。2008 年德国蒂森公司在高强度冷轧产品介绍中提出,双相钢也可以存在一定数量的残余奥氏体,其有利于改善成形性。

这3代先进高强度钢的核心技术都是通过适当的化学成分设计和相应的生产工艺,使材料获得一定数量的残余奥氏体(富碳亚稳奥氏体)或者奥氏体,在塑性变形过程中发生马氏体相变及其诱导的 TRIP 效应。因此,先进高强度钢的塑性取决于钢中残余奥氏体的数量及其碳含量。目前

大力值、轧制力传感器及其控制  
(福建)莆田市力天量控有限公司  
Tel: 0594-2695245 2636151 2636152



大量生产应用的冷轧 DP 钢和 TRIP 钢,技术关键在连续退火工艺控制,尤其是冷却速度控制。

世界上已有 80 条连续退火线,我国有 22 条,年处理能力 1679 万 t,大都是 2000 年以后建设的,包括宝钢的 1550mm 机组、1800mm 机组、1700mm 机组、2030mm 机组,武钢的 2230mm 机组、1550mm 机组,鞍钢 2130mm 机组、本钢 1970mm 机组、马钢 2130mm 机组、邯钢 2230mm 机组、首钢(顺义)2000mm 机组、首钢京唐 1700mm 和 2230mm 机组等。我国还将建设 10 条新的连续退火线,包括武钢防城港基地和宝钢湛江基地的 2030mm 机组、昆钢草埔基地、华菱钢铁、新余钢厂和安阳钢厂等。

2006 年以前,我国投产的连续退火线基本上引进日本的技术,而 2006 年以后投产的连续退火线主要引进欧洲的新技术,特别是比利时 Drever 公司和法国 Stein-Heurtey 公司的技术。连续退火在快速冷却方面的技术主要有: NKK 独特的组合冷却系统(辊冷+对侧与后部喷气冷却)、新日铁 NSC 的高速循环喷气冷却技术 H-GJC、法国 Stein-Heurtey 公司的高氢气体快速冷却(Flash Cooling)技术、比利时 Drever 公司的高氢气体超快冷技术(Ultra Fast Cooling System)等。

连续退火机组的最大冷却速度决定了产品的强度级别范围。近年来采用高氢气体快速冷却技术,使连续退火机组的最大冷却速度显著提高,从原来低氢气体( $\varphi(\text{H}_2)=5\%$ 、 $\varphi(\text{N}_2)=95\%$ )的  $40^\circ\text{C}/\text{s}$  以内提高到现在高氢气体( $\varphi(\text{H}_2)=30\%\sim 40\%$ 、 $\varphi(\text{N}_2)=70\%\sim 60\%$ )的  $60\sim 70^\circ\text{C}/\text{s}$  以上。产品从普通强度(TS270)深冲级 IF 钢系列拓展到 DP 钢、TRIP 钢等先进高强度钢系列(TS600~TS1000)。

#### 4.3 高强度热镀锌汽车板

在连续热镀锌生产线 CGL 上,尽管连续退火段内采用还原性的氢氮混合保护气氛( $\varphi(\text{H}_2)=5\%$ 、 $\varphi(\text{N}_2)=95\%$ )以保护带钢表面不被氧化,但是 AHSS 钢仍然会与退火炉气氛发生反应,而且随后只有 Fe 元素能够被还原。由于选择氧化的作用,在热浸镀之前合金元素会在钢带表面富集并氧化,导致热镀锌板在锌液润湿、锌层粘附和裸露点等方面的质量问题。特别是对于 SiMn 系合金化的 TRIP 钢,在双相区加热时露点温度对带钢表面化学成分的影响,以及选择氧化对锌液润

湿的影响,使得先进高强度钢的热镀锌工艺成为国内外新的研究开发聚焦点。

为解决先进高强度钢板的热镀锌问题,近几年采取的主要工艺措施有<sup>[26]</sup>:

(1)预涂镀 FeNi 合金层:采用高成本的电化学沉积法预镀 FeNi 合金,以阻止带钢表面在双相区退火过程中合金元素的富集与选择氧化。

(2)控制连退炉露点温度:通过促进内部氧化,改变带钢表面化学成分,从而改善 AHSS 钢表面质量。但是这种改善是非常有限的,因为在较高的露点温度下,带钢的表面脱碳会显著增强;同时,对于含 Si 的 AHSS 钢,由于 Si 与氧的高亲和力,这种表面层内的氧化反应受到了限制。

(3)预氧化—还原处理:对热镀锌(GI)和热镀锌铁合金(GA)的 AHSS 钢,首先使带钢表面生成非常薄的氧化铁膜,并在连续退火炉的还原气氛中使之还原,从而改变带钢表面的反应过程并显著改善带钢的表面质量。

相比之下,第 3 种方法比较有效而且成本较低。因此,可以在采用辐射管炉 RTF 加热的热镀锌线上配置预氧化室,使先进高强度钢 AHSS 在连续热镀锌过程中进行预氧化还原处理。在这种预氧化室内,可以非常精确地调节预氧化程度。目前,在新建的连续热镀锌线内,已经配备了这种预氧化还原技术,而对于现有的连续热镀锌线,也可以移植预氧化还原技术。如果采用预氧化还原处理与露点控制相结合的方法,可以获得最为优良的镀层表面质量。

#### 5 短流程—冷连轧—罩式退火生产线的汽车板开发

我国已经建成薄板坯连铸连轧生产线 15 条,总设计产能 3500 万 t,其中引进德国 SMS-Demag 技术的 CSP 生产线 7 条,采用意大利 TSFR 技术的生产线 4 条,采用鞍钢自主开发的中薄板坯连铸连轧技术的 ASP 生产线 4 条。对引进的 CSP、FTSR 生产线,绝大部分厂家建设了冷连轧和罩式退火生产线,短流程机组生产的热轧带卷 70% 以上作为冷轧原料。

在我国汽车制造业对汽车板需求大幅度增长的形势下,可在已有的短流程 CSP(或 FTSR)—冷连轧机组 TCM—罩退 BA 生产线上,充分利用薄板坯热送热装和热轧的工艺特点与优势,开发

汽车结构用深冲级冷轧板。薄板坯在 900℃ 左右高温下直接进入隧道式加热炉,在钢中 AlN 未充分析出的有利条件下进行热轧,冷轧后采用罩式退火工艺,利用 AlN 在升温过程中的析出获得较强的{111}//RP 织构,钢板可获得较高的  $r$  值和良好的深冲性能。

钢铁研究总院在与马钢合作过程中,对低碳钢短流程生产工艺进行了优化,使冷轧退火板不仅获得所需的铁素体组织和晶粒尺寸,而且使{111}//RP 织构的强度提高到 ODF14 级,钢板  $r_{90^\circ}=2.5\sim 2.7$ ,而  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  3 个方向  $r$  值的平均值提高到  $r_m=2.00\sim 2.08$  [27]。酒钢通过自主工艺开发,在短流程 CSP-CR-BA 工艺线上批量生产出高深冲性能的 DC04 冷轧板,其  $r_{90^\circ}=2.6$ ,  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  3 个方向  $r$  值的平均值达到  $r_m=2.16$ 。可见,短流程 CSP-TCM-BA 工艺线具有生产高深冲性能冷轧板的工艺优势和技术条件。

同时,美国塞维斯塔公司 (Severstal Nroth America, SNA) CSP-TCM-BA 生产线的经验也值得借鉴。该公司与德国西马克公司合作于 2007 年建成年产 270 万 t 的 CSP 机组,并配备了年产 180 万 t 的冷连轧机组和年产 80 万 t 的热镀锌线,连铸坯宽度达到 1880mm,热轧和冷轧带卷宽度可达 1900mm。所生产的 IF 钢、低碳钢、含硼钢和微合金钢等汽车板被美国通用 GM、福特 Ford 和克莱斯勒 Chrysler,德国宝马 BMW、奔驰 Mercedes,日本丰田、本田和尼桑等十几家汽车制造厂家采用。

## 6 深加工技术的新发展—热冲压成形 [28]

热冲压成形工艺的主要特点是采用含硼低合金钢板,在奥氏体区 (900~950℃) 进行热成形后随即进行淬火硬化处理,获得具有良好尺寸形状精度和抗拉强度 (1300~2000MPa) 的超高强度钢构件。由于在奥氏体区进行热变形,钢板可以在很低的流变应力和冲压载荷下成形,获得形状十分复杂和几何精度很高的构件,而且没有回弹。这是汽车厂家制造新一代节能、环保、安全、舒适的超轻钢汽车所迫切需要的构件。

热冲压成形生产线由钢板剪切机、加热炉、热冲压模、淬火冷却系统、构件精整等设备组成,见图 7。热冲压成形前钢板的加热和保温时间为 8min 左右,冲压周期为 20~30s,每组可同时成形 2 件以上多块钢板构件。

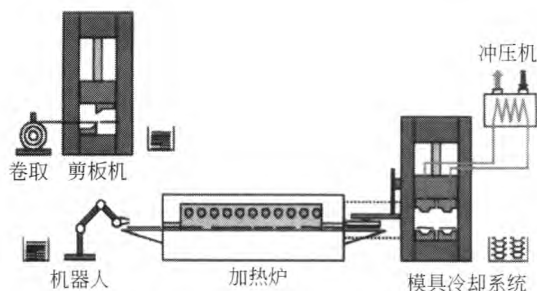


图 7 热冲压成形生产线示意图 [1]

Fig. 7 Schematic diagram of hot stamping production line

热冲压成形工艺的优点是可以在很低的冲压载荷条件下,获得具有超高强度的高几何精度构件。这种超高强度构件具有优异的抗冲撞性能,可用于车身结构中的 A 柱、B 柱、前后保险杠、门板加强肋、门槛、车顶纵梁、侧冲击梁、隧道形底板等承载结构件和抗冲撞构件。

瑞典 Plannja 公司成功研究开发了热冲压成形技术,并于 1977 年申请了专利。1984 年瑞典萨博汽车制造厂在其 SAAB9000 车型中使用了含硼钢的热成形构件。1987 年世界热冲压成形构件产量达到 300 万件,1997 年增加到 800 万件。2000 年法国阿塞洛公司开发出高强度热冲压构件 Usibor1500,其抗拉强度达到 1500MPa。此后热冲压成形技术迅速推广,热成形构件产量迅速增长。2007 年全球热成形构件产量超过 1 亿件,2013 年全世界已有 159 条热成形机组,大部分集中在欧洲和北美,而热冲压构件产量已达到 4.5 亿件。

德国大众 2008 版帕萨特车型的白车身中,热成形构件的重量已占白车身总重的 19%。美国福特公司 2010 年版福克斯车型中,热成形构件占白车身重量的 26%。瑞典沃尔沃公司预计热成形构件在其成型白车身中的饱和极限重量比将达到 45%。

热冲压生产线设备的制造商主要有德国 SCHULER、瑞典 AP&T 和德国 NEFF 公司等。德国大众汽车公司建起了 6 条热冲压成形生产线,在新车型中大量采用热冲压构件。我国长春 BENTLER、昆山 GESTAMP、上海 BENTLER、上海 COSMA 和上海宝钢热冲压零部件有限公司建有热冲压生产线;武钢研究院建有一条热冲压成形试验生产线。预计我国的热冲压成形生产

大力值、轧制力传感器及其控制  
(福建)莆田市力天量控有限公司  
Tel:0594-2695245 2636151 2636152

线将在近期内得到迅速发展。

为预报和调节热成形构件的性能,各国正在深入研究和优化热成形过程中各环节的工艺参数,并了解和控制其相互影响,尤其是热成形过程中的加热、成形、淬火等工艺参数对钢板奥氏体化、抗高温氧化镀层内 Fe 原子扩散、奥氏体热变形、奥氏体—马氏体转变以及构件成品显微组织和力学性能的影响。

通过对先进高强度钢强塑化机理分析,可以看到,目前的热冲压成形技术存在着进一步与淬火—碳分配—回火处理 Q-P-T 工艺相结合的可能性,使热成形构件获得马氏体+残余奥氏体组织和更高的强塑性与抗冲撞性能。为此,需要采用新型 QPT 钢成分设计,在热冲压成形淬火(Hot Press Forming)后,随即进行碳分配—回火处理(Q-P-T Treatment)。这种新型的热成形淬火+碳分配回火 HFQPT 处理工艺,需要在现有热冲压成形机组的基础上,开发和添加新的碳分配—回火处理炉,以生产具有更高强塑性和抗冲撞能力的热成形淬火+碳分配回火处理 HFQPT 钢板。

我国汽车板生产技术和产品开发面临着国内外激烈的市场竞争和技术挑战,尤其是在汽车板产品的系列化和均质化、深加工(Deep Working)与先期介入(Early Vendor Involvement)、新技术新产品的原创发明这3个方面。近期内通过先进高强度钢和热冲压成形技术的开发,我国高强度汽车板构件的比例将提高到50%~60%以上,为新一代节能、环保、安全、舒适的汽车提供材料技术支撑。

#### 参考文献:

- [1] 马鸣图. 先进汽车用钢[M]. 北京:化学工业出版社,2008.
- [2] 马鸣图,易红亮,路洪洲,等. 论汽车轻量化[J]. 中国工程科学,2009,11(9):20.
- [3] 马鸣图,陈一龙,惠荣,等. 特钢在新型汽车领域中的应用研究[M]// 翁宇庆,陈蕴博,刘玠,等. 特钢在先进装备制造应用中的战略研究. 北京:冶金工业出版社,2012:72.
- [4] Ma Ming-tu, Yi Hong-liang. Lightweight car body and application of high strength steels[M]// Weng Yuqing, Dong Han, Gan Yong. Advanced steels. [出版地不详]:Springer and Metallurgical Industry Press, 2011:187.
- [5] 王利,陆匠心. 汽车轻量化及其材料经济选用[J]. 汽车工艺与材料,2013(1):1.
- [6] 许健勇,杨春平. 发展壮大中的宝钢分公司冷轧带钢事业[J]. 宝钢技术,2008(4):1.
- [7] 王利,陆匠心. 宝钢高强度汽车板技术进展[J]. 宝钢技术,2009(增刊):36.
- [8] 袁媛,易凡. 宝钢 2030mm 新增连续退火机组设计简述[J]. 甘肃冶金,2011,33(4):3.
- [9] 王晓东,王利,戎咏华. TRIP 钢研究的现状与发展[J]. 热处理,2008,23(6):8.
- [10] 欧阳金明,胡吟萍. 武钢冷轧厂技术改造介绍[J]. 轧钢,2005,22(4):39.
- [11] 宫贵良,王聪,贾生晖,等. 武钢冷轧厂生产技术进步[J]. 宝钢技术,2009,47(1):20.
- [12] 潘利波. 武钢汽车用钢研发与应用[Z]. 武汉:武汉钢铁集团公司研究院汽车用钢所,2013.
- [13] 王衍平,蔡恒君,刘仁东,等. 鞍钢高品质汽车板的研制开发[J]. 鞍钢技术,2010(2):8.
- [14] 蔡恒君,王衍平,王越. 鞍钢 TRIP 钢的研制开发[J]. 鞍钢技术,2010(4):35.
- [15] 王旭,刘仁东,王科强,等. 鞍钢高强度超细晶 IF 冷轧汽车板的研制[J]. 鞍钢技术,2013(4):24.
- [16] 时晓光,董毅,韩斌,等. 热成形工艺参数对 AC 1500HS 钢板性能的影响[J]. 鞍钢技术,2013(5):24.
- [17] 李光瀛,周积智. 高等级汽车板的开发与应用[J]. 钢铁研究学报,2012,24(增刊1):1.
- [18] Harald Peters, Thomas Heckenthaler, Norbert Holzknicht. Optimization of flat product quality by intelligent data exploration[C]// Proc. 3rd European Rolling Conference. Düsseldorf:[出版者不详],2003.
- [19] Zhang Li-feng, Thomas Brian G. State of the art in evaluation and control of steel cleanliness[J]. ISIJ International, 2003, 43(3):271.
- [20] 王新华. 高品质冷轧薄板钢中非金属夹杂物控制技术[J]. 钢铁,2013,48(9):1.
- [21] 胡宽辉,田德新,许竹桃,等. 冷轧深冲汽车板表面夹杂缺陷的研究[J]. 热加工工艺,2012,41(5):180.
- [22] Speer John G, Rizzo Fernando C, Matlock David K, et al. The quenching and partitioning' process: background and recent progress[J]. Materials Research, 2005, 8(4):417.
- [23] 徐祖耀. 钢热处理的新工艺[J]. 热处理,2007,22(1):1.
- [24] 徐祖耀. 淬火—碳分配—回火(Q-P-T)工艺浅介[J]. 金属热处理,2009,34(6):1.
- [25] 董瀚,曹文全,时捷,等. 第3代汽车钢的组织与性能调控技术[J]. 钢铁,2011,46(6):1.
- [26] Martin Norden, Marc Blumenau, Rudolf Schenberger. Recent trends in hot-dip galvanizing of advanced high-strength steel at ThyssenKrupp steel Europe[J]. Iron & Steel Technology, 2013(2):67.
- [27] Li Guang-ying, Liu Liu, He Chong-zhi, et al. Process-property-texture of cold-rolled deep-drawing sheet-steel produced on csp-tandem cold mill line[J]. Iron & Steel, 2006, 41(S1):222.
- [28] 李光瀛,唐荻,王先进. 汽车板深加工技术的发展[J]. 轧钢,2013,30(1):1.