

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20180284

先进高强度汽车钢的发展趋势与挑战

王存宇¹, 杨 洁², 常 颖³, 曹文全¹, 董 瀚^{1,4}

(1. 钢铁研究总院特殊钢研究所, 北京 100081; 2. 中国汽车工程学会汽车轻量化技术创新战略联盟, 北京 100055; 3. 大连理工大学汽车工程学院, 辽宁 大连 116024; 4. 上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444)

摘 要: 高强钢在汽车轻量化、节能减排、成本方面具有一定的优势与潜力, 目前, 仍是汽车的主要材料。高强钢的使用比例逐年增加, 并且向更高强度方向发展, 生产方式呈现出钢板“以热代冷”、零件成形“以冷代热”的低成本发展趋势, 依靠亚稳奥氏体增强、增塑的第三代汽车钢成为先进高强钢的重要发展方向, 然而, 先进高强钢的发展给材料、工艺、装备等带来了新的挑战。

关键词: 汽车钢; 高强度; 塑性; 轻量化

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2019)02-0001-06

Development trend and challenge of advanced high strength automobile steels

WANG Cun-yu¹, YANG Jie², CHANG Ying³, CAO Wen-quan¹, DONG Han^{1,4}

(1. Institute for Special Steels, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China; 2. China Auto Lightweight Technology Innovation Strategic Alliance, Society of Automotive Engineers of China, Beijing 100055, China; 3. School of Automotive Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China; 4. School of Material Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: High strength steel is still the main material of automobiles, and has certain advantages and potentials in light weight, energy saving, emission reduction and cost for automobiles. The use ratio of high strength steel increases year by year and develops towards higher strength. Lower cost are important developing trend, the low cost production modes mainly reflected in hot rolling instead of cold rolling to produce sheet steel, and cold forming instead of hot stamping to produce ultra-high strength automobile parts, and so on. The third generation automobile steel, which relies on the meta-stable austenite enhancing strength and ductility, has become important development trends of advanced high strength steel. The development of advanced automobile steels bring new challenges to the material science, processing and equipment.

Key words: automobile steel; high strengthen; plasticity; light weight

1 汽车多材料的竞争发展

汽车由钢、铝、镁、铜、塑料、橡胶等多种材料组成^[1], 钢铁一直是汽车的主要材料之一, 广泛应用于车身、动力与传动、底盘等总成或系统中。近年来, 为了提高汽车燃油经济性, 越来越多可以减轻汽车质量的材料得到应用, 如用高强钢代替低强钢, 用低密度的铝合金、镁合金或塑料等代替钢等。文献[2]对 1995—2014 年美国轻型车辆材料平均使用质量统计结果如图 1 所示, 可以看出, 钢铁材料质量为 930~1 030 kg/车, 占汽车质量的 53.3%~55.9%, 虽然在 2007 年以后整车质量不再升高, 普通低强度

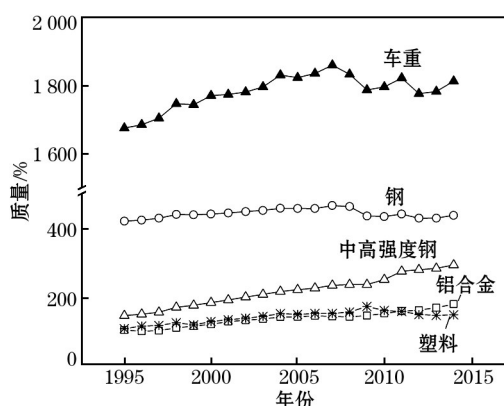


图 1 美国轻型车辆材料平均使用质量
Fig. 1 Average weight of different materials in light vehicle in USA

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51571048); 国家重点研发计划专项资助项目(2017YFB0304401, 2016YFB0101605)

作者简介: 王存宇(1979—), 男, 博士, 高级工程师; **E-mail:** wangcunyu@nercast.com; **收稿日期:** 2018-07-12

钢的应用比例降低,但高强度和中等强度钢以及铝合金、塑料等轻质材料的应用比例逐年增加。

2016年,中国乘用车产量为2 442.07万辆,平均整车质量为1 385 kg,各种材料的消耗量如图2所示,共消耗钢铁材料3 411.7万t,占乘用车用材的61.53%,在汽车用钢中,板材的比例约为52%,主要用于生产车身体、底盘件和覆盖件等。可见钢铁材料尤其是钢板仍是中国汽车主体材料,钢的使用比例高于美国2007年轻型车辆水平。

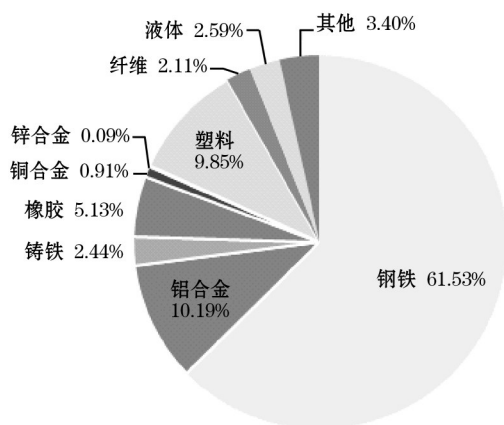


图2 2016年中国乘用车用材比例

Fig. 2 Percentage of different materials in passenger car in China

车辆的排放应从材料生产到车辆回收的全生命周期评估。研究表明,铝合金、镁合金、碳纤维等轻质材料全生命周期的 CO_2 等效排放量远大于钢铁材料^[3],在材料生产过程中排放为钢的5~20倍。在钢材生产过程中,80%以上的排放发生在铁前阶段,因此从全生命周期减少排放角度来讲,提高高强钢比例、减少钢材使用量是减少排放的最有效方法。文献[4]指出,当钢的抗拉强度水平分别超过900和300 MPa时,其比强度(强度与密度的比值)和比刚度(弹性模量与密度比值)都大于镁合金和铝合金。另外,钢的材料、加工及回收成本都远低于铝合金、镁合金、碳纤维等轻质材料。可见钢铁材料在汽车轻量化、全生命周期的节能减排、成本方面仍具有一定的优势与潜力。

轻量化和高安全性是汽车工业发展的重要方向。自20世纪90年代至今,国内外开展了多个汽车轻量化项目,如美国新一代汽车合作伙伴计划(PNGV)、欧盟超轻汽车计划(SLC)、国际钢铁协会组织开展的“超轻钢”(Ultralight Steel)系列研究项目、超轻钢车身项目(ULSAB)、超轻钢覆盖件(ULSAC)、超轻钢悬架(ULSAS)、超轻钢车身——

先进的汽车概念计划(ULSAB-AVC)、未来钢制汽车(FSV)项目、安赛乐米塔尔公司的S-in motion项目、蒂森克虏伯集团的新型轻量化汽车项目(InCar plus)、宝钢的超轻车身项目(BCB)等^[5]。这些项目主要从高强度材料、结构设计和先进制造等几个方面解决汽车轻量化及安全性的需求,在材料方面可以总结出以下特点:(1)材料的强度水平不断提高;(2)突出了先进高强钢、铝合金、镁合金、碳纤维等多种汽车轻量化材料配合使用的发展趋势。中国在《节能与新能源汽车路线图》中也明确指出,通过发展多材料车身,在2025年将实现比2015年整车减重20%以上的目标^[6]。

2 先进高强度汽车钢的发展趋势

先进高强钢(AHSS)通常指强度在500 MPa以上同时具有较好塑性的汽车钢,如双相钢(DP)、相变诱导塑性钢(TRIP)、马氏体钢(MS)、复相钢(CP)、热成形钢(HPF)和孪晶诱导塑性钢(TWIP),以及淬火配分钢(Q&P)、中锰钢(MMnS)等,先进高强钢及高效成形技术^[7-11]已经广泛应用于汽车工业,主要应用于汽车结构件、安全件和加强件,如A/B/C柱、车门槛、前后保险杠、车门防撞梁、横梁、纵梁、座椅滑轨等。

2.1 高强度化趋势

随着钢铁工业的发展,先进汽车钢的生产和应用强度级别不断提高。目前,汽车用先进高强钢的主流应用品种、强度级别和可商业供货的最高强度见表1。其中,DP钢是白车身用钢量最大的钢种。目前,1 200 MPa级以下的钢质汽车零部件主要使用冷成形方式生产,而1 500 MPa级以上通常采用热成形的加工方式。高强钢的生产能力及技术储备为汽车轻量化提供了更多的潜力。

表1 先进高强钢的生产及使用情况

Table 1 Production and use of advanced high strength steel

钢种	主流应用强度 级别/MPa	可供货最高强度 级别/MPa	成形方式
DP钢	590、780	1 180	冲压、辊压
CP钢	980	1 180	冲压、辊压
MS钢	1 180	1 700	辊压
HPF钢	1 500	2 000	热冲压

在先进汽车钢应用方面,以长城哈弗汽车高强钢使用情况来看(表2),高强度汽车钢、热成形钢的使用比例逐年增加,到2017年,高强钢比例达到

68%, 600 MPa 级以上钢板使用比例占 35%, 热成形钢比例达到 11%, 高强钢的使用提高了轻量化水平和汽车碰撞安全性。

表 2 长城汽车先进高强钢使用情况
Table 2 Use of advanced high strength steels in
Great Wall automobile

项目	2011 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
车型	H6	H2	H6COUPE	H7	CHB071
高强钢比例/%	53	62	65	70	68
600 MPa 级及 以上钢板比例/%	22	26	26	31	35
1 500 MPa 级热成形 钢比例/%	0	5	7	13	11

中国自主品牌汽车与合资品牌在强度级别和品质方面存在差距。宝武集团统计数据表明,强度级别不低于 780 MPa 的汽车钢中,自主品牌与合资品牌汽车消费所占比例为 24%和 76%,合资品牌汽车中 980 MPa 级和 780 MPa 级汽车钢比例为 48%和 52%,而自主品牌汽车相应的比例为 27%和 73%;另外,合资品牌汽车镀锌板和冷轧板的比例为 44%和 56%,自主品牌汽车相应的比例为 12%和 88%。可见,相对于合资品牌,自主品牌汽车的高强钢使用比例、强度级别和镀锌板使用比例相对较低,仍有较大的发展空间。

为实现汽车轻量化,很多国家都制定了汽车轻量化技术路线,发展超高强度钢及先进成形工艺成为主要发展趋势^[8]。如美国提出 2025 年和 2030 年分别完成 1 500~2 000 MPa 和 2 500~3 000 MPa 级低密度高模量汽车钢的开发,日本着重发展高延性钢、高冲压性能钢板及冲压技术,英国提出了通过超高强度钢、液压成形、热成形实现汽车小幅轻量化的目标,中国也提出了发展超高强度第三代汽车钢及应用 2 000 MPa 超高强度钢的发展目标。未来,汽车钢的发展和使用将朝更高强度发展。

从汽车厂角度来讲,除了需要加大超高强度钢的应用比例以适应车身轻量化及高安全性的发展要求,材料还要具有优异的加工性和连接性,以及多材料匹配应用的特性,满足性能要求情况下应具备高性价比,可实现材料及部件的低能耗生产及回收,实现全生命周期绿色供应链体系。

2.2 低成本化趋势

汽车钢属于量大面广品种,满足性能要求情况

下具备高性价比是汽车用钢的重要指标,因此,低成本化(包括原材料成本和零部件制造成本)是汽车钢主要发展趋势之一。

为了保证良好的焊接性和低成本,汽车结构件和安全件用钢板通常使用低碳微合金化钢制造,主要采用组织调控、形变相变相结合工艺流程实现高性能化,而不建议加入高合金来保证性能,热处理方面通常采用生产效率较高及一致性较好的连续式退火。

在钢板生产流程方面,汽车板目前常使用长流程工艺生产,即冶炼→连铸→热轧(→退火)→冷轧→退火等,随着流程和装备技术的进步,先进高强钢板的生产向低成本流程的“以热代冷”的方向发展,即冶炼→薄板坯连铸→热轧→退火,节省的冷轧工序,吨钢工艺成本可节约 700 元以上。薄板坯连铸连轧(CSP)技术起初是为了减少投资和成本,主要生产中低档次的热轧产品,近年来,在深入理解冶金流程和工艺特征的基础上,不仅能生产深冲钢、结构钢、低合金高强度钢、IF 钢等,还可以生产出屈服强度 700 MPa 级的超高强度钢^[12]。无头轧制技术(ESP)将是薄板坯连铸连轧的发展趋势,大量的理论研究和生产实践表明,薄板坯连铸连轧将代替冷轧生产高质量、薄规格钢板。薄带连铸技术生产带钢将连铸和热轧相融合^[13],在汽车钢低能耗、短流程、高效率、低成本的生产方面具有更加明显的优势。

在汽车零件成形方面,“以冷代热”、“以温代热”成为零部件低成本生产趋势。由于钢板成型能力和加工能力的限制,强度水平较高的零部件通过冷冲压的方式较难生产,热冲压成形通过对完全奥氏体化的钢板进行冲压,零件成形的同时完成淬火,获得具有超高强度的力学性能,解决了超高强度钢零部件成形的问题,如 1 500 MPa 级热成形零件已广泛应用于汽车制造,但是热成形不仅带来表面质量下降,还显著提高零部件制造成本。与欧洲不同,日本通过调整材料、工艺与结构设计的匹配,着力发展高延性钢及冷成形技术,2015 年日本汽车展展出了三维辊压的 1 500 MPa 级冷成形 B 柱,实现“以冷代热”提高生产效率降低生产成本。钢铁研究总院发展 1 500 MPa 超高强度汽车零部件的温成形技术^[14],基于中锰钢将加热温度相对于热成形钢降低 150 ℃,不仅节约能源还提高零件表面质量,同时零件的塑性提高 30%以上,利用温成形技术还制造出了热成形无法实现的超大超薄汽车零件^[15],基于材料创新发展了“以温代热”的超高强度零件

生产技术。

2.3 依靠亚稳奥氏体增强增塑的发展趋势

利用亚稳奥氏体在变形过程中的相变增强增塑成为先进高强度汽车钢的重要方向。为了解决汽车钢随着强度提高而塑性降低的问题,美国首先提出了发展高强度、高塑性第三代汽车钢的概念^[16]以及第三代汽车钢的 Q&P 工艺发展思路^[17]。董瀚教授在国家 973 项目中提出了 M³(多相、亚稳、多尺度)组织调控理论与技术^[18],明确了亚稳奥氏体体积分数与强塑积对应关系^[19],深入研究了利用 Q&P 钢正相变^[20-21]、中锰钢逆相变^[22]组织调控获得大量亚稳奥氏体组织的工艺与原理,以及亚稳奥氏体变形过程中增强增塑机理^[23-24]。目前,Q&P 钢和中锰钢是第三代汽车钢的两个主要发展路线^[25]。Q&P 工艺利用不完全淬火及控制间隙原子碳配分,最终获得马氏体基体上分布一定量残留奥氏体的组织;中锰钢利用逆相变退火过程中间隙锰原子的配分控制在超细铁素体基体上获得一定量的亚稳奥氏体,两种思路的不同点在于基础钢化学成分和工艺路线的差异,其共同点都是获得一定比例的亚稳奥氏体,利用亚稳奥氏体在变形过程中的 TRIP 效应增强增塑。在第三代汽车钢的工业生产方面,中国走在世界前列,分别最早于 2010 年和 2013 年实现中锰钢和 Q&P 钢的工业生产,两类钢目前都处于推广应用初步阶段^[26]。

3 汽车钢面临的挑战与展望

高强度化给材料科学本身带来挑战。高强度化是汽车钢发展的必然趋势,然而钢的韧塑性随着强度水平的提高而降低,强度提高到一定程度会产生延迟断裂现象和抗疲劳性能的下降^[27-28],当抗拉强度超过 1 200 MPa 时,零件在使用过程中将会发生延迟断裂;抗拉强度超过 1 400 MPa 时,疲劳破坏敏感,限制高强度钢的发展和应用^[29],如何提高高强度钢的韧塑性以及使役性能是汽车钢面临的重要科学问题。如前所述,第三代汽车钢利用亚稳奥氏体增强增塑,相比于第一代汽车钢在强塑性方面得到了明显提高^[30]。但是含亚稳奥氏体多相组织钢在单轴拉伸载荷、循环载荷以及氢环境下变形和断裂的现象与机理,以及在 M³组织中的裂纹启裂与扩展规律、微观组织与力学性能间的定量描述等尚需要进行深入研究,理解强度与韧塑性的本源才是提高材料性能的关键。2017 年,国家启动“十三五”重点研发计划项目“高性能超高强汽车用钢的开发与应用

(2017YFB0304400)”,提出了探究含亚稳奥氏体多相组织钢变形与断裂机理的关键科学问题,并在此基础上开发出抗拉强度为 1 000~1 500 MPa、强塑积分别达到 20 和 30 GPa·% 以上的新一代汽车钢,项目从成分设计、组织调控原理、工业生产、零部件的先进成形、使役性能评价等几个方面,围绕超高强度高塑性汽车钢的研发和应用开展工作,利用大量亚稳奥氏体增强增塑,并实现工业生产和应用。

钢铁材料和装备技术的发展,为汽车钢和零部件的生产方式提供了更多选择。由表 1 可知,不同先进高强钢的力学性能范围交叉,为零部件的选材提供了多种选择。在成形方式方面,抗拉强度为 1 000~2 000 MPa 的零件可选用热成形,而在 1 300 MPa 以下通常选择冷成形工艺,热成形解决了超高强度钢成形问题,使零件在获得 1 500 MPa 级以上抗拉强度时仍具有较高的尺寸精度,但是热成形生产效率较低、表面质量差、成本较高;而冷成形具有较高的生产效率和较低的加工成本,而随着强度水平的提高,回弹成为高强度钢应用的关键技术瓶颈,回弹的大小与材料的屈服强度 $R_{p0.2}$ 呈正比,与弹性模量 E 呈反比,即 $R_{p0.2}/E$ 越大,回弹越大,就高强度钢来说,弹性模量差异不大,随着初始屈服强度增大,回弹呈现增加趋势。从成形工艺角度来讲,高强度汽车钢需要加强对回弹精准预测与补偿的研究,尤其是含有一定比例亚稳奥氏体的超高强第三代汽车钢,成形过程中的相变行为对回弹的影响也非常值得关注。汽车钢的短流程生产节约工艺成本,但是目前大多数短流程产线仅适用于生产抗拉强度不超过 700 MPa 的高强钢,而更高强度的钢板需要进一步提高产线生产能力。由于汽车属于量大面广的产业,因此,针对不同流程、材料、成形工艺等选择时,满足使用要求情况下的低成本技术往往受到汽车厂的青睐。

多材料化与减少钢种数量的平衡。汽车由多材料构成,尤其在近年来铝、镁、塑料、复合材料等轻质材料迅速发展的推动下,轻质材料越来越多地应用在汽车中,通过多材料车身实现车辆轻量化和高安全性是重要的发展趋势。车身多材料化与减少材料品种数量成为矛盾,汽车车身制造中,为了满足结构设计的需求,平台化管控大概需要 120 种钢的牌号与厚度组合,给材料连接、结构优化设计、性能匹配等提出了挑战。通过钢的微观组织调控实现多种力学性能从而减少材料品种数量,不仅可以减少材料异质连接的数量、减少钢厂和汽车厂的

材料管理,还能降低材料和车身的制造成本。作者对中锰钢的研究表明,通过不同工艺的组织调控,可用同一种钢实现不同强度与塑性水平的配合,抗拉强度覆盖 650~1 500 MPa,其中 650 MPa 级、750 MPa 级、980 MPa 级和 1 180 MPa 级可用于冷冲压及辊压成形,1 500 MPa 级可通过温成形工艺实现^[26]。中锰钢通过组织调控实现多种力学性能可为减少钢种数量提供参考(图 3)。

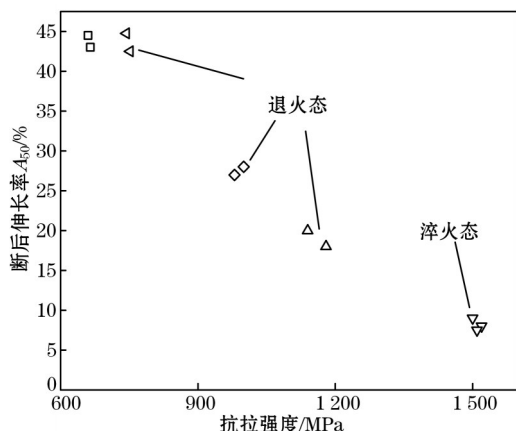


图 3 中锰钢(0.1C-5Mn)的力学性能

Fig. 3 Mechanical properties of medium manganese steel with chemical composition of 0.1C-5Mn

4 结语

先进超高强度汽车钢呈现高强度化和低成本化的发展趋势,出现了钢板“以热代冷”和零件“以冷代热”的生产方式变革,依靠大量亚稳奥氏体的相变行为增强增塑的第三代汽车钢成为新的发展方向。多材料车身的大趋势下,先进超高强度汽车钢不仅需要解决自身在成形过程中面临的回弹、剪切边裂纹敏感性问题,还需要兼顾与其他材料的连接和结构性能匹配,给材料学科、零部件设计制造、装备、工艺等都带来新的挑战。

参考文献:

- [1] 中国汽车工程学会,中国汽车轻量化技术创新战略联盟,中国第一汽车股份有限公司技术中心. 中国汽车轻量化发展战略与途径[M]. 北京:北京理工大学出版社,2015.(Society of Automotive Engineers of China, China Auto Lightweight Technology Innovation Strategic Alliance, Research Center of FAW Group Co., Ltd. Development Strategy and Approach of China Automobile Lightweight[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2015.)
- [2] Stacy C D, Susan E W, Robert G B, et al. 2016 Vehicle Technologies Market Report[R]. Washington D C: OAK Ridge National Laboratory, 2017.
- [3] Keeler S, Kimchi M. Advanced High-Strength Steels Application Guidelines V5[M]. Brussels: World Auto Steel, 2015.
- [4] 韩维建,张瑞杰,郑江. 汽车材料及轻量化趋势[M]. 北京:机械工业出版社,2017.(HAN Wei-jian, ZHANG Rui-jie, ZHENG Jiang. Automotive Materials and Lightweight Trend[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2017.)
- [5] 陈鹰. 轻量化评估方法研究与高性能汽车钢冲压件技术开发[D]. 北京:钢铁研究总院,2017.(CHEN Ying. Study of High Strength Auto-Steel Sheets and Stamping Parts Based on Lightweight Evaluation[D]. Beijing: Central Iron and Steel Research Institute, 2017.)
- [6] 节能与新能源汽车技术路线图战略咨询委员会,中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图[M]. 北京:机械工业出版社,2016.(Strategic Advisory Committee of Energy Saving and New Energy Vehicle Technology Roadmap, Society of Automotive Engineers of China. Technology Roadmap of Energy Saving and New Energy Vehicle[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2016.)
- [7] 陈鹰,张英健,董瀚,等. 提高汽车安全性的先进高强钢高效成形技术[J]. 钢铁研究学报,2015,27(6):1.(CHEN Ying, ZHANG Ying-jian, DONG Han, et al. Efficient forming technology of advanced high strength steel for car crashworthiness improvement[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2015, 27(6):1.)
- [8] 康永林,朱国明. 中国汽车发展趋势及汽车用钢面临的机遇与挑战[J]. 钢铁,2014,49(12):1.(KANG Yong-lin, ZHU Guo-ming. Development trend of China's automobile industry and the opportunities and challenges of steels for automobiles[J]. Iron and Steel, 2014, 49(12):1.)
- [9] 李润昌,张环宇,夏银峰,等. 980 MPa 级双相钢边裂致断带原因分析[J]. 中国冶金,2018,28(9):37.(LI Run-chang, ZHANG Huan-yu, XIA Yin-feng, et al. Reasons analysis of edge cracks on 980 MPa level dual-phase steel strip leading to strip-break[J]. China Metallurgy, 2018, 28(9):37.)
- [10] 夏碧峰,杜振民,崔全法,等. 高强汽车大梁钢 S700L 性能预测模型分析[J]. 中国冶金,2018,28(8):38.(XIA Bi-feng, DU Zhen-min, CUI Quan-fa, et al. Analysis of performance prediction model of high strength automobile beam steel S700L[J]. China Metallurgy, 2018, 28(8):38.)
- [11] 孙力,刘天武,安会龙,等. 汽车热轧大梁钢分条后出现侧弯的原因分析[J]. 中国冶金,2018,28(1):49.(SUN Li, LIU Tian-wu, AN Hui-long, et al. Cause analysis on lateral bending of hot rolled steel strip for automobile beam after longitudinal cutting[J]. China Metallurgy, 2018, 28(1):49.)
- [12] 毛新平,高吉祥,柴毅忠. 中国薄板坯连铸连轧技术的发展[J]. 钢铁,2014,49(7):49.(MAO Xin-ping, GAO Ji-xiang, CHAI Yi-zhong. Development of thin slab casting and direct rolling process in China[J]. Iron and Steel, 2014, 49(7):49.)
- [13] 肖丽俊,岳尔斌,仇圣桃,等. 双辊薄带连铸生产取向硅钢的技术分析[J]. 钢铁研究学报,2009,21(8):1.(XIAO Li-jun, YUE Er-bin, QIU Sheng-tao, et al. Twin-roll strip casting process and grain oriented silicon steel production[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2009, 21(8):1.)

- [14] 钢铁研究总院. 高效率低能耗高质量的钢板温成形零件及其生产方法: 中国, ZL201110041545.3[P]. 2012-11-14. <http://www.soopat.com/Patent/201110041545?lx=FMSQ>. (Central Iron and Steel Research Institute. High Efficiency, Low Energy Consumption and High Quality Steel Plate Warm Forming Parts and its Production Method: China, ZL201110041545.3[P]. 2012-11-14. <http://www.soopat.com/Patent/201110041545?lx=FMSQ>.)
- [15] WANG Cun-yu, LI Xiao-dong, HAN Shuo, et al. Warm stamping technology of the medium manganese steel[J]. Steel Research International, 2018, 89: 1.
- [16] Kuvin B. Steelmaking and steels, getting better and better all the time[J]. Metalforming, 2008(2): 7.
- [17] Matlock D K, Bräutigam V E, Speer J G. Application of the quenching and partitioning (Q&P) process to a medium-carbon, high-Si microalloyed bar steel[J]. Materials Science Forum, 2003, 426-432(2): 1089.
- [18] 董瀚, 王毛球, 翁宇庆. 高性能钢的M³组织调控理论与技术[J]. 钢铁, 2010, 45(7): 1. (DONG Han, WANG Mao-qiu, WENG Yu-qing. Performance improvement of steels through M³ structure control[J]. Iron and Steel, 2010, 45(7): 1.)
- [19] 王存宇. 30 GPa%级超高强度马奥组织钢的研究[D]. 北京: 钢铁研究总院, 2010. (WANG Cun-yu. Investigation on 30 GPa% Grade Ultrahigh-Strength Martensitic-Austenitic Steels[D]. Beijing: Central Iron and Steel Research Institute, 2010.)
- [20] 王存宇, 时捷, 曹文全, 等. Q&P 工艺处理低碳CrNi3Si2MoV钢马氏体的研究[J]. 金属学报, 2011, 47(6): 720. (WANG Cun-yu, SHI Jie, CAO Wen-quan, et al. Study on the martensite in low carbon CrNi3Si2MoV steel treated by Q&P process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(6): 720.)
- [21] WANG C Y, SHI J, CAO W Q, et al. Microstructure characterization of low alloy martensitic steel processed by quenching and partitioning[J]. Materials Science and Engineering A, 2010(527): 3442.
- [22] CAO W Q, WANG C, SHI J, et al. Microstructure and mechanical properties of Fe-0.2C-5Mn steel processed by ART-annealing[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528: 6661.
- [23] SHI Jie, SUN Xin-jun, WANG Mao-qiu, et al. Enhanced work-hardening behavior and mechanical properties in ultrafine-grained steels with large-fractioned metastable austenite[J]. Scripta Materialia, 2010, 63: 815.
- [24] WANG Cun-yu, CHANG Ying, YANG Jie, et al. Work hardening behavior and stability of retained austenite for quenched and partitioned steels[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2016, 23(2): 130.
- [25] 韩志勇, 张明达, 徐海峰, 等. 高性能汽车钢组织性能特点及未来研发方向[J]. 钢铁, 2016, 51(2): 2. (HAN Zhi-yong, ZHANG Ming-da, XU Hai-feng, et al. Research and application of high performance automobile steel[J]. Iron and Steel, 2016, 51(2): 2.)
- [26] 王存宇, 曹文全, 董瀚. 中锰第三代汽车钢及其先进性[C]//第十一届中国钢铁年会论文集. 北京: 中国金属学会, 2017: 1648. (WANG Cun-yu, CAO Wen-quan, DONG Han. The third generation automobile steel of medium manganese and its advantages[C]//Proceedings of the 11th CSM Steel Congress. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2017: 1648.)
- [27] 祁豆豆, 林万明, 李双寿. 淬火-分配工艺对高强钢疲劳失效的影响[J]. 中国冶金, 2017, 27(6): 24. (QI Dou-dou, LIN Wan-ming, LI Shuang-shou. Effect of quenching-partitioning process on fatigue failure of high strength steel[J]. China Metallurgy, 2017, 27(6): 24.)
- [28] 郭晶, 杨天一, 赵广东. 汽车用钢DC53D+ZF的疲劳试验测试[J]. 中国冶金, 2017, 27(11): 57. (GUO Jing, YANG Tian-yi, ZHAO Guang-dong. Fatigue test of automotive steel DC53D+ZF[J]. China Metallurgy, 2017, 27(11): 57.)
- [29] 董瀚. 钢铁材料基础研究的评述[J]. 钢铁, 2008, 43(10): 1. (DONG Han. Overview on the fundamental study of steel products[J]. Iron and Steel, 2008, 43(10): 1.)
- [30] 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. (DONG Han, CAO Wen-quan, SHI Jie, et al. Microstructure and performance control technology of the 3rd generation auto sheet steels[J]. Iron and Steel, 2011, 46(6): 1.)