汽车底盘用高强度复相钢 HR680/800CP 的开发与应用

谭大庆[1], 周　莉[1], 贾国翔[2*], 曹晓恩[3], 文才君[4], 薛仁杰[3]

(1. 重庆工业职业技术学院机械工程与自动化学院, 重庆 401120; 2. 河钢集团邯钢公司邯宝炼钢厂, 河北 邯郸 056015; 3. 河钢集团邯钢公司技术中心, 河北 邯郸 056015; 4. 西安交通大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710049)

摘　要: 顺应汽车轻量化发展需求, 综合考虑汽车底盘结构件成型工艺特点, 采用低 C-Si-Mn-Nb-Ti-Mo 复合成分体系设计实现良好焊接性能、第二相析出强化效果及促进中温贝氏体相变。通过理论计算制定热轧控轧控冷工艺, 按照精轧终轧温度 890 ℃、卷取温度 570 ℃ 及前段 3/4 层流冷却模式, 实现奥氏体区轧制稳定性、主要发生贝氏体相变, 成功开发了铁素体/贝氏体为主、屈服强度 769 MPa、抗拉强度 840 MPa、延伸率 17.92%、扩孔率高达 110%、具有良好凸缘翻边和扩孔性能的高强度复相钢 HR680/800CP, 并成功应用于某车型底盘控制臂和新能源电池包支架。

关键词: 复相钢; 控轧控冷工艺; 贝氏体; 晶粒取向; 扩孔性能

中图分类号: TF76　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1004−7638(2023)04−0167−06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.04.024　　**开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID) :**

听语音 聊科研　与作者互动

Development and application of high strength complex phase steel HR680/800CP for automobile chassis

Tan Daqing[1], Zhou Li[1], Jia Guoxiang[2*], Cao Xiao'en[3], Wen Caijun[4], Xue Renjie[3]

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing 401120, China; 2. Hanbao Steel Plant, Han Steel Company, HBIS Group, Handan 056015, Hebei, China; 3. Technology Center, Han Steel Company, HBIS Group, Handan 056015, Hebei, China; 4. School of Material Science and Engineering , Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: Considering lightweight requirement and forming process characteristics of chassis structural parts, a complex alloying system of C-Si-Mn-Nb-Ti-Mo elements had been designed in order to achieve a better performance of weldability, second phase precipitation and bainite transformation at intermediate temperature. Based on theoretically calculation, a TMCP process where FET and CT are set at 890 ℃ and 570 ℃ and uses laminar cooling mode front 3/4, had been developed. During the TMCP process stable rolling steps were within austenite phase zone, and ferrite and bainite transformation occurred upon cooling period during and after laminar process. As a result HR680/800CP was produced which is featured with well flanging and hole expansion property. Microstructure mainly consists of Ferrite/Bainite, and mechanical properties reaches yield strength 769 MPa, tensile strength 840 MPa, elongation

收稿日期: 2022−11−17

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202103211)。

作者简介: 谭大庆, 1984 年出生, 男, 重庆永川人, 副教授, 主要从事高品质钢铁材料研发、精密模具设计与制造, E-mail: tandaqing1984@163.com;　*通讯作者: 贾国翔, 1987 年出生, 男, 河北邯郸人, 工程师, 硕士, 主要从事汽车板冶炼工艺研究, E-mail: 847902215@qq.com。

17.92%, hole expansion ratio up to 110%. This product has been successfully used for structure parts of chassis control arm and battery pack bracket in new energy automobile.

Key words: complex phase steel, controlled rolling and cooling process, bainite, misorientation of grain boundaries, hole expansion property

0 引言

面对国家双碳战略目标的提出，汽车工业节能减排势在必行，而汽车轻量化设计是实现双碳目标的重要举措[1-8]。作为汽车结构中占比较大的底盘零件，安全性能要求高且成型复杂，诸如摆臂类零件，需要开发具有更高强度、优异成形性能的酸洗高强钢产品，为轻量化设计奠定基础。复相钢（Complex Phase Steel）简称 CP 钢[9]，显微组织包括铁素体或贝氏体，基体上分布少量马氏体、残余奥氏体或珠光体。通过微合金元素细晶强化或析出强化，与同等抗拉强度的双相钢相比具有较高的屈服强度和良好的翻边扩孔性能，成为扩孔、凸缘、翻边类底盘零件的首选。保证高强度前提下组织类型控制是此类钢种的开发难点，目前国内仅有宝钢、首钢等少数企业具备高强度 CP 钢产品供货能力。

河钢集团邯钢公司作为国内重要的汽车家电板生产基地，顺应主机厂轻量化设计需求，立足产线装备能力，在 GB/T 20887.6-2017《汽车用高强度热连轧钢板及钢带 第 6 部分：复相钢》基础上，校企合作成功开发了酸洗复相钢 HR680/800CP，主要用于汽车底盘结构零件及新能源电池包支架材料领域。

1 成分设计

采用“260 t 顶底复吹转炉→LF+RH 双联精炼→板坯连铸→2 250 mm 热连轧→2 250 mm 平整机组→1 650 mm 推拉式酸洗”的工艺流程在邯钢产线上生产汽车底盘用高强度复相钢 HR680/800CP，具体化学成分如表 1 所示。低碳成分设计保证良好焊接性能，少量 Si 促进铁素体相变、提高铁素体强度，Mn 发挥固溶强化作用和提高奥氏体稳定性，Nb 和 Ti 起到第二相析出强化作用，同时 Nb 具有显著细化晶粒的作用[10]，在贝氏体等温过程中 Nb 可抑制渗碳体的析出，提高残余奥氏体含量及残余奥氏体中碳含量，抑制珠光体相变。Mo 元素可提高碳在奥氏体中的溶解度，降低碳化物析出速率、抑制析出产物的粗化[11]，同时 Mo 可抑制多边形铁素体形成，促进针状铁素体形成。

表 1 HR680/800CP 典型化学成分

Table 1 Typical chemical composition of HR680/800CP %

C	Si	Mn	P	S	Als	Al	Nb	Ti	Mo	N
0.07	0.13	1.68	0.011	0.001	0.029	0.030	0.049	0.11	0.11	0.003 0

2 工业试制开发

2.1 炼钢工艺开发

1）BOF+LF+RH 冶炼工艺

转炉冶炼具有氧化脱硅、脱磷、脱碳和调整温度的功能[12]。冶炼终点 C 含量控制≤0.04%、P 含量≤0.015%，转炉炉后出钢过程进行铝脱氧及合金化操作。出钢过程保证出钢口良好，避免钢流散流增氮。采用滑板挡渣，控制下渣量 80 mm 以下，出钢后对钢包顶渣添加 CaO 进行改质避免下渣回磷。LF 精炼的主要目的是造白渣（还原渣）进行深脱硫，保证成品硫含量≤0.005%，并进行合金成分粗调。RH 精炼主要进行脱氮、去氢气，控制 N 含量≤0.005%，H 含量≤0.000 3%，避免材料氢致延迟开裂的风险，同时进行合金成分精调。

2）连铸工艺

采用中间包覆盖剂、浸入式水口氩封、低碳高强钢专用保护渣等措施，防止二次氧化形成 Al_2O_3，同时防止大包下渣，避免下渣与钢液中 [Al] 发生反应生成 Al_2O_3。杜绝敞开浇注，保证稳定浇铸，结晶器液面波动控制在±5 mm，避免液面波动导致的卷渣缺陷。该钢种液相线温度为 1 519 ℃，中包温度控制在 1 534 ~ 1 559 ℃，严格控制二冷水强度，保证铸机状态良好，避免第Ⅲ脆性区矫直及设备状态导致的铸坯内裂纹及角横裂[13]。对下线铸坯进行热检，监控铸坯纵裂、角裂等缺陷，必要时采取人工火焰

清理。由于 HR680/800CP 含有较高合金元素 Si、Mn、Nb、Ti 和 Mo, 具有较高的淬透性, 在铸坯冷却过程中需要置于挡风墙内集中堆垛缓冷, 避免由于相变内应力导致的断坯风险, 如图 1 所示。

图 1　铸坯挡风墙集中堆垛缓冷

Fig. 1　Concentrated stacking and slow cooling of slab in windshield wall

2.2　热轧工艺开发

1)相变规律研究

汽车底盘用高强度复相钢多用于具有凸缘翻边、扩孔等成形工艺的零件, 如摆臂、控制臂等, 此类零件成形过程中落料剪切面受到较大扩孔张力, 若材料基体组织中各相强度差较大, 如马氏体 M 和铁素体 F 组织, 软相组织 F 受力变形而硬相组织 M 不发生塑性变形, 两相组织的变形差异导致 F/M 相界面处形成组织内应力, 最终在 F/M 相界面处裂纹萌生、扩展。降低各相组织强度差异、提高组织间协调变形能力、降低扩孔张力作用下相界面处应力是开发此类钢种的关键[14]。基于上述分析, 设计复相钢 HR680/800CP 显微组织主要为铁素体和贝氏体组织, 同时含有少量珠光体和细小碳化物。

利用热力学计算软件 JMat Pro7.0 计算 CCT 和 TTT 曲线, 结果如图 2 所示。由图 2(a)可知, A_{c1} 温度为 674.2 ℃、A_{c3} 温度为 845.8 ℃; 连续冷却转变过程冷速小于 1 ℃/s 时, 主要发生铁素体相变、珠光体相变; 随着冷速提高, 贝氏体相变比例增大; 冷却至 650 ℃ 时开始发生珠光体相变, 冷却至 600 ℃ 时开始发生贝氏体相变。等温转变曲线表征热轧带钢卷取后在极其缓慢的冷却过程中(接近等温转变)过冷奥氏体的固态相变类型。由图 2(b)可知, 卷取温度设定在 650 ~ 700 ℃ 时, 主要发生铁素体相变; 610 ~ 650 ℃ 卷取时, 主要发生铁素体相变和珠光体相变; 500 ~ 600 ℃ 卷取时, 主要发生贝氏体相变和少量铁素体相变。

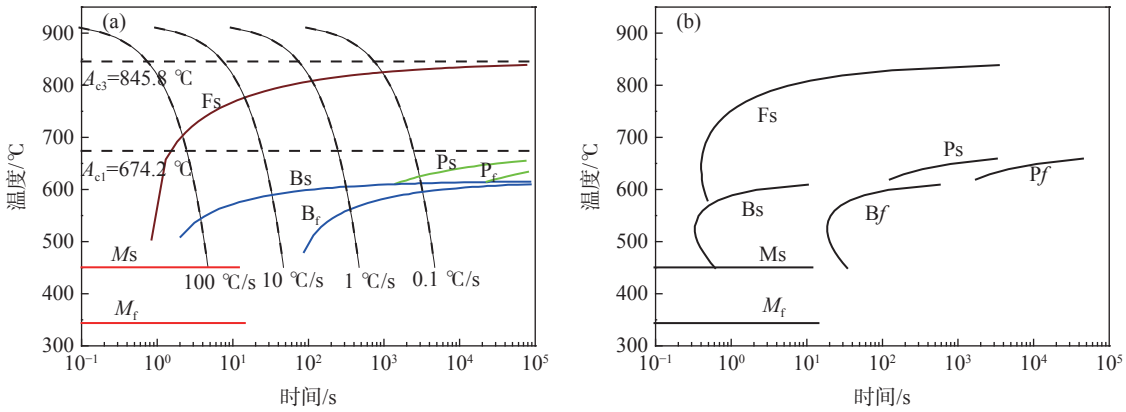


图 2　CCT 和 TTT 曲线

Fig. 2　CCT&TTT curves

2)热轧工艺

复相钢 HR680/800CP 含有较高的微合金元素 Nb 和 Ti, 通过控轧控冷工艺使得第二相粒子充分弥散析出以保证析出强化效果, 需要将铸坯中已经析出的粗大第二相粒子经高温加热充分回溶, 得到具有高固溶度微合金元素 Nb 和 Ti 的奥氏体组织为控轧控冷工艺奠定基础, 设定板坯加热温度为 1 260 ℃±20 ℃。根据相变点温度, 设定精轧终轧温度为 890 ℃, 实现奥氏体区轧制稳定性; 基于 JMat Pro7.0 计算结果和考虑微合金化元素 Nb、Ti 的第二相析出强化作用, 设定卷取温度为 570 ℃, 保证卷取后主要发生贝氏体相变和充分的第二相析出效果; 综合考虑精轧后形变奥氏体晶粒长大对相变组织晶粒大小的影响、三次氧化铁皮厚度控制对酸洗效果的影响及冷却速率对板形的影响多重因素, 层流冷却方式设定为前段 3/4 冷却模式, 实现相变组织细晶

强化、三次氧化铁皮减薄及降低冷却强度过大产生较大相变应力导致板形不良的不利影响。具体控轧控冷实例如表 2 所示，轧制规格为 4.0 mm×1 015 mm，其精轧终轧温度和卷取温度控制情况如图 3 所示。

表 2 热轧工艺典型关键参数

Table 2 Key parameters of hot rolling process

加热温度/ ℃	在炉时间/min	粗轧道次 R1+R2	中间坯厚度/mm	R2出口温度/ ℃	精轧入口温度/ ℃	终轧温度均值/ ℃	卷取温度均值/ ℃	层流冷却方式	凸度平均值/μm
1 260	209	3+5	44	1 080	1 042	888	574	前段3/4冷却	40

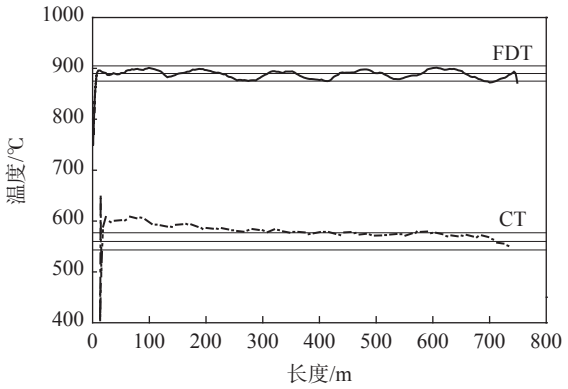


图 3 热轧终轧温度(FDT)和卷取温度(CT)控制情况

Fig. 3 FDT and CT control of hot rolling process

3)热卷下线冷却方式

由于合金及微合金元素含量高，钢种温度敏感性强，在冷却过程中钢卷不同温度场条件下显微组织及性能存在较大差异，钢种强度越高，差异性越显著[15]。为了避免客户使用过程中由于组织、性能差异导致的冲压质量问题，采取下线热卷放置于挡风墙内集中堆垛缓冷的方式促进外圈及芯轴部位板带基体第二相析出，提高通卷性能稳定性。

3 产品组织性能及应用

3.1 产品组织性能

图 4 为 HR680/800CP 产品显微组织形貌，主要为贝氏体和少量多边形铁素体。采用截距法测定平均晶粒尺寸为 4.8 μm，晶粒度评级 12.0 级。按照国标 GB/T 20887.6-2017 力学性能测试方法，HR680/800CP 试验卷力学性能如表 3 所示，经过挡风墙缓冷后通卷性能良好，强度波动范围控制在 30 MPa 以内，均满足标准要求。按照 GB/T 24524-2009《金属材料 薄板和薄带 扩孔试验方法》测定新开发的 HR680/800CP 扩孔率达到 110% 的良好指标。新产品试制 1 500 t，产品板形、表面质量及力学性能指标良好，总体合格率达到 96%。

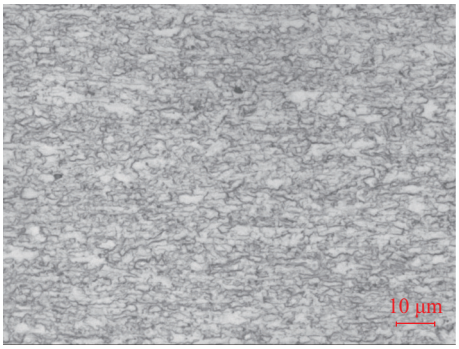


图 4 HR680/800CP 显微组织

Fig. 4 Microstructure of developed HR680/800CP

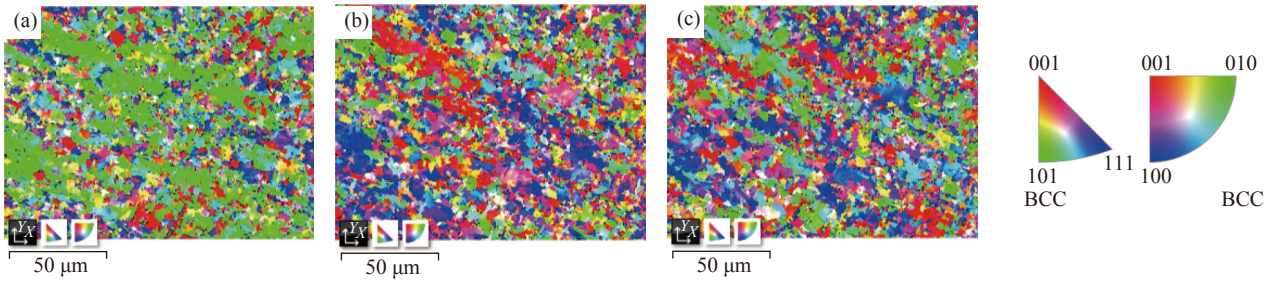
表 3 HR680/800CP 力学性能

Table 3 Mechanical properties of developed HR680/800CP

项目	屈服强度 $R_{p0.2}$/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 A/%	扩孔率 λ/%
标准要求	680 ~ 830	800 ~ 980	≥11	未要求
实测	769	840	17.92	110

注：轧向 L_0=80 mm，b_0=20 mm标样。

将热轧板厚度 1/4 位置机械抛光至 1 000 目(0.013 mm)后在−30 ℃ 下用 4%$HClO_4$ 酒精溶液电解抛光(电压 30 ~ 40 V、时间 15 s)去除表面内应力，采用 Ultra55场发射扫描电镜配备的电子背散射衍射分析(EBSD)系统进行晶粒取向测量，加速电压 20 kV、样品倾斜角度 70°、采集速度 79.48 Hz、解析率 90.97%、其中 BCC 占比 90.50%、FCC 占比 0.05% 和 Fe_3C 占比 0.42%，说明基体组织主要为 BCC 结构的铁素体、贝氏体组织。图 5 为试验钢不同方向的 IPF 图，其中 X 代表轧向，Y 代表板法向，Z 代表横向。由图 5 可知，热轧板轧制方向与横向存在显著的晶粒取向差异，横向晶粒取向主要为<101>、<010>，而轧制方向具有更高比例的<111>、<100>和<001>，且在厚度方向与轧向具有相似的晶粒取向，具有更为优异的成形性能。



(a) IPF-*Z*; (b) IPF-*Y*; (c) IPF-*X*

图 5　HR680/800CP 试验钢 *Z*/*Y*/*Z* 方向的 IPF 图

Fig. 5　IPF diagram of developed HR680/800CP in *Z*/*Y*/*Z* direction

图 6 为 BCC 晶粒取向误差的分布情况, 固溶 Nb 元素在奥氏体晶界偏聚对奥氏体晶界具有拖曳作用, 实现奥氏体晶粒细化进而细化相变组织, 其中小于 10°的小角度晶界占比达到 50.10%, 大于 10°的大角度晶界占比为 49.90%, 相邻晶粒取向差小于 2°的亚晶界占比达到 30.43%, 整体晶粒细小、较高比例亚晶界和小角度晶界发挥细晶强化效果。

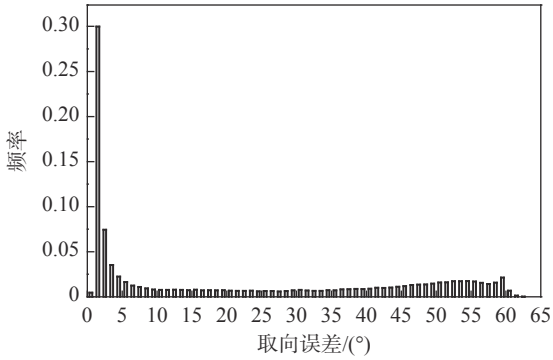
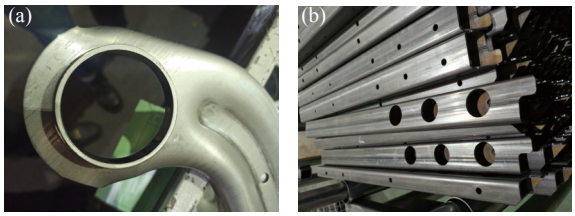


图 6　晶粒取向误差的分布

Fig. 6　Distribution for misorientation of grain boundaries

3.2　产品应用

高强度复相钢 HR680/800CP 具有铁素体/贝氏体组织、抗拉强度 840 MPa、延伸率 17.92%、扩孔率高达 110% 的良好性能, 成功应用于国内某车型底盘控制臂和新能源电池包支架, 如图 7 所示。控制臂冲压过程凸缘翻边部位良好, 未出现开裂问题; 经辊压成型的新能源电池包支架尺寸精度、抗折弯性能满足客户需求。后续开展客户成型技术服务及焊接技术研究, 加大在底盘结构件及新能源汽车领域的推广应用。



(a) 控制臂 (局部, 凸缘翻边部位)　　(b) 新能源电池包支架

图 7　HR680/800CP 应用零件

Fig. 7　Application parts of HR680/800CP (a) Control arm, (b) battery pack bracket

4　结论

1)采用低 C-Si-Mn-Nb-Ti-Mo 复合成分体系设计, 通过理论计算制定热轧控轧控冷工艺及下线热卷挡风墙集中堆垛缓冷等, 获得显微组织为 F/B 组织、屈服强度 769 MPa、抗拉强度 840 MPa、延伸率 17.92%、扩孔率高达 110% 的高强度复相钢 HR680/800CP 产品。

2)热轧酸洗板 HR680/800CP 的 EBSD 分析结果显示, 板料存在显著的晶粒取向差异, 轧制方向具有更高比例的<111>、<100>和<001>晶粒取向, 具有更为优异的成形性能。

3)热轧酸洗板 HR680/800CP 具有良好的凸缘翻边及折弯性能, 成功应用于控制臂和新能源电池包支架。

参考文献

[1] Wang Weiwei. Effect of continuous annealing process on microstructure-properties and study on strength plasticization mechanism of cold rolled high strength steel[D]. Beijing: General Iron and Steel Research Institute, 2021.
(王卫卫. 冷轧高强钢连退工艺对组织和性能的影响及强塑化机理研究[D]. 北京: 钢铁研究总院, 2021.)

[2] Li Jiayu. A study of the annealing and the hot-dip galvanizing process of 980 MPa DP steel for automobile[D]. Shenyang:

Northeastern University, 2018.
（李佳彧. 汽车用980 MPa级双相钢退火及热镀锌工艺研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.）

[3] Cao Xiao' en, Zhao Hongqi, Li Shouhua, *et al*. Cause analysis and process optimization of edge crack for 980 MPa cold rolled ultra high strength dual-phase steel[J]. China Metallurgy, 2022, 32(9): 90−96.
（曹晓恩, 赵红旗, 李守华, 等. 980 MPa级冷轧超高强度双相钢边裂原因分析与工艺优化[J]. 中国冶金, 2022, 32(9): 90−96.）

[4] Tang Di, Zhao Zhengzhi, Mi Zhenli, *et al*. Advanced high strength strip steel for automobile[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2016.
（唐荻, 赵征志, 米振莉, 等. 汽车用先进高强板带钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2016.）

[5] Zhao Yan, Cai Xiaohui, Liu Zhenyu. Effects of continuous annealing parameters on microstructure and mechanical properties of 980 MPa cold-rolled dual-phase steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2015, 27(2): 55−59.
（赵岩, 蔡晓辉, 刘振宇. 连续退火参数对980 MPa级冷轧双相钢组织和性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(2): 55−59.）

[6] Kang Yonglin. Light weight vehicle, advanced high strength steel and energy-saving and emission reduction[J]. Iron and Steel, 2008, 43(6): 1−7.
（康永林. 汽车轻量化先进高强钢与节能减排[J]. 钢铁, 2008, 43(6): 1−7.）

[7] Gao Yun, Shao Lixin. Optimization of heat treatment process for automobile high strength steel[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(14): 204−207.
（高云, 邵立新. 汽车高强钢的热处理工艺优化研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(14): 204−207.）

[8] Sun Hang, Chu Xiaohong, Tang Mengxia, *et al*. Microstructure and properties analysis of 1500 MPa grade high elongation dual phase steel[J]. China Metallurgy, 2022, 32(4): 47−53.
（孙航, 褚晓红, 唐梦霞, 等. 1500 MPa级高伸长率双相钢的组织性能分析[J]. 中国冶金, 2022, 32(4): 47−53.）

[9] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. GB/T 20887. 6-2017. Continuously hot rolled high strength steel sheet and strip for automobile-part 6: Complex phase steel[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
（中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 20887.6-2017. 汽车用高强度热连轧钢板及钢带 第6部分: 复相钢[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.）

[10] Gao Yongxu, Wang Shuize, Chu Xiaohong, *et al*. Effect of annealing process on microstructure and properties of Nb-V microalloyed dual phase steel[J]. China Metallurgy, 2022, 32(10): 52−60.
（高永旭, 汪水泽, 褚晓红, 等. 退火工艺对Nb-V微合金化双相钢组织性能的影响[J]. 中国冶金, 2022, 32(10): 52−60.）

[11] Zhao Y, Yang D, Qin Z, *et al*. A novel hot stamping steel with superior mechanical properties and antioxidant properties[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21: 1944−1959.

[12] Wang Xinhua. Iron and steel metallurgy (steelmaking)[M]. Beijing: High Education Press, 2007.
（王新华. 钢铁冶金(炼钢学)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.）

[13] Li Shouhua, Cao Xiao' en, Zhao Linlin, *et al*. Study on hot ductility of slab of 1180 MPa grade F/M high strength dual phase steel for automobile[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2019, 40(1): 123−128.
（李守华, 曹晓恩, 赵林林, 等. 汽车用1180 MPa级F/M高强双相钢板坯高温热塑性研究[J]. 钢铁钒钛, 2019, 40(1): 123−128.）

[14] Yang Laishan. The study of hot rolling process and stretch-flangeability on FB steels[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
（杨来山. 低成本FB钢热轧工艺和延伸凸缘性能的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.）

[15] Li Chaofei. Research and application of longitudinal performance uniformity control technology for DP980 dual phase steels[D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.
（李超飞. DP980双相钢通卷性能稳定性控制技术研究及应用[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.）

编辑 杨冬梅