

# 汽车轻量化下热轧淬火配分钢的组织性能研究

王炎颜<sup>1</sup>, 康远程<sup>1</sup>, 滕胜<sup>1</sup>, 谢光辉<sup>2</sup>, 文诗云<sup>1</sup>, 张子淇<sup>1</sup>, 吴腾<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>武汉科技大学材料科学工程学院, 湖北 武汉

<sup>2</sup>湖南华菱涟源钢铁有限公司钢铁研究院, 湖南 娄底

收稿日期: 2026年3月3日; 录用日期: 2026年3月27日; 发布日期: 2026年4月7日

## 摘要

基于汽车轻量化原则, 以低碳C-Si-Mn系钢为原料, 采用热轧 + 超快冷 + 淬火配分一体化工艺制备QP980钢, 替代传统离线热处理工艺并探究其组织和性能。结果表明: 试验钢形成板条马氏体与薄膜状残余奥氏体复合组织, 残余奥氏体体积分数9.1%, 碳在奥氏体区富集实现室温稳定。该钢强塑积达18.95 GPa·%, 满足CR550/980QP牌号要求, 冷加工性能优异。该钢替代传统软钢可实现车身结构件显著减重, 适配冷冲压成形工艺。

## 关键词

热轧Q&P钢, 显微组织, 力学性能

# Study on Microstructure and Properties of Hot-Rolled Q&P Steel for Automobile Lightweighting

Yanyan Wang<sup>1</sup>, Yuancheng Kang<sup>1</sup>, Sheng Teng<sup>1</sup>, Guanghui Xie<sup>2</sup>, Shiyun Wen<sup>1</sup>, Ziqi Zhang<sup>1</sup>, Teng Wu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>Steel Research Institute, Hunan Valin Lianyuan Iron and Steel Co., Ltd., Loudi Hunan

Received: March 3, 2026; accepted: March 27, 2026; published: April 7, 2026

## Abstract

Based on the principle of vehicle lightweight, QP980 steel with a low-carbon C-Si-Mn was prepared

\*通讯作者。

文章引用: 王炎颜, 康远程, 滕胜, 谢光辉, 文诗云, 张子淇, 吴腾. 汽车轻量化下热轧淬火配分钢的组织性能研究[J]. 材料科学, 2026, 16(4): 92-99. DOI: 10.12677/ms.2026.164076

by an integrated process of hot-rolling, ultra fast cooling and quenching and partitioning, replacing the conventional offline heat treatment route, and then the microstructure and mechanical properties of the tested steel was studied. The results show that the tested steel develops a composite microstructure consisting of elongated martensite and film-like residual austenite, the volume fraction of austenite is 9.1%, and carbon is enriched in the austenite regions, resulting in its stability at room temperature. The strength plasticity product of the tested steel is 18.95 GPa·%, which meets the requirements of the CR550/980QP grade and exhibits excellent cold workability. The steel serves as a substitute for conventional mild steel, offers significant weight reduction in automotive body structures and is suitable for cold stamping forming processes.

## Keywords

Hot-Rolled Q&P Steel, Microstructure, Mechanical Properties

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着科技发展和经济水平提高,环境危机和能源安全正引起全球广泛关注[1],我国适时提出“碳达峰、碳中和”战略目标,积极响应全球协约,在各行各业实行节能减排[2][3]。在汽车用钢领域的先进高强度钢(AHSS)开发可高效降低自重,同时保证本身的优异性能,实现轻量化、低碳化转型的目的。淬火配分(Quenching and Partitioning, Q&P)钢是第三代先进高强度钢[4],凭借马氏体与残余奥氏体复合组织带来的高强塑积特性,同时利用残余奥氏体的相变诱发塑性(TRIP)效应获得抗撞击性能,既满足了驾驶过程中日益增长的安全性能需要[5]和汽车复杂结构件的轻量化需求[6],又因其合金成分含量少从而在一定程度上降低了生产成本,具有广阔的应用前景。

常规 Q&P 钢生产多采用离线热处理[7][8],即经过热轧和冷轧后,再重新加热进行 Q&P 处理,但该线路生产周期长,工艺复杂,不利于节能减排与高效生产。随着以超快冷为核心的控轧控冷技术(TMCP)的快速发展,为 Q&P 钢通过热连轧生产提供了可能。热轧 Q&P 钢的工艺流程短,通过控制残余奥氏体的组织形貌以及体积分数以获取优异的力学性能是研究的关键。本文采用热轧 + 超快冷 + Q&P 热处理一体化工艺制备低碳 Q&P 钢,优化传统制造工艺,进一步降低能耗、简化流程和压缩成本,之后分析力学性能参数,研究组织与性能的关系,以期节能减排与大规模生产提供参考。

## 2. 试验材料及方法

### 2.1. 试验材料

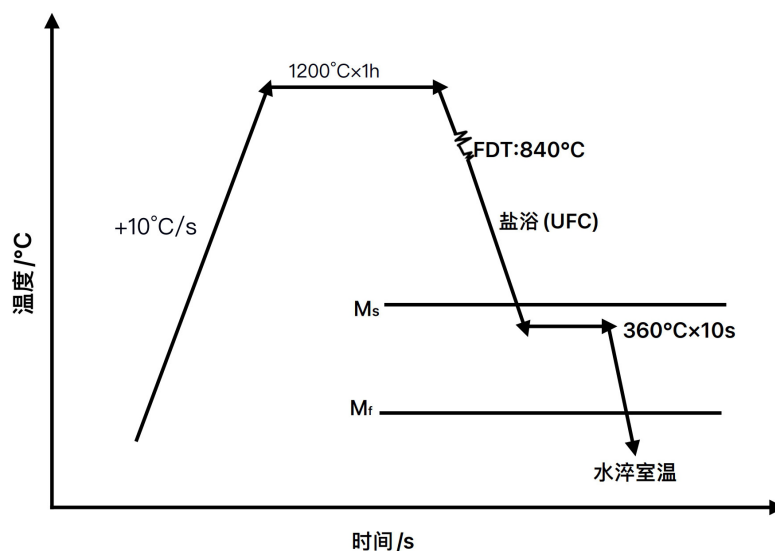
试验钢采用简单的 C-Si-Mn 成分设计,化学成分如表 1 所示,碳是强韧调控核心,0.2%的含量既可固溶强化,又为淬火-配分(QP)工艺提供碳源,促进碳向奥氏体扩散并稳定残余奥氏体,借助 TRIP 效应提升塑性,含量过高易脆化、过低则奥氏体稳定性不足[9]。锰是奥氏体稳定与强化关键,能扩大奥氏体区、降低 Ms 点,同时固溶强化基体,还可抑制渗碳体析出,保证碳的有效利用,该含量平衡了奥氏体稳定性与工艺性,避免成分偏析。硅(0.7%)强烈抑制渗碳体形核长大,确保碳向奥氏体扩散,轻微固溶强化的同时不损害塑性,该含量处于 QP 钢最优区间,最大化发挥抑碳化物作用,配合碳配分实现残余奥氏体精准调控。

**Table 1.** Chemical composition of tested steel (mass fraction, %)**表 1.** 试验钢的化学成分(质量分数, %)

C	Mn	Si	N	P	S	Al	Fe
0.2	1.4~1.8	0.7	0.006	0.008	0.006	0.04	余量

## 2.2. 试验过程

采用材料性能模拟软件 JMatPro 模拟得到试验钢 Ms 点为 385℃、Mf 点为 270℃。铸坯经锻造得到坯料, 将坯料随炉升温至 1200℃保温 1 h。接着将坯料取出进行两段式控制轧制(再结晶区粗轧和未再结晶区精轧), 粗轧获得大的变形得到细化的奥氏体, 精轧进一步变形获得高密度位错, 其终轧温度 840℃, 轧后厚度为 3.8 mm。然后通过盐浴超快冷至 Ms 点以下的 360℃进行一步法配分热处理(淬火温度 = 配分温度), 最后水冷至室温得到马氏体 + 残余奥氏体的热轧 Q&P 钢, 其工艺流程如图 1 所示。

**Figure 1.** Process flow chart of tested steel**图 1.** 试验钢的工艺流程图

## 2.3. 测试方法

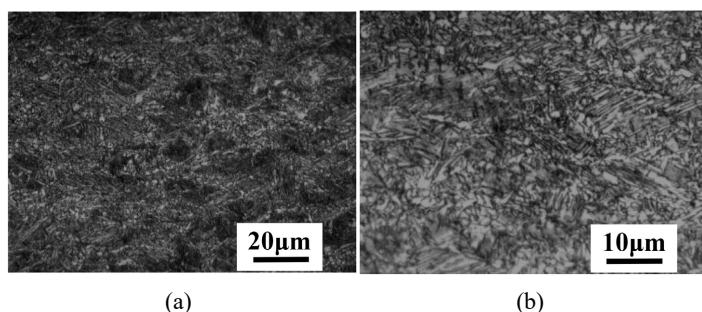
根据 GB/T 228.1-2021 采用线切割沿钢材轧制方向制取室温拉伸试样。利用 WAW-500C 型万能试验机开展室温力学性能测试, 拉伸速率控制为 2 mm/min, 试样标距长度与宽度分别为 50 mm 和 12.5 mm。试样经逐级打磨、机械抛光与化学腐蚀后, 进行显微组织结构表征: 采用 ZEISS 光学显微镜(OM)观测金相组织; 先借助 Nova nano 400 扫描电镜(SEM)和 JEM-2100F 透射电镜观察扫描组织(SEM)和透射组织(TEM), 对微观形貌及组织特征进行系统分析; 再利用 EDS 线扫描功能, 对碳元素在不同微区的分布规律进行定量分析; 按 YB/T 5338-2006《钢中残留奥氏体定量测定 X 射线衍射仪法》在多晶衍射仪 XRD 测量得到试验钢中的残留奥氏体, 进而阐明了 Q&P 钢中碳配分与组织调控的内在机制。

## 3. 试验结果与分析

### 3.1. 试验钢的显微组织

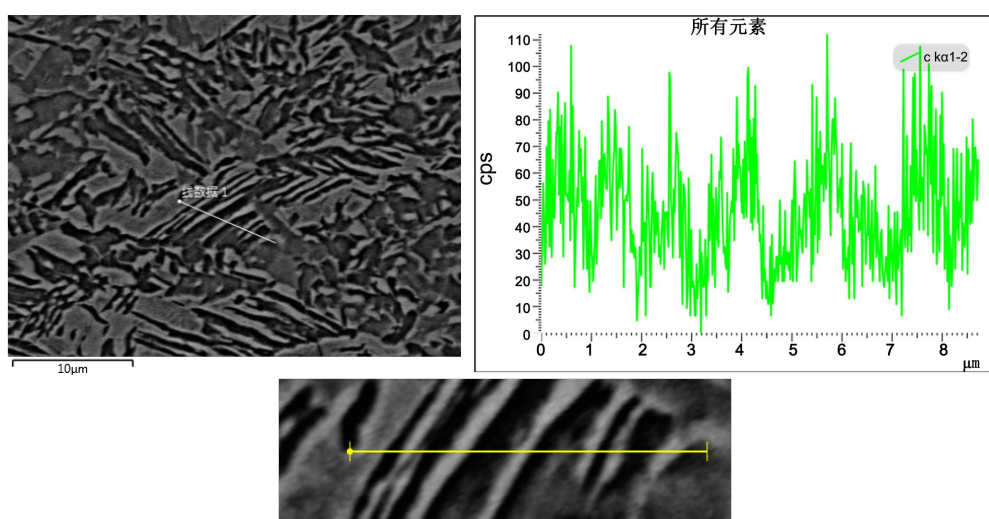
图 2 为试验钢经热轧和超快冷至 360℃配分得到的室温金相(OM)组织, 该显微组织由马氏体和残留

奥氏体复合组成。由图可知，衬度较深的板条马氏体与亮色的残余奥氏体相间分布，残余奥氏体晶粒细小且大多沿马氏体板条间呈薄膜状分布。这是由于试验钢在热轧后得到细晶且含高密度缺陷的奥氏体晶粒，随后超快冷抑制了铁素体、贝氏体等扩散型相变，生成板条马氏体并在板条间保留未转变的奥氏体薄膜，最终经 10 s 配分处理后，碳从过饱和马氏体向薄膜状奥氏体定向分配，使其富碳稳定并以残余奥氏体形式保留至室温[10]。



**Figure 2.** Microstructures of the tested steel with different magnification (a)  $\times 500$ ; (b)  $\times 1000$   
**图 2.** 试验钢不同放大倍数的显微组织(a)  $\times 500$ ; (b)  $\times 1000$

图 3 为试验钢的室温 SEM 组织及 EDS 图谱，对其显微组织与元素分布特征进行系统观察可知，该材料呈现出典型 Q&P 钢多相组织特征。由显微形貌可以看出，组织主要由板条马氏体与薄膜状、条状残余奥氏体两相构成。其中，颜色较深、呈连续分布的区域为板条马氏体基体，为钢材提供主要的强度支撑；分布于马氏体板条之间的浅色区域为残余奥氏体相，该相在变形过程中可通过相变诱导塑性(TRIP)效应，显著提升材料的塑性与韧性水平。整体组织细化且板条特征明显，与热轧及淬火配分工艺带来的强韧化规律相吻合。采用 EDS 线扫描对碳元素分布进行表征，结果显示，在 0~8  $\mu\text{m}$  的测试范围内，碳元素信号强度呈现显著的周期性波动，部分区域出现明显富集峰。这些碳元素富集的位置与残余奥氏体区域相对应，说明淬火配分过程中碳的再分配行为：即在配分阶段，碳原子由过饱和马氏体向周围奥氏体区域扩散，使奥氏体富碳并得以稳定保留至室温。残余奥氏体的含量、形貌及分布状态，是决定 Q&P 钢力学性能匹配关系的核心因素。



**Figure 3.** SEM micrographs of the tested steel with magnification  
**图 3.** 试验钢的 SEM 组织及 EDS 图谱

### 3.2. Q&P 钢的显微组织与力学性能的关系

试验钢经室温拉伸后得到的力学性能结果如表 2 所示, 当配分时间为 10 s 时, 抗拉强度  $R_m$  为 997 MPa, 屈服强度  $R_{p0.2}$  为 583 MPa, 伸长率  $A_{50}$  为 19.5%, 强塑性  $R_m \cdot A_{50}$  为 18.95 G·Pa%, 表现出较好的强度与塑性的匹配。根据 GB/T20564.9-2016《汽车用高强度冷连轧钢板及钢带第 9 部分: 淬火配分钢》可知, 该试验钢配分 10 s 即达到了牌号为 CR550/980QP 的力学性能要求。

**Table 2.** Mechanical properties of dual phase steel QP980

**表 2.** 试验钢的力学性能

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	加工硬化指数 $n$	屈强比	强塑性/GPa·%
583	997	19.5	0.17	0.59	18.95

试验钢在拉伸变形时, 首先发生软相奥氏体的塑性变形, 奥氏体在变形过程中通过 TRIP 效应发生奥氏体向马氏体的转变可同时提高钢的强度和塑性, 之后随着变形的进行, 会有硬相马氏体的塑性变形, 可获得高的强度。通过透射电镜(TEM)观察, 可清晰地看到高位错密度的马氏体板条(如图 4), 板条宽度约为 0.2~0.5  $\mu\text{m}$ , 这是由于热轧 + 超快冷可获得具有大量形变亚结构的奥氏体, 在后续配分过程中, 这些形变亚结构促进了碳的配分和马氏体相变, 有利于提高钢的强韧性。同时, 通过 X 射线衍射(XRD)测试, 测得试验钢中残余奥氏体体积分数为 9.1%。较多的初淬火马氏体可为奥氏体提供更多碳源, 在配分过程中奥氏体增碳程度相对较高, 有利于奥氏体稳定至室温。因此, 10 s 配分的试验钢的抗拉强度和屈服强度均较高, 分别为 997 MPa 和 583 MPa, 伸长率可达到 19.5%。在变形过程中, 残余奥氏体通过 TRIP 效应发生马氏体相变, 有效缓解了应力集中, 有利于材料的均匀变形和提高其强塑性, 实现了强韧性的良好匹配。



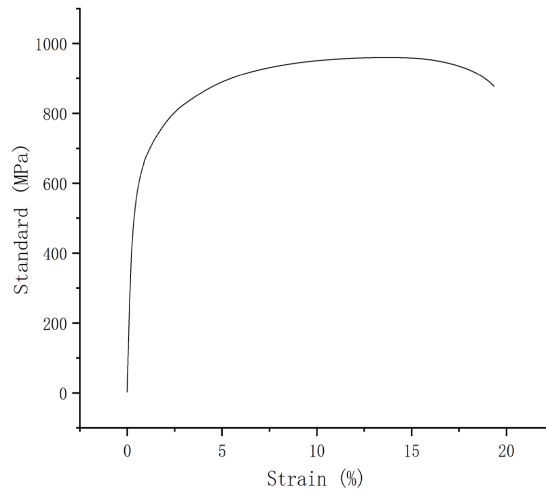
**Figure 4.** TEM bright-field image of the experimental steel

**图 4.** 试验钢的 TEM 明场像

### 3.3. Q&P 钢的成形性能

图 5 为 Q&P980 钢拉伸后的应力 - 应变曲线。由图可知, 曲线呈连续光滑的连续屈服特征, 并有一段较长的强化阶段, 无明显屈服平台。这是由于试验钢经热轧大变形与超快冷保留了大量形变亚结构,

这些亚结构在拉伸过程中可作为位错增殖与滑移的核心，避免了明显的屈服点；同时，钢中保留的薄膜状残余奥氏体在拉伸变形时通过 TRIP 效应逐步转变为马氏体，马氏体相变膨胀挤压周围的残余奥氏体，进一步提高了软相残余奥氏体内部的位错密度，试验钢在屈服变形时未出现应力的上下波动，从而呈现连续上升的光滑趋势，无应力突变。



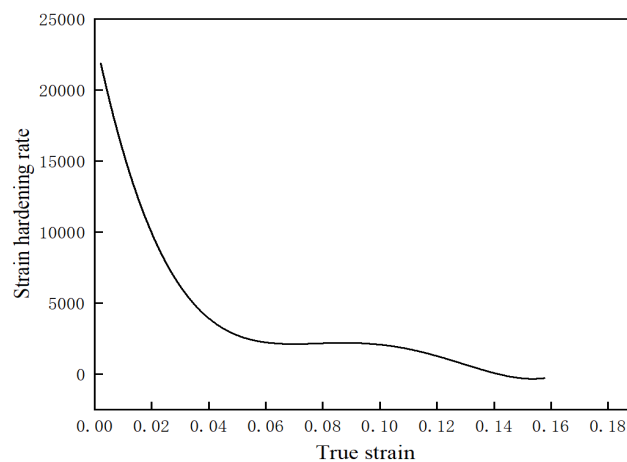
**Figure 5.** Stress-strain curves of the experimental steel  
**图 5.** 试验钢的应力应变曲线

图 6 所示为  $\ln(d\sigma/d\varepsilon)$ - $\ln \varepsilon$  Crussard-Jaoul 不同阶段的加工硬化曲线。该图由 Crussard-Jaoul 公式(1)和(2)计算分析得到

$$\sigma = \sigma_0 + K \varepsilon^n \quad (1)$$

$$\ln(d\sigma/d\varepsilon) = \ln K + \ln n + (n-1) \ln \varepsilon \quad (2)$$

式中： $\sigma$  和  $\varepsilon$  分别为应力和应变； $\sigma_0$  为真应力； $n$  为不同阶段的加工硬化指数； $K$  为材料的强度因子。



**Figure 6.** Crussard-Jaoul plot of  $\ln(d\sigma/d\varepsilon)$ - $\ln \varepsilon$  to reveal  $\varepsilon$  various stages of work hardening  
**图 6.**  $\ln(d\sigma/d\varepsilon)$ - $\ln \varepsilon$  Crussard-Jaoul 不同阶段的加工硬化曲线

如图 6 所示，Q&P980 钢的应变硬化能力由板条马氏体和薄膜状残余奥氏体的复相组织及演变决定，

在外力作用下，其硬化过程分为三个阶段：第 1 阶段为初始硬化阶段主要与板条马氏体基体的位错滑移相关。变形初期，马氏体板条内的位错增殖、运动并在板条界塞积，界面产生位错缠结，硬化速率较高；第 2 阶段为稳定硬化阶段，与残余奥氏体的 TRIP 效应及马氏体变形协同作用。随着变形增加，薄膜状残余奥氏体相变生成新马氏体，引入新位错并阻碍原有位错运动，维持稳定的硬化速率；第 3 阶段为硬化衰退阶段，主要与残余奥氏体转变结束及颈缩启动相关。残余奥氏体转变结束后，TRIP 效应消失，位错硬化无法抵消颈缩带来的局部软化，最终导致材料颈缩断裂。

### 3.4. Q&P 钢的节能减排效果

在“双碳”战略背景下，先进高强度钢的研发与应用已成为实现汽车轻量化、降低全生命周期碳排放的核心路径。中国汽车工程学会发布的《节能与新能源汽车技术路线图 3.0》明确提出，至 2040 年乘用车平均碳排放强度较 2024 年下降 60% 的行业目标，为汽车用钢的绿色化发展指明了方向[11]。本研究制备的热轧 Q&P980 钢凭借优异的强塑匹配特性，在保证车身碰撞安全性能的前提下，可通过减薄钢板厚度实现轻量化设计，其适配冷冲压成形的工艺特性还能规避热成形钢制造阶段的高能耗问题。

从全生命周期视角看，汽车用钢的绿色化不仅体现在应用阶段，更贯穿于生产制造环节。首钢股份发布的《绿色低碳冷轧和热镀锌板及钢带》企业标准显示，先进高强钢可通过工艺优化实现综合降碳 30%~70% [12]。本研究采用的热轧 + 超快冷 + 淬火配分一体化工艺，摒弃了传统离线热处理的重复加热流程，生产环节能耗与碳排放显著降低。综上，热轧 Q&P980 钢的轻量化与低碳化特性，既符合钢铁行业产品结构升级需求，也契合汽车产业向低排放、高安全发展的行业趋势[11]，在“双碳”背景下具备广阔的产业化应用前景。

## 4. 结论

1) 采用低合金低碳的成分设计，试验钢经热轧 + 超快冷 + 配分热处理工艺得到性能优异的 Q&P980 钢板，其显微组织为板条马氏体和薄膜状残余奥氏体。

2) 试验钢的抗拉强度为 997 MPa、屈服强度为 583 MPa、伸长率 19.5%， $n$  值较高为 0.17，屈强比较低为 0.59，强塑积较高为 18.95 GPa·%，具有优异的强韧性。

3) 试验钢通过淬火配分实现对马氏体与残余奥氏体的精准调控，获得低屈强比与高加工硬化率  $n$  值，在断裂前期取得较长的塑性变形，可提高冷加工性能。

## 参考文献

- [1] 徐跃明, 李俏, 高直, 等. 绿色低碳热处理标准体系构建[J]. 金属热处理, 2022, 47(1): 1-6.
- [2] 唐远寿, 司宇, 徐正萌, 等. 超高强度钢在汽车轻量化中的应用及研究进展[J]. 金属热处理, 2023, 48(10): 247-254.
- [3] 杜金亮, 冯运莉, 张颖隆. 新型汽车用 Q&P 钢的研究现状与发展趋势[J]. 材料导报, 2021, 35(15): 15189-15196.
- [4] 牛超, 陈新平, 林建平. 基于数字图像相关法的第三代先进高强度钢 QP980 成形性能评价[J]. 宝钢技术, 2020(4): 8-13.
- [5] 李文通, 亓海全, 笄仲钟, 等. 汽车用 QP980 钢模拟火灾后的组织与力学性能变化[J]. 材料热处理学报, 2025, 46(3): 160-170.
- [6] 宋思川, 陈龔, 姜峻岭, 等. QP980 钢在车身轻量化开发中的应用[J]. 现代制造工程, 2017(1): 51-54.
- [7] 郭昊东, 唐正友, 赵利, 等. 淬火加热温度对超细晶 Q&P 钢组织性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(12): 67-73.
- [8] 官计生, 刘曼, 徐光. 配分工艺对中碳 Ti-Mo 高强 Q&P 钢组织和性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(7): 672-678.
- [9] 田亚强, 田耕, 郑小平, 等. 淬火配分贝氏体钢不同位置残余奥氏体 C、Mn 元素表征及其稳定性[J]. 金属学报,

2019, 55(3): 332-340.

- [10] 左智成, 苏钰, 李军. 加热速率和配分时间对低碳 Q&P 钢组织及性能的影响[J]. 材料导报, 2021, 35(12): 12156-12160.
- [11] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图 3.0 [R]. 北京: 中国汽车工程学会, 2025.
- [12] 首钢股份有限公司. Q/SGJS 1011-2025 绿色低碳冷轧和热镀锌板及钢带第 1 部分: 软钢[S]. 北京: 首钢股份有限公司, 2025.