

汽车用低碳热轧Q&P钢的组织性能测试及研究

李潇琳¹, 宋鑫阳¹, 滕 胜¹, 涂 军², 熊维亮^{1,3}, 贾佳灵¹, 吴 腾^{1*}

¹武汉科技大学材料学部, 湖北 武汉

²湖北省计量测试技术研究院能源所, 湖北 武汉

³涟源钢铁有限公司技术中心, 湖南 娄底

收稿日期: 2023年10月28日; 录用日期: 2023年12月1日; 发布日期: 2023年12月12日

摘 要

基于汽车轻量化原则, 通过热轧后的超快冷与配分热处理技术得到了强韧性优异的980 MPa级热轧Q&P钢, 研究了配分时间对其组织与性能的影响。研究表明: 随着配分时间增加, 钢中马氏体体积分数逐渐减少, 抗拉强度由1016 MPa降低至938 MPa, 伸长率由19.0%增加至24.5%, 屈强比较低在0.6左右, n 值较高为0.16~0.18, 强塑积较高在20 GPa·%左右。当配分时间为30 s时, 得到的残余奥氏体较多, 其抗拉强度较高为987 MPa、伸长率为24.0%, 但其屈强比最低、 n 值和强塑积最高, 综合力学性能最好。

关键词

热轧Q&P钢, 配分时间, 显微组织, 力学性能

Test and Research on Microstructure and Properties of Low Carbon Hot Rolled Q&P Steel for Automobile

Xiaoling Li¹, Xinyang Song¹, Sheng Teng¹, Jun Tu², Weiliang Xiong^{1,3}, Jialing Jia¹, Teng Wu^{1*}

¹Department of Materials, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

²Department of Energy, Hubei Institute of Measurement and Testing Technology, Wuhan Hubei

³Technology Center, Lianyuan Iron and Steel Group, Loudi Hunan

Received: Oct. 28th, 2023; accepted: Dec. 1st, 2023; published: Dec. 12th, 2023

Abstract

Based on the principle of vehicle lightweight, 980 MPa hot-rolled Q&P steel with excellent strength

*通讯作者。

文章引用: 李潇琳, 宋鑫阳, 滕胜, 涂军, 熊维亮, 贾佳灵, 吴腾. 汽车用低碳热轧 Q&P 钢的组织性能测试及研究[J]. 材料科学, 2023, 13(12): 1010-1016. DOI: 10.12677/ms.2023.1312112

and toughness was obtained through ultra fast cooling and partitioning heat treatment technology after hot rolling, and then effect of partitioning time on microstructure and mechanical properties of the tested steel was studied. The results show that with the partitioning time increases, the volume fraction of martensite in the steel gradually decreases, the tensile strength decreases from 1016 MPa to 938 MPa, the elongation increases from 19.0% to 24.5%, the yield ratio is low at around 0.6, the n value is high at 0.16~0.18, and the strength plasticity is high at around 20 GPa·%. When the partitioning time is 30 s, more residual austenite is obtained, with a higher tensile strength of 987 MPa and an elongation of 24.0%. However, its yield ratio is the lowest, n value and strength plastic product are the highest, and its comprehensive mechanical properties are the best.

Keywords

Hot-Rolled Q&P Steel, Partitioning Time, Microstructure, Mechanical Property

Copyright © 2023 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

随着经济发展和生活水平提高, 环境污染和能源危机在全球范围内日益严重, 我国适时提出了“碳中和与碳达峰”的战略目标, 因此, 在未来几十年, 节能减排将持续成为全球研究的热点和主题[1]。先进高强钢可在保证安全的前提下有效降低自重有利于节能减排, 并已成为汽车用钢的首选[2] [3]。淬火配分(Quenching and Partitioning, Q&P)钢由软相残余奥氏体和硬相马氏体两相复合组成, 其在变形过程中通过 TRIP (Transformation induced plasticity)效应使钢具有高的强塑积和优异的冷加工成形性能, 可作为轻量化材料特别适用于防撞梁、铰链板和座椅滑轨等成形要求复杂的结构件, 并且合金含量少生产成本低, 比如宝钢于 2010 年通过冷轧和两步法处理在全球首发 Q&P980 钢, 马钢于 2018 年通过连退机组生产得到强塑积达到 22 GPa·%的冷轧 Q&P980 钢, 具有很大的应用前景[4] [5]。

常规的 Q&P 钢是通过热轧和冷轧后, 或者重新加热和进行 Q&P 热处理, 是目前汽车用 Q&P 钢生产应用的主流[6] [7], 但该工艺流程长, 增加了生产周期和生产成本, 不利于“碳中和与碳达峰”。随着控轧控冷技术(TMCP)的发展及其设备的升级更新, 结合超快冷技术, 使热轧 Q&P 钢的开发应用成为可能。热轧 Q&P 钢的工艺流程短, 有利于节能减排, 而通过该工艺控制钢中残余奥氏体的体积分数及形貌, 进而获得优异的力学性能是研究的重点, 因此在 Q&P 热处理过程中配分时间的选择非常重要。本文基于汽车轻量化和合金减量化进行低合金低碳的成分设计, 通过高温高压 + 超快冷 + Q&P 热处理的一体化工艺技术实现组织调控, 并制备得到不同配分时间的热轧 Q&P 钢板, 之后进行组织性能测试研究该工艺技术条件下钢的强韧化机理, 为生产出优异性能的热轧 Q&P 钢提供参考。

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, 在 50 Kg 中频真空感应冶炼炉熔炼得到铸坯, 其主要的化学成分如表 1 所示, 低的 C 含量可降低钢的焊接裂纹敏感指数, 从而提高钢的焊接性能; 适量的 Si 可对 C 原子起拖曳作用, 减缓碳化物的长大和析出, 抑制贝氏体生成, 有利于形成残余奥氏体[8]; 适量的 Mn

可以扩大奥氏体相区，有利于残余奥氏体稳定至室温，也可以起到固溶强化的作用。

Table 1. Chemical composition of tested Q&P steel (mass fraction, %)

表 1. 试验 Q&P 钢的化学成分(质量分数, %)

C	Si	Mn	P	S	Al	N	Fe
0.20	0.68	1.4~1.8	≤0.008	≤0.006	0.04	0.004	余量

2.2. 试验过程

铸坯经锻造得到 38 mm 的坯料，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)，粗轧获得大的变形成得到细化的奥氏体，精轧进一步变形获得高密度位错，其开轧温度 1150℃、终轧温度 840℃，轧后厚度为 3.8 mm。然后通过盐浴超快冷至 M_s 点以下的 350℃进行一步法配分热处理(淬火温度 = 配分温度)，配分时间分别为 10 s、30 s 和 60 s，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。

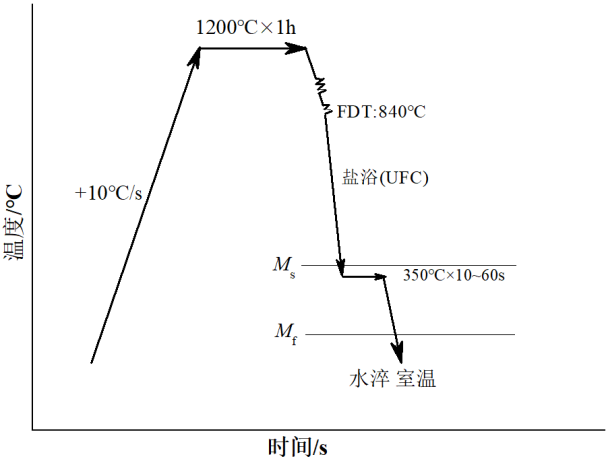


Figure 1. Process flow chart of the tested steel
图 1. 试验钢的工艺流程图

2.3. 测试方法

根据 GB/T 228.1-2021 将得到的试验钢通过线切割沿轧制方向取样制得室温拉伸试样，其力学性能测试是在 WAW-500C 型万能材料试验机上进行，拉伸速度取 2 mm/min，试样的标距和宽度分别取 50 和 12.5 mm [9]。试样经磨样、抛光和侵蚀后观察显微组织，在 ZEISS 显微镜下观察金相组织(OM)，在 Nova nano 400 扫描电镜和 JEM-2100F 透射电镜下观察扫描组织(SEM)和透射组织(TEM)并进行特征分析，按 GB8362-87 利用五峰法在多晶衍射仪 XRD 测量得到试验钢中的残余奥氏体。

3. 试验结果与分析

3.1. 试验钢的显微组织

图 2 是试验钢经热轧和超快冷至 350℃分别配分 10 s、30 s 和 60 s 后得到的金相显微组织，主要由板条马氏体(M)和少量的残余奥氏体(Ar)组成。根据图 2 观察所知，随着配分时间的延长，马氏体的体积分数逐渐减少，10 s 短时间配分试验钢中有较多的块状马氏体，是由于试验钢热轧后采用的一步配分法(淬火温度 = 配分温度)，在淬火温度等温时，会有过冷奥氏体转变为马氏体，同时也进行配分热处理，马

氏体中的碳原子会向未转变的奥氏体中扩散, 10 s 配分时间较短, 扩散至未转变奥氏体中的碳原子也较少, 导致未转变的奥氏体不稳定, 在后续水淬至室温过程中转变为二次马氏体[10]。30 s 配分的试验钢中块状马氏体很少, 且马氏体尺寸较 10 s 配分试验钢有明显减小, 应该是碳的配分过程基本完成。60 s 配分时间较长, 金相组织中马氏体以条状和岛状为主, 应该是碳的配分过程已完成。

图 3 中扫描电镜组织可以看到, 10 s 短时间配分试验钢中块状马氏体较多且尺寸较大, 组织中白亮的残余奥氏体较少。根据 XRD 测量可知, 10 s、30 s 和 60 s 配分热处理后钢中残余奥氏体的体积分数分别为 8.1%、12.2%和 12.8%。因此, 随着配分时间延长, 试验钢中残余奥氏体体积分数逐渐增加, 但是在 30 s 后增加较少, 从图 3 中可以看出, 10 s 和 30 s 配分试验钢中马氏体板条边界较清晰, 而 60 s 配分试验钢中马氏体板条边界较模糊, 应该是 60 s 长时间的配分增加了马氏体的回火程度, 同时, 也会有较多的碳化物析出, 这样会消耗马氏体中的碳原子, 故而, 60 s 长时间的配分后获得的残余奥氏体比 30 s 只有小幅增加。因此, 配分时间对热轧 Q&P 钢的组织形貌控制及体积分数变化有重要影响。

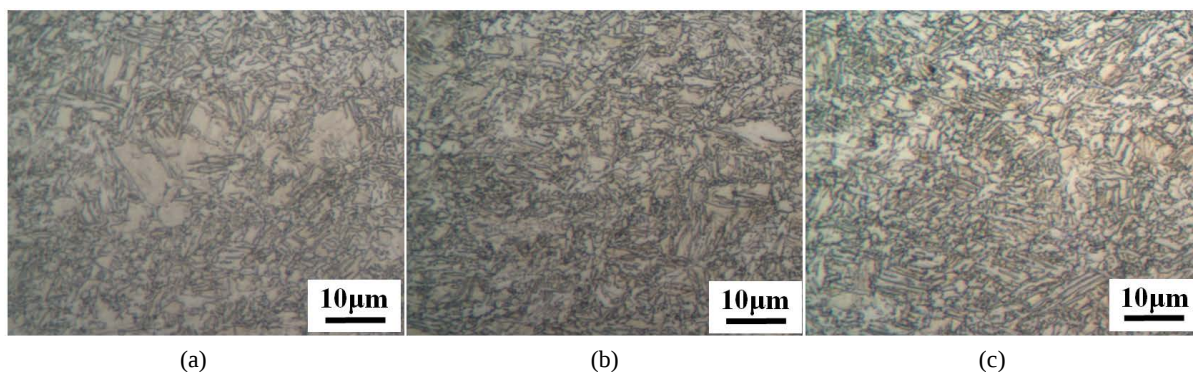


Figure 2. Microstructures of the tested steel with different partition time (a) 10 s; (b) 30 s; (c) 60 s

图 2. 试验钢不同配分时间的显微组织 (a) 10 s; (b) 30 s; (c) 60 s

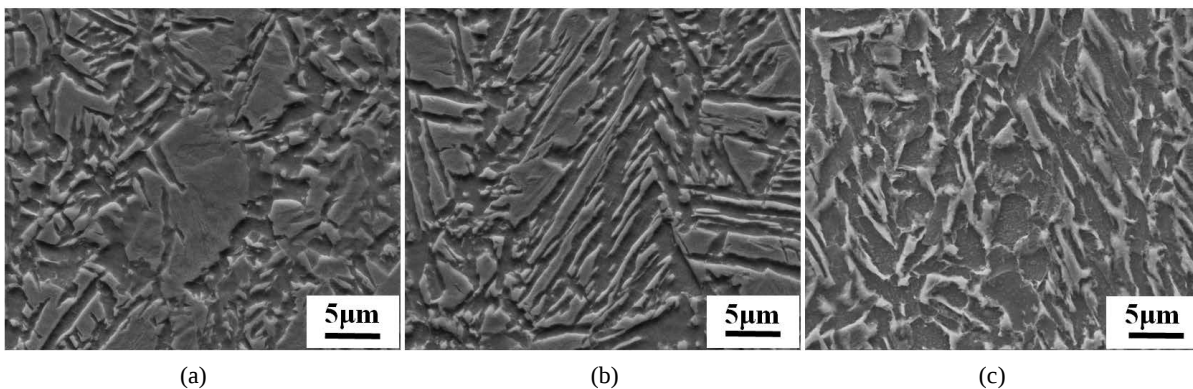


Figure 3. SEM micrographs of the tested steel with different partition time (a) 10 s; (b) 30 s; (c) 60 s

图 3. 试验钢不同配分时间的 SEM 组织 (a) 10 s; (b) 30 s; (c) 60 s

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如表 2 所示, 当配分时间由 10 s 增加至 60 s 时, 抗拉强度由 1016 MPa 减少到 938 MPa, 屈服强度由 598 MPa 减少到 566 MPa, 伸长率由 19.0%增加至 24.5%, 屈强比较低在 0.6 左右, n 值较高为 0.16~0.18, 强塑积较高在 20 GPa·%左右。根据 GB/T20564.9-2016《汽车用高强度冷连轧钢板及钢带: 淬火配分钢》, 配分时间为 10 s 和 30 s 的试验钢满足牌号 CR550/980QP 的力学

性能要求。试验钢中的合金含量较少，但通过热轧大变形和超快冷保留大量的形变亚结构，这些形变亚结构加速后续配分行为和影响相变组织，使得钢的抗拉强度最高达到 1016 MPa、伸长率最高达到 24.5%，强塑积达到 23.69 GPa·%，具有优异的强度和塑性匹配。

试验钢拉伸后的应力应变曲线较平滑，表现为连续屈服，如图 4 所示。其中，30 s 和 60 s 配分的试验钢有较长的均匀变形区，是由于该配分时间下得到的残余奥氏体较多，在拉伸变形时首先发生软相残余奥氏体的变形，残余奥氏体通过 TRIP 效应转变为马氏体，接着会发生马氏体的塑性变形，这种通过软相残余奥氏体和硬相马氏体的协调变形有效提高了钢的均匀变形能力。当配分时间为 30 s 时，试验钢的屈强比最低位 0.58、 n 值最高为 0.18、强塑积最高为 23.69 GPa·%，具有最优异的冷加工成形性能。

Table 2. Mechanical properties of the tested Q&P steel

表 2. 试验 Q&P 钢的力学性能

配分时间/s	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	$R_{p0.2}/R_m$	$A_{50}/\%$	n	强塑积/GPa·%
10	598	1016	0.59	19.0	0.17	19.23
30	574	987	0.58	24.0	0.18	23.69
60	566	938	0.61	24.5	0.16	22.93

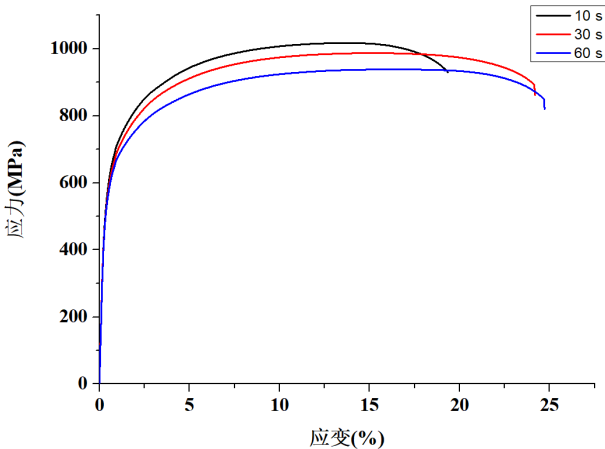


Figure 4. The tensile stress-strain curves of the test steel

图 4. 试验钢的应力应变曲线

试验钢的力学性能差异是由显微组织不同引起。当配分时间为 10 s 时，得到的马氏体体积分数最多，且由于大量的形变亚结构保留至相变区域，得到高位错密度的马氏体板条(如图 5a 所示)，其抗拉强度也最高为 1016 MPa，得到的残余奥氏体体积分数最少，TRIP 效应最弱，其屈服强度最高为 598 MPa，伸长率最低为 19.0%；当配分时间为 60 s 时，得到的马氏体体积分数最少，且由于马氏体回火程度高，使得钢的强度最低为 938 MPa，得到的残余奥氏体体积分数最多，TRIP 效应最强，其屈服强度最低为 566 MPa，伸长率最高为 24.5%；当配分时间为 30 s 时，得到的马氏体体积分数和残余奥氏体体积分数居中，且残余奥氏体以薄片状为主(如图 5b 所示)，其抗拉强度、屈服强度和伸长率均居中，但其屈强比最低、 n 值和强塑积最高，综合力学性能最优异。

3.3. Q&P 钢的节能减排效果

面对全球能源危机和环境污染的问题，为了达到“碳中和碳达峰”的“双碳”目标，Q&P 钢作为第三代汽车用先进高强钢的代表，其比传统高强钢具有更高的强度和强塑积，同时兼具有低的屈强比和高

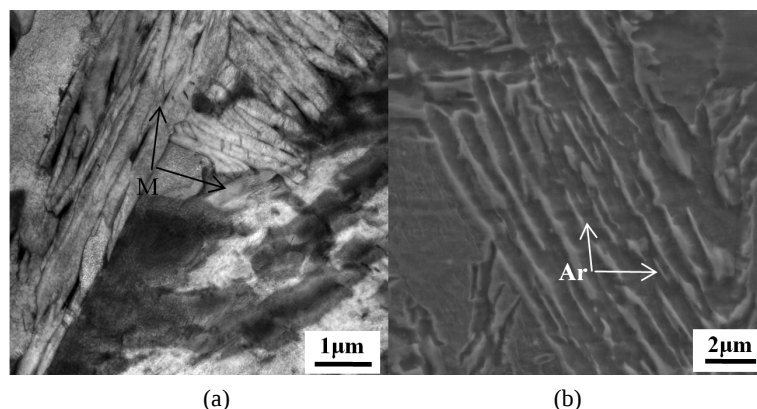


Figure 5. Microstructure and morphology characteristics of the tested steel (a) M10 s; (b) Ar30 s

图 5. 试验钢的组织形貌特征(a) 马氏体 10 s; (b) 残余奥氏体 30 s

的 n 值, 表现出高的碰撞安全性能和出色的冷冲压成形性能, 可广泛用于形状结构复杂的汽车底盘和防撞梁等部件, 从而有效减少钢板厚度, 实现汽车的轻量化, 达到节能减排的效果。相关研究结果表明, 钢板厚度减少 0.1 mm, 汽车自重可减少 12%, 燃油损耗可减少 10%, 碳排放可减少 8%, 因此, 汽车轻量化是提高燃油效率和降低碳排放的有效方式。

日本科学家研究了钢板抗拉强度与厚度的关系, 当抗拉强度为 590 MPa 厚度为 0.8 mm 的双相钢板, 其承载力与抗拉强度为 370 MPa 厚度为 1.0 mm 的 Q235B 钢板相同, 因此, 采用 590 MPa 级双相钢板替代常规的 Q235B 钢板用于汽车部件的生产制造, 可使汽车部件减重约 20% [9] [11]。对于本工艺条件下的 Q&P 钢, 10 s 配分热处理的试验钢力学性能达标且抗拉强度最高为 1016 MPa, 用其替换常规的 Q235B 钢, 可使汽车制造部件减重 41.3%, 相应的燃油损耗减少 34.4%, 碳排放可减少 27.5%, 具有显著的节能减排效果。

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 + 配分热处理得到性能优异的 980 MPa 级 Q&P 钢板, 其显微组织均为马氏体和残余奥氏体。

2) 试验钢的抗拉强度为 938~1016 MPa、屈服强度为 566~598 MPa、伸长率 19.0%~24.5%, n 值较高为 0.16~0.18, 屈强比较低为 0.6 左右, 强塑积较高在 20 GPa·%左右, 具有优异的强韧性。

3) 10 s 和 30 s 配分试验钢的力学性能达到牌号 CR550/980QP 要求, 其中 10 s 配分试验钢的抗拉强度最高, 可使汽车制造部件减重 41.3%, 碳排放可减少 27.5%, 节能减排效果显著。

基金项目

武汉科技大学大学生创新创业训练计划项目“低碳短时热轧 Q&P 钢的组织性能研究”(项目编号: 23ZA508); 武汉科技大学教学改革研究基金项目“基于多层次项目教学培养拔尖创新人才的探索和实践”(项目编号: 2023X065)。

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] 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.
- [3] 李洪周, 张文晶. 基于微观组织结构重构的先进高强度双相钢力学性能预测[J]. 材料科学, 2019, 9(10): 955-963.

- [4] 高学然, 陈晓虎, 原思宇, 等. 汽车用 Q&P 钢的研究进展[J]. 金属热处理, 2023, 48(7): 245-253.
- [5] 王乐. 第三代汽车用先进高强钢 SRQP980 的研制开发[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2019.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 曾金, 栗克建, 高翔, 等. 微合金化对 Q&P 钢组织性能影响的研究进展[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(7): 1-12.
- [9] 何畅, 董璐, 涂军, 等. 汽车用热轧双相钢的组织性能测试及研究[J]. 材料科学, 2022, 12(11): 1159-1164.
- [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] 董瑞峰, 孙丽钢, 刘哲, 等. 汽车结构用 590 MPa 级热轧双相钢的开发[J]. 轧钢, 2008, 25(1): 9-13.