

汽车用热轧双相钢的组织性能测试及研究

何畅¹, 董璐¹, 涂军², 滕胜¹, 杨双峰¹, 胡宏亮¹, 吴腾^{1*}

¹武汉科技大学材料与冶金学院, 湖北 武汉

²湖北省计量测试技术研究院能源所, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年10月8日; 录用日期: 2022年11月15日; 发布日期: 2022年11月24日

摘要

基于汽车轻量化原则, 通过控轧控冷工艺技术得到了强韧性较好的DP580和DP600热轧双相钢, 研究了等温时间对其组织与性能的影响。研究表明: 随着等温时间增加, 钢中铁素体的尺寸和体积分数均增加, 抗拉强度由616 MPa降低至586 MPa, 伸长率较高在30%左右, 屈强比较低小于0.6, n 值较高在0.18~0.20。同时考虑到产线上长时间的等温会降低生产效率, 故试验钢合适的等温时间为7 s左右。

关键词

热轧双相钢, 等温时间, 显微组织, 力学性能

Test and Research on Microstructure and Properties of Hot Rolled Dual Phase Steel for Automobile

Chang He¹, Lu Dong¹, Jun Tu², Sheng Teng¹, Shuangfeng Yang¹, Hongliang Hu¹, Teng Wu^{1*}

¹School of Materials and Metallurgy Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

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

Received: Oct. 8th, 2022; accepted: Nov. 15th, 2022; published: Nov. 24th, 2022

Abstract

Based on the principle of vehicle lightweight, DP580 and DP600 hot rolled dual phase steels with good strength and toughness were obtained by controlled rolling and controlled cooling technol-

*通讯作者。

文章引用: 何畅, 董璐, 涂军, 滕胜, 杨双峰, 胡宏亮, 吴腾. 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. DOI: 10.12677/ms.2022.1211128

ogy, and then effect of isothermal time on microstructure and mechanical properties of the tested steel was studied. The results show that with the isothermal time increases, the size and volume fraction of ferrite increase, the tensile strength is reduced from 616 MPa to 586 MPa, the elongation is about 30%, the yield ratio is lower than 0.6, and the n value is 0.18~0.20. Considering that the production efficiency will be reduced if the production line is isothermal for a long time, the appropriate isothermal time for the test steel is about 7 s.

Keywords

Hot-Rolled Dual Phase Steel, Isothermal Time, Microstructure, Mechanical Property

Copyright © 2022 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

汽车行业发展迅速并已成为国民经济的支柱，随之也带来了能源短缺和环境保护等问题。汽车的生产制造在保证安全性的前提下采用轻量化的材料，可使总重降低，从而达到节能减排的目的[1] [2]。因此，汽车轻量化成为研究的主要方向。先进高强度双相钢(DP)是由硬相马氏体和软相铁素体两种相复合组成，其具有高的加工硬化率、低的屈强比以及强度与塑性的良好匹配等优异性能，已作为汽车轻量化材料广泛应用于汽车底盘、车顶内板和保险杠加强体等结构件中[3]。

冷轧双相钢的工艺控制比较稳定，是目前汽车用双相钢制品的主流，但冷轧需要增加退火、重卷等工序，也容易带来加工硬化等问题，使生产成本与生产周期增加，不利于国家的“双碳”政策的实施。控轧控冷技术(TMCP)的快速发展和控轧控冷设备的更新换代，为热轧双相钢的成功开发和应用提供了坚实基础。热轧双相钢的工艺流程短有利于降低碳排放，且其较好的综合力学性能有利于替代冷轧双相钢，从而受到用户和生产企业的青睐[4]。本文基于汽车轻量化进行低碳低合金的成分设计，通过控轧控冷工艺技术生产得到不同等温时间的试验钢，最后经组织性能的测试来研究工艺的影响因素，为高强度热轧双相钢的生产和获得优异性能提供参考。

2. 试验材料及方法

2.1. 试验材料

试验钢是通过真空冶炼炉冶炼得到的主要化学成分如表 1 所示，采用的是 C-Si-Mn-Cr 的成分设计，较低的 C 含量可有效降低碳当量和焊接裂纹敏感指数，从而提高钢的焊接性能和冷加工成形性能；少量的 Si 和适量的 Cr 可抑制渗碳体的形成促进铁素体的析出，也尽可能减少氧化铁皮的生成提高表面质量，少量的 Al 主要用于脱氧以净化钢质。

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

表 1. 试验双相钢的化学成分(质量分数, %)

C	Si	Mn	P	S	Al	N	Cr	Fe
0.07	0.2	1.6	<0.008	<0.006	0.04	0.004	适量	余量

2.2. 试验过程

铸锭在浇注后经锻造得到 40 mm 的坯料, 将坯料放入 1200℃ 的加热炉中保温 1 h, 然后进行两阶段的控制轧制, 具体的第一阶段为三个道次的再结晶区粗轧、第二个阶段为二个道次的未再结晶区精轧, 开轧温度为 1140℃, 终轧温度为 825℃, 轧后厚度为 4 mm, 再经层流冷却至 680℃ 分别等温 7 s 和 9 s 以析出先共析铁素体, 最后水冷至 300℃ 以下卷取发生马氏体相变, 得到铁素体+马氏体的热轧双相钢。

2.3. 测试方法

对控轧控冷后得到的试验钢进行取样, 根据 GB/T 228.1-2021 制取室温拉伸试样, 力学性能和 n 值的测试在 WAW-500C 型万能材料试验机通过拉伸试验进行, 拉伸的速度取 2 mm/min, 试样的宽度和标距分别取 12.5 mm 和 50 mm。显微组织观察的试样通过线切割沿热轧板纵向切取, 采用 ZEISS 金相显微镜进行金相组织观察(OM)和定量分析, 采用 Nova nano 400 扫描电镜进行扫描组织的观察(SEM)及特征分析。

3. 试验结果与分析

3.1. 试验钢的显微组织

图 1 所示为试验钢在控制轧制后经 7 s 和 9 s 不同时间等温得到的金相显微组织, 由铁素体和马氏体两相混合组成。图中显示铁素体呈白亮色, 主要是多边形, 也有较多晶粒非常细小的铁素体组织, 这是由于铁素体是从过冷奥氏体中析出, 包括形核和长大两个过程, 应该有很多晶粒长大不完全, 晶粒组织很细小[5]。通过 IPP 软件对得到的组织进行定量知, 7 s 和 9 s 等温试样的铁素体平均晶粒尺寸分别为 4.8 和 5.3 μm , 体积分数分别为 83.5% 和 87.3%。从定量结果发现, 试验钢中铁素体的平均晶粒尺寸较小约为 5 μm , 铁素体的体积分数较多约为 85%, 这是由于试验钢在第一阶段的再结晶区粗轧细化了原奥氏体晶粒, 接着在第二阶段精轧使奥氏体中获得大量形变带, 这些形变带为后续的铁素体相变提供了形核点, 有利于组织的细化。另外, 9 s 等温的时间长, 得到铁素体的尺寸和体积分数均增加, 这说明在两相区的等温时间长, 组织会不断长大并且更加均匀。

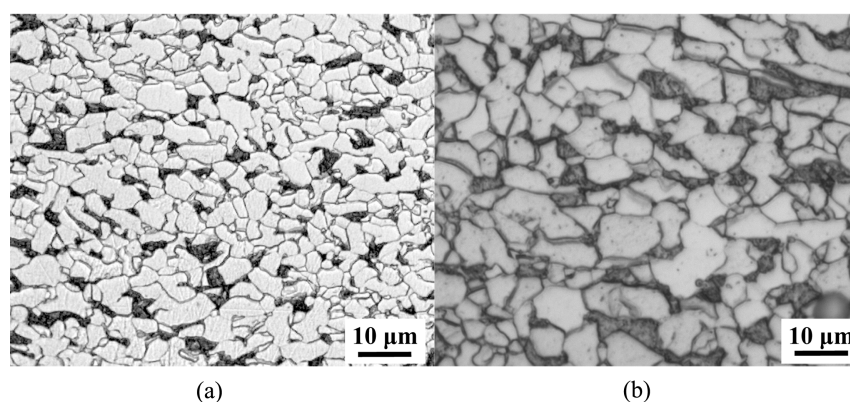


Figure 1. Microstructures of the tested steel with different isothermal time (a) 7 s; (b) 9 s

图 1. 试验钢不同等温时间下的金相组织(a) 7 s; (b) 9 s

试验钢在两相区等温析出铁素体后水冷至 300℃ 以下卷取发生马氏体相变, 得到的马氏体弥散分布在铁素体周围, 7 s 和 9 s 等温试样的马氏体体积分数分别为 16.5% 和 12.7%, 其通过扫描电镜观察到的组织如图 2 所示。图 2 中显示马氏体具有浮凸效应, 且以岛状和长条状为主, 也观察到少量块状马氏体。9 s 等温试样的等温时间长, 得到的马氏体体积分数要少, 是由于试验钢在两相区等温过程中还会发生碳原

子向未转变的过冷奥氏体扩散, 9 s 等温试样的扩散时间长, 未转变过冷奥氏体中的碳含量要多, 降低了 M_s 点, 后续相变得到的马氏体也要少。故而, 等温时间对双相钢的组织形貌及含量有较大影响。

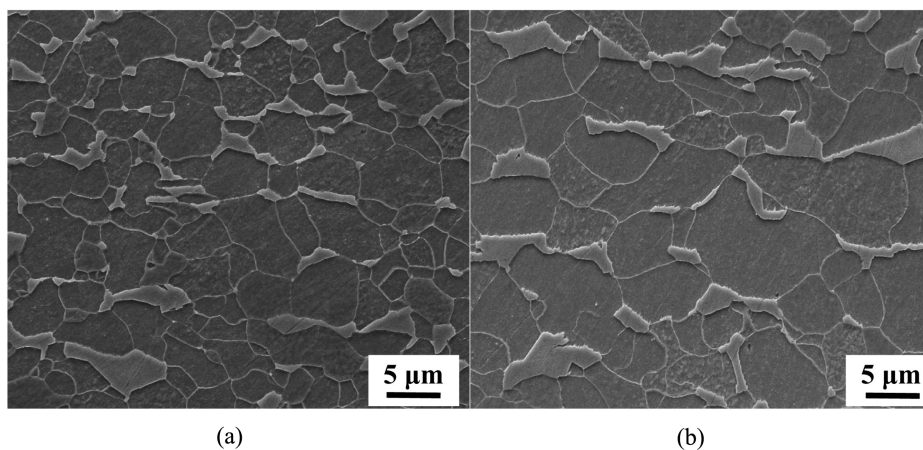


Figure 2. SEM micrographs of the tested steel with different isothermal time (a) 7 s; (b) 9 s
图 2. 试验钢不同等温时间下的 SEM 组织(a) 7 s; (b) 9 s

3.2. 双相钢显微组织与力学性能关系

试验钢在室温下经拉伸测试后得到的力学性能结果如表 2 所示。由表 2 数据知, 热轧双相钢具有高的伸长率在 30% 左右、高的加工硬化率 n 值在 0.18~0.20, 还具有较低的屈强比小于 0.60。根据 GB/T 20887.3-2010《汽车用高强度热连轧钢板及钢带: 双相钢》知, 经 7 s 和 9 s 等温的试验钢力学性能均 DP580 钢的性能要求, 说明试验钢具有较好的强韧性匹配, 而 7 s 等温的试验钢力学性能还达到了 DP600 的性能要求, 因此, 7 s 等温的试验钢综合力学性能要优于 9 s 等温的试验钢。

Table 2. Mechanical properties of the tested steel

表 2. 试验钢的力学性能

等温时间	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A_{50}/\%$	$R_{p0.2}/R_m$	n 值
7	366	618	27.5	0.59	0.18
9	338	586	31.0	0.58	0.20
GB/T 20887.3-2010	330~470	≥ 580	≥ 22	-	≥ 0.14

两种试样的应力应变曲线如图 3 所示, 得到的拉伸曲线比较平滑没有出现上下屈服点, 而且具有较高的初始加工硬化率和较长的均匀塑性变形区。是由于马氏体相变膨胀挤压周围铁素体, 使铁素体内产生较多的可动位错; 同时, 铁素体作为双相钢中的软相会首先发生塑性变形, 而且铁素体的体积分数较大, 也会产生大量的可动位错[6]。因此, 双相钢在拉伸变形时表现为连续屈服。而且试验钢中有较多的条状马氏体, 其板条边界不规则易发生扭折(如图 4 所示), 是由于热轧后过冷奥氏体中保留了大量的形变带等高密度位错, 破坏了原奥氏体中结构的均匀性, 而马氏体是通过奥氏体发生相变得到, 故观察到较多不规则的边界, 而这些带有不规则边界的细化的条状马氏体较大的增加了马氏体与铁素体的有效接触面积, 使得马氏体膨胀产生较多的可动位错, 提高了钢的 n 值。另外, 钢中屈强比较低, 这些均有利于提高钢的深冲性能和冷加工成形性能。

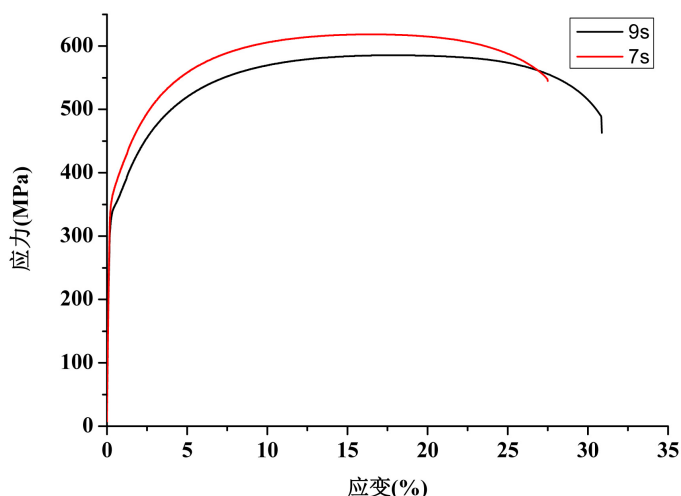


Figure 3. Stress strain curve of the tested steel

图 3. 试验钢的应力应变曲线图

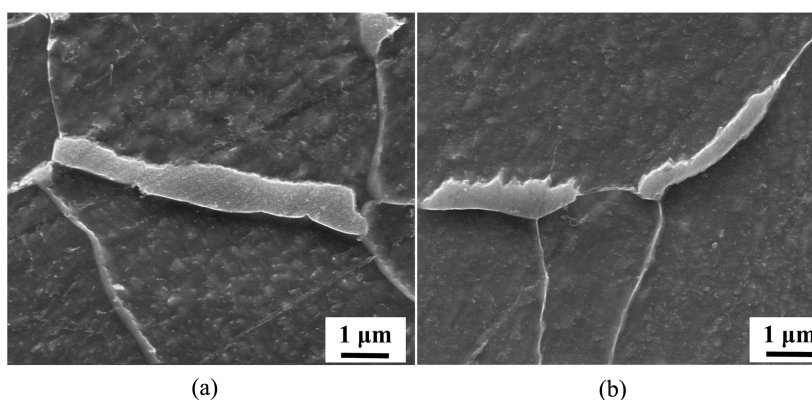


Figure 4. Microstructure characteristics of lath martensite in test steel (a) 7 s; (b) 9 s

图 4. 试验钢的条状马氏体组织特征(a) 7 s; (b) 9 s

试验钢的力学性能差异与显微组织有较大关系。7 s 等温试样的两相区等温时间短，得到的铁素体体积分数少，而铁素体作为软相在塑性变形过程中起主要作用，得到的伸长率相对较低为 27.5%；又由于铁素体的平均晶粒尺寸要小为 4.8 μm ，根据霍尔佩奇公式，7 s 等温试样得到的屈服强度要高为 366 MPa；钢中马氏体的体积分数较多为 16.5%，而马氏体作为硬相在塑性变形后期起强化作用，得到的抗拉强度较高为 618 MPa，即达到了 DP600 的力学性能要求[7] [8]。而 9 s 等温试样的两相区等温时间长，钢中马氏体的体积分数较少为 12.7%，得到的抗拉强度较低为 586 MPa，达不到 DP600 的力学性能要求。同时考虑到产线上长时间的等温会降低生产效率，故试验钢合适的等温时间为 7 s 左右。

3.3. 双相钢的节能减排效果

与常规的高强钢相比，双相钢因较低的屈强比和较高的 n 值具有较好的冲压成形性能、扩孔性能和耐疲劳性能，可实现对具有复杂形状的轮辐和底盘等汽车零部件采用高强钢进行冲压，从而可有效减小材料的厚度。当钢板厚度减小 0.10 mm 时，车身可减重 12%，燃油消耗则下降 10%，碳排放下降 8%。国际汽车用钢协会针对电动汽车车体发布了未来钢质汽车项目 FSV (Future Steel Vehmle)，其汽车使用的高强钢和先进高强钢高达 97%，可实现车身减重 39% 为 188 kg，并具有 5 星的安全评级。

日本科学家对钢板的抗拉强度与钢板厚度之间的关系进行研究发现：厚度为 0.80 mm 对应抗拉强度为 590 MPa 的钢板与厚度为 0.83 mm 对应抗拉强度为 540 MPa 的钢板，其承载力与厚度为 1 mm 对应抗拉强度为 370 MPa 的钢板相同，因此，采用 DP590 或者 DP540 替代常规的 Q235B 高强钢来制作汽车零部件，可使相应的汽车部件减重约 20% 与 17% [9]。所以，对于本试验钢，7 s 等温试样的抗拉强度较高为 616 MPa，用其替换 Q235B 高强钢，可使相应的汽车部件减重约 21.5%，燃油消耗则下降 18%，碳排放下降 14%，具有较好的节能减排效果。

4. 结论

- 1) 采用低碳低合金的成分设计，通过控轧控冷工艺技术得到性能良好的 DP580 和 DP600 双相钢，其显微组织均为铁素体+马氏体。
- 2) 试验钢的屈服强度为 338~366 MPa、抗拉强度为 586 MPa~616 MPa，伸长率为 27.5%~31.0%，屈服比较低为 0.58~0.59， n 值较高为 0.18~0.20，表现出较好的强韧性。
- 3) 试验钢的力学性能达到 DP580 与 DP600 双相钢的要求，可满足车辆零部件的减重要求，具有较好的节能减排效果。

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] 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.
- [3] 唐荻, 赵征志, 米振莉, 等. 汽车用先进高强钢板带钢[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2016.
- [4] 陈维晋, 殷胜, 裴新华. 580DP 与 700DP 热轧双相钢的力学性能与成形性能[J]. 机械工程材料, 2020, 44(7): 92-97.
- [5] 董毅, 时晓光, 韩斌, 等. 600 MPa 级 C-Si-Mn-Cr 热轧双相钢的研制[J]. 鞍钢技术, 2014, (3): 12-15.
- [6] 利成宁, 袁国, 周晓光, 等. 分段冷却模式下热轧双相钢的组织演变及力学性能[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(6): 810-814.
- [7] 刘斌, 王志刚, 王孟, 等. 冷却工艺对高强度热轧双相钢组织与力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(17): 174-176.
- [8] 方圆, 刘雅政, 周乐育, 等. 马氏体体积分数对热轧双相钢形变位错结构和断裂的影响[J]. 钢铁, 2009, 44(8): 89-92.
- [9] 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.