● 实用成型技术 Practical Shaping Technology ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.07.021

控轧控冷对船舶用钢组织与性能的影响

李振华[1],王灏旭[1],李 壮[1],蔡一钦[1],苗博闻[1],宋殿福[1],张 利[1],李艳梅[2]
(1. 沈阳航空航天大学 材料科学与工程学院,辽宁 沈阳 110136;2. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室,辽宁 沈阳 110819)

摘 要:对比研究了两种成分控轧控冷船舶用钢的组织与性能。结果表明,2 种钢控轧控冷后,组织均为贝氏体、针状铁素体、多边形铁素体及少量珠光体。控轧控冷引起的细小 M-A 岛复合强化、铁素体细晶强化作用提高了实验钢的强度、硬度及低温冲击韧性。2 种实验钢在 0°轧制方向上的冲击吸收功最大,分别达到了 238.74 J 和 274.68 J,而在 90°轧制方向上的冲击功最小,B 钢高于 A 钢。镍量的增多能够提高实验钢的硬度、强度、塑性及低温冲击韧性。

关键词:船舶用钢;控轧控冷;显微组织;力学性能
中图分类号:TG335 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2020)07-0679-04

Influence of Controlled Rolling and Cooling on Microstructure and Mechanical Properties of Marine Steel

LI Zhenhua[1], WANG Haoxu[1], LI Zhuang[1], CAI Yiqin[1], MIAO Bowen[1], SONG Dianfu[1], ZHANG Li[1], LI Yanmei[2]
(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China; 2. State Key Lab of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The microstructure and properties of two kinds of steel for ship controlled rolling and cooling were studied. The results show that the structures of the two steels are bainite, acicular ferrite, polygonal ferrite and a small amount of pearlite after controlled rolling and cooling. The tensile strength, hardness and low temperature impact toughness of the experimental steel are improved by the combination strengthening of small M-A island and ferrite fine grain. The impact energy of the two experimental steels in the 0° rolling direction is the largest, reaching 238.74 J and 274.68 J, respectively, while the impact energy in the 90° rolling direction is the smallest, and steel B is higher than steel A. The increase of nickel content can improve the hardness, strength, plasticity and low temperature impact toughness of the experimental steel.

Key words: ship steel; controlled rolling and cooling; microstructure; mechanical properties

21 世纪是海洋开发利用的新时代,海洋资源的已成为世界各国的开发热点[1]。随着船舶航程的不断增加,船舶所面临的运行环境越来越苛刻,由此造成船舶的安全风险甚至报废更是不容小觑[2]。为了保证船舶及海洋工程的服役性能,船舶用钢的研发需关注其强度、塑性、韧性、疲劳性能、焊接性能和耐腐蚀性能等[3-6]。

各国正在争相开发强度级别更高,综合性能更好,且具有良好的焊接和加工成型性的微合金化船用钢板。目前,采用微合金化及控轧控冷技术(TMCP)是生产高强度船板钢的主要方法[7]。合理设计合金元素含量及终轧温度、终冷温度和冷却速度等参数,以细晶强化、M-A 岛复合强化、第二相强化等强化方式有助于获得更高的强韧性能指标[8,9]。

本文对比研究了 2 种不同成分的船舶用钢,分析了经过控轧控冷后其组织及性能的不同,以期为该技术和钢板的应用提供理论依据。

1 实验材料及方法

本实验所用材料来自于国内某钢厂,供货状态为热轧钢材,其化学成分如表 1 所示。

将 2 种 90 mm 厚的热轧板在 ϕ450 mm 轧机上经过如下工艺处理:加热温度为 1 200 ℃,压下规程

收稿日期:2020-04-09
基金项目:十三五国家重点研发计划项目(2017YFB0305301),沈阳航空航天大学大学生创新创业训练计划项目(201910143485)
作者简介:李振华(1998-),辽宁朝阳人,本科. 研究方向:金属材料的组织与性能. 电话:15942316481,E-mail:923455371@qq.com
通讯作者:李 壮(1964-),辽宁沈阳人,教授. 研究方向:金属材料的组织与性能. E-mail:Lizhuang20047@163.com

表1 实验钢的化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of experimental steel

钢种	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Nb	Ti	Alt	N
A	0.05	0.21	1.5	0.004	0.003	0.31	0.33	0.21	0.02	0.014	0.02	≤0.004
B	0.051	0.19	1.49	0.004	0.003	0.62	0.32	0.20	0.021	0.014	0.03	≤0.004

依次为 90,72,57,45,36,29 和 25 mm,未再结晶区最后 3 道次的道次压下率≥15%，总压下率为 0.812 5,具体参数如表 2。

表2 实验钢控轧控冷参数
Tab.2 Controlled rolling and cooling parameters of experimental steels

阶段	开轧温度	开轧规格	终轧温度	开冷温度	返红温度
第一阶段	1 130 ℃	90 mm	—	—	—
第二阶段	900 ℃	45 mm	830 ℃	790 ℃	390 ℃

采用线切割将控轧控冷后的钢坯切割金相、拉伸性能和冲击试样。2 种钢坯的拉伸试样和冲击试样各 3 组,分别取自平行、垂直和与轧制方向成 45°。金相试样经 4%硝酸酒精腐蚀后进行光学显微镜观察。采用 Lepera 方法 [10] 突出显微结构成分。通过 KYKY-2800B 扫描电镜进行断口分析。用 HVS-50 维氏硬度机检测硬度,负载 1 kg 力。采用 5105-SANS 微机控制电子万能试验机进行拉伸试验,ZBC-300C 摆式冲击试验机进行 -80 ℃低温冲击实验。

2 实验结果与讨论

2.1 显微组织

实验钢控轧控冷后组织如图 1 和图 2 所示。

由图 1 可见,A 钢的多边形铁素体尺寸大约为 7~10 μm,如图 1(a)所示。B 钢的铁素体晶粒尺寸相对减小,尺寸大约为 5~8 μm,如图 1(b)所示。经 Lepera 试剂腐蚀后,如图 2 所示,铁素体变为灰色,贝氏体、珠光体变为黑色,其中不规则形状弥散分布的白色区域为 M-A 岛。这些 M-A 岛数量很多,为本成分微合金钢在控轧控冷后留下的特有的产物。

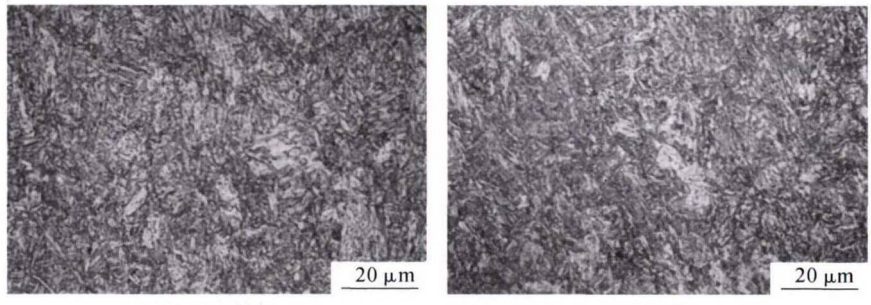
2.2 断口形貌

实验钢控轧控冷后的拉伸断口与冲击断口形貌分别如图 3、图 4 所示。

由图 3 可以看出,2 种钢的断口均为微孔聚合剪切断裂,B 钢的韧窝更深，表明 B 钢的韧性相对较好。图 4 为 -80 ℃冲击实验断口,可以看出,2 种钢冲击后的断口形貌均含有大量韧窝，特别是在 B 钢中,呈现出大而深的韧窝,表明 2 种钢在此条件下均具有良好的低温冲击韧度。从断口分析可见 B 钢的冲击韧性优于 A 钢。

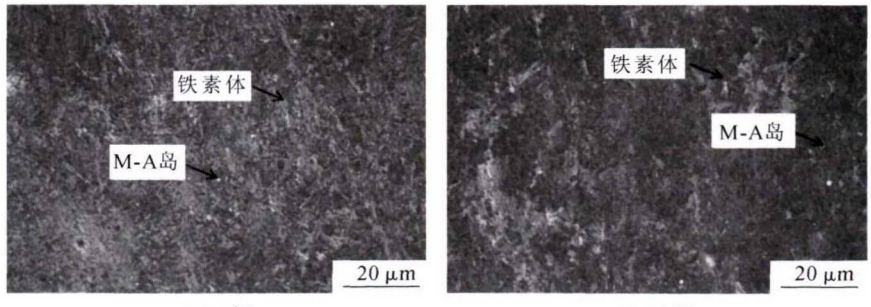
2.3 力学性能

实验钢控轧控冷后硬度、-80 ℃冲击吸收功平均值，力学性能的强度与伸长率平均值的柱状图以及其应力–应变曲线图如表 3 所示。



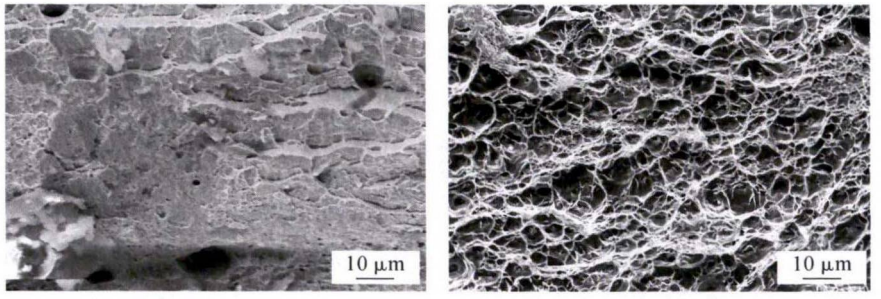
(a)A钢　　(b)B钢

图 1 实验钢控轧控冷后的显微组织(4%硝酸酒精腐蚀)
Fig.1 Microstructure of experimental steels after controlled rolling and cooling



(a)A钢　　(b)B钢

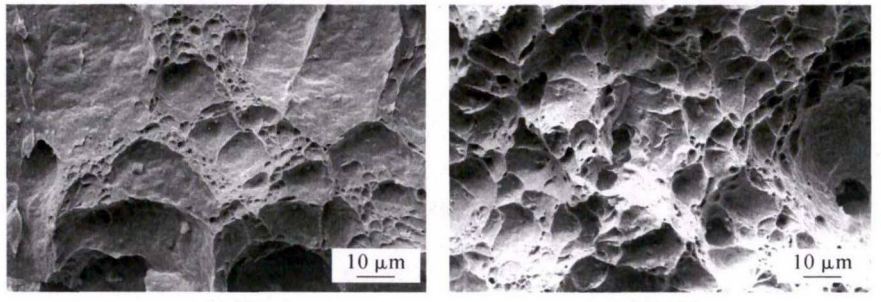
图 2 实验钢控轧控冷后的显微组织(Lepera 试剂腐蚀)
Fig.2 Microstructure of experimental steels after controlled rolling and cooling



(a)A钢　　(b)B钢

图 3 实验钢拉伸断口的 SEM 形貌

Fig.3 SEM images of tensile fracture of experimental steels



(a)A钢　　(b)B钢

图 4 实验钢冲击断口的 SEM 形貌

Fig.4 SEM images of impact fracture surface of experimental steels

表 3 实验钢硬度和冲击功(–80 ℃)

Tab.3 Hardness and impact energy(–80 ℃) of experimental steels

钢种	硬度 / HV_{10}	冲击吸收功 /J		
		0°	45°	90°
A 钢	255	238.74	188.23	101.16
B 钢	298	274.68	209.12	115.39

由表 3 可以看出，A 钢、B 钢的纵向 0°时的冲击功最高，分别达到了 238.74 和 274.68 J，90°轧制方向上的冲击功最小。可见，在 -80℃时具有较好的低温韧性。B 钢冲击吸收功高于 A 钢，B 钢硬度高于钢。A 钢的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别达到 739.0 MPa、641.0 MPa 和 9.6%，B 钢的分别为 809.1 MPa、644.0 MPa 和 10.98%，可见 B 钢拉伸性能优于 A 钢。

2.4 结果分析与讨论

在控制轧制过程中，由于碳的扩散、富集，在冷却过程中，马氏体和残余奥氏体一起构成的细小 M-A 岛在基体组织中弥散分布。A 钢、B 钢的高强度、高硬度均与 M-A 岛的复合强化作用有关，B 钢中具有相对较多的 M-A 岛，所以造成 B 钢的强度、硬度高于 A 钢，如图 2 所示。M-A 岛是基体组织中的第二相，其大小、形状及分布能够在很大程度上影响钢材的低温冲击韧度。分布均匀的细小 M-A 岛能够有效的阻碍位错的运动，同时延缓疲劳裂纹的扩展，从而使钢的低温冲击韧性大大提高。

另外，微量镍、铬和钛等元素存在，板条内或者界面处可能在轧制中还有纳米级析出物，轧制过程中的部分细小颗粒相从基体中析出，可能起到第二相强化[11]。微合金化和控轧控冷是 2 种钢均获得高强度、高硬度和良好的力学性能的重要原因。实验钢的拉伸断口可以看出均存在较明显的韧窝，均为微孔聚集型剪切断裂，并且 B 钢的韧窝相对较多，如图 3 所示，说明 B 钢的韧性相对较好。结合成分分析可见，镍含量的增加可以有效提高实验钢的韧性和强度。冲击断口附近处晶粒变形严重，甚至成了纤维状，如图 4 所示，可见低温冲击韧度的提高和较大程度的塑性变形关系很大。在冲击过程中由于塑性变形能量被吸收，基体组织较大程度的变形阻碍裂纹的扩展。冲击断口的韧窝形貌表明实验钢较好的低温冲击韧度。

控轧控冷导致了铁素体晶粒细化，A，B 钢铁素体晶粒尺寸分别达到 12~15 μm 和 7~10 μm。这符合 Hall-Petch 关系式，晶粒尺寸的减小会导致抗拉强度极限和屈服强度的增加，其伸长率亦随晶粒细化而增加。

3 结论

(1)实验钢控轧控冷后组织由贝氏体、针状铁素体、多边形铁素体及少量珠光体等组成。控轧控冷引起的细小 M-A 岛的复合强化作用、铁素体晶粒的细晶强化作用能够提高实验钢的强度、硬度及低温冲

(下转第 686 页)

4 结论

通过宏观形貌扫描电镜能谱分析，判断此鳍片管失效发生的腐蚀主要为氧化性气氛下游离态硫引起的硫化物型高温腐蚀。根据鳍片管向火侧外壁壁厚减薄的特征，判断失效鳍片管受到火焰冲刷，火焰冲刷导致鳍片管向火侧存在温度波动，受到反复变化热应力的作用；当变化的热应力作用于存在腐蚀的鳍片管向火侧时，鳍片管向火侧发生腐蚀性热疲劳失效开裂。因此该鳍片管开裂是热疲劳和游离态硫的高温腐蚀协同作用所致。

参考文献：

[1] 李全全. 浅谈锅炉的安全运行管理与维护保养 [J]. 山东工业技术, 2016(5):68-68.
[2] 唐丽，白若冰，王领. 热电厂锅炉水冷壁管开裂及鳍片脱落分析[J]. 中国锅炉压力容器安全，2000，16(6):49-51.
[3] 郭伟平.火电厂锅炉水冷壁鳍片横向拉裂问题分析[J]. 机械研究与应用，2018，31(3):151-153.
[4] 赵宝珠，张成恩，徐丰. 防止电站锅炉水冷壁管热腐蚀的研究[J]. 东北电力技术，2002，23(11):13-14.
[5] 简安刚. 锅炉运行 300 问[M]. 北京：中国电力出版社，2014.
[6] 张磊，廉根宽. 锅炉运行技术问答[M]. 北京：化学工业出版社，2009.
[7] 赵虹，魏勇. 燃煤锅炉水冷壁烟侧高温腐蚀的机理及影响因素[J]. 动力工程学报，2002，22(2):1700-1704.

(上接第 681 页)

击韧度。

(2)2 种实验钢在 0°轧制方向上的冲击吸收功最大，分别达到了 238.74 J 和 274.68 J，而在 90°轧制方向上的冲击功最小，B 钢高于 A 钢。

(3)合金元素和镍的存在引起第二相强化作用，镍量的增多能够提高实验钢的硬度、强度、塑性及低温冲击韧度，综合地提高了实验钢的力学性能。

参考文献：

[1] 赵捷. 我国高品质船舶，海洋工程用钢研究进展[J]. 材料导报，2018，32(31): 428-431.
[2] 杨延涛，曲占元，刘刚. 船用 E36 钢和 10CrNiCu 钢耐海水腐蚀性能研究[J]. 材料开发与应用，2013，28(4): 22-25.
[3] 郝文魁，刘智勇，王显宗，等. 海洋平台用高强钢强度及其耐蚀性现状及发展趋势[J]. 装备环境工程，2014，11(2): 50-58.
[4] 李大航，赵刚，刘璇，等. 耐蚀 B 级船板用钢的开发[J]. 鞍钢技术，2017(5): 20-23.
[5] 尚成嘉，李秀程，谢振家. 高性能海洋工程用钢的智慧研发之一[J]. 鞍钢技术，2018(1)：1-6.
[6] 尚成嘉，李秀程，王学林. 高性能海洋工程用钢的智慧研发之二—钢铁材料基因与显微组织数字化表征 [J]. 鞍钢技术，2018(2)：1-9.
[7] 李鑫. 新型 Nb-Ti/V 复合微合金化高强度船板钢组织演变与性能优化研究[D]. 天津：天津理工大学, 2014.
[8] Jahazi M, Egbali B. The influence of hot rolling parameters on the microstructure and mechanical properties of an ultra-high strength steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 103(2): 276-279.
[9] Bakkaloglu A. Effect of processing parameters on the microstructure and properties of an Nb microalloyed steel [J]. Materials Letters, 2002, 56(3):200-209.
[10] Girault E, Jacques P, Harlet P, Metallographic Methods for Revealing the Multiphase Microstructure of TRIP-Assisted Steels[J]. Materials Characterization, 1998, 40(2):111-118.
[11] Tan W, Han B, Wang S, et al. Effects of TMCP parameters on microstructure and mechanical properties of hot rolled economical dual phase steel in CSP [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2012, 19(6): 37-41.

技术资料邮购

《铸造实用生产技术集锦》

《铸造实用生产技术集锦》本书由李德臣教授级高工编著。共七章：1、重大铸件生产技术；2、耐热耐磨产品生产技术；3、耐蚀耐磨产品生产技术；4、耐磨产品生产技术；5、铸造工艺设计；6、铸造用辅助产品生产技术；7、铸造与哲学。特快专递邮购价：97元。

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071