

特约专栏

新一代舰船用钢制备技术的现状与发展展望

刘振宇, 陈俊, 唐帅, 王国栋

(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 110004)

摘要: 综述了美国舰船用钢的发展历程, 总结了其成分体系、工艺技术及典型应用, 分析了新一代舰船用钢的发展趋势。介绍了我国舰船用钢的主要发展历程, 指出了我国舰船用钢与国际先进水平的主要差距。对于新一代极低碳复合析出强化型高强韧钢进行了探索性研究。结果发现, 采用极低碳成分并结合控制轧制工艺技术, 可以获得强度和韧性的良好匹配。对实验钢的显微组织和析出相进行了检测分析, 对强韧化机制进行了初步的阐述。最后, 概述了我国高强韧钢生产的关键技术及装备基础。我国自主开发的新一代 TMCP 工艺技术和装备已达到国际先进水平, 表明我国新一代舰船用钢由“跟踪”向“自主研发”转变已经具备了坚实的装备和工艺基础。

关键词: 新一代 TMCP; 超快冷; 冷却路径控制; 钢材强韧化

中图分类号: TG 142.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2014)09-0595-08

State of the Art Development of the Manufacturing Technologies of New Generation War Ship Steels

LIU Zhenyu, CHEN Jun, TANG Shuai, WANG Guodong

(State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: In the present paper, the development history of war ship steels in the United States, including their composition system, processing routes and typical applications, was summarized. The development trend of new generation war ship steels was pointed out. The development history of war ship steels in China was also introduced, and the gap in war ship steels between our country and world level was analyzed. In addition, prototype steel plate with extremely low carbon content was fabricated at laboratory scale. By applying controlled rolling and heat treatment, the optimized combination of high strength and high toughness has been obtained. The mechanisms of strengthening and toughening for the experimental steel was elucidated by EBSD and TEM, which indicates that precipitation hardening by nano-composite precipitates plays the main role in strengthening this steel. Finally, the key processing routes and equipment developed in China for manufacturing steels with high strength and toughness were outlined. It can be clearly seen that both new generation TMCP technologies and the equipment for on-line cooling and off-line heat treatment developed in China have already reached the international level, which has laid solid foundation for developing new generation war ship steels of our own.

Key words: new generation TMCP; ultra fast cooling; cooling profile; strengthening and toughening of steels

1 前言

21 世纪是海洋的世纪, 海洋在国家经济发展及维护国家主权中的地位更加突出。我国是一个海洋大国, 主权海洋面积占陆地面积的 1/3, 根据 2008 年第 3 次石油资源评价结果, 我国海洋石油资源量为 246 亿 t, 海洋天然气资源量为 16 万亿 m³^[1]。但是, 我们也必须清

醒认识到, 我国还不是海洋强国, 我国海洋国土安全和海洋权益正面临着严峻挑战和威胁, 迫切需要在海洋领域的方方面面赶超世界先进水平。

世界强国均拥有强大的海军作为其争夺海洋资源的后盾。钢铁材料是建设各类舰船的最重要、最关键的结构原材料, 其性能优劣直接关系到舰船技术性能的先进程度、使用寿命和安全可靠性。特别是大船用钢, 不仅用量大且规格庞杂, 还要求高强度、高韧性、低的时效敏感性、良好的耐海水腐蚀性能以及造船工艺适应性等。目前, 仅美、日、俄、法等少数工业大国具备系列化舰船用钢的研发和生产能力^[2-9]。

我国通过多年的实践, 随着冶金工业整体技术水平

收稿日期: 2014-04-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51271050)

第一作者及通讯作者: 刘振宇, 男, 1967 年生, 教授, Email: zyliu@mail.neu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2014.09.08

的发展和进步,已经从“跟踪、仿制”走向了“自主研发”,构建起了系列舰船用钢研发与应用的完善体系。然而,由于我国起步相对较晚,在先进钢铁生产技术等方面落后于欧美日等国,因此需要剖析世界先进舰船用钢的发展趋势,找到支撑今后发展的技术方向。

本文针对国外大船结构用钢发展历程,总结了典型成分体系、工艺技术和应用实例,对新一代舰船用钢制备技术的最新发展进行了评述。

2 国外新一代舰船用钢的发展历程和应用

世界海洋强国一直在开发研制新的舰船用结构材料,特别是航母用钢,直接关系到航母作战平台能否适应现代化海上作战需求及安全可靠性。表 1 列出了世界各主要军事强国舰船用钢强度的比较。

表 1 世界主要工业国家舰船用钢强度级别对比
Table 1 Comparison of strength of war ship steels of the world's advanced industrial countries

Yield strength/MPa	America	Japan	Russia	England	France
350	HTS				
390					
440	HSLA-65	NS46		QT28	
490					
550	HY-80 HSLA-80	NS56		Q1(N)	HY80
590			AK-25		60HLES
690	HY-100 HSLA100	NS70	AB-2	Q2(N)	
785	HSLA-115	NS80	AK-29		80HLES
890	HY-130 HSLA-130	NS90	AK-??	Q3(N)	
980			AK-??		100HLES
1078	HY-156	NS110			
1175	HY-180		AK-??		

二次世界大战后,美国海军持续保持着大船的稳步发展。目前全世界在役大船 22 艘,其中美国海军 11 艘,并且多是大型核动力大船,美国舰船用钢基本代表了目前世界舰船用钢发展的最高水平^[2]。图 1 示出的是美国舰船用钢的发展历程及典型应用^[2-9]。可以看出,美国海军舰船用钢从第二次世界大战后到 20 世纪 50 年代期间,根据水面战斗舰船和潜艇发展的需要,以屈服强度为 340MPa 的 C-Mn 钢为主。20 世纪 50 至 70 年代逐步发展了以 Ni-Cr-Mo-V 合金化且碳含量较高的马氏体相变强化型热处理钢,被称为 HY 系列钢,主要包括 HY-80、HY-100 和 HY-130 钢,具有较高的强度和优良的低温韧性,但焊接性能差是这种钢材的主要缺点。在 20 世纪 80 年代之前,美国的大型水面舰船及水下潜艇结构用钢均采用 HY 系列舰船用钢。20 世纪 90 年代之

后,随着超纯净钢冶炼、微合金化和控制轧制与控制冷却等制造技术的发展,同时为了提高舰船用钢的焊接性能并降低焊接成本,美国率先提出了新一代 HSLA(High Strength Low Alloy)舰船用钢的开发计划。由美国伯利恒钢铁公司、卢肯斯钢铁公司和 USX 钢铁公司制成钢坯,在日本开展了 TMCP(Thermal-Mechanical Control Process)-DQ(Direct Quenching)和 AC(Accelerated Cooling)等工业试验,并随后从日本引进了 DQ 和 AC 装备,开始工业化生产强度和韧性分别与 HY-80 和 HY-100 相当的 Cu 析出沉淀强化型 HSLA-80 和 HSLA-100 钢,显著降低了生产成本且提高了生产效率,形成了大型水面舰船结构用钢的新体系,而大型水下潜艇仍采用 HY 系列结构用钢。

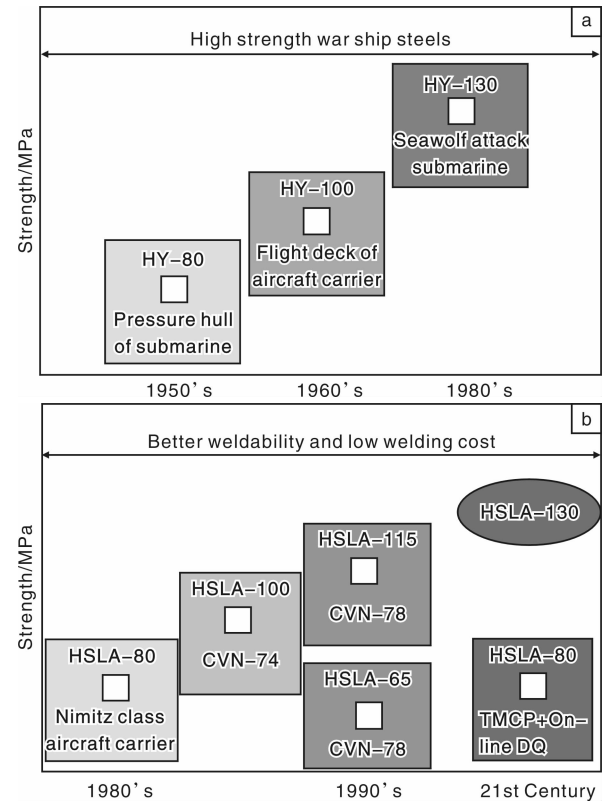


图 1 美国海军舰船用钢发展历程及其典型应用: (a) HY 系列大船结构用钢; (b) HSLA 系列大船结构用钢

Fig. 1 The development history and typical applications of the U. S. war ship steels: (a) HY series war ship steels and (b) HSLA series war ship steels

HSLA-80 钢为 Ni-Cr-Mo-Cu-Nb 合金化钢,强度主要靠时效热处理过程中形成的纳米 ϵ -Cu 析出相获得,其制造工艺按照 ASTM A710 钢的最严格生产规范执行,化学成分、拉伸性能、缺口韧性和质量保证均比 ASTM A710 钢的要求更加严格。在 20 世纪 80 年代,美国根据水面战斗舰艇使用要求对 HSLA-80 钢进行了认证,

并且按照军用材料规范 MIL-S-24645 组织生产。由于水面舰船减轻甲板以上结构重量的需求日益强烈,美国海军开发出 HSLA-100 钢并用以代替 HY-100 钢,达到降低成本、减轻重量并降低船体重心的目标。HSLA-100 是在研究 HSLA-80 的过程中发展起来的,这种钢主要是通过提高 HSLA-80 中的 Mn, Ni, Cu 和 Mo 含量,使其屈服强度从 550MPa 提高到 690MPa。1989 年, HSLA-100 钢通过认证并在水面舰船结构上得到应用,1990 年美国海军公布了军用规范 MIL-S-24645A,其中包括对 HSLA-100 钢的相关标准。20 世纪 90 年代初,为了进一步满足新型航空母舰减轻重量和降低重心的需要,研制出了 HSLA-65 和 HSLA-115 钢。2008 年开始建造的新型航空母舰 CVN78 号采用 HSLA-65 钢作为主壳体材料,

HSLA-115 钢则用于飞行甲板、栈桥甲板等部位^[4, 10-11]。

表 2 示出的是美国 HSLA 系列和 HY 系列舰船用结构钢的化学成分^[12-14]。可以看出, HSLA 钢的 C 含量一般低于 0.06% (质量分数,下同),而 HY 钢的 C 含量一般大于 0.10%,甚至是大于 0.14%,表明新一代大型水面舰船用钢的 C 含量显著降低,钢材的强化已不再过度依赖 C 的间隙固溶强化和组织强化。HSLA 钢的主要合金元素为 Ni、Cu 和 Mo,随着钢板厚度的增加, Cu 和 Mo 的含量略有增加而 Ni 含量显著增加,以保证厚钢板的相变组织均匀性和整体低温韧性。HY 钢的主要合金元素为 Ni、Cr 和 Mo,随着钢板厚度的增加, Ni 含量显著增加, Cr 和 Mo 含量略有增加,而且 C 含量也有一定程度的增加。钢材的成分体系在很大程度上决定了其焊接性能。

表 2 美国 HSLA 系列和 HY 系列舰船用结构钢的化学成分 (w/%)

Table 2 Chemical composition of the HSLA series and HY series war ship steels (w/%)

Steel	Thickness/mm	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu	V	Nb
HSLA-65	≤32	0.03~0.10	1.10~1.65	0.10~0.50	≤0.40	≤0.20	0.03~0.08	≤0.35	0.04~0.10	0.02~0.06
HSLA-80	≤32	≤0.06	0.40~0.70	≤0.40	0.70~1.00	0.60~0.90	0.15~0.25	1.00~1.30	≤0.03	0.02~0.06
	≤25	≤0.06	0.75~1.15	≤0.40	1.50~2.00	0.45~0.75	0.30~0.55	1.00~1.30	≤0.03	0.02~0.06
HSLA-100	≤51	≤0.06	0.75~1.15	≤0.40	2.50~3.00	0.45~0.75	0.45~0.60	1.00~1.30	≤0.03	0.02~0.06
	≤152	≤0.06	0.75~1.15	≤0.40	3.35~3.65	0.45~0.75	0.55~0.65	1.15~1.75	≤0.03	0.02~0.06
	≤32	0.10~0.18	0.10~0.40	0.15~0.38	2.00~3.25	1.00~1.80	0.20~0.60	≤0.25	≤0.03	
HY-80	32~76	0.13~0.18	0.10~0.40	0.15~0.38	2.50~3.50	1.40~1.80	0.35~0.60	≤0.25	≤0.03	
	76~203	0.13~0.18	0.10~0.40	0.15~0.38	3.00~3.50	1.50~1.90	0.50~0.65	≤0.25	≤0.03	
	≤32	0.10~0.18	0.10~0.40	0.15~0.38	2.25~3.50	1.00~1.80	0.20~0.60	≤0.25	≤0.03	
HY-100	32~76	0.14~0.20	0.10~0.40	0.15~0.38	2.75~3.50	1.40~1.80	0.35~0.60	≤0.25	≤0.03	
	76~152	0.14~0.20	0.10~0.40	0.15~0.38	3.00~3.50	1.50~1.90	0.50~0.65	≤0.25	≤0.03	
HY-130	≤203	≤0.12	0.60~0.90	0.15~0.35	4.75~5.25	0.40~0.70	0.30~0.65	≤0.25	≤0.05~0.10	

图 2 示出的是 HSLA 系列和 HY 系列钢的焊接特性。可以看出, HY 系列钢处于难焊接区域,一般需要在较

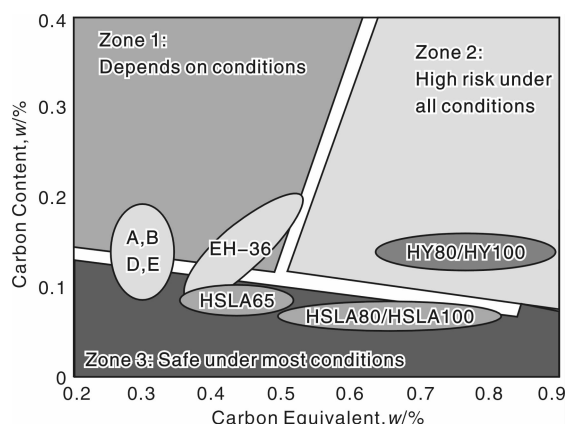


图 2 C 含量和 C 当量对焊接性能的影响 (CE = C + Mn/6 + Si/6 + Ni/15 + Cu/15 + Cr/5 + Mo/5 + V/5)

Fig. 2 Effect of carbon content and carbon equivalent on welding properties

高的预热温度下进行焊接;而 HSLA 系列钢均处于易焊接区域,一般可取消焊前预热和层间温度控制,大大降低焊接成本。另外值得注意的是, HSLA 系列钢的 C 当量并不比 HY 系列结构用钢的 C 当量显著降低,其焊接性能的提高主要源于 C 含量的降低,说明采用低 C 或是超低 C 的成分设计是提高大船用钢焊接性能的最有效途径。为进一步提高大船用钢的焊接性能,美日在 1995 年签署了经费总额 3500 万美元的舰船用钢“先进钢技术”合作研究项目,重点研究改进舰船用钢焊接性能的技术途径,已成功将 GTWA 焊接工艺应用于 HY 和 HSLA 系列钢。

图 3 示出的是美国 HY 系列钢和 HSLA 系列钢的核心生产工艺及钢板典型显微组织特征的总结。可以看出,自 20 世纪 80 年代以后,大船结构用钢的生产工艺由以调质工艺 (淬火 + 回火) 为核心演变为以 TMCP 工艺为核心,强化机制由马氏体相变强化演变为贝氏体相变强化和沉淀强化。美国 HY 系列钢是在低合金钢的基础

上通过调质热处理工艺获得回火马氏体组织来获得高强韧性,为了满足强度和淬透性的要求,钢中的 C 和 Ni、Cr、Mo 含量也相应增加,严重恶化钢材的焊接性能,如 HY-100 钢焊接前需要预热至 $51.7 \sim 93.3^{\circ}\text{C}$, 大幅增

加舰船的建造周期、成本和施工难度。由于注重 TMCP 工艺的开发和应用, HSLA 系列钢通过贝氏体相变和沉淀强化实现高强韧性的结合,同时兼具优异的焊接性能,如 HSLA-100 钢的焊接预热温度可降低至 15.6°C [15]。

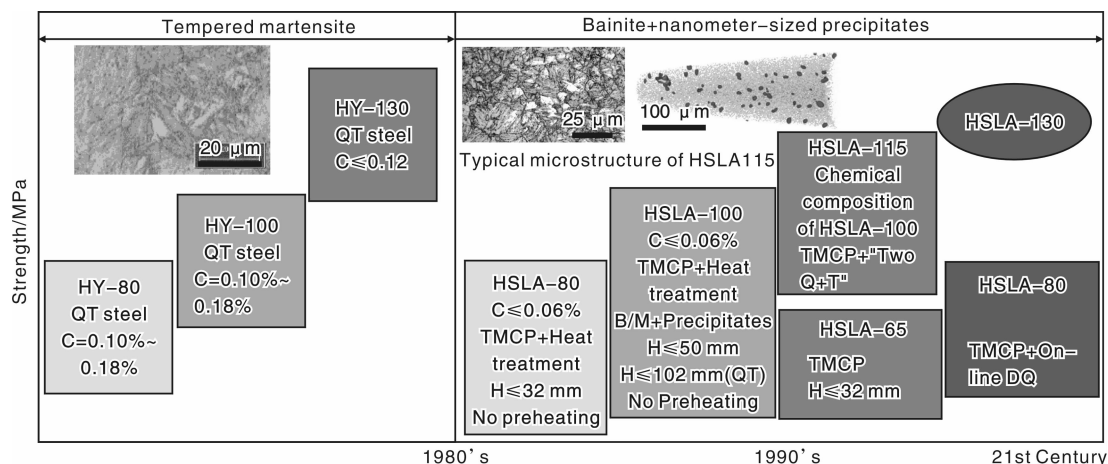


图 3 美国 HY 系列和 HSLA 系列大船结构用钢核心工艺及典型组织特征

Fig. 3 The core processes and typical microstructures of the HY series and HSLA series war ship steels

图 4 示出的是采用 TMCP 和热处理工艺生产的高强钢的焊接预热温度的比较。相同强度级别条件下, TMCP 钢的焊接预热温度较热处理钢降低近 50°C 。1994 ~ 2000 年, 美国开展了 CR (Controlled Rolling)、TMCP 和 QT 状态 HSLA-65 钢焊接性能研究项目, 结论是焊接性能优于 HSS 钢; 2002 年完成了水面舰船主体结构认证评定, 结论是可以应用于主体结构的建造 [15]。在 HSLA-100 钢化学成分的基础上, 美国海军开发出屈服强度为 115 ~ 130ksi 的 HSLA-115 和 HSLA-130 钢, 用于水面舰艇的关键结构部位, 采用“板坯连铸-低温再加热-低温控制轧制-双重奥氏体化+回火后水淬”等工艺获得与 HSLA-100 钢相当的韧性与可焊性 [16]。

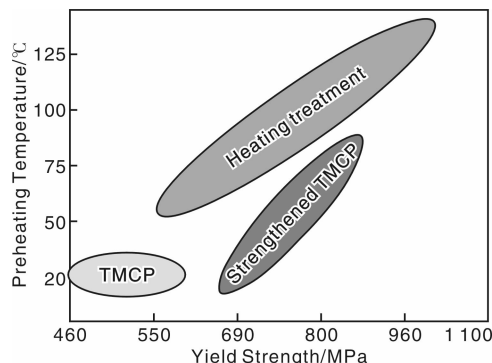


图 4 采用 TMCP 与热处理工艺生产的同强度级别高强钢焊接预热温度的比较

Fig. 4 Comparison for welding preheat temperature of the same level high-strength steel between TMCP and heat treatment

图 5 示出的是 HSLA-115 钢的典型组织特征 [17], 其显微组织结构为回火板条马氏体上弥散分布高密度富 Cu 纳米析出沉淀相, 尺寸为 $4.36 \pm 2.05 \text{ nm}$, 密度为 $(2.0 \pm 0.5) \times 10^{22}/\text{m}^3$, 体积分数为 1.115%。

图 6 示出的是 HSLA-115 钢中纳米析出相的三维原子探针 (3DAP) 详细分析结果。纳米相由 Cu 和其他

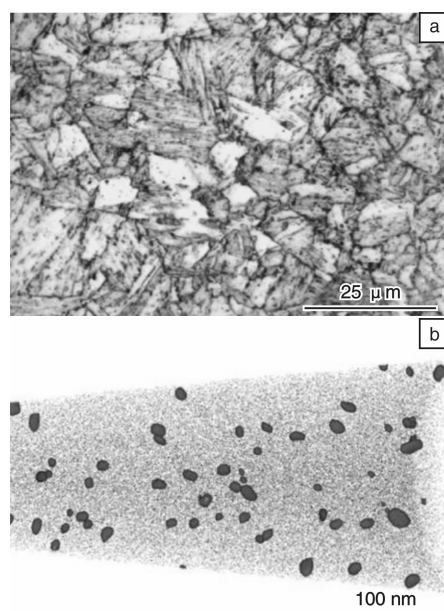


图 5 HSLA-115 典型组织特征 (贝氏体基体中分布大量亚稳 bcc-Cu 的纳米析出相): (a) 光学显微组织; (b) 三维原子探针 (3DAP) 获得的析出相分布情况

Fig. 5 Typical microstructure of HSLA-115 steel: (a) metallograph and (b) distribution of the precipitation phase

合金化元素共同组成, 形成具有层级结构的富 Cu 纳米强化相。Cu 在纳米相中的含量仅占 50% 左右, 纳米相尺度小于 5 nm, 且纳米析出相与基体间形成异相界面并与基体保持共格关系, 如图 6c 所示。这些结果表明, 只有将富 Cu 析出相控制为 5 nm 以下的复合析出相, 才能对钢材形成有效的强韧化作用。

根据 Asshby-Orowon 沉淀强化理论, 可以推算当钢中沉淀析出相小于 5 nm 时, 钢材的屈服强度可以提高 300 ~ 500 MPa。因此, 新一代舰船用钢中的纳米富 Cu 析出相与常规舰船用钢中粗化的 ε -Cu 完全不同, 需要开发新的 TMCP 和热处理工艺来保证钢中析出相的尺寸、结构及分布。

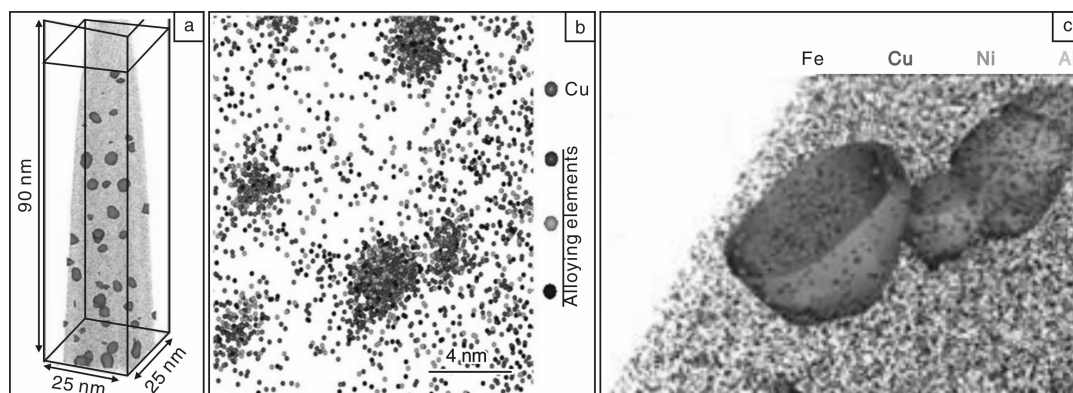


图6 三维原子探针测试结果: (a) 纳米相在基体中的分布情况; (b), (c) 合金元素的分布情况

Fig. 6 Three dimensional atom probe test results: (a) distribution of nano-precipitation phase and (b, c) distribution of alloy elements

3 我国舰船用钢的现状与差距

图7示出的是我国舰船用钢的发展历程^[3]。20世纪50~60年代, 主要依赖原苏联进口和仿制, 开发了屈服强度390 MPa级、590 MPa级系列舰船用钢。20世纪70~80年代开始自主研制, 当时受国内资源限制, 立足于无镍合金钢, 自行研制了我国第1代舰船用锰系无镍、铬钢和低镍、铬系列舰船用钢并在我国海军舰艇建造中得到了成功应用。20世纪80年代以后, 海军装备有了很大发展, 对舰船用钢也提出了更高的要求, 第1代舰船用钢已不能满足现代海军的需求, 因此, 在第1代舰船

用钢的基础上开始研制综合性能更好的第2代舰船用钢及配套材料, 主要为屈服强度440 MPa级、590 MPa级和785 MPa级的系列舰船用钢。20世纪90年代后, 特别是2000年以后, 我国舰船用钢的研究开发进入快速发展阶段, 许多具有世界先进水平的钢种研发成功并得到应用, 屈服强度覆盖400~1 000 MPa, 且品种规格及配套材料齐全, 为新型舰船装备建设提供了强大的材料基础。

我国用于潜艇、核潜艇实船建造的钢种, 屈服强度级别为785 MPa级、590 MPa级; 用于水面舰船实船建造的钢种, 屈服强度级别为590 MPa级、440 MPa级和390 MPa级。785 MPa级钢主要采用为 Ni-Cr-Mo-V 合金

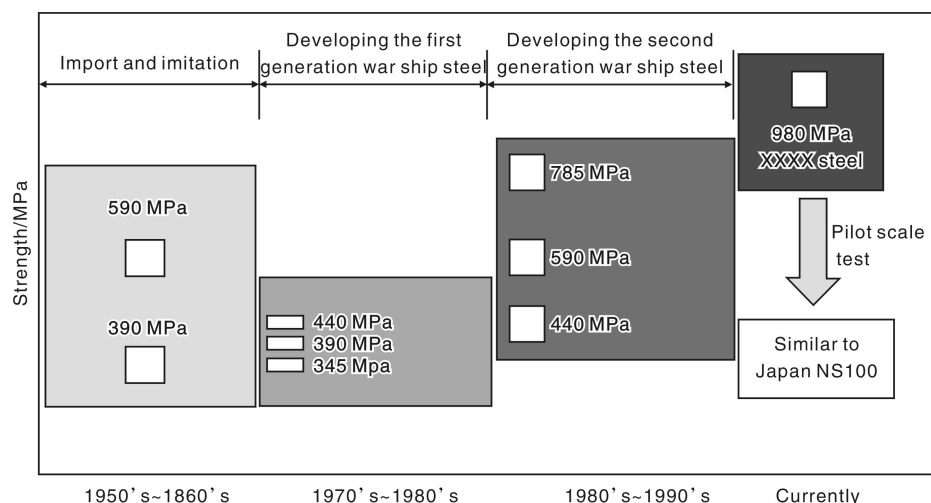


图7 我国舰船用钢发展历程

Fig. 7 Development history of war ship steels in China

体系,通过“电炉模铸+调质热处理”工艺生产,目前钢板最厚达到 80 mm。590 MPa 级钢为 Ni-Cr-Mo-V 合金体系,采用“电炉模铸或转炉连铸+调质热处理”工艺进行生产,目前最厚规格达到 35 mm;440 MPa 级钢采用 Ni-Cr-Mo-V 合金体系,采用“转炉连铸+调质热处理”工艺生产,厚度规格为 17~32 mm,7~16 mm 厚度规格采用“正火+高温回火热处理”,3~6 mm 则采用热轧状态交货;390 MPa 级钢为 Ni-Cr-Cu 合金体系,采用“转炉连铸+调质热处理”工艺进行生产,厚度规格为 17~32 mm,9~16 mm 钢板采用高温回火热处理,3~8 mm 采用热轧状态直接交货^[3]。图 8 示出了我国舰船用钢的焊接性能。

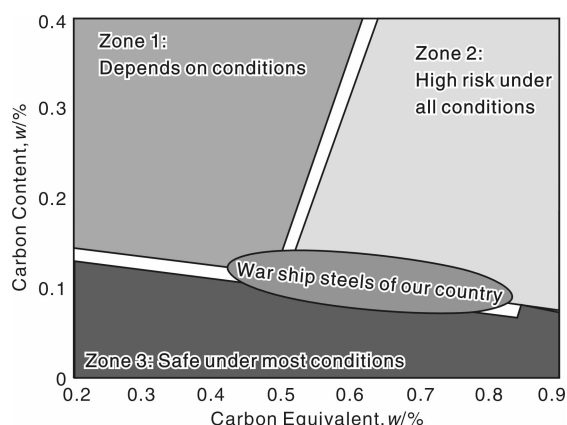


图 8 我国典型舰船用钢的焊接特性

Fig. 8 Welding properties of our country typical war ship steels

($CE = C + Mn/6 + Si/6 + Ni/15 + Cu/15 + Cr/5 + Mo/5 + V/5$)

4 新一代舰船用钢的发展趋势

大船结构用钢的发展趋势主要体现在:①单位载重用钢量减少,需要高强度、高韧性的船板钢。因此仍将高性能作为追求的主要方向,并注重提高钢材的总体性能,包括强度、塑形、韧性、抗爆性能、抗脆性破坏、耐海水腐蚀、抗疲劳特性等。②船板用钢的规格、尺寸

精度要求更高,需要钢材的成品质量进一步提高。③表面质量要求高,不允许出现表面缺陷,表面氧化铁皮要致密均匀。④注重高强度结构钢的成分设计,尤其是高强度结构钢的强化方式进行了大量的探索,在传统的合金化的基础上向纳米析出相沉淀强化方向发展,并完善相应的制备应用技术理论和方法。⑤在追求高强韧性的同时,更加注重服役性能和焊接性能的均衡发展。

目前,稳定控制组织与析出行为、降低 C 含量已成为大船船体和甲板用钢新的发展方向。作者对于新一代易焊接极低 C 复合析出强化型高强韧钢进行了探索性研究,对强韧化机制进行了初步的阐述。

表 3 示出的是我国试制的极低 C 纳米复合析出相强化型高强韧钢的主要化学成分,采用极低 C 成分设计,同时添加一定量的 Cr, Ni, Mo 和 Cu,同时根据需要提供一定量的 Nb, V, Ti 和 B。中试条件下采用“TMCP+在线 UFC/DQ+时效热处理”工艺,实现了纳米析出强化。表 4 示出的是试制钢板的典型力学性能。

表 3 实验用钢的化学成分 (w/%)

Table 3 Chemical compositions of tested steel (w/%)

C	Si	Mn	Cr + Ni + Mo	Cu
≤0.01	0.2	2.0	3.0	2.0

表 4 实验用钢的力学性能

Table 4 Mechanical properties of tested steel

YS/MPa	TS/MPa	$A_{50}/\%$	$A_{kv}(-20\text{ }^{\circ}\text{C})/\text{J}$	$A_{kv}(-40\text{ }^{\circ}\text{C})/\text{J}$
930	1 008	20.0	130	100

图 9 示出的是试制钢板的显微组织的 EBSD 及沉淀析出相的 TEM 表征。试制钢板由细小的铁素体组成,基体上分布着大量纳米 Cu 析出粒子,大大提高了钢板的强度,屈服强度达到了 930 MPa,达到了 HSLA-130 水平,同时试制钢板具有极佳的塑性和低温韧性。在较少的合金含量的情况下可以形成 $10^{23} \sim 10^{24} \text{ m}^{-3}$ 的纳米相,数量密度高并均匀分布于基体,这些高数量密度的细小纳米相有效钉扎了位错的运动,从而产生强烈的沉淀强化效果以保证钢的高强度,富 Cu 纳米相与位错

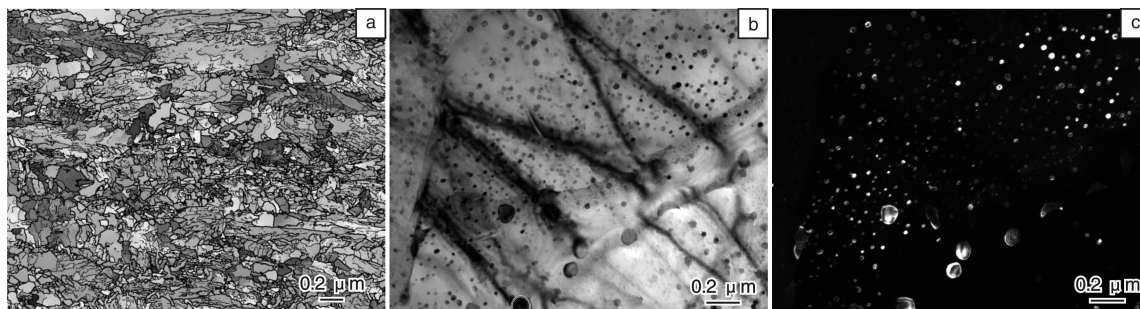


图 9 试制钢板的组织特征:(a) EBSD, (b) TEM 明场像, (c) TEM 暗场像

Fig. 9 Microstructures of tested steel: (a) EBSD, (b) TEM Bright field and (c) TEM Dark field

的作用方式独特, 获得高强度的同时可保持良好的低温韧性。

5 实现高强韧钢生产的技术与装备基础

极低 C (含量 $\leq 0.01\%$) 成分设计和纳米复合析出相强化更加依赖于轧制、冷却及后续热处理的精确控制, 而新一代 TMCP 技术可以通过高效控制轧制、精确的轧

后冷却路径控制和通过热处理实现组织演变和析出行为的高精度控制, 进而实现新型高强韧钢的稳定化生产。图 10 示出的是新一代 TMCP 控制冷却路径以达到精确调控显微组织状态的工艺示意图。

超快速冷却作为新一代 TMCP 的关键核心技术, 可精确调控相变行为及沉淀析出行为, 是开发并稳定生产新型舰船用钢的关键核心技术。我国自主开发的中厚板

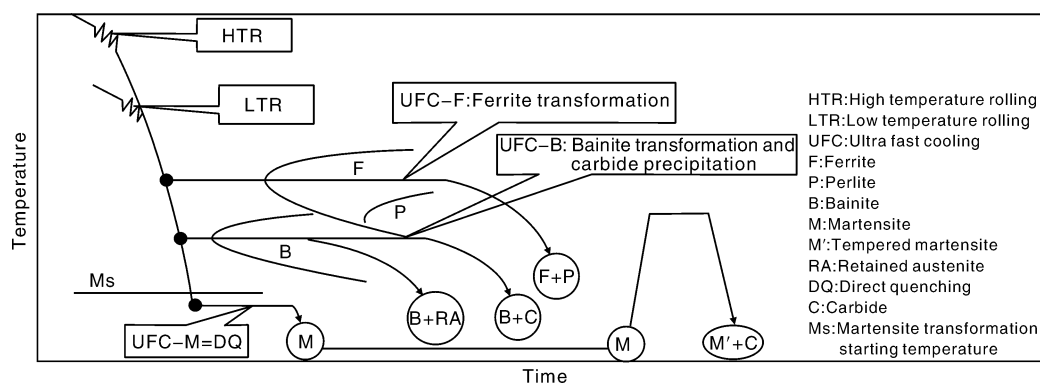


图 10 新一代 TMCP 调控冷却路径控制显微组织状态的工艺示意图

Fig. 10 Sketch diagram of microstructure control by adjusting cooling path using new generation TMCP

超快速冷却设备(UFC)可有效打破残存冷却水与钢板之间形成的气膜, 从而使钢板和冷却水之间完全接触并达到沸腾状态。因此, 超快冷技术可以实现轧件的超快速冷却, 其冷却能力与日本 JFE Super-OLAC 超快速冷却能力相当, 达到传统层流冷却(ACC)能力的两倍以上。可以看出, UFC 的冷却速率较 AC 的冷却速率提高 1 倍以上, 20 mm 钢板最大冷速可达 $40\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, 40 mm 钢板最大

冷速可达 $20\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, 且冷却速率可根据工艺需要进行调整(如 20 mm 的钢板冷却速率调整范围为 $15\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C/s}$)。图 11a 示出的是我国自主开发的在线超快速冷却成套装备。图 12a 示出的是在线冷却后高强钢钢板板形的比较。采用国外引进的 ACC 装备冷却时, 产生严重的板形问题, 质量和性能稳定性差。采用我国自主知识产权的超快速冷却装备冷却时, 板形良好, 质量和性能稳定性好。

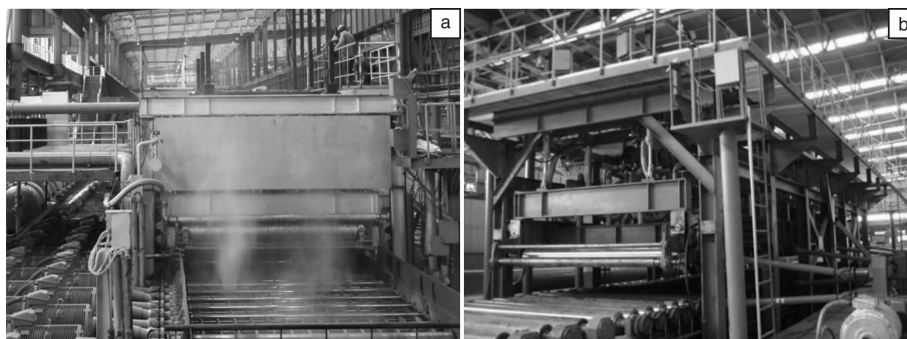


图 11 在线超快速冷却成套装备和辊式淬火机照片: (a) 在线超快速冷却成套装备; (b) 辊式淬火机

Fig. 11 Photos of the on-line UFC system and roller quenching machines: (a) on-line UFC system and (b) roller quenching machines

另外, 我国自主开发出系列多功能中厚板辊式淬火成套装备、先进热处理工艺技术和高端中厚板热处理产品, 打破了外国对该领域的装备垄断和技术封锁。辊式淬火机与传统压力淬火机不同, 钢板在运动中进行淬火, 钢板表面淬火均匀、无软点, 钢板长度不受机架限制, 能够有效避免淬火后的瓢曲, 可以以极高的冷却速度将

钢板冷却到室温, 是当前高强度中厚钢板淬火生产的主流设备^[18], 可实现 4~120 mm 全系列厚度钢板的淬火处理, 6 mm 厚 890 MPa 级高强钢纵向平直度达到 4~5 mm/2 m, 横向平直度达到 2~3 mm/2 m。

上述在线冷却和离线热处理装备为工业化稳定生产新一代高强韧舰船用钢提供了必要的装备保障。

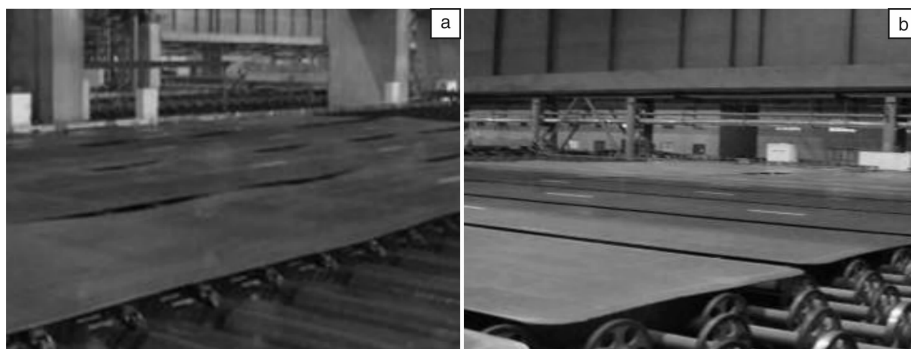


图 12 在线冷却后板形比较: (a) 国外引进 ACC 装备; (b) 具有自主知识产权的 UFC 装备

Fig. 12 Comparison of strip shape after on-line cooling: (a) ACC equipment introduced from abroad and (b) UFC equipment with self-owned intellectual property right

6 结 语

随着海军舰船的更新换代和现代冶金技术的发展,必然要对现有舰船用结构材料进行更新换代,以满足现代舰船的需要,获得最大的社会和经济效益。总体上来看,我国大船结构用钢的基础研究还比较薄弱,与国际先进水平差距较大,部分关键技术亟待突破。必须加强组织演变行为的基础研究工作,建立组织演变数学模型,同时注重 HSLA 系列钢稳定化生产控制模型、工艺技术及相关装备开发及应用,同时探索新型超高强韧化及稳定化生产技术,注重配套焊接材料及工艺的开发。在我国钢铁冶金现有装备和工艺条件下,完全有能力开发极低 C、易焊接的新一代大船用 HSLA 系列钢材,建立我国特有的新一代大船结构用钢体系。

参考文献 References

- [1] Wu Jiaming(吴家鸣). 世界及我国海洋油气产业发展及现状[J]. *Guangdong Shipbuilding*(广东造船), 2013(1): 29-32.
- [2] Cheng Xin'an(程新安). 国外舰船用钢的回顾与展望[J]. *Development and Application of Materials*(材料开发与应用), 1997, 12(2): 46-48.
- [3] Shao Jun(邵军). 舰船用钢研究现状与发展[J]. *Angang Technology*(鞍钢技术), 2013, (4): 1-4.
- [4] Deng Xianhui(邓贤辉), Guo Aihong(郭爱红), Liao Zhiqian(廖志谦). 低成本材料技术在美国新型航母上的应用研究[J]. *Development and Application of Materials*(材料开发与应用), 2012(12): 81-86.
- [5] Wang Wenjie(王文杰). 高性能先进舰船用合金材料的应用现状及展望[J]. *Materials Review A*(材料导报 A: 综述篇), 2013, 27(4): 98-105.
- [6] Yi Shike(尹士科), He Changhong(何长红), Li Yalin(李亚琳). 美国和日本的新型舰船用钢及其焊接材料[J]. *Development and Application of Materials*(材料开发与应用), 2008(2): 58-65.
- [7] Ma Heng(麻衡), Li Zhonghua(李中华), Zhu Xiaobo(朱小波), et al. 航空母舰用厚钢板的发展现状[J]. *Shandong Metallurgy*(山东冶金), 2010, 32(2): 8-10.
- [8] Huang Xiaoyan(黄晓艳), Liu Bo(刘波). 舰船用结构材料的现状与发展[J]. *Ship & Boat*(船舶), 2004(3): 21-24.
- [9] Wu Shidong(吴始栋). 美国舰艇用结构钢的开发与应用研究[J]. *Shanghai Shipbuilding*(上海造船), 2006(4): 57-60.
- [10] Wu Shidong(吴始栋). 航空母舰用新型钢种 HSLA-115 及其焊接技术[J]. *Shipbuilding Science and Technology*(中外船舶科技), 2012(2): 22-27.
- [11] Wu Shidong(吴始栋). 2009 年 NMC 的水面舰艇、航空母舰和潜艇材料制造加工技术的进展[J]. *Shipbuilding Science and Technology*(中外船舶科技), 2010(4): 13-17.
- [12] Wu Shidong(吴始栋). HSLA-65 钢及其应用[J]. *Metal World*(金属世界), 2011(3): 15-16.
- [13] Sampath K. An Understanding of HSLA-65 Plate Steels[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2006, 15(1): 32-40.
- [14] Wang Renpu(王任甫), Zhao Caiqin(赵彩琴), Jiang Ying(蒋颖), et al. 美国舰船用钢板规范的演变与分析[J]. *Development and Application of Materials*(材料开发与应用), 2012(8): 80-85.
- [15] Christein J P, Warren J L. Implimentation of HSLA-100 Steel in Aircraft Carrier Construction-CVN74[J]. *Journal of Ship Production*, 1995, 11(2): 97-101.
- [16] Konkol P J, Stefanick K M, Pike G S. New Steel Shows Promise for Navy Ships[J]. *Welding Journal*, 2011, 90(2): 34-41.
- [17] Hunter A H. An Atom Probe Tomographic Investigation of High-Strength, High-Toughness Precipitation Strengthened Steels for Naval Applications[D]. United States: Northwestern University, 2012.
- [18] Wang Chao(王超). *Reserch and Application of Quenching Controlling System of Plate Roller Quenching Machine*(宽厚板辊式淬火机淬火工艺控制系统的开发与应用)[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.