

引用格式: 杨勇, 任群, 杨西荣, 等. 国外舰船结构用钢发展与需求分析[J]. 中国材料进展, 2025, 44(2): 177-183.

YANG Y, REN Q, YANG X R, *et al.* Development and Requirement Analysis of Structural Steel for Warship Abroad[J]. Materials China, 2025, 44(2): 177-183.

国外舰船结构用钢发展与需求分析

杨 勇^{1, 2}, 任 群³, 杨西荣³, 林启惠⁵, 赵 伊⁴,
李 亮⁴, 殷文昌⁴, 臧勃林⁴, 曹京宜⁴, 方志刚⁴

(1. 天津大学材料学院, 天津 300072)

(2. 海军装备部装备招标中心, 北京 100071)

(3. 西安建筑科技大学冶金工程学院, 陕西 西安 710055)

(4. 中国人民解放军 92228 部队, 北京 100072)

(5. 北京朝阳社区学院, 北京 100013)

摘 要: 舰船结构用钢作为大、中型水面舰船和潜艇装备用量最大的结构材料, 其服役性能和结构安全性直接影响人员装备安全性和舰船战技术性能的发挥。同时, 舰船结构用钢具有研发周期长、投入成本高、研制流程多的特点, 因此舰船结构用钢体系化研制能力是衡量国家综合工业实力的重要指标。首先通过梳理分析舰船结构用钢的典型服役环境, 明确材料的极端服役环境适用性的重要性, 极地环境作为导致舰船装备失效的典型极端服役环境, 以该环境为例分析典型失效问题, 提出舰船结构用钢结构安全性及环境适用性的设计输入参数。在此基础上, 以美国海军舰船结构用钢的研发为例, 对当前舰船结构用钢设计思路进行分析, 梳理介绍舰船用钢研制及强化思路。对比美国、俄罗斯、法国、英国、日本舰船结构用钢发展现状, 分析舰船结构用钢发展历史和研制规律、发展现状与瓶颈, 然后对舰船结构用钢低温性能考核指标进行分析。结合当前材料研制模式新特点, 提出舰船结构用钢未来发展趋势和方向, 为我国舰船结构用钢发展提供参考。

关键词: 舰船材料; 结构钢; 极端环境; 发展和需求分析

中图分类号: U668. 2; TG457. 11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2025)02-0177-07

Development and Requirement Analysis of Structural Steel for Warship Abroad

YANG Yong^{1, 2}, REN Qun³, YANG Xirong³, LIN Qihui⁵, ZHAO Yi⁴,
LI Liang⁴, YIN Wenchang⁴, ZANG Bolin⁴, CAO Jingyi⁴, FANG Zhigang⁴

(1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(2. Armaments Tendering Center, Armaments Department of PLA Navy, Beijing 100071, China)

(3. College of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

(4. Unit 92228 of the People's Liberation Army, Beijing 100072, China)

(5. Chaoyang Community College, Beijing 100013, China)

Abstract: Warship structural steels is the largest used structure materials in large and medium-sized surface vessels and submarine equipment, its service performance and structural safety severely affect safety and technical performance of warships and personnel safety. Meanwhile, warship structural steel research presents characteristics of long research and development cycle, high investment costs, and multiple research & development processes, the ability of systematically developing structural steel materials is an important indicator to evaluating comprehensive industrial strength of a country. The

present work first clarifies the importance of the environment applicability of structural steels to extreme service environments by analyzing the typical service environment. Polar environment, as a typical extreme environment that leads to failure of warship and equipment, is used as a typical example to analyze the typical failure problems, then this paper proposes design inputs of the safety and environ-

收稿日期: 2024-03-18 修回日期: 2024-10-15

第一作者: 杨 勇, 男, 1978 年生, 高级工程师

通讯作者: 任 群, 男, 1987 年生, 高级工程师,

Email: renqunrr@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202305005

mental applicability of warship structure steel. On this basis, taking the development of United States navy ship structural steel as an example, this review analyzes the current design ideas for steel used in warship structures, and sorts out the development and strengthening and toughening ideas for warship structural steel. By comparing the current development of warship structural steel of United States, Russia, France, United Kingdom, and Japan, this review analyzes the development history, research patterns, current development status, and bottlenecks, then compares and analyzes the low-temperature performance assessment indicators of warship structural steel. Finally, combining the new characteristics of current material develop modes, the future trend and direction of warship structural steel development are proposed, providing a reference for the development of warship structural steel in China.

Key words: warship materials; structural steel; extreme environment; development and requirement analysis

1 前言

舰船结构用钢是舰船结构和装备非常重要的一类先进金属结构材料,特别是对航母、潜艇、驱逐舰、护卫舰等大、中型水面舰船、常规潜艇和核潜艇的主船体及关键装备结构,因而受到大量研究^[1-4]。舰船结构用钢发展水平直接影响装备发展及技战术性能,是海军装备发展水平的重要标志。“一代材料,一代装备”,先于装备型号研制材料是保障舰船型号正常服役所必须的,世界各国都在集中国家力量进行长期研发,形成了多种型号、多强度级别、适用于水面及水下装备的舰船结构用钢。舰船结构用钢屈服强度通常在 345 MPa 以上,是具有较高强度的船体结构用钢。美国、俄罗斯舰船结构用钢目前主流牌号的屈服强度级别已经达到 345~1175 MPa,被广泛用于大、中型水面舰船以及潜艇结构建造,例如 HY 系列钢用于尼米兹核动力航母、俄亥俄级核潜艇, HSLA 系列钢用于福特级核动力航母。通常舰船结构用钢采用轧后热处理工艺,要求具有高强韧、耐腐蚀、工艺适用性、低成本、易焊接、长寿命等性能^[5]。在全球海域服役环境中,极端环境会更容易导致舰船结构用钢发生断裂、腐蚀等失效行为^[6,7],因此通常以极端海洋环境作为典型服役环境输入参数。舰船结构用钢以极端海洋环境作为其典型服役环境,材料需要在盐雾、温度、湿度、辐照、载荷等多场耦合环境下达到强度、耐腐蚀、寿命性能要求。舰船在不同极端环境下服役,对结构用钢提出多层级、多指标性能要求。目前世界上仅有为数不多的工业大国具备舰船结构用钢的全流程、系列化研制和生产能力。

本文以美国海军舰船结构用钢发展为主要参考,通过分析其发展历史和发展思路,明确舰船结构用钢主要发展思路。在此基础上,通过对比俄罗斯、英国、法国、日本等国舰船结构用钢发展水平,结合海洋环境特点及金属材料研制模式,提出舰船结构用钢发展建议,为我国舰船船体用结构钢发展提供借鉴。

2 舰船结构用钢全球典型服役环境及举例

舰船装备以全球海域海洋环境为服役环境,因此需

要舰船结构用钢具备全球各种海洋环境适用性,其中极端海洋环境更容易加速和导致材料失效,因此材料的极端环境适用性在考核材料通用性时具有代表性。钢铁材料相较于其他金属结构材料,其服役性能难题主要体现在低温韧性及耐腐蚀性能,其中典型极端服役环境以极地低温环境(耐低温脆性断裂、耐冰磨损磨蚀)、热带高温、高盐、高湿、强辐照“三高一强”环境(耐腐蚀性能)及深海高压及压力交变环境(耐常温蠕变)为代表^[8-11]。因此,以极端环境条件下舰船结构用钢结构安全性及长寿命为重要指标进行材料研制,是各国发展舰船结构用钢的重要思路^[12-14]。其中因结构钢低温韧性不足导致的极地低温脆断事故和相关针对性研究最为广泛。例如,北极由于极其重要的战略意义以及经济价值,受到各军事强国的关注。由于钢铁材料在低温环境下容易发生脆性断裂,因此确保其在最低服役温度下仍能保持韧性断裂模式是舰船船体结构安全性重要的设计保障。北极地区太阳光常年无法直射,因此其年平均温度低。北极圈内的年平均温度在 0℃ 以下,而北极地区低温极值可达约-70℃,如此低温环境对舰船结构钢安全服役提出挑战。历史上,船体发生低温脆性断裂的事故很多,最著名的是第二次世界大战期间,美国的数千艘货轮曾发生脆断事故,这也是因为当时对冶金学和材料科学认识有限,力学理论和测试技术发展有限,对钢铁材料发生脆性断裂缺乏科学认识。

不同类型钢铁材料的低温脆性行为具有显著差异^[7]。对于面心立方(FCC)晶体结构的钢铁材料,其在较宽的温度范围保持较高的冲击功,低温脆断问题基本不发生;而对于体心立方(BCC)晶体结构及密排六方(HCP)晶体结构的钢铁材料,则常发生低温脆断。图 1 总结了舰船结构用钢典型断裂模式^[7],当温度较高时,材料断裂模式为韧性断裂(具体如图 2 所示);在温度较低时,材料断裂模式为脆性断裂;当处于两种温度之间时(韧脆转变区间),材料将发生韧性-脆性断裂模式转变,其断口形貌将由纤维断口逐渐过渡到晶状断口^[7]。图 1 中,断口纤维率 100%代表全塑性断裂的上平台能量(FTP 温度),而 0%代表无塑性变形的下平台能量(NDT 温度)。韧脆

转变发生在 FTP 和 NDT 之间, 因此其转变并不是一个点, 而是一个区间, 在该区间上选择相同度量指标定义韧-脆转变温度 (fracture appearance transition temperature, FATT) 指标并进行对照, 例如可以将断口纤维率 50% 时对应 FATT50 温度作为韧-脆转变温度, 将不同结构钢的 FATT50 进行对比分析, 也可以用 FTP 或 NDT 温度进行对照分析。

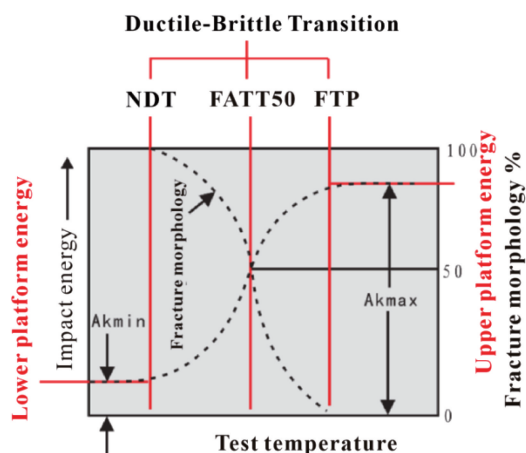


图1 舰船结构用钢材料断裂模式^[7]

Fig. 1 Fracture modes for warship structural steels^[7]

图3中插图不同温度(0, -40, -70 °C)下舰船用钢夏比V型缺口冲击断口形貌, 可以看到在0和-40 °C时, 为韧性断裂, 并未发生脆性断裂, 甚至样品并未完全断裂; 而随着试验温度的降低, 在-70 °C时部分样品发生脆性断裂。不同温度下的夏比V缺口冲击断裂能量值 KV_2 如图3所示, 在温度为0 °C时, 出现最高的 KV_2 值, 可达184 J; 而随着试验温度逐渐降低, KV_2 值逐渐降低, 在-70 °C的低温下, 呈现出2.1和39 J的冲击韧性值, 由于可能受到缺口应力约束, 在-70 °C下也可能获得较高冲击功, 如本试验120 J的冲击韧性值。结合冲击断口形貌, 说明此温度舰船用钢处于脆性断裂模式, 如果舰船结构在此温度下服役将可能发生结构安全风险, 应结合实际使用工况予以避免。NDT、FATT50、FTP 都

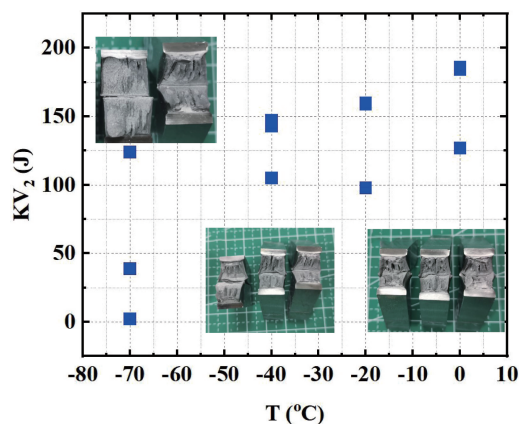


图3 不同温度下舰船用钢夏比V型缺口冲击试验 KV_2 值

Fig. 3 KV_2 of Charpy impact test for warship structural steels at different temperatures

是衡量舰船结构用钢发生脆性断裂倾向的重要指标。通常, 舰船设计部门要求舰船结构用钢服役温度应不低于 $NDT \times \text{安全系数}$ 或 $FATT50 \times \text{安全系数}$, 舰船结构用钢的服役环境适用性的重要性应优先于低成本、易焊接。

3 舰船结构用钢发展及典型考核问题举例分析

3.1 舰船结构用钢材料设计思路

按照用途分类, 舰船结构用钢可以划分为水面舰船结构用钢和潜艇用钢, 这两种类型舰船结构用钢服役环境不同, 潜艇是以海水环境及压力环境为主, 而水面舰船服役环境则包括了海水环境以及海洋大气环境。由于其应用场景不同, 对结构钢的性能要求也差异较大。潜艇用钢主要追求高强韧性, 特别是中厚、超厚钢板要求高强韧性以及止裂性能, 代表牌号有美国 552 MPa 级 HY80、690 MPa 级 HY100 以及 890 MPa 级 HY130, 舰船结构用钢厚板是耐压壳体结构材料^[15]。水面舰船结构用钢则更加关注其高强韧、易焊接、低成本, 其中以美国海军 440 MPa 级 HSLA65 钢、552 MPa 级 HSLA80 钢、690 MPa 级 HSLA100 钢、785 MPa 级 HSLA115 钢系列结构钢最具有代表性^[15, 16]。美国舰船结构用钢的发展和研制历史最久, 其材料研发经历了多个阶段, 建立了多个系列的牌号和钢种。

(1) 第二次世界大战期间, 舰船结构用钢以中低强度为主, 钢中合金元素少, 碳当量低, 因此成本低、易焊接, 但是鉴于当时材料科学、冶金学、力学理论的发展水平的限制, 对钢铁材料理论认识有局限, 因此结构钢韧性较低、易发生脆性断裂, 并且防弹、耐蚀性较差。

(2) 20 世纪 60 年代以后, 发展高强度结构钢是为了满足大型水面舰船和大潜深潜艇性能要求, 发展了具有

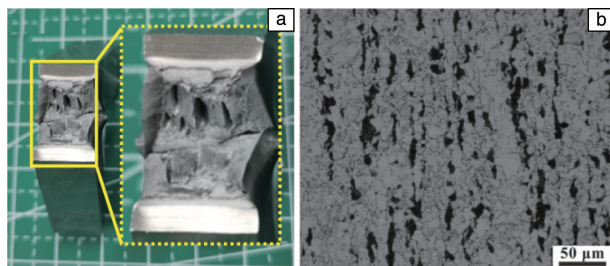


图2 舰船结构钢典型韧性断口(a)及组织照片(b)

Fig. 2 Typical ductile fracture morphology (a) and microstructure (b) of warship structural steels

高强韧性的 HY 系列钢种, 包括 HY80、HY100、HY130、HY150、HY180 等, 屈服强度等级涵盖各部分性能要求, 规格齐全、水面水下通用。

(3) 20 世纪 80 年代以后, 美国开始发展高强度低合金钢 HSLA 系列及超低碳贝氏体钢 ULCB 系列。虽然 HY 系列调质钢性能优异, 但是焊接成本高, 随着材料设计理念的升级和强化机理的发展, 按照高强度、易焊接、低合金设计理念发展了 HSLA 钢种, 包括 HSLA80 和 HSLA100(替代 HY80 和 HY100)。在此基础上, 又相继开发了 HSLA65 和 HSLA115 结构钢。总体来说, HSLA 系列是按几项重要指标的要求进行综合设计的, 包括高强度、低成本、长寿命、耐腐蚀、易焊接性。

3.2 各国舰船结构用钢发展分析

舰船结构用钢是舰船船体建造最重要且用量最大的一类材料, 其用量通常可以占到舰船排水量的 35% 以上。美国作为主要军事工业强国, 舰船结构用钢发展历史及牌号、强度级别、理论与技术的演化发展脉络最为清晰, 因此首先对以美国为代表的世界主流舰船用钢发展历史和演变进行介绍。美国舰船结构用钢的研发最早可以追溯到第二次世界大战, 至今已发展了 80 余年。发展过程中, 舰船结构用钢的屈服强度等级得到不断提升, 现役舰船结构用钢强度已达到了较宽的范围(345~1175 MPa)^[16]。伴随冶金学、材料科学、力学理论、测试技术等理论及技术的发展, 舰船结构用钢经历多个发展阶段, 其设计理念也发生转变, 目前美国舰船高强结构钢包括 HY 系列、HSLA 系列、ULCB 系列、HSLC 系列, 其中 HY 系列和 HSLA 系列钢均已形成完整的材料体系, 覆盖各屈服强度级别, 技术成熟度高; 而 ULCB 系列和 HSLC 系列处于研究阶段。总体来说, 按照研发应用的时间先后, 国外舰船结构用钢主要包括^[15, 16]: ① 碳素钢。碳素钢用于早期舰船结构, 如美国在 1940 年以前将屈服强度高于 235 MPa 的碳素钢(MS)用于建造舰船主船体结构, 目前仅用于小型舰艇及军辅船。② 高强度钢。该钢种是美国现役水面舰船船体建造的主要钢种, 包括 HTS 结构钢及 HY 系列高屈服强度钢等, 其中, HY 系列高屈服强度钢最早于 1952 年研制成功, 牌号为 HY80, 并用于“大青花鱼”和“咆哮号”潜艇建造。该类型调质型结构钢以 HY80 为代表, 随后在此基础上, 陆续研制了 HY100、HY130、HY150、HY180, 该类结构钢性能优异, 可以满足舰船技战术性能指标, 但是焊接性能较差、成本高。由于 HY 系列钢种性能优异, 目前是美国潜艇用钢的主力钢种。自 1952 年 HY80 钢第一版标准(MIL-S-16216^[17])制定至今, 该材料相关标准制修订已经经历了数十次, 其考核指标、考核方式等均已发生几次变化, 最新标准版本为 T9074-BD-GIB-010/0300^[18, 19]。③ 高强低合金钢。随着

结构钢成分设计理念及强化机制的创新, 为了改善 HY 系列结构钢焊接困难、成本较高的问题, 通过低合金设计、沉淀强化、控轧控冷等原理和技术, 开发了适用于水面舰船的 HSLA 系列钢种, 其中以 HSLA80 结构钢为代表, 随后在其基础上研发了 HSLA100 结构钢, 并陆续研制了 440 MPa 级 HSLA65 结构钢和 785 MPa 级 HSLA115 结构钢, 其中 HSLA115 钢是甲板用高强度钢, 而 HSLA65 钢用于代替 HTS 钢建造 440 MPa 级主船体结构。④ 低碳贝氏体钢等其他类型。20 世纪 80 年代末, 发展了以低碳贝氏体钢 ULCB 为代表的高强韧性结构钢, 其含碳量极低, 焊接性能极大改善。

目前世界各工业强国主要舰船结构用钢牌号总结于表 1, 其中美国舰船结构用钢体系和强度等级最全。美国舰船结构用钢以调质型高屈服强度钢 HY 系列和高强低合金钢 HSLA 系列为代表, 二者目前分别用于潜艇结构建造和水面舰船结构建造。调质型高屈服强度钢 HY 系列可以完全满足水面舰艇、破冰船的性能需求, 并由于性能优异且可制造超厚板, 因此用于潜艇结构制造, 包括 550 MPa 级 HY80 钢^[17, 20]、690 MPa 级 HY100 钢^[17, 20]、890 MPa 级 HY130 钢^[21], 其中 HY130 钢是潜艇专用结构钢。HY 结构钢合金含量高、焊接困难导致成本高, 因此针对该问题发展了用于大型水面舰船结构的高强低合金沉淀强化型 HSLA 系列结构钢, 目前以 HSLA80 钢^[22]和 HSLA100 钢^[22]为代表, 已用作航母结构钢, 包括止裂板、加强部位、甲板等位置, 而新研制的 440 MPa 级的 HSLA65 钢^[23]主要用于替代 350 MPa 级的高强度 HTS 结构钢, 作为主船体材料使用, 而 785 MPa 级的 HSLA115^[16]结构钢主要用于航母高强度甲板等结构。此外, 随着全寿命周期成本概念的提出, 为了加速材料研制和装备建造, 以及改善焊接性和降低成本, 美国海军不仅发展了易焊接 HSLA 系列钢, 也发展了超低碳贝氏体钢 ULCB, 该材料具有超低碳含量, 有效改善了焊接问题。

俄罗斯是除美国以外建立完整的舰船结构用钢体系的国家, 研发了各型潜艇耐压壳体用 CXII 系列、屈服强度达 588~1176 MPa 的 AK 系列结构钢以及极地低温环境使用的 AB 系列钢^[24]。英国也是较早开展舰船结构用钢研发的国家, 在 20 世纪 50 年代前主要以 UXW 钢为主, 在 20 世纪 50 年代开始自行研制 432 MPa 级的 QT 系列钢, 但由于 QT 结构钢抗层状撕裂性能较差, 因此后期主要在美国 HY 系列基础上研制, 包括 Q1N 钢(对标 HY80 钢)、Q2N 钢(对标 HY100 钢)等^[25]。法国作为海军强国, 在舰船结构用钢领域的研制具有其特色, 目前已发展了屈服强度 785 MPa 级的 HLES80 以及 980 MPa 级的 HLES100, 并成功用于核潜艇结构, 下潜深度可达 500 m。日本非常重视舰船结构用钢的开发和应用, 不仅

表1 各国舰船结构用钢主要种类及牌号

Table 1 Main types and grades of warship structural steels in various countries

Yield strength/ MPa	America			Russia		Britain	France	Japan
	HY steels	HSLA steels	Other steels	AB steels	CX/J/AK steels	Q steels	HLES steels	NS steels
350	HTS			AB	CX/J-1	HTS	HTS	
390				ABA	CX/J-4	UXW		
440		HSLA65			CX/J-45	QT28		NS46
490				AB1 AB1A				
560~620	HY80	HSLA80	ULCB80 *	AB2	AK-25	QT35	HLES60	NS63
				AB2K	AK-27	Q1N	(590 MPa)	
				AB2A	AK-28			
690	HY100	HSLA100	ULCB100 * NUCu-100 *					
785		HSLA115		AB3A AB4A	AK-32	Q2N *	HLES80	NS80
890	HY130		ULCB130 *			Q3N *		NS90
980			NUCu-140 *	AB5A AB6A	AK-33		HLES100	
1078			BA160 *					NS110
1176			NUCu-170 *	AB7A	AK-34			
1240	HY180 *							
1370	HY200 *							

Note: The symbol “*” indicates that the steel brand is still in the development and assessment stage and has not yet been put into service.

深耕钢铁冶金技术，在冶金理论和材料设计理论上也非常重视，并不断创新，例如日本在 TMCP 控轧控冷技术方面具有独特优势^[26]。日本早期主要采用 440 MPa 级的 NS46 建造舰船船体结构，在 1967 年研发成功 NS63 结构钢并投入使用，在 1975 年发展了 785 MPa 级的 NS80 结构钢，在 1981 年应用 890 MPa 级的 NS90 结构钢建造了深海科学探测船。在此基础上，又发展了 1078 MPa 级的 NS110 结构钢^[27]。

3.3 舰船结构用钢低温韧性考核分析

目前各国舰船结构用钢的标准中除了对成分、夹杂等提出要求，也规定了力学性能要求及质量一致性要求，主要包括拉伸性能^[28]、冲击性能^[29, 30]等，其中低温问题带来的舰船结构用钢脆性失效成为核心关注点，本节以美国海军舰船结构用钢军用标准为例，对不同钢低温冲击性能考核进行对比分析。目前 HY 系列和 HSLA 系列结构钢低温冲击韧性的考核方式主要以夏比 V 型缺口摆锤冲击试验 (Charpy V-notch impact test, CVN)、动态撕裂摆锤试验 (dynamic tear, DT) 及落锤试验 (drop weight tear testing, DWTT) 为主^[6, 29-33]，其中 CVN 试验选择 2 mm 的 V 缺口样品，利用摆锤锤刃从缺口样品另一侧一次冲断，测试其不同温度下的 KV_2 冲击功值 (KV_2 冲击功值是使用 2 mm 摆锤锤刃对 V 型缺口样品测得的冲击吸收能量，单

位为 J)。而 DT 试验则测试样品不同温度下的动态撕裂能，试验是在冲击试验机上将处于简支梁的结构钢动态撕裂缺口样品一次冲断，测量吸收能量和其断口纤维率^[19]。对比发现，美国军用标准低温考核的温度以华氏温度的整数进行设置。其中钢板、铸件、锻件、棒材、型材、热处理接头几大类中，除铸件外，其他类型 CVN 试验温度为 -84 ℃，该温度对应华氏温度 -120 ℉；铸件的 CVN 试验温度为 -73 ℃，对应华氏温度为 -100 ℉。剪切断面率为 35%~50%，其中 50% 断面率主要对应中薄板的要求，40% 断面率主要对应厚板的要求；35% 断面率对应超厚板要求。对于 DT 测试，除 HY130 潜艇用钢外，主要考核 -40 ℃ 下动态撕裂能，对应华氏温度 -40 ℉，动态撕裂能一般要求不能低于 542 J (超厚板) 或 610 J。对于 HY130 结构钢，其 DT 试验考核温度为 -29 ℃ (-20 ℉)^[19]。考虑 CVN 低温冲击性能考核温度设置的目标主要是保证舰船结构用钢即使在极地低温极值 -70 ℃ 恶劣环境下也不发生脆性断裂失效，根据船舶结构设计准则，一般需要在此基础上增加安全系数，通过增加裕量方式保证极地低温环境下不发生船体脆断。

3.4 舰船结构用钢考核评价存在问题及建议

美国舰船结构用钢种类最多、强度级别范围最宽，目前已形成了多系列舰船结构用钢，现役舰船结构用钢

以 HTS、HY 系列、HSLA 系列为代表。舰船结构用钢标准也随着材料科学、力学理论及技术、测试技术等的发展不断升级,材料标准中对成分、杂质含量、拉伸性能、低温冲击性能、无损检测等提出具体控制指标和要求。然而,针对舰船结构材料研制,目前存在一些共性问题尚需进一步研究。

(1) 指标建设方面。以 MIL 军标为例,主要对成分、夹杂缺陷、拉伸性能、冲击性能指标和检测考核方法提出要求,具体是主要针对材料供货质量和质量一致性的规定。指标设置较为简单(这也是供货质量一致性测试的要求),难以支撑材料高质量发展;此外,材料研制、应用研究、中试、生产供货等各阶段亦缺乏多节点、可剪裁的全流程控制指标。因此在现有标准基础上,发展多参量、多节点指标体系全流程控制,是未来舰船材料快速、高效发展的重要基础。

(2) 考核评价方法及标准建设。军民结构用钢现有考核评价方法主要以常规考核评价方法为主^[19, 34-36],不包含多环境载荷(环境载荷、力载荷)的作用,例如,拉伸性能为常温拉伸,冲击韧性则以常温和低温(最低达-84℃)为主,由于舰船结构用钢服役环境包含极地(低温、冰载荷)、热带(高温、高盐、高湿、强辐照)、深海(海水、压力保载、压力交变)等极端、多场耦合海洋环境,因此,应在现有基础上发展多环境载荷下材料考核评价方法及标准体系。

(3) 快速高效的考核方法研制。传统考核评价技术虽然具有一系列优点,但是实验数据较少以及实验缺乏代表性和大数据定量分析是其发展瓶颈,近年来随着大数据技术和人工智能的快速发展^[37, 38],不断涌现出适用于各类重要参量的高通量、快速试验表征的先进技术^[39-41],以此为基础发展高效考核评价方法也是加速舰船材料研发的重要途径。

4 结 语

舰船结构用钢作为支撑舰船装备制造的主要材料之一,其发展水平直接影响舰船装备发展及技战术性能。由于各类舰船研制周期长、程序多、服役环境恶劣,对舰船结构钢材料的研发提出了更高的要求。本文梳理了舰船结构用钢全球典型服役环境并进行分析,提出舰船结构安全性和环境适用性设计输入;对美国舰船结构用钢的设计思路和发展历程进行分析,梳理其研制和强韧化思路,对比主要国家舰船结构用钢发展历史、分类、现状;总结了舰船结构用钢低温韧性考核方法;提出舰船结构用钢研发未来发展趋势和方向。参考各国舰船结构用钢研究的先进经验,结合当前大数据、智能化研制

新模式,在今后舰船结构用钢研制工作中,应着重在以下几方面开展工作:① 建立全流程设计、可剪裁、多维参数、多节点控制的舰船材料指标体系;② 发展舰船结构用钢材料设计、考核评价标准体系;③ 研制先进、高效、快速考核评价方法等。

参考文献 References

- [1] 周成,叶其斌,田勇,等. 材料热处理学报[J], 2021, 42(1): 14-23.
ZHOU C, YE Q B, TIAN Y, *et al.* Transactions of Materials and Heat Treatment[J], 2021, 42(1): 14-23.
- [2] HARIPRASATH P, SIVARAJ P, BALASUBRAMANIAN V, *et al.* Engineering Failure Analysis[J], 2022, 142: 106783.
- [3] HOSSEINI FAR A R, MOUSAVI ANJIDAN S H, ABBASI S M. Materials Science and Engineering A[J], 2019, 746: 384-393.
- [4] 李梦欢,张露友,徐海卫,等. 金属热处理[J], 2022, 47(7): 34-39.
LI M H, ZHANG L Y, XU H W, *et al.* Heat Treatment of Metals[J], 2022, 47(7): 34-39.
- [5] 方志刚,刘斌,李国明,等. 中国材料进展[J], 2014, 33(7): 385-393.
FANG Z G, LIU B, LI G M, *et al.* Materials China[J], 2014, 33(7): 385-393.
- [6] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料动态撕裂试验方法: GB/T 5482—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Dynamic Tear Test Method for Metallic Materials: GB/T 5482—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [7] 刘瑞堂,刘文博,刘锦云. 工程材料力学性能[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001.
LIU R T, LIU W B, LIU J Y. Mechanical Properties of Engineering Materials[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2001.
- [8] 王勋龙,于青,刘二虎,等. 中国计量[J], 2018(8): 78-79.
WANG X L, YU Q, LIU E H, *et al.* China Metrology[J], 2018(8): 78-79.
- [9] 陈景昊,乐可铭,张兴东,等. 舰船科学技术[J], 2023, 2: 29-33.
CHEN J H, LE K M, ZHANG X D, *et al.* Ship Science and Technology[J], 2023, 2: 29-33.
- [10] 刘德红,徐庆林,王向军. 兵工学报[J], 2022, 43(11): 2905-2915.
LIU D H, XU Q L, WANG X J. Acta Armamentarii[J], 2022, 43(11): 2905-2915.
- [11] FAN E, ZHAO Q Y, WANG S Y, *et al.* Materials Science and Engineering: A[J], 2022, 854: 143802.
- [12] 师仲然,罗小兵,柴锋,等. 一种具有低温韧性的 590 MPa 级极地船体结构钢及其制备方法: CN202211510043. 5[P]. 2022-11-29.
SHI Z R, LUO X B, CHAI F, *et al.* A 590 MPa Polar Hull Structur-

- al Steel with Low Temperature Toughness and Its Preparation Method; CN202211510043. 5[P]. 2022-11-29.
- [13] WANG K, WU L, LI Y Z, *et al.* Ocean Engineering[J], 2020, 216: 107789.
- [14] GAGNE M. Corrosion 2021 Virtual Conference and Expo[C]. National Association of Corrosion Engineers (NACE), 2021: 3429-3436.
- [15] 程新安. 材料开发与应用[J], 1997, 12(2): 46-48.
CHENG X A. Materials Development and Application[J], 1997, 12(2): 46-48.
- [16] 王国栋, 尚成嘉, 刘振宇. 海洋工程用钢铁材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
WANG G D, SHANG C J, LIU Z Y. Iron and Steel Materials for Ocean Engineering[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.
- [17] Steel Plate, Alloy, Structural, High Yield Strength (HY-80 and HY-100); MIL-S-16216K-1987[S]. U.S. Department of Defense, 1987.
- [18] 吉嘉龙, 马建坡. 材料开发与应用[J], 1992, 7(1): 1-9.
JI J L, MA J P. Materials Development and Application[J], 1992, 7(1): 1-9.
- [19] Base Materials for Critical Applications; Requirements for Low Alloy Steel Plate, Forgings, Castings, Shapes, Bars, and Heads of HY-80/100/130 and HSLA-80/100; T9074-BD-GIB-010/0300 [S]. NAVSEA, 2012.
- [20] Steel Forgings, Alloy, High Yield Strength (HY-80 and HY-100); MIL-S-23009C-1987[S]. U.S. Department of Defense, 1987.
- [21] Steel Plate, Structural, High Yield Strength (HY-130); MIL-S-24371B-1989[S]. U.S. Department of Defense, 1989.
- [22] Steel Plate, Sheet, or Coil, Age-Hardening Alloy, Structural, High Yield Strength (HSLA-80 and HSLA-100); MIL-S-24645[S]. U.S. Department of Defense, 1984.
- [23] 吴始栋. 船舶物资与市场[J], 2009, 4: 30-32.
WU S D. Shipbuilding Materials and Market[J], 2009, 4: 30-32.
- [24] 吴始栋. 舰船知识[J], 2011, 3: 67-68.
WU S D. Ship Knowledge[J], 2011, 3: 67-68.
- [25] 徐科. 材料开发与应用[J], 2010, 25(1): 55-58.
XU K. Materials Development and Application[J], 2010, 25(1): 55-58.
- [26] 叶其斌, 刘振宇, 王国栋. 第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集[C]. 上海: 中国金属学会, 2015.
YE Q B, LIU Z Y, WANG G D. Proceedings of the 10th China Iron and Steel Annual Conference and the 6th Baosteel Academic Annual Conference[C]. Shanghai: The Chinese Society for Metals, 2015.
- [27] 尹士科, 李亚琳, 刘奇凡. 材料开发与应用[J], 2008, 23(4): 62-72.
YIN S K, LI Y L, LIU Q F. Materials Development and Application[J], 2008, 23(4): 62-72.
- [28] Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials; ASTM E8[S]. ASTM, 2013.
- [29] Test Method for Dynamic Tear Testing of Metallic Materials; ASTM E604[S]. ASTM, 1983.
- [30] Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials; ASTM E23[S]. ASTM, 2012.
- [31] 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法; GB/T 229-2007[S]. 中国国家标准化管理委员会, 2007.
Metallic Materials—Charpy Pendulum Impact Test Method; GB/T 229-2007[S]. Standardization Administration of the People's Republic of China, 2007.
- [32] 铁素体钢的无塑性转变温度落锤试验方法; GB/T 6803-2023[S]. 中国国家标准化管理委员会, 2023.
Test Method for Drop-Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels; GB/T 6803-2023[S]. Standardization Administration of the People's Republic of China, 2023.
- [33] Test Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferrite Steels; ASTM E208; 1995[S]. ASTM, 1995.
- [34] 舰艇用 10CrNi3MoV 球扁钢规范; GJB 1662A-2015[S]. 中国人民解放军总装备部, 2015.
Specification for 10CrNi3MoV Flat Bulb Steel for Ships; GJB 1662A-2015[S]. The General Reserve Department of PLA, 2015.
- [35] Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft [S]. Lloyd's Register, 2004.
- [36] 船用高强度钢厚板应用指南 2024; GD002-2024[S]. 中国船级社, 2024.
Application Guide for Marine High Strength Steel Slabs 2024; GD002-2024[S]. China Classification Society (CCS), 2024.
- [37] 孙志梅, 王冠杰, 张烜广, 等. 北京航空航天大学学报[J], 2022, 48(9): 1575-1588.
SUN Z M, WANG G J, ZHANG X G, *et al.* Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics[J], 2022, 48(9): 1575-1588.
- [38] 殷倩倩, 申鑫欣, 夏祎. 数字技术与应用[J], 2022, 40(5): 21-23.
YIN Q Q, SHEN X X, XIA Y. Digital Technology & Application[J], 2022, 40(5): 21-23.
- [39] WANG H Z, ZHAO L, JIA Y H, *et al.* Engineering[J], 2020, 6: 621-636.
- [40] 王海舟, 汪洪, 丁洪, 等. 科技导报[J], 2015, 33(10): 31-49.
WANG H Z, WANG H, DING H, *et al.* Science & Technology Review[J], 2015, 33(10): 31-49.
- [41] 崔壮, 刘满平, 曾迎, 等. 稀有金属材料与工程[J], 2024, 53(8): 2375-2389.
CUI Z, LIU M P, ZENG Y, *et al.* Rare Metal Materials and Engineering[J], 2024, 53(8): 2375-2389.