

船舶用高强度低合金钢的发展综述

李长福^{1, 2}, 高云保^{1, 2}, 李宝治^{1, 2}, 赵岭^{1, 2}, 王宇^{1, 2}, 张海军²,
杜丘², 陈博龙³, 王增睿^{1, 2}

(1. 高端装备铸造技术全国重点实验室, 辽宁沈阳 110021; 2. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110021; 3. 沈阳真空技术研究所有限公司, 辽宁沈阳 110042)

摘要: 随着船舶性能需求的不断提高, 对船舶建造材料的要求也逐渐变化。高强度低合金钢因具备高强韧性、良好的焊接性等优异性能而受到广泛关注。本文主要对高强度低合金钢在船舶建造方面的发展过程及研究现状、应用情况、合金体系、制造工艺以及未来的发展方向和先进船舶用材料的开发等方面进行了概述, 旨在为我国开展先进船舶用材料研究及推动船舶用高强度低合金钢的改进和提高起到启示作用。

关键词: 高强度低合金钢; 发展方向; 先进船舶用材料

作者简介:

李长福 (1990-), 男, 硕士生, 主要研究方向为低合金高强度钢性能提升和热处理工艺机理。E-mail: 635516849@qq.com

通信作者:

王增睿, 男, 博士, 高级工程师。E-mail: wangzr_srif@foxmail.com

中图分类号: TG142

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)10-1309-12

基金项目:

辽宁省科技计划联合计划(技术攻关计划项目, 编号: 2024JH2/102600262)。

收稿日期:

2025-01-15 收到初稿,
2025-03-25 收到修订稿。

自21世纪伊始, 世界各国为了应对全球范围内的人口增长、资源短缺和环境恶化等危机, 开发利用海洋已是大势所趋; 我国邻近国家及其他大洲强国竞相采取多种策略来争夺我国领海空间与资源的行为, 使得我国的海洋权益面临了空前的威胁与挑战^[1]。因此开发制造性能更加优异的船舶已经迫在眉睫。但由于船舶长期服役环境的复杂多变, 如海洋气候、海水介质、不同海域以及不同深度海水温差等因素极易导致船舶结构出现腐蚀开裂、力学性能逐渐减弱等问题直接威胁船舶的服役安全性, 显著降低船舶的作战能力^[2]。

有研究表明, 海水中的氧含量、温度和盐度等条件随海水深度变化而变化^[3]。为应对如此复杂的服役环境, 船舶用材料通常要求具备高强度、高韧性、低屈强比、高弹性模量、高低周疲劳抗性、良好的耐蚀性以及优良的焊接性能; 基于以上要求, 世界各国的船舶建造材料包括: 钢材、铝合金、钛合金、铜合金、复合材料和新型功能材料等^[3]。高强度低合金 (High Strength Low Alloy, HSLA) 钢因具备高强度、高韧性、较低的屈强比^[4-5]、良好的焊接性能^[6-9]和耐蚀性能, 成为船舶的甲板、耐压壳体等位置建造的主要材料^[10-11]。

本文主要针对HSLA钢在国内外船舶结构应用方面的发展历程、应用实例, 总结了典型合金成分体系、制造工艺技术和碳当量设计, 对船舶用HSLA钢及其他先进材料的未来发展方向进行了展望。

1 船舶用HSLA钢发展现状

1.1 美国船舶用 HSLA 钢发展现状

HSLA钢源自普通碳素钢, 属于特殊钢的范畴^[12-13], 可称为微合金钢 (总合金元素含量 $\leq 0.1\%$) 或低合金钢 (总合金元素含量 $\leq 5\%$)^[14], 在轧制条件下屈服强度不低于275 MPa^[4, 15]。18世纪初, 冶金与机械技术革新推动了铁质及铁木混合船舶的建造发展。19世纪末期, 为减轻船体重量, 提高钢材的强度以便建造更加大型的船舶成为了一些国家的研发目标。由于此时期的船舶建造的连接方式为铆接, 使用的材料均是普通碳素钢, 除了Fe和C外不添加其他的合金元素, 因此就经济性方面的考虑, 增加碳含量以提高抗拉强度成为了一种高效的方法, 高碳高强钢应运

而生。

20世纪40年代,美国水面船舶主要选用高抗拉强度(High Tensile Strength, HTS)钢及一般强度级别的结构钢。尽管在使用过程中HTS钢展现出良好的焊接性能,但其强度有限、韧性不足,且耐腐蚀性处于中等水平,直接引发了多起海上重大事故。因此,各国均开始研发性能更优越的船舶用HSLA钢,为获得强度、淬透性及低温韧性等配合良好的综合性能,通过增加Cr、Ni、Mo等合金元素的含量,成功研制了Ni-Cr-Mo系HSLA钢,经调质热处理后屈服强度可达590~745 MPa,韧脆转变温度低至-100℃以下^[16]。

20世纪50年代,美国成功研发的HY-80是早期调质型Ni-Cr-Mo系HSLA钢的代表。HY-80钢含碳量不高于0.18%,经过调质热处理后,屈服强度可达到550 MPa以上。自1958年首次应用于船舶建造以来, HY-80钢显著提升了船舶结构的安全性与服役寿命,成为海洋工程材料发展的重要里程碑^[17]。

在20世纪60年代,美国制备出新型的屈服强度达到690 MPa的HY-100钢。其合金成分与HY-80钢基本相同,但合金元素配比得到优化,同时也进行了热处理参数的调控,旨在保证大幅提升屈服强度的同时,低温韧性也具有出色的表现。美国最新型号深海探测设

备的承压结构部件,即是选用HY-100钢作为主要建造材料^[18]。表1为20世纪80年代HTS钢和HY系列钢在美国船舶上应用情况^[19]。

表1 HTS钢和HY系列钢在美国船舶上应用情况
Tab. 1 Applications of HTS steel and HY series steel in U.S. ships

船型	用量/t		
	HTS	HY-80	HY-100
海上基地	22 370	1 496	21 527
海洋科考船	2 725~3 500	707	0~112
远洋护航船	2 230~2 370	707	-
近海执法船	1 100	150	-
两栖运输船	5 600~15 600	327~771	224~280

在20世纪60年代中叶,美国又进一步研发了屈服强度为890 MPa的HY-130钢,其含镍量增加至5%左右,并额外添加了0.05%~0.1%的V元素;为了确保良好的韧性和焊接性,碳含量控制在0.12%以下^[20-23]。此外,还通过精炼技术进一步降低了P、S等杂质元素和气体含量,从而提高了钢的纯净度和质量, HY-130钢多用于深海探测设备的耐压壳体制造^[24]。HY系列钢的具体成分见表2^[1],具体性能见表3^[25-27]。

表2 HY系列钢合金成分
Tab. 2 Compositions of HY series steels

船型	板厚/mm	化学成分 $w_B/\%$							
		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	Cu
HY-80	≤32	0.10~0.18	0.15~0.38	0.1~0.4	2.25~3.5	1.0~1.8	0.2~0.6	≤0.03	≤0.25
	32~76	0.13~0.18	0.15~0.38	0.1~0.4	2.5~3.5	1.4~1.8	0.35~0.6	≤0.03	≤0.25
HY-100	76~203	0.13~0.18	0.15~0.38	0.1~0.4	3.0~3.5	1.5~1.9	0.5~0.65	≤0.03	≤0.25
	32~76	0.14~0.20	0.15~0.38	0.1~0.4	2.75~3.5	1.4~1.8	0.35~0.6	≤0.03	≤0.25
HY-130	76~152	0.14~0.20	0.15~0.38	0.1~0.4	3.0~3.5	1.5~1.9	0.5~0.65	≤0.03	≤0.25
	≤203	≤0.12	0.15~0.35	0.6~0.9	4.75~5.25	0.4~0.7	0.3~0.65	0.05~0.1	≤0.25

表3 HY系列钢力学性能
Tab. 3 Mechanical properties of HY series steels

钢种	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	断面收缩率/%	冲击功/(J·cm ⁻²)	碳当量
HY-80	550	690	18	50	68(-84℃)	0.72
HY-100	690	830	18	45	68(-84℃)	0.74
HY-130	890	-	15	50	68(-84℃)	0.62

20世纪80年代,美国科研人员通过微调ASTM A710钢的合金元素含量,即Nb元素含量由不超过0.02%增加至0.02%~0.06%,限制P、S元素含量小于于

0.01%,成功研制了HSLA-80钢,其屈服强度可以媲美HY-80钢,但低温韧性大幅度提高,并且实现了板材厚度不超过32 mm时不需预热焊接的设想,简化了船舶建

造工艺,提高了生产效率,降低了成本^[28]。据美国官方预测,相比于HY-80钢,使用HSLA-80钢建造船舶每磅将节约成本40%~90%,每十年节约经费2~10亿美元^[29]。截至当前,HSLA-80钢已逐步替代HY-80钢成为建造船舶的主要材料^[30]。

到了20世纪80年代中叶,为了进一步减轻船体自重,降低建造成本,通过增加HSLA-80钢中Mn、Ni、Mo和Cu的合金元素含量^[31],美国成功研制了HSLA-100钢,屈服强度可达690 MPa,与HY-100钢相当,但其具有优良的焊接性^[31];可在最低预热温度15.6 °C的情况下施焊,从而降低了船舶建造成本^[34]。据推断,因预热温度降低,每年可节省资金1亿美元^[29]。由于HSLA-100钢优异的低温韧性,常被用于建造深海探测载具^[35]和大型水面船舶的某些特定构件^[29]。HSLA-100钢在美国船舶上的使用情况见图1^[19, 29]。可以发现,经过前期船舶上的少量试用后,HSLA-100钢在后续船舶的建造时开始大量应用。

在20世纪90年代,美国为了满足最新型超大水面船舶减重及降低重心的要求,研发了HSLA-65钢和

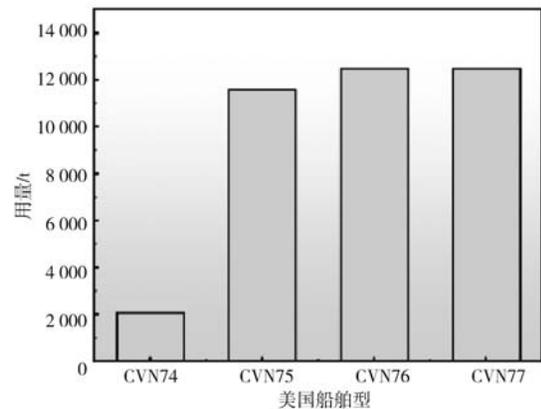


图1 HSLA-100钢在美国船舶上的使用情况

Fig. 1 The application of HSLA-100 steel in U.S. ships

HSLA-115钢,屈服强度分别达785 MPa和445.9 MPa^[23],并已被应用于超大型水面船舶的壳体和甲板的建造^[36];研究表明:使用HSLA-115钢可以帮助船舶的自重减轻101 000~203 000 kg,重心降低150 mm^[28],提高船舶的机动性能。HSLA系列钢的合金成分见表4^[1, 37-39]。

表4 HSLA系列钢合金成分
Tab. 4 Composition of HSLA series steels

钢种	板厚/mm	化学成分 $w_B/\%$								
		C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	V	Nb
A710		≤0.07	≤0.40	0.40~0.70	0.70~1.00	0.60~0.90	0.15~0.25	1.00~1.30	-	≥0.02
HSLA-80	≤25	≤0.06	≤0.40	0.75~1.15	1.50~2.00	0.45~0.75	0.30~0.55	1.00~1.30	≤0.03	0.02~0.06
	≤32	≤0.06	≤0.40	0.40~0.70	0.70~1.00	0.60~0.90	0.15~0.25	1.00~1.30	≤0.03	0.02~0.06
HSLA-100	≤32	0.1~0.18	0.15~0.38	0.10~0.40	2.00~3.25	1.00~1.80	0.20~0.60	≤0.25	≤0.03	-
	≤51	≤0.06	≤0.40	0.75~1.15	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	≤0.40	0.75~1.15	3.35~3.65	0.45~0.75	0.55~0.65	1.15~1.75	≤0.03	0.02~0.06
HSLA-65	≤32	≤0.10	0.10~0.50	1.10~1.65	≤0.40	≤0.20	≤0.08	≤0.35	≤0.10	≤0.05
HSLA-115		0.05	0.22	0.97	3.37	0.64	0.56	1.29	<0.01	0.02
HSLA-130		0.07	0.37	0.79	3.33	0.57	0.58	1.72	0.005	

进入21世纪后,为更进一步降低成本、提高性能,美、日等国开始选用超低碳贝氏体(ultra-low carbon bainite, ULCB)钢来建造船舶,成果主要包括:美国的Fe-Cu-Nb-B系列钢和日本的Fe-Mn-Nb-B系列钢。ULCB钢的碳当量在0.2左右,采用添加Mn、Mo和B等元素的方式提高淬透性,通过添加Nb、Ti、Mo和Cu等元素增加析出强化效果;同时,由于消除了碳化物,减少了裂纹萌生几率并且贝氏体板条阻碍裂纹扩展,因此提高了韧性^[40-41]。

1.2 俄、日等国船舶用HSLA钢发展现状

19世纪初,俄国的某种型号船舶建造时使用的钢材

就是HSLA钢^[42-43]。20世纪50年代,成功研发了屈服强度为590 MPa级的Ni-Cr-Mo系A K 25钢,并在1956年被用于第一艘深海探测设备的建造;当进入19世纪60年代时,A K系列钢已基本完善^[28]。随着国际形势发展的需要,开展了Ni-Cr-Mo-V-Cu系A B系列钢的研究,通过添加超过1%的Cu元素,利用Cu的沉淀强化效果来提高强度;成果包括:590 MPa级的A B 2钢、785 MPa级的A B 3、A B 4钢、980 MPa级的A B 5 A、A B 6 A钢和1176 MPa级的A B 7 A钢。其中,日本的NS110钢与俄罗斯A B 7 A钢共同代表了Ni-Cr-Mo-V-Cu系HSLA钢的最高水平。目前,A K系列钢已逐步被A B系列钢所取代。世界各国调质型船舶用HSLA钢钢种和强度级别见表5^[44]。

表5 世界各国调质型船舶用HSLA钢钢种和强度级别
Tab. 5 Steel types and strength levels of HSLA steels used in ships around the world

屈服强度/MPa	美国	日本	英国	法国	俄罗斯
560~620	HY-80, HSLA-80	NS63	QT35, Q1 (N)	HY-80	A B 2A, A B 2, A B 2 K
690	HY-100, HSLA-100		Q2 (N)		
785	HSLA-115	NS80		80HELs	A B 4A, A B 3, A B 4 K
890	HY-130, HSLA-130	NS90	Q3 (N)		
980				100HELs	A B 5A, A B 6A
1108		NS110			
1176					A B 7A

日本在船舶用钢的研发方向上与美国基本一致，均为调质型Ni-Cr-Mo系HSLA钢，包括：NS30、NS46、NS63、NS80、NS90及NS110等钢，其屈服强度分别为294、451、617、780、883和1 108 MPa^[24]。其中，NS63、NS80和NS110钢分别应用于多种型号的深海探测设备的承压结构件的制造，展现了NS系列钢在

复杂海洋工况下的优秀适配性^[18]。法国、英国、德国和澳大利亚在此时期也开发了相应的Ni-Cr-Mo系HSLA钢^[45]，如HLES系列钢，QT(N)系列钢，BIS812EMA钢等。日本部分船舶用HSLA钢的合金成分见表6^[27]，力学性能见表7^[18, 27]。

美、日等国在船舶用钢的发展方面主要有以下

表6 日本部分船舶用HSLA钢的合金成分
Tab. 6 Compositions of HSLA steels for some Japanese ships

钢种	化学成分 $w_B/\%$								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
NS46	0.16	0.15~0.50	0.60~1.45	0.035	0.030	0.6	0.3	0.15	0.10
NS63	0.16	0.15~0.40	0.35~0.80	0.025	0.020	2.0~3.5	0.3~1.2	0.2~0.6	0.03
NS80	0.10	0.15~0.40	0.35~0.90	0.015	0.010	3.5~4.5	0.3~1.0	0.2~0.6	0.10
NS90	0.12	0.15~0.40	0.35~1.0	0.015	0.010	4.8~5.5	0.4~0.8	0.3~0.65	0.10
NS110	0.11	-	0.45	0.002	0.001	9.9	1.0	0.98	0.10

表7 日本部分船舶用HSLA钢的力学性能
Tab. 7 Mechanical properties of HSLA steels used in some Japanese ships

钢种	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%	冲击功/(J·cm ²)	碳当量
NS46	451	569~686	23	27 (-50 ℃)	0.46
NS63	618	686~824	20	68 (-70 ℃)	0.59
NS80	785~922	-	17	68 (-70 ℃)	0.55
NS90	833~1 030	-	16	68 (-70 ℃)	0.62
NS110	1 108	1 177	23	198 (-70 ℃)	0.88

几个特点：①通过增添微合金元素或调整合金元素含量来改进现有钢种，获得良好的焊接性能及力学性能；②利用超纯净钢冶炼、热机械控制工艺（Thermo-mechanical Control Processing, TMCP）等现代冶金、制造技术，研发具备更优异强韧性和可焊性的新型船舶用钢；③根据先进材料学理论成果，开展新类型材料研究，进而拓展出新系列的船舶用钢，实现材料本身成本和船舶建造成本同时降低的目标。

1.3 国内船舶用HSLA钢发展现状

我国在船舶用HSLA钢的研究和应用方面先后经历了进口、仿制和国产化、自行研制、改进提高和研究发展等阶段。

在20世纪50年代，前苏联有偿向我国提供全套的装备与船舶建造技术并成功应用于船舶和深海探测设备的建造。然而，由于中苏关系恶化，在20世纪60年代，前苏联废止相关协议并撤回了所有专家，中断了对我国船舶用钢的供应。在这一历史背景下，我国启

动自主研发船舶用钢工程,相继开发出921、922、923船体结构钢,604、607、608铸钢、925锻钢及907和917特种用途钢等系列钢种。在20世纪70年代,我国自主研发第一代船用高强度低合金钢,包括不含Ni和Cr元素的Mn系901、902和903钢,以及含有低量Ni和Cr元素的904钢及其相关材料^[46-49]。

在20世纪80年代,为满足船舶性能现代化要求,

我国成功研发出综合性能更优的HSLA钢,主要代表钢材包括强度达到390 MPa的907A钢、具有卓越耐海水腐蚀性和低温性能的440 MPa级945钢、与HY-80钢相媲美的921A钢,以及可与HY-100相匹敌的980钢等^[46-49]。进入21世纪后,鞍钢生产的420~550 MPa级的ULCB钢也被用于船舶建造^[51]。我国部分船舶用HSLA钢主要合金成分见表8^[24, 39],力学性能见表9^[24]。

表8 我国部分船舶用HSLA钢主要合金成分
Tab. 8 Main alloy components of HSLA steels used in some Chinese ships

钢种	化学成分 $w_B/\%$								
	C	Si	Mn	Ni	Mo	Cr	V	Ti	Cu
907A	0.061	0.60	0.91	0.651	-	0.644	-	-	0.48
945	0.14	0.60	1.00	1.00	0.10	0.50	0.05	-	-
	0.12	0.54	1.05	1.15	0.11	0.52	0.04	-	-
921	0.11	0.27	0.48	2.72	0.23	1.02	0.06	0.026	-
	0.10	0.20	0.41	2.66	0.25	1.03	0.06	0.016	-
921A	0.07	0.29	0.43	2.65	0.26	-	0.06	-	-
	0.10	0.24	0.46	2.78	0.24	1.11	0.07	-	-
922A	0.07~0.14	0.17~0.37	0.3~0.6	2.2~2.5	0.2~0.27	1.2~1.6	-	-	0.8~1.1
923A	0.07~0.14	0.17~0.37	0.3~0.6	2.0~2.3	0.17~0.25	0.7~1.0	-	-	0.8~1.1
	≤ 0.13	0.2~0.4	0.3~0.6	4.8~5.3	0.2~0.35	-	-	-	-
980	0.09~0.13	0.2~0.3	0.5~0.6	4.4~4.5	0.36~0.44	0.5~0.7	-	-	-

表9 我国部分船舶用HSLA钢力学性能
Tab. 9 Mechanical properties of some HSLA steels used in Chinese ships

钢种	板厚/mm	屈服强度/MPa	断后伸长率/%	断面收缩率/%	冲击功/($J \cdot cm^{-2}$)	断面纤维率/%	碳当量
907A	-	480	21	77	-	-	0.38
945	-	525	24	74	28 (-20 °C)	-	0.48
921A	10~35	590~745	16	50	80 (-20 °C)	100 (-40 °C)	0.54
922A	36~70	510~665	16	50	80 (-20 °C)	100 (-40 °C)	0.58
923A	5~9	510~665	16	-	-	-	0.46

虽然我国自主研发的船舶用HSLA钢的基本性能能够满足不同历史时期船舶建造的需求。然而,由于碳及合金元素含量偏高,造成材料成本、焊接成本和船舶建造成本较高;同时船舶用钢的种类和强度级别缺失,也使我国船舶用HSLA钢与国际先进水平相比存在不足和差距。

2 船舶用钢制造工艺及合金成分分析

2.1 国外船舶用钢制造工艺及合金成分分析

HTS钢为非合金化的C-Mn钢,含碳量0.2%左右,采用传统控制轧制工艺,室温组织为粗大的铁素体(ferrite, F)和珠光体(pearlite, P)混合组织,强化方

式主要是细化铁素体晶粒、减小珠光体片距、增加珠光体含量以及固溶强化等方法,强度在350 MPa左右^[52-53]。

HY系列钢是基于普通低碳钢(含0.10%~0.20%C),通过添加Ni、Cr、Mo等多种合金元素,采用调质热处理以获得回火马氏体组织来达到良好的强韧性,图2(a)为HY系列钢合金元素含量变化曲线图。可以看出,随着强度级别的增加, HY系列钢中C含量变化不大,均在0.18%左右, C元素的主要作用是影响材料的强度和淬透性;但也有研究表明^[54]:随着C含量的增加, HY-130钢的韧性逐渐下降,焊接性也会受到损失。HY系列钢的主要合金元素为Ni、Cr和Mo,随着强度级别的增加, HY-80与HY-100钢中Cr元素含量相同,

在HY-130钢中含量下降; Mo元素含量基本保持不变而Ni元素含量从2.0%左右显著提高至5%左右。有研究表明, 钢中Cr元素含量影响材料的淬透性和耐腐蚀性^[44], Mo元素则主要是保证强度、淬透性以及回火稳定性^[55]; 提高Ni元素含量能够抑制粗晶区组织转变, 降低粒状贝氏体比例^[56]; 同时固溶于基体中的Ni元素可以直接提高其低温冲击性能^[56]。

HSLA系列钢采用Ni-Cr-Mo-V合金系设计, 其显微组织由多边形铁素体、珠光体、粒状贝氏体、针状铁素体和马氏体组成^[57-58], 依靠低碳微合金化、TMCP、沉淀硬化等技术, 通过沉淀强化、固溶强化和细晶强化等强化机制^[4, 59-62]获得了优良的综合性能。由于其碳含量极低, 晶粒尺寸细小, 减少了对焊接及热影响区的影响, 其耐腐蚀及腐蚀开裂的性能也得到大幅提升, 使船体结构钢的开发及耐腐蚀性能进入了一个新时代^[63-66]。图2(b)为HSLA系列钢合金元素含量变化曲线。从图可以看出, HSLA系列钢的C含量较低, 普遍在0.06%左右, 结合图2(a)可知HSLA系列钢的C含量明显低于HY系列钢, 且随着强度级别变化, C元素含量也不断降低, 表明HSLA系列钢的强化方式已

不再依赖C原子的固溶强化和组织强化。HSLA系列钢的主要合金元素为Ni、Mo、Cr和Cu, 随着强度级别的增加, Mo、Cr元素含量少量调整而Ni元素含量显著增加; 相较于HY系列钢中Cu作为残余元素存在, HSLA系列钢中Cu元素含量随强度级别提高而不断增加。研究发现添加Cu元素可显著提高材料的强度^[67-68]、耐蚀性^[69]和硬度^[70]; Ni元素不仅可以提高材料的低温韧性并大幅度降低韧脆转变温度, 还可以增强材料耐蚀性能, 同时还有改善Cu脆的作用^[71-73]; Nb等微合金元素的加入可以细化晶粒, 添加Cr、Mo等合金元素可以起到抑制多边形铁素体形成作用并且可以作为固溶元素用来强化基体^[13, 44]。

英、日、法等国的船舶用HSLA钢的研制过程均借鉴美国的先进经验, 因此与美国的研发思路大致相同, 采用Ni-Cr-Mo合金系设计, 经调质热处理后获得优异的综合性能。图2(c)为日本NS系列钢合金元素变化曲线。可以看出, NS系列钢的碳含量与美国HY系列钢基本一致, 均低于0.16%; 随着强度级别从450 MPa提高至1 100 MPa, Ni、Cr和Mo元素含量不断提高, 尤其是Ni元素含量显著提高。

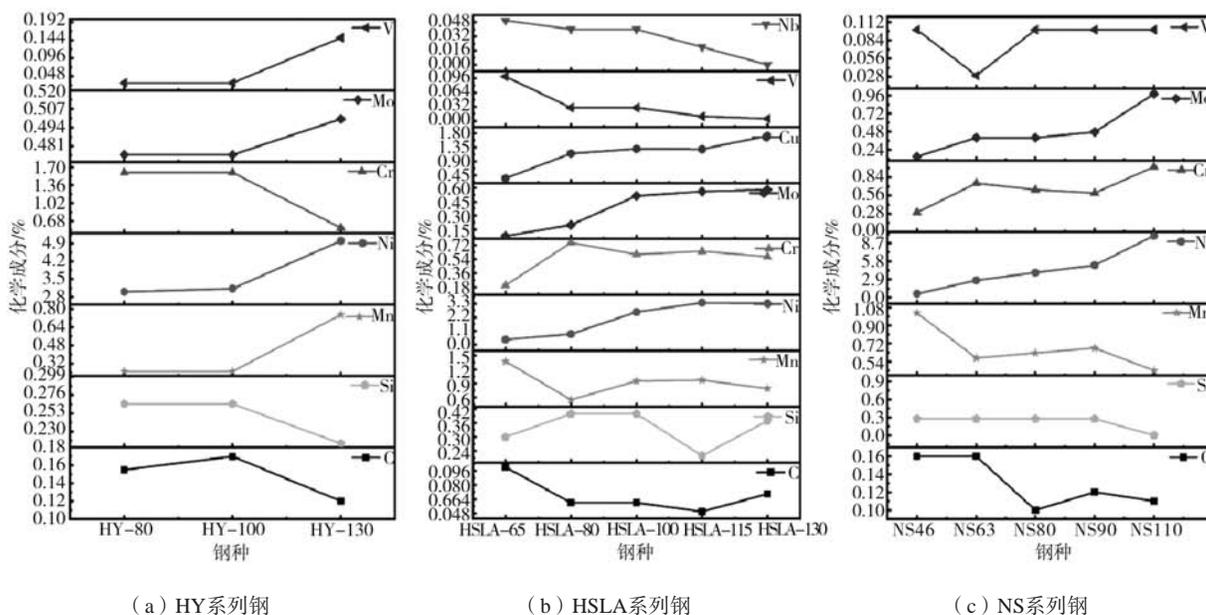


图2 国外船舶用HSLA钢合金元素变化曲线
Fig. 2 Variation curves of alloy elements of HSLA steels for foreign ships

2.2 我国船舶用制造工艺和合金成分分析

我国船舶用HSLA钢采用Ni-Cr-Mo-V合金系设计, 其生产工艺一般为连铸坯热轧+后续热处理, 热轧态或者调质热处理状态交货, 显微组织为回火马氏体。我国船舶用HSLA钢合金元素含量变化曲线见图3。从图可知, 我国船舶用HSLA钢的碳含量一般在0.14%以

下, 相较于美国HSLA系列钢来说碳含量较高; 主要合金成分为Ni、Cr、Mo和Cu元素, 随着强度级别的逐渐上升, Mo元素含量轻微增加, Cr元素含量先增加后减少而Ni元素含量显著提高, Cu元素含量也略有提高。添加Cu元素主要是利用 ϵ -Cu沉淀强化来补偿C含量减小引起的强度损失; 含量较高的Ni元素能够促进含Cu

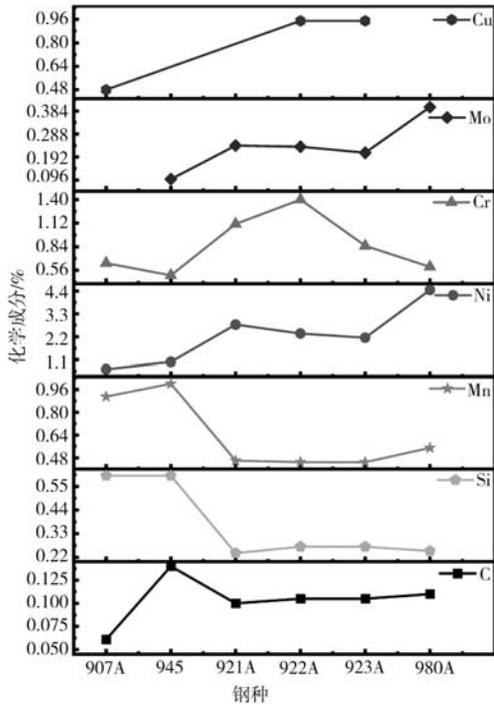


图3 我国船舶用HSLA钢合金元素变化曲线

Fig. 3 Variation curves of alloy elements of HSLA steels for Chinese ships

相析出并抑制其粗化，在提高材料强度的同时增强低温韧性，也有助于改善铜脆现象^[73-76]。

综上所述，世界各国船舶用HSLA钢的性能的提高均是通过降低碳含量、提高合金元素含量并采用新型制造工艺来实现的。目前，船舶用HSLA钢的核心工艺由传统的调质热处理转变为先进的TMCP工艺，其冶金学原理是在奥氏体再结晶温区和未再结晶温区进行大塑性变形，以此促进合金元素的应变诱导析出，进而细化原始奥氏体晶粒，并通过控制轧后冷却过程实现对奥氏体相变过程的控制，最终得到晶粒细小的室温组织；强化机制也发生了由马氏体相变强化向贝氏体相变强化和沉淀强化的转变^[1, 74, 77]。以美国船舶用钢为例，图4为美国HY系列钢和HSLA系列钢核心工艺及典型组织特征^[1, 74, 77]。

3 焊接性能评价

20世纪40年代，由于第一次世界大战和第二次世界大战期间对船舶等设备的大量需求，因此廉价可靠的连接技术受到重视，促进了焊接技术的发展^[78]。从此开始，船舶在建造的过程中使用焊接的连接方式，材料的焊接性也成为船舶用钢的重要性能之一。已有

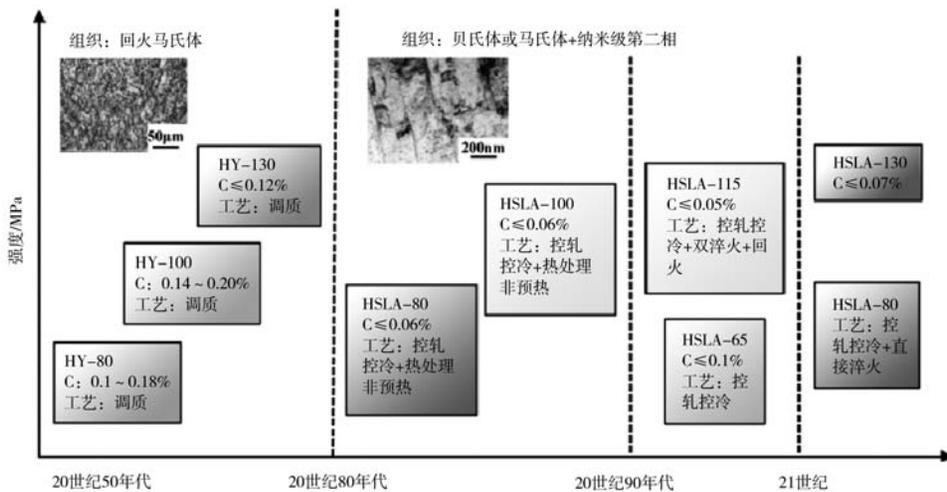


图4 HY系列钢和HSLA系列钢核心工艺及典型组织特征

Fig. 4 Core processes and typical microstructure characteristics of HY series steels and HSLA series steels

研究表明^[79]，C元素显著影响材料的焊接性能，所以在设计材料的合金成分时就应该考虑到C元素的含量。同时，由式(1)可知，C含量是碳当量的主要影响因素，因此降低含碳量成为了船舶用HSLA钢的发展趋势。而为了满足船舶大型化及轻量化发展需求，弥补船舶用钢因降碳导致的强度损失并保证钢材的淬透性，船舶用钢中合金元素的添加也向多元化发展。

一般通过计算碳当量来评价钢材的焊接性能，式(1)由日本学者提出，可用来计算HSLA钢的碳当量^[54, 80]，具体表达式如下：

$$Ceq(JIS) = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14 \quad (1)$$

式中，元素符号均表示该元素的质量分数。

碳当量及碳含量结合Graville焊接性评价图^[54, 80]

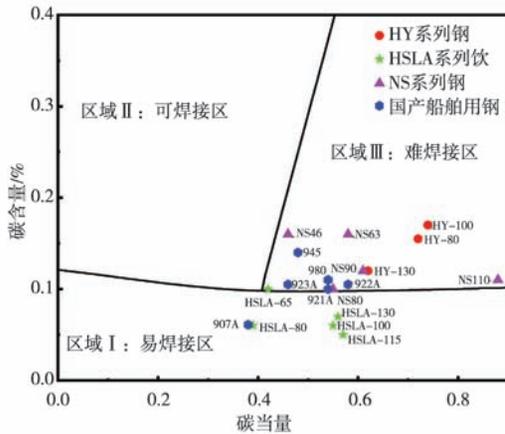


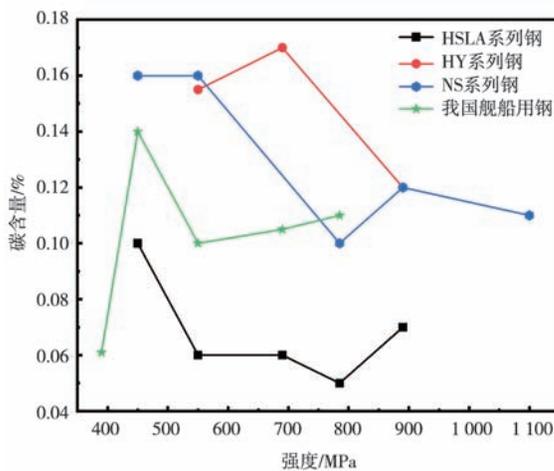
图5 Graville焊接性评价图

Fig. 5 Graville weldability evaluation diagram

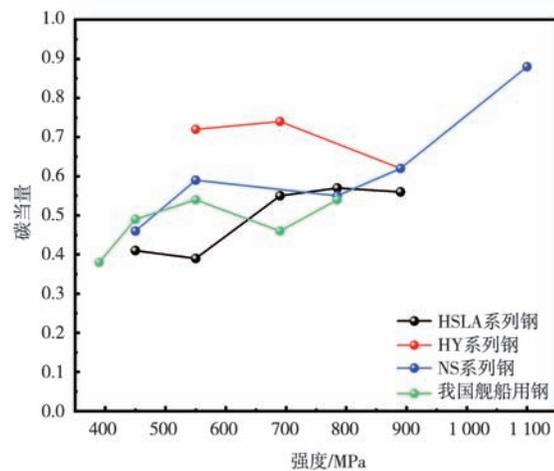
能够评估各种钢材焊接的难易程度。冷裂纹敏感性取决于材料的合金成分与施焊方式^[81]：当碳含量与碳当量的数值位于可焊接区域范围内时，冷裂纹敏感性主要取决于焊接工艺的具体参数，如焊接时输入的线能量、钢材的实际有效厚度以及焊接时的预热温度等关键因素；而当这些数值位于难焊接区域范围时，则不论采用何种焊接方式，都会有产生冷裂纹的倾向；相反，若数值位于易焊接区域范围内，则不存在冷裂纹

敏感性。

图6为各国船舶用HSLA钢碳含量及碳当量随强度变化曲线。从图6(a)可以看出，相同屈服强度下，HSLA系列作为目前最先进的船舶钢，其碳含量低于其他钢种，且随着强度的提高，碳含量也呈上升趋势。图6(b)表明，相同屈服强度下，传统HY系列钢碳当量均高于HSLA系列钢、NS系列钢和我国船舶用HSLA钢，超过0.6，位于图5的难焊接区域，焊接时需进行预热处理，而HSLA系列钢的碳当量位于0.3~0.6之间且碳含量较低，在焊接时不存在冷裂倾向，因此不需预热或仅需要低温预热；至于890 MPa级的HY-130钢的碳当量降低是其C含量下降导致的。NS系列钢的碳当量随强度的提高由0.46增加至0.88，导致材料焊接难度逐渐增加，这是由于合金元素含量大幅度提高导致的，NS80钢碳当量下降的原因是含碳量的降低，这也表明碳含量是影响碳当量的主要因素。我国船舶用HSLA钢的碳当量随强度的提高呈上升趋势，然而均低于0.6，与美国HSLA系列钢相当，但由于碳含量较高，导致大部分钢种位于难焊接区域，在焊接时需要进行预热处理，表明我国船舶用HSLA钢的焊接性能相较于HSLA系列钢还存在差距。923A钢碳当量下降是Ni、Cr和Mo元素含量共同降低的结果。



(a) 碳含量随强度变化曲线



(b) 碳当量随强度变化曲线

图6 各国船舶用HSLA钢碳含量及碳当量随强度变化曲线

Fig. 6 Carbon contents and carbon equivalents versus strength curves of HSLA steels used in ships of various countries

综上所述，美国HSLA系列钢作为当前世界先进船舶用钢，其焊接性能较各国船舶用钢相比存在一定优势。通过分析可知，影响焊接性能的因素为碳含量和碳当量，目前来看世界各国为保证大厚度船舶用钢板的淬透性，主要通过添加合金元素来实现；而为满足船舶用钢对焊接性能的要求，只有通过降低碳含量的

方式，因此降低碳含量仍然是未来船舶用钢的发展趋势。

4 船舶用材料发展方向

4.1 向高性能方向发展

为适应大型水面船舶和深海探测设备日益增长的

性能需求,高性能将成为船舶用HSLA钢的核心发展导向。这要求钢材在强度、塑性、韧性、焊接性、抗脆性破坏、耐海水腐蚀性以及抗疲劳特性等多个方面实现提升。俄罗斯、美国、日本和法国等国家为追求深海探测设备深潜极限的突破,均研发了高性能的船舶用钢,如A B 7 A钢、HY系列和HSLA系列钢、NS110钢、HLES100钢并已成功应用于深海探测设备的耐压壳体制造,使下潜深度超过500 m。我国同样在突破深海探测设备的深潜极限方面取得了显著成就,成功研发了屈服强度达到785 MPa级的HSLA钢。

4.2 研发新型船舶用钢

采用超低碳及超纯净钢冶炼技术、微合金化、复合微合金化和TMCP等前沿的冶金与制造技术,积极研发新型船舶用钢。相较于传统HY系列钢依赖固溶强化合金元素含量提升强度的传统路径,HSLA钢创新性地采用超低碳设计,通过大幅提高Cu、Ni等微量元素配比,在热处理过程中实现含Cu相的弥散析出强化,有效补偿了降碳导致的强度损失,又显著降低了焊接热影响区的裂纹敏感性,最终在保持高强度的同时赋予钢材优异的焊接工艺适应性。我国正在研制的590 MPa和690 MPa级低碳铜时效系列钢,其强度性能正逐步逼近发达国家的先进水平。

4.3 向更长、更厚、更宽方向发展

大型化是现代船舶的发展趋势,而更长、更厚、更宽则是船舶用钢的必然的发展方向。船舶的排水量从20世纪初的几百吨,到一战时期排水量已增加至1 000 t,在二战期间排水量已接近3 000 t,进入21世纪船舶的排水量已超过万吨。可见大型化是船舶的发展趋势,大型化后有助于提升船舶适航性和自持力,有利于搭载数量更多、种类更全的装备,而更长、更厚、更宽的船舶用钢能有效减少船体结构的焊缝数量,降低水火弯板和火攻矫正的时间,保证船舶的建造质量和速度。

4.4 研发其他类型先进材料

为满足现代船舶的某些特殊性能要求,世界各国

纷纷研发其他类型先进材料,包括低磁钢、钛合金、铝合金、复合材料和新型功能材料等。德国和俄罗斯等通过应用低磁钢以及高强低磁钢建造潜艇,最大限度地降低了磁辐射能量,保证了深海探测载具的隐身能力,但从目前使用和发展前景来看,俄罗斯更倾向于选用具有强耐蚀性、低密度、高比强度、高抗冲击性、无磁性且成形、加工、焊接性能好的钛合金;我国也于1971年使用低磁钢建成了第一艘隐身船舶。同时由于铝合金密度低、无磁、可焊和易成型等优秀性能,美、日、英等发达国家对其的研究与发展都非常重视,其已成为高性能船舶的主要结构材料之一;我国也应用铝合金制造了水翼快艇、全垫升气垫船、侧壁式气垫船和“龙门”号海港工作艇等船舶。具有力学性能优良、耐腐蚀性好、重量轻、优良的声、磁、电性能等特点的复合材料已逐渐应用在各国的巡逻艇、气垫船以及上层建筑中。为满足防腐、隐身、减振降噪、隔热及其他特种功能,世界各国均开发了相应的新型功能材料。

5 结语

随着全球船舶对机动性、生存能力、潜深和负载能力等性能的要求日益增强,以及现代冶金和制造技术的不断进步,对船舶用材料的性能要求也在持续提升。开发具备优异综合力学性能、轻量化、无磁性、耐腐蚀和降噪特性等特点的材料,已成为满足现代船舶需求的紧迫任务。我国也应顺应全球船舶结构的发展趋势,充分利用现代材料科学和冶金工业的最新成果,对现有船舶结构材料进行创新与升级。然而,我国在船舶用材料研究方面起步较晚,基础较为薄弱;因此,应加大基础性研究投入,寻求关键技术突破,在我国现有装备和技术下,积极开发超低碳、易焊接的新一代船舶用HSLA系列钢,建立我国特有船舶用钢体系,以缩小与发达国家之间的差距,推动我国造船事业的稳步发展。

参考文献:

- [1] 刘振宇,陈俊,唐帅,等.新一代船舶用钢制备技术的现状与发展展望[J].中国材料进展,2014(9):595-602.
- [2] 李川,罗茜,张薇.典型船舶用金属材料腐蚀与防护研究进展[J].装备环境工程,2023,20(8):80-89.
- [3] 孟晓宇,吴始栋,王祖华.艇体结构用钢材技术发展展望[J].船舶科学技术,2014,36(12):1-5.
- [4] VERVYNCKT S, VERBEKEN K, LOPEZ B, et al. Modern HSLA steels and role of non-recrystallisation temperature [J]. International Materials Reviews, 2012, 57(4):187-207.
- [5] RODRIGUES P C M, PERELOMA E V, SANTOS D B. Mechanical properties of an HSLA bainitic steel subjected to controlled rolling

- with accelerated cooling [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2000, 283 (1): 136–143.
- [6] SUN W, WANG G, ZHANG J, et al. Microstructure characterization of high-heat-input welding joint of HSLA steel plate for oil storage construction [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2009, 25 (6): 857–860.
- [7] RAVI S, BALASUBRAMANIAN V, NEMAT S. Effect of notch location on fatigue life prediction of strength mismatched HSLA steel weldments [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2004, 20 (2): 129–135.
- [8] BEIDOKHTI B, KOUKABI A H, DOLATI A. Effect of titanium addition on the microstructure and inclusion formation in submerged arc welded HSLA pipeline steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209 (8): 4027–4035.
- [9] KIM K H, MOON I J, KIM K W, et al. Influence of carbon equivalent value on the weld bead bending properties of high-strength low-alloy steel plates [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2017, 33 (4): 321–329.
- [10] 唐学生. 海洋工程用钢需求现状及前景分析 [J]. *船舶物资与市场*, 2010 (1): 10–12.
- [11] 王任甫, 赵彩琴, 蒋颖, 等. 美国船舶用钢板规范的演变与分析 [J]. *材料开发与应用*, 2012, 27 (4): 80–85.
- [12] VAN BOHEMEN S M C, SIETSMA J. Martensite formation in partially and fully austenitic plain carbon steels [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A, Physical Metallurgy and Materials Science*, 2009, 40 (5): 1059–1068.
- [13] 张中武. 高强度低合金钢 (HSLA) 的研究进展 [J]. *中国材料进展*, 2016, 35 (2): 141–151.
- [14] WANG K. A study of HSLA steels microalloyed with vanadium and titanium during simulated controlled rolling cycles [D]. Christchurch: University of Canterbury, 2003.
- [15] SHAO Y, LIU C, YAN Z, et al. Formation mechanism and control methods of acicular ferrite in HSLA steels: a review [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34 (5): 737–744.
- [16] 于兆斌, 张庄. 921A钢的韧脆转变温度研究 [J]. *理化检验 (物理分册)*, 2006, 42 (7): 332–334.
- [17] 高国龙, 林光裕, 于海玲. 浅谈船体钢结构材料的发展现状和展望 [J]. *中国水运 (下半月)*, 2022 (11): 44–45, 48.
- [18] 郝文魁, 刘智勇, 王显宗, 等. 舰艇用高强度钢强度及其耐蚀性现状及发展趋势 [J]. *装备环境工程*, 2014 (1): 54–62.
- [19] 方志刚, 刘斌, 李国明, 等. 船舶装备材料体系发展与需求分析 [J]. *中国材料进展*, 2014 (7): 385–393.
- [20] HSIEH R, WANG S, LIOU H. A study on the formation of liquation cracks in the weld heat-affected zone of HY-80 quenched and tempered steel [J]. *Journal of Materials Science*, 1994, 29 (9): 2328–2334.
- [21] GORNI A A, MEI P R. Austenite transformation and age hardening of HSLA-80 and ULCB steels [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 155–156: 1513–1518.
- [22] RAJENDRAN A M, LAST H R, GARRETT R K. Plastic flow and failure in HY100, HY130 and AF1410 alloy steels under high strain rate and impact loading conditions [M]. Army Research Laboratory, 1995.
- [23] JORGE J C F, SOUZA L F G, REBELLO J M A. The effect of chromium on the microstructure/toughness relationship of C–Mn weld metal deposits [J]. *Materials Characterization*, 2001, 47 (3): 195–205.
- [24] 王文杰. 高性能先进船舶用合金材料的应用现状及展望 [J]. *材料导报*, 2013, 27 (7): 98–105.
- [25] FUNNI S D, KOUL M G, MORAN A L. Evaluation of properties and microstructure as a function of tempering time at intercritical temperatures in HY-80 steel castings [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2007, 14 (5): 753–764.
- [26] HOLTHAUS J E, KOUL M G, MORAN A L. Property and microstructure evaluation as a function of processing parameters: large HY-80 steel casting for a US navy submarine [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2006, 13 (8): 1397–1409.
- [27] 尹士科, 何长红, 李亚琳. 美国和日本的潜艇用钢及其焊接材料 [J]. *材料开发与应用*, 2008, 23 (1): 58–65.
- [28] 邵军. 船舶用钢研究现状与发展 [J]. *鞍钢技术*, 2013 (4): 1–4.
- [29] 康美泽, 马英华. 美国航母结构用钢情况分析 [J]. *船舶标准化与质量*, 2016 (1): 46–48, 54.
- [30] 吴始栋. 船舶先进结构材料的发展 [J]. *材料开发与应用*, 1999, 14 (2): 36–41.
- [31] FAR A R H, ANIJAN S H M, ABBASI S M. The effect of increasing Cu and Ni on a significant enhancement of mechanical properties of high strength low alloy, low carbon steels of HSLA-100 type [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2019, 746: 384–393.
- [32] DUTTA S, BARAT K, DAS A, et al. Characterization of micrographs and fractographs of Cu-strengthened HSLA steel using image texture analysis [J]. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 2014, 47: 130–144.
- [33] DAS S, GHOSH A, CHATTERJEE S, et al. Microstructural characterization of controlled forged HSLA-80 steel by transmission electron microscopy [J]. *Materials Characterization*, 2003, 50 (4): 305–315.
- [34] CHRISTEIN J P, WARREN J L. Implementation of HSLA-100 Steel in aircraft carrier construction—CVN 74 [J]. *Journal of Ship Production*, 1995, 11 (2): 97–101.
- [35] THOMPSON S W. A Transmission electron microscopy investigation of re-austenitized-and-cooled HSLA-100 steel [J]. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2012, 1 (3–4): 131–141.
- [36] 吴始栋. 美国海军舰艇用钢板消耗量 [J]. *金属世界*, 2010 (3): 21.

- [37] KONKOL P J, MRUCZEK M F. Comparison of friction stir weldments and submerged arc weldments in HSLA-65 steel [J]. *Welding Journal*, 2007, 86 (7): 187s-195s.
- [38] JAIN D, ISHEIM D, HUNTER A H, et al. Multicomponent high-strength low-alloy steel precipitation-strengthened by sub-nanometric Cu Precipitates and M_2C carbides [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A, Physical Metallurgy and Materials Science*, 2016, 47 (8): 3860-3872.
- [39] 雷玄威, 周栓宝, 黄继华. 超高强度船体结构钢焊接性的研究现状和趋势 [J]. *材料研究学报*, 2020, 34 (1): 1-15.
- [40] 夏文真. 高强度超低碳贝氏体钢研究与开发 [D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- [41] 何有洪. 船用超低碳贝氏体钢控轧控冷工艺与组织性能研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2023.
- [42] 孔冠宏. Q460C钢的成分设计及控轧控冷工艺优化 [D]. 济南: 山东大学, 2011.
- [43] 王祖滨, 东涛. 低合金高强度钢 [M]. 北京: 原子能出版社, 1996.
- [44] 张中武, 魏兴豪, 赵刚. 低合金高强钢的强韧化机理与焊接性能 [J]. *鞍钢技术*, 2018 (4): 1-8.
- [45] 蔡梦茹. 590 MPa级含铜高强船体钢热处理工艺、组织和性能的研究 [D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2019.
- [46] 程新安. 国外船舶用钢的回顾与展望 [J]. *材料开发与应用*, 1997 (2): 45-47.
- [47] 王晓强, 朱锡. 船舶用钢抗弹道冲击性能研究综述 [C]// 2009年船舶结构力学学术会议暨中国船舶学术界进入ISSC30周年纪念会论文集. 2009.
- [48] 胡伯航, 魏书修. 舰艇用钢的研制与发展 [J]. *船舶科学技术*, 2001 (2): 16-18.
- [49] 张炯, 刘家驹. 水面舰艇主船体选材、用材及其相关问题 [J]. *船舶科学技术*, 2001 (2): 2-8.
- [50] 黄晓艳, 刘波. 船舶用结构材料的现状与发展 [J]. *船舶*, 2004 (3): 21-24.
- [51] 刘凯. 含铜超低碳贝氏体钢屈强比研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2011.
- [52] 刘庆冬. HSLA铁素体钢中Cu析出强化和奥氏体韧化的原子探针层析技术研究 [D]. 上海: 上海大学, 2012.
- [53] MUJAHID M, LIS A K, GARCIA C I, et al. HSLA-100 steels: influence of aging heat treatment on microstructure and properties [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1998, 7 (2): 247-257.
- [54] 柴锋. 低合金高强度船体钢焊接热影响区韧化机理研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [55] GARCIA C I. High strength low alloyed (HSLA) steels [M]. Woodhead Publishing, 2017: 145-167.
- [56] LEI X, WU K, WANG H, et al. Microstructure evolution and alloying features of a developed high strength and high toughness weld metal used for pipeline steels [J]. *Journal of Coastal Research*, 2015, 73: 265-269.
- [57] JUN H J, KANG J S, SEO D H, et al. Effects of deformation and boron on microstructure and continuous cooling transformation in low carbon HSLA steels [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2006, 422 (1): 157-162.
- [58] LIU Y, SHAO Y, LIU C, et al. Microstructure evolution of HSLA pipeline steels after hot uniaxial compression [J]. *Materials*, 2016, 9 (9): 721-733.
- [59] BAKKALOGLU A. Effect of processing parameters on the microstructure and properties of an Nb microalloyed steel [J]. *Materials Letters*, 2002, 56 (3): 200-209.
- [60] CHARLEUX M, POOLE W J, MILITZER M, et al. Precipitation behavior and its effect on strengthening of an HSLA-Nb/Ti steel [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2001, 32: 1635-1647.
- [61] PARK D, HUH M, SHIM J, et al. Strengthening mechanism of hot rolled Ti and Nb microalloyed HSLA steels containing Mo and W with various coiling temperature [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2013, 560: 528-534.
- [62] 雷玄威, 黄继华, 陈树海, 等. 超高强度船体结构钢的开发现状与趋势 [J]. *材料科学与工艺*, 2015 (4): 7-16.
- [63] FERNÁNDEZ J, ILLESCAS S, GUILMANY J M. Effect of microalloying elements on the austenitic grain growth in a low carbon HSLA steel [J]. *Materials Letters*, 2007, 61 (11): 2389-2392.
- [64] YAN W, SHAN Y Y, YANG K. Effect of TiN inclusions on the impact toughness of low-carbon microalloyed steels [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A, Physical Metallurgy and Materials Science*, 2006, 37 (7): 2147-2158.
- [65] MISRA R D K, NATHANI H, HARTMANN J E, et al. Microstructural evolution in a new 770 MPa hot rolled Nb-Ti microalloyed steel [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2005, 394 (1): 339-352.
- [66] YANG C, ZHANG Y. New generation of HSLA steels for naval structures [J]. *Iron and Steel*, 2001, 36 (11): 50-54.
- [67] 卞小龙, 王永霞, 杨金业, 等. 铜在钢中的作用概述 [J]. *科技创新与应用*, 2019 (26): 41-42.
- [68] 李娜. 铜在钢中的作用综述 [J]. *辽宁科技大学学报*, 2011, 34 (2): 157-162.
- [69] SAN X Y, ZHANG B, WU B, et al. Investigating the effect of Cu-rich phase on the corrosion behavior of Super 304H austenitic stainless steel by TEM [J]. *Corrosion Science*, 2018, 130: 143-152.
- [70] 陈大伟, 王青峰, 苏航. 铜和铌对多层焊缝金属显微组织和硬度的影响 [J]. *机械工程材料*, 2007 (1): 82-85.
- [71] 王晓东. TRIP钢微结构-性能的表征与设计 [D]. 上海: 上海交通大学, 2006.

- [72] NISHIMURA T, KATAYAMA H, NODA K, et al. Effect of Co and Ni on the corrosion behavior of low alloy steels in wet/dry environments [J]. *Corrosion Science*, 2000, 42 (9): 1611–1621.
- [73] 王雷, 董俊华, 韩达, 等. 含铜钢在1 150 °C高温保温条件下的铜偏聚现象 [J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2020, 40 (6): 545–552.
- [74] 杜瑜宾, 胡小锋, 张守清, 等. 含1.4%Cu的HSLA钢的组织 and 力学性能 [J]. *金属学报*, 2020, 56 (10): 1343–1354.
- [75] FU W, LI C, DI X, et al. Improvement of Cu-rich precipitation strengthening for high-strength low carbon steel strengthened via Ti-microalloying [J]. *Materials Letters*, 2022, 316: 132031.
- [76] LI C, DUAN R, FU W, et al. Improvement of mechanical properties for low carbon ultra-high strength steel strengthened by Cu-rich multistructured precipitation via modification to bainite [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2021, 817: 141337.
- [77] KUMAR S, NATH S K. Effect of heat input on impact toughness in transition temperature region of weld CGHAZ of a HY 85 steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 236: 216–224.
- [78] MOCHEL N L. Ten years of welding development [J]. *Naval Engineers Journal*, 2010, 48 (4): 455–475.
- [79] SEO W C, BANG K S, CHI B H. Effects of carbon content on the weldability of B-containing 620 °C grade high Cr ferritic cast steel for turbine casing [J]. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 2008, 22 (6): 41–45.
- [80] 中国船级社. 材料与焊接规范 [M]. 北京: 中国船级社, 2012: 1–29.
- [81] 徐平光, 白秉哲, 方鸿生. 高强度低合金中厚钢板的现状与发展 [J]. *机械工程材料*, 2001, 25 (2): 4–8.

Review of the Development of High Strength Low Alloy Steel for Ships

LI Chang-fu^{1,2}, GAO Yun-bao^{1,2}, LI Bao-zhi^{1,2}, ZHAO Ling^{1,2}, WANG Yu^{1,2}, ZHANG Hai-jun², DU Qiu², CHEN Bo-long³, WANG Zeng-rui^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Advanced Casting Technologies, Shenyang 110021, Liaoning, China; 2. Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., CAM, Shenyang 110021, Liaoning, China; 3. Shenyang Vacuum Technology Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110042, Liaoning, China)

Abstract:

With the continuous improvement in the performance of ships, the requirements for shipbuilding materials have been increasingly evolved. High-Strength Low-Alloy (HSLA) steel has received widespread attention due to its excellent properties, including high strength, high toughness, good weldability, and so on. This article summarizes the development process, research status, applications, alloy systems, manufacturing processes, and future development directions of HSLA steel in shipbuilding, as well as advancements in advanced ship materials, etc.. The purpose is to provide insights for the research of advanced shipbuilding materials and to facilitate the improvement of HSLA steel for marine applications in China.

Key words:

HSLA steel; development directions; advanced ship materials