

· 试验研究 ·

低屈强比高强度海工钢研究进展

陈星宇¹ 徐振¹ 王宁¹ 张于顺¹ 王弘江¹ 丁太兴² 高宇²

(1 辽宁科技大学材料与冶金学院,鞍山 114051;2 鞍山紫竹科技型钢有限公司,鞍山 114015)

摘要 综述了国内外低屈强比高强度海工钢研究与应用情况。从化学成分、金相组织结构、晶粒尺寸与取向、缺陷与强化四个方面阐述了影响钢材屈强比的常见因素,系统地总结了多种降低钢材屈强比的一般性工艺手段。介绍了国内外海工钢发展现状,目前国内690 MPa级别的海工钢屈强比在0.90~0.95,未来将致力于屈强比低于0.85的海工钢的研发,其中,热处理是降低海工钢屈强比的重要手段。

关键词 低屈强比 高强度 海工钢 研究进展

Research Progress of High Strength Marine Engineering Steel Having Low Yield Ratio

Chen Xingyu¹, Xu Zhen¹, Wang Ning¹, Zhang Yushun¹, Wang Hongjiang¹, Ding Taixing² and Gao Yu²

(1 School of Material and Metallurgy, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051

2 Anshan Zizhu Science and Technology Profile Steel Co Ltd, Anshan 114015)

Abstract The research progress and application of high strength marine engineering steel having low yield ratio at home and abroad are summarized. The factors of chemical composition, metallographic structure, grain size and orientation and defect of strengthening to affect yield ratio of steel, and the multiple general process measures reducing the yield ratio are viewed. The development status in marine engineering steel at home and abroad is introduced, the yield ratio of 690 MPa marine engineering steel in China is between 0.90 and 0.95 and the marine engineering steel with a yield ratio lower than 0.85 will be researched in the future. One of which it the heat treatment process is a key measure to decrease the yield ratio of marine engineering steel.

Material Index Low Yield Ratio, High Strength, Marine Engineering Steel, Development Prospect

海洋占地球表面总面积的71%,且蕴含着极为丰富的资源。21世纪以来,世界各国用于海洋油气的年平均投资呈现出快速增长的趋势^[1]。但海洋上的恶劣环境也决定着人类对海洋的开发绝非易事,因此,研制一系列在强度、低温韧性、焊接性能、抗层状撕裂性、耐腐蚀性等方面有着较高要求的海工钢板显得十分重要和紧迫。

1 海工钢屈强比简述

作为衡量海工钢性能的重要标准之一,屈强比为材料屈服强度与抗拉强度的比值,如下列公式所示,其大小可以反映钢板的应变强化能力。

$$YR = \sigma_s / \sigma_b \quad (1)$$

式中:YR- 屈强比, σ_s - 屈服强度, σ_b - 抗拉强度。

余耀国^[2]等人经过研究,得出:

$$E_u = \exp(n) - 1 \approx n \quad (2)$$

$$\ln(1/YR) = \ln(\ln n - 1) + \ln(1 + EL) - n \ln[\ln(1 + EL)] \quad (3)$$

式中:YR- 屈强比,EL- 屈服点伸长数, E_u - 均匀延伸率, n - 应变硬化指数

上述公式表明,低屈强比钢材的均匀延伸率较高。当这类钢材受到外界的猛烈冲击时,会发生较大程度的塑性变形,从而吸收和储存能量,使其不至于因局部超载变形而发生忽然断裂,极大地提高了钢材使用的安全性。

我国将海工钢按强度划分有一般强度、高强度、超高强度三类,屈服强度以此可划分为235~305 MPa,315~400 MPa,410~685 MPa,并规定高强度钢的屈强比低于0.85为低屈强比^[3]。一般来说,材料的屈强比会随着强度的升高而不断上升^[4]。因此,在增大钢材强度的同时,屈强比的居高不下成为制约海工钢发展的重要瓶颈。

2 降低钢结构屈强比的几种方法

2.1 影响钢结构屈强比的主要因素

2.1.1 化学成分

化学成分对材料屈强比的大小起着至关重要的作用,如添加 0.065% Nb 和 0.20% Cr 有利于获得屈服强度均值 537 MPa、抗拉强度均值 663 MPa 的钢种^[5]。

谭佳梅等发现 C 含量的提高对钢抗拉强度的影响比屈服强度要大,较高 C 含量的高强钢有着更低的屈强比,对于高强度的低碳钢,可以降低 Si 含量,适当提高 Mn、Al 或 V 等来降低屈强比^[6]。王卫卫等采用低 C-Si-Mn-Nb 成分系统,其化学成分(%)为: C ≤ 0.17、Si ≤ 0.60、Mn ≤ 2.0、P ≤ 0.015、S ≤ 0.015、0.02 ~ 0.05 Al、Nb ≤ 0.05,获得了屈强比小于 0.5 的低屈强比高伸长率的冷轧 DP780 钢材,进一步证实了钢的化学成分对屈强比的影响^[7]。

2.1.2 金相组织结构

屈强比是由钢内的金相组织结构决定的,单一金相组织可有效提高钢的屈服强度与抗拉强度。一般认为钢级较低的钢种具有较低的屈强比,如铁素体和珠光体钢,而单一贝氏体或马氏体等高强钢屈强比则较高^[8]。若钢材是双相或多相结构,特别是软硬相之间的强度相差较大时,钢材的屈强比会明显降低^[9],这是因为钢材中有硬相来保证抗拉强度,当钢材发生塑性变形时软相先发生屈服,钢材形变,到达抗拉强度后断裂,钢的屈服强度较低而抗拉强度较高,使得总体屈强比下降,如铁素体-马氏体/贝氏体钢^[10]。

Shikanai N 等通过对双相钢的研究,发现在软相铁素体的基体中,如果分布有硬相贝氏体或马氏体,则有利于降低钢的屈强比,其中当软硬相的体积分数分别为 50% 时效果最佳。另外,软硬两相之间的强度差异也对屈强比有较大影响,实验表明,两相强度差越大,获得低屈强比就越容易^[11]。所以,以贝氏体或针状铁素体为基体,多边铁素体为第二相的混合组织有利于获得高强韧性和低屈服比的钢材^[12]。雍歧龙则通过大量试验数据表明,双相基体组织的抗拉强度 TS 基本遵循混合物定律^[13],即:

$$TS = fM1 \cdot TSM1 + fM2 \cdot TSM2 = fM1 \cdot TSM1 + (1 - fM1) \cdot TSM2 \quad (4)$$

式中: $TSM1$ 、 $TSM2$ - 软硬相 M1、M2 基体相的抗拉强度, $fM1$ 、 $fM2$ - 软硬相 M1、M2 基体相的体积分数,而钢的屈服强度取决于基体相中软相的屈服强度。因

此,钢的屈服强度和抗拉强度是由两相或多相结构中软、硬两相的比例决定的,这直接影响屈强比的大小。

2.1.3 晶粒尺寸与取向

晶粒细化主要用于提高材料强度和韧性,是一种提升材料综合机械性能的常用方法与手段,但是它并不能有效降低屈强比^[14]。王爱华等认为晶粒尺寸变小后,晶界增多,且有效晶粒越细小,大角度晶界数量越多,在金属拉伸过程中,位错受拉应力作用,滑移运动受到了大角度晶界的阻碍作用,滑移的距离缩短,减弱了均匀塑性变形能力,使材料屈强比升高^[15]。侯晓英等则通过研究不同屈强比的冷轧 DP780 钢工艺调控技术,发现通过热轧工艺调控,得到初始组织为 F + P(铁素体 + 珠光体)后,当晶粒尺寸细化至约 7.5 μm 时,屈服强度增加,屈强比由原来的 0.48 增加至 0.56^[16]。

2.1.4 缺陷与强化

固溶强化、位错强化、沉淀强化等是各种显微缺陷引起的主要强化方式^[17]。固溶强化的方式分为间隙固溶强化和置换固溶强化,间隙固溶强化对于屈服强度的提升大于抗拉强度,故屈强比增加,而置换固溶强化相反,会降低钢的屈强比^[18]。位错强化是目前钢铁材料中最有效的强化方式之一。在拉伸变形过程中,位错密度随着变形量的增加而提高,甚至可以提高 4 ~ 5 个数量级,因此可显著提高屈服强度,使屈强比明显升高。沉淀强化则利用弥散细小的第二相粒子阻碍位错运动,从而提高材料强度,它也是微合金钢中常用的强化方式,与位错强化一样,沉淀强化也起到提升屈强比的作用^[19-20]。

2.2 降低钢材屈强比的常用工艺手段

目前热处理是实际生产中降低钢屈强比最常用且最有效的工艺手段,它是一种通过加热、保温和冷却的方式,以改善钢材内部结构与性能的一种金属热加工工艺^[21]。

汪澜等研究了在不同淬火温度和回火温度下,高铁用 25CrMo 车轴钢屈强比的变化趋势,发现升高淬火温度对试验钢屈服强度的增加要大于抗拉强度,钢材的屈强比增大,若升高回火温度,钢的抗拉强度和屈服强度均下降,特别是在 550 ~ 610 °C 时,内部板状型组织消失,钢材的冲击韧性下降,屈强比增加^[22]。

童明伟等发现改变回火温度对屈强比的影响比改变淬火温度更明显。回火前,试验钢显微组织主要有细小板条状,粒状贝氏体,少量铁素体和一些

表1 国产高强度海洋工程用钢
Table 1 Domestic ultra-high strength Marine engineering steel

钢种	厚度/mm	化学成份/%						工艺手段	交货状态	屈服强度/MPa	屈强比
		C	Si	Mn	P	S	Al				
API 2W-50	80	0.07	0.20	1.48	0.004	0.001	0.053	转炉加真空处理	TM	433	0.79
EN10225	63.5	0.07	0.03	1.50	0.010	0.001	0.041	转炉加钢包精炼	TM	426	0.77
EQ70	88	0.08	0.19	0.09	0.004	0.001	0.056	-	QT	733	0.92

M/A 岛,当回火温度上升时,若干条板条贝氏体发生合并慢慢长大,板条宽度增加,M/A 岛发生分解,造成抗拉强度下降,而屈服强度大小保持不变,屈强比升高。M/A 岛位于板条之间或贝氏体/铁素体边界,以块状或链条状的形态存在,由于较低的回火温度下有细小的板条组织和稳定的 M/A 岛存在,可获得高强度高韧性和低屈强比钢^[4]。

白星等认为,回火处理会加快组织中第二相粒子析出,软化分解 M/A 岛,提高了屈服强度,从而使屈强比升高^[23]。康健研究了一种基于亚温淬火的热处理工艺,即将钢加热至一定温度保温一段时间后再进行淬火的工艺过程,获得了混合针条状铁素体与马氏体复相组织,从而达到降低屈强比的目的^[24]。

3 海工钢发展现状

3.1 国内发展现状

我国开发海洋资源起步较晚,开始于 20 世纪 60 年代末期,到 80 年代才建成自己的海洋石油平台,但近年来我国加大了对海洋工程用钢的研究力度,取得了一定的进步^[25]。2010 年以前,我国对 EH36(屈服强度 355 MPa)及以下平台用钢的生产基本实现了国产化,但关键部位所用高强度、大厚度材料的抗层状撕裂性能和大线能量焊接性能与国外相比仍存在较大差距^[26-27]。目前我国海洋平台主要使用的屈服强度为 355~460 MPa 的 D、E 及 F 级钢板,且完成了国产化。部分国产高强度海洋工程用钢见表 1^[28],其中 TM 为 TMCP 热处理轧制,QT 为淬火:

鞍钢是国内最早参与研究海工钢的大型钢企之一,早在 1950 年就已经开始研究,开发出了 A~E、AH32~EH32、AH36~EH36、AH40~EH40 共 4 个系列的大线能量焊接用船体结构钢产品,不仅率先完成了 A、B、DAH32、DH32 船板的开发和五国船级社的认证,还打破了国内建造出口船板用的钢材完全依赖进口的局面^[29]。近年来,鞍钢不断研制出满足国家发展需要的海工钢材,比如 F550 超厚钢板,应用于连接“蓝鲸 1 号”海洋平台上层平台双层底和立柱,保证平台作业的安全性和可靠性^[30]。还有山东号航空母舰上用的甲板钢,厚度小于 50 mm,

屈服强度在 500 MPa 以上,使我国成为世界上少数能够制造航母特种钢的国家之一。

在高强度的船体及海洋工程用钢方面,鞍钢约出售 24 种产品,共有 420 MPa、460 MPa、500 MPa、550 MPa、620 MPa、690 MPa 六种不同的级别,屈强比依次为 0.62~0.92,0.64~0.81,0.65~0.82,0.66~0.82,0.69~0.86,0.73~0.89^[31]。

宝武钢铁集团是目前国内最为先进的钢企,钢铁生产规模长年在 2000 万 t 左右,其中海工钢年产量已超 100 万 t,且品种丰富,如 400 英尺自升式海洋平台^[32],R5 系泊链钢^[33]等。2011 年,宝钢可以生产出屈服强度为 690 MPa,厚度为 178 mm 的海工钢。近年,该集团又研发出最大厚度为 178 mm 的自升式海洋平台桩腿用板,并通过了 ABS、DNV、GL、CCS、ABS 五家船级社产品认证。

宝武集团中宝钢集团生产的海洋结构用钢有五大系列,API 系列、EN10225 系列、EQ 系列、ASTM 系列、海底管线,不同系列的应用环境也不尽相同,比如 EQ 系列主要用于超高强船板,ASTM 系列则是自升式平台用齿条和半圆板用钢,主要产品有屈强比为 0.83 的 API 2W-50(厚度:80 mm)、0.77 的 S355G10+M(厚度:63.5 mm)、0.79 的 EQ56 和 0.73 的 EQ70,海底管线类产品中,有 X65MO(厚度:28.6 mm)、X65MO(厚度:30.2 mm)、X70MO(厚度:31.8 mm)三类产品,屈强比在 0.90 左右^[28]。

除此之外,还有马钢开发的海洋工程用 E36 型钢^[34],舞钢研制的 177.8 mm 厚度钢板,沙钢自主设计的 E690 等系列的海洋工程钢板等^[35],这些产品缩小了我国与世界先进水平的差距。

近年来随着校企合作的不断深入,高校成为越来越多科研成果的孵化器。北京科技大学陶素芬研究 EQ70 钢并获得了最佳综合性能的热处理工艺方法^[36],王学林与陈闽东则深入研究了海工钢的焊接性能和抗腐蚀性能^[37]。孙宪进对 460 MPa 级和 690 MPa 级海洋工程用钢的成分设计、组织演变规律、组织与性能调控等原理进行了研究,成功降低了 460 MPa 级海工钢的屈强比,提高了 690 MPa 级低碳海工钢的低温韧性和焊接性^[1]。

辽宁科技大学李胜利团队以 EH690 的海工钢为研究对象,采用不同工艺路径和组合进行调质后,获得了最佳的热处理工艺制度,制备出的试验钢心部屈服强度为 686 MPa、抗拉强度为 769 MPa,屈强比约为 0.892^[38]。

此外,东北大学康健、唐帅,武汉大学董明伟等人在低屈强比高强钢研究领域进行了大量的工作,但他们研究的领域大多在结构钢,使高强度结构钢的屈强比可降低至 0.74 左右。非传统冶金高校中,山东大学的李桂川和燕山大学的余永光,也在该领域中有相关方面的贡献。

3.2 国外发展现状

国外对海工钢的研究领先于我国,早在 20 世纪 60 年代初期,以美国、日本、德国为首的发达国家就开始了海洋工程用钢的研究与开发,并制定了一系列的标准,如美国的 API 标准、欧盟的 EN10225 标准等。日本因其独特的地理位置,在海洋工程用钢方面的研究甚至更早于欧美国家,研究水平达到世界前列。目前,国际生产海洋平台用钢较著名的企业有德国的迪林根和日本的新日铁、JFE 公司,产品主要级别为 355 MPa、420 MPa、460 MPa^[39]。

新日铁在 20 世纪 60 年代就开始研究耐层状撕裂钢,在 70 年代的厚板产量曾一度超过 600 万 t,在 90 年代开发出强度 700 MPa,屈强比约为 0.82 的自升式海洋平台齿条专用特厚板,目前开发出多种性能高效、价格低廉的优质海洋类用钢,包括 210 mm 厚自升式海洋平台齿条专用特厚板以及各类屈服强度、抗拉强度分别为 500 MPa 和 650 MPa、冲击功(-40℃)数值大于 200 J 的平台类用钢^[40-41]。

JFE 公司前期主要生产汽车外板^[42],随着海洋开发的需要,125~150 mm 的海洋厚板钢的需求量不断增大,JFE 公司也投身于海工钢的研究,钢铁产量曾一度达到 2700 万 t。目前产品主要有 40 mm 厚度、抗拉强度、屈服强度分别为 800 MPa、700 MPa 的含镍平台用钢,高耐蚀性的特厚复合板等^[43]。

德国迪林根公司是欧洲最大、世界知名厚板生产企业,以海洋平台类用钢而闻名,年产能和销量约为 200 万 t,产品中最大宽度、最大厚度、最大单重分别达到 5200 mm、250 mm、60 t。迪林根公司的海洋平台用钢板大致有细晶粒正火钢板、细晶粒 M/TCM

钢板和淬火及回火钢板等。在迪林根公司出售的特殊产品中,纵向异形板不仅规格种类齐全,还可以承受变动载荷,屈服强度最低可达 460 MPa,屈强比较低^[44]。

国外高水平的冶金高校在海工钢研究领域也进行了大量的工作。密歇根大学 Sherif EL-Tawil 研究了局部几何细节屈服-极限应力对比前北岭连接非弹性行为的影响,根据有限元的分析结果分析出高屈服-极限应力比钢种的不利影响^[45]。科罗拉多大学波尔得分校 Cho J Y 研究了 600 MPa 级别的钢降低屈强比的元素百分比,把屈强比降低到 0.8 以下^[46]。哥但斯克工业大学 Cwiek J 介绍了 690 MPa 高强度低合金钢的调质实验结果,证明了实验钢满足挪威船级社(DNV)的要求^[47]。日本的东北大学、韩国的浦项理工大学、美国的田纳西大学、澳大利亚的莫纳什大学、英国的曼彻斯特大学等高校也在该领域开展了大量的研究工作。

4 结语与展望

(1)国内对高强度建筑结构钢屈强比的研究早已达到 0.85 以下,且实现了大规模生产。考虑到海工钢使用环境的特殊性,目前使用的海洋工程设备用钢的屈服强度仍在 400 MPa 以下,对于 690 MPa 级别的海工钢则仍处于研制阶段,屈强比在 0.90~0.95,且性能不稳定,关键部件依赖进口。但从工程安全和材料发展的角度来看,未来 690 MPa 级别海工钢屈强比需要降至 0.85 以下,低屈强比海工钢的研制仍十分必要。

(2)国内不管是宝武、鞍钢这样的大型钢铁集团,还是一些中小型钢铁企业,热处理技术都已相当成熟与普遍,特别是淬火后再高温回火的调质工艺,有着成本低廉、性能改变显著的巨大优势。虽然目前也出现了飞秒激光等一系列新技术,但由于成本等原因,还没有实现大规模应用。所以,热处理依然是我国目前和未来用于降低海工钢屈强比最为重要的工艺手段。

国家自然科学基金(U1860112),辽宁省自然科学基金指导计划(2019-2D-0025)资助,辽宁科技大学 2020 年大学生创新企业训练计划项目 202010146143

参考文献

[1]孙宪进.高性能海洋工程用钢的研究与开发[D].北京:北京科技大学,2018.

[2]余耀国,任勇,徐光华.建筑用钢 SN400B 的开发[J].武钢技术,2007(2):21-24.

- [3] 余永光. 船舶及海洋平台用钢的开发与应用[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2016.
- [4] 童明伟. 550/690MPa 级高强韧低屈强比结构钢开发及抗断能力研究[D]. 武汉:武汉科技大学, 2016.
- [5] 李忠义, 胡学文, 李万松, 等. 低屈强比 X70M 钢的工艺和组织性能[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(4): 135-140.
- [6] 谭佳梅, 张永银, 张帆, 等. 降低武钢 CSP 低碳酸洗钢 SAPH370 屈强比的实践[J]. 武钢技术, 2014, 52(3): 25-29.
- [7] 王卫卫, 李光瀛, 张江玲, 等. 超低屈强比冷轧 DP780 钢的组织及性能研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(9): 23-26.
- [8] Li Z, Wu D. Study of the High Strength and Low Yield Ratio Cold Forging Steel[J]. Materials Science and Engineering A, Structural Materials, Properties, Microstructure and Processing, 2007, A452/53 (Apr): 142-148.
- [9] 余宏伟, 王世森, 易勋, 等. 高强度建筑钢屈强比的研究[J]. 云南冶金, 2012, 41(4): 48-52.
- [10] Kim C. Modeling Tensile Deformation of Dual-phase Steel[J]. Metallurgical and Materials Transaction A, 1988, 19(5): 1263-1268.
- [11] Nobuo Shikanai, Hiroyuki Kagawa, Masayoshi Kurihara. Influence of Microstructure on Yielding Behavior of Heavy Gauge High Strength Steel Plates[J]. ISIJ International, 1992, 32(3).
- [12] Kim Y M, Kim S K, Lim Y J, et al. Effect of Microstructure on the Yield Ratio and Low Temperature Toughness of Line Pipe Steels[J]. ISIJ International, 2002, 42(12): 1571-1577.
- [13] 雍歧龙. 钢铁材料中的第二相[M]. 北京:冶金工业出版社, 2006: 33.
- [14] 于庆波, 赵贤平, 孙斌, 等. 高层建筑用钢板的屈强比[J]. 钢铁, 2007, 42(11): 74-78.
- [15] 王爱华. 晶粒尺寸对高强钢熔敷金属屈强比的影响[J]. 电焊机, 2015, 45(7): 97-100.
- [16] 侯晓英, 刘晓美, 郝亮. 不同屈强比的冷轧 DP780 钢工艺调控技术分析[J]. 中国冶金, 2019, 29(2): 29-33.
- [17] 张兴. 低屈强比高强度结构钢的发展概况[J]. 宽厚板, 2018, 24(4): 35-38.
- [18] 王文慧. 镍和铬对硅固溶强化球墨铸铁组织和性能的影响[D]. 郑州:郑州大学, 2019.
- [19] 陈焕友. 高碳钢丝冷拔过程中的组织演变与强化机制研究[D]. 广州:华南理工大学, 2019.
- [20] 魏占山. 微合金钢沉淀强化机理的分析[D]. 沈阳:沈阳航空航天大学, 2019.
- [21] 李桂川. 退火工艺对 Q195 冷轧钢板组织及屈强比的影响[D]. 济南:山东大学, 2017.
- [22] 汪澜, 王福明, 郑亚旭, 等. 淬回火温度对高铁用 25CrMo 车轴钢屈强比的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(9): 89.
- [23] 白星, 钱亚军, 刘吉文, 等. 低屈强比桥梁用钢 Q420qE 的研究与开发[J]. 金属热处理, 2019, 44(8): 106-109.
- [24] 康健. 780 MPa 级低屈强比建筑结构用钢组织调控与工艺开发[D]. 沈阳:东北大学, 2012.
- [25] 王学林. 高性能海洋工程用钢焊接物理冶金行为研究[D]. 北京:北京科技大学, 2018.
- [26] 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.
- [27] 杨忠民. 我国海洋工程用钢发展现状[J]. 新材料产业, 2013(11): 17-19.
- [28] 宝钢海洋结构用钢产品手册[M/OL]. (2013-9) 2020-04-10 <http://ecommerce.ibaosteel.com/portal/download/manual/OS-SP.pdf>
- [29] 朱立光, 孙立根. 氧化物冶金技术及其在船体钢开发中的应用及展望[J]. 炼钢, 2017, 33(5): 1-11.
- [30] 付魁军, 及玉梅, 王佳骥, 等. 大线能量焊接用船体结构钢的研究进展[J]. 鞍钢技术, 2011(6): 7-12.
- [31] 鞍山钢铁集团有限公司. 中厚板产品[R/OL]. (2018-06-20) [2020-04-10]. <http://www.ansteelgroup.com/a/honor.php?pcid=19&cid=20&id=13&cid1=20>.
- [32] 杜伟, 李鹤林. 海洋石油平台用钢的现状与发展趋势(三)[J]. 石油管材与仪器, 2016, 2(5): 1-9.
- [33] 祁振华. 宝钢 R5 系泊链钢产品开发项目的质量管理研究[D]. 沈阳:东北大学, 2015.
- [34] 丁根. 马钢如何发展海洋工程用钢[J]. 安徽冶金, 2012(4): 24-27 + 41.
- [35] 黄维, 高真凤, 丁伟, 等. 我国船板钢现状及技术发展趋势[J]. 上海金属, 2014, 36(4): 43-46.
- [36] 陶素芬. 700 MPa 级海洋平台用钢成分、组织与性能的研究[D]. 北京:北京科技大学, 2015.
- [37] 陈闽东. 海洋工程用 E690 钢浪花飞溅区腐蚀行为及演变[D]. 北京:北京科技大学, 2018.
- [38] 周曼锋. 690 MPa 海洋工程用钢生产工艺的实验研究[D]. 鞍山:辽宁科技大学, 2016.
- [39] 黄维, 高真凤, 何立波. 海洋平台用钢板品种发展及研发概况[J]. 上海金属, 2013, 35(4): 53-58.
- [40] 唐获, 武会宾. 我国高附加值中厚板产品现状与发展趋势[J]. 轧钢, 2012, 29(2): 1-4.
- [41] 李鑫鑫. E40 高强度海洋平台用钢的研制与开发[D]. 沈阳:东北大学, 2008.
- [42] 松冈才二, 长谷川浩平, 田中靖, 等. 具有良好成形性及焊接性的新型超高拉伸强度冷轧钢板[J]. 本钢技术, 2009(1): 40-43.
- [43] 张翔, 徐秀清, 马飞. 国内外海洋工程用高强钢研究进展[J]. 石油仪器, 2015, 1(1): 9-11.
- [44] 柯华飞. 迪林根钢铁集团的厚板发展之路[J]. 冶金管理, 2014(5): 37-40.
- [45] Sherif El-Tawil, Tameka Mikesell, Sashi K Kunmath. Effect of Local Details and Yield Ratio on Behavior of FR Steel Connections. 2000, 126(1): 79-87.
- [46] Cho Jae Young, Um Kyung Keun, Choi Jong Kyo. High Strength and Low Yield Ratio Steel for Structure having Excellent Low Temperature Toughness[J]. 2014. <http://www.freepatentsonline.com/8702880.html>.
- [47] Cwiek J, Labanowski J. The Research On Usability Of 14HNMBCu And 10GHMBA High-strength Low-alloy Steels For Marine Applications[J]. Low Alloy Steel, 1995.

陈星宇(2000-),男,2020年辽宁科技大学(在校本科生),海洋装备材料研发与应用。
E-mail:twchenxingyu@163.com

收稿日期:2020-02-01