

# 国外新型金属材料及焊接技术的开发与应用

王晓峰 赵国庆

(中国人民解放军 91206 部队, 山东 青岛 266000)

**摘要** 科学技术飞速发展, 为各类金属材料以及焊接技术的开发与应用提供了强大动力。本次主要以潜艇为研究对象, 从各个国家现有研究情况出发, 深入分析不同国家在提高潜艇隐蔽性、防护力、生存力等方面的研究, 致力于利用新型金属材料提高潜艇机动性, 从而减少维修成本, 增加潜艇使用寿命, 希望此次研究和探讨可以为业内相关人士提供参考与借鉴。

**关键词** 金属材料 潜艇 结构钢 焊接技术

**中图分类号:** U674.76

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-0745(2022)10-0064-03

为了有效加强潜艇作战将性能, 有必要深入研究新型金属材料和焊接技术, 将其应用到潜艇中, 充分发挥作用, 使得潜艇各方面能力得以提升。20世纪50年代起, 西方诸多国家便开始研制结构钢, 这类材料不仅高强度、高韧性, 而且也具备耐压壳体, 这些优势使得潜艇在下潜时, 其深度可以从200米提高到600米, 其中苏联潜艇引入了钛合金材料, 使得下潜深度达到了1000米以上。通过高强度耐腐蚀紧固件材料的研制, 使得潜艇连接部件更加安全、可靠, 很大程度上降低了维修成本。综合来看, 各个国家不同新型金属材料和焊接技术的开发与应用, 对提高潜艇性能产生了重要促进作用, 有利于增强潜艇作战性能。

## 1 潜艇耐压壳体结构材料开发与应用

分析潜艇作业环境可知, 一般都低于几百米的深海环境, 要求潜艇要具备敌方兵器水中攻击的防御能力, 因此, 要求潜艇耐压壳体结构材料必须具备较强的性能, 在强度、韧性、抗爆性等方面必须达到一定水平, 此外, 也要具备足够的焊接性、成型性, 潜艇可以耐受海水腐蚀, 具有较强的抗疲劳性。下文主要从各个国家实际情况入手, 具体分析不同国家在潜艇耐压壳体结构材料开发、应用方面的情况。

### 1.1 法国

纵观全球范围内, 法国在潜艇研究中采用了先进耐压壳体结构钢。20世纪80年代后期, 引入了100HLES钢材料, 将其用于大型弹道导弹核潜艇“凯旋”级的耐压壳体, 此类潜艇自20世纪90年代开始投入使用, 其排水量可以达到14335吨, 航速25kn。

### 1.2 英国、德国等国家

根据相关报道, 俄罗斯的“库尔斯克”号核潜艇

的耐压壳体材料, 与美国HY-130钢材料极为相似, 此外, 俄罗斯也开始使用钛合金建造一系列不同等级的核潜艇, 根据该国报道, 名为“奥斯卡”级核潜艇, 在投入使用后, 其下潜工作深度可以达到1000-1300米<sup>[1]</sup>。另外, 澳大利亚、英国等国家的潜艇也应用Q2N和BIS812EMA钢。除此之外, 英国也在积极研究Q3N钢。而德国在建造潜艇时引入了低磁钢, 成为世界首例, 该类材料的屈服强度与HY-80钢水平非常相近。

### 1.3 美国

#### 1.3.1 非耐压壳体用结构钢

20世纪80年代, 美国就已经开始开发HSLA-80和HSLA-100钢, 这类结构钢在实际应用中表现出非常突出的可焊性, 并且应用成本也非常低, 可以取代以往美国研究的具有机械性能等级的HY-80和HY-100。由于属于非耐压壳体用钢, 所以在建造过程中降低甚至取消预热, 大大降低了建造成本。

#### 1.3.2 配套铸锻钢研究

从美国航空母舰、潜艇每年需要量看, HY-80, HY-100钢铸锻件均需要250吨, 舰艇年均需求量会达到1100吨。从铸锻件实际应用情况看, 往往暴露出诸多问题, 比如, 若是热处理不合理, 会导致铸锻件硬度过高, 直接降低了韧性; 铸件非常容易产生氢, 导致铸锻件出现裂缝; 在焊接铸锻件时, 往往需要进行预热, 导致成本增加等问题<sup>[2]</sup>。美国海军提出这些问题后, 美国金属加工技术中心根据具体要求, 致力于在工艺方面解决上述问题, 从实践情况看, 主要就是用均热处理、数学模型等缓解铸件氢产生问题, 达到降低裂缝问题的目的; 还尝试调整铸锻件化学成分、改善热处理工艺, 希望可以降低, 甚至直接取消焊接预热情况, 进而提升铸锻件强度、韧性要求的目的。

通过这些处理后,可以节省很大一笔预热费用。

### 1.3.3 新焊接材料与工艺

美国从建造新型核动力航空母舰经验出发,致力于研究出新型焊接材料与工艺,并将其应用到新型潜艇中,可以总结为以下几个方面:

1. 美国在海军制造技术研究中,提出了 SMAW 研究项目,该材料可以增强金属极电弧焊 SMAW 焊条的防弹性。在美国首舰 CVN-78 建造中,为了满足防弹性能要求,所有的 HSLA-100 和 HY-100 钢都应用了直径 3.2 毫米的 MIL-10718-M 焊条<sup>[3]</sup>。但从实践应用情况看,这类焊条废品率问题较为明显,需要深入研究和分析,找出原因,而后采取相应措施解决,比如,可以尝试着扩大焊条规格,研究 2.38 毫米和 3.97 毫米焊条的应用,这就需要注重提升焊条制造水平,强化检验效果,明确要求焊条制造厂可以保证焊条成批生产,促使造船厂全面检验。

2. 开发熔剂芯焊条,这种类型的焊条在实际应用中具有非常突出的经济性,可以很好地连接高强度钢,并且具有低锰烟雾特点,该研究也是美国海军制造技术计划的研究项目,主要目的就是减少焊工和锰烟雾,还有其他烟雾接触的机会。该类型焊接材料在实际应用中,并不会增加焊缝中气孔,也不会致使氢含量扩散,这与海军对焊缝要求和船厂使用特性相适应,将其应用到潜艇建造中可以很好地提高生产率,同时也能够改善焊工工作环境。所有水面舰艇使用 HSLA-80、HSLA-100 钢,都可以使用此焊条进行焊接,此外,也可以使用“弗吉尼亚”级潜艇,可以起到减轻重量的效果,获得不错的应用效果。

3. 为了降低预热温度,可以通过高线能量焊接 HSLA-100 厚板。美国海军在该项目研究中,研究经费投资了 179 万美元,该焊接工艺,主要目的就是利用高线能量,取代较低的预热温度,在此基础上,可以运用 25.4 毫米以上的脉冲气保焊、10.2 毫米 HSLA-100 厚度的埋弧焊,从而改善氢致开裂的情况,该类先进技术也可以应用到潜艇建造中<sup>[4]</sup>。

### 1.3.4 采用低匹配强度焊缝金属技术

潜艇与水面舰艇建造开始广泛应用高强度钢,这使得焊缝强度匹配问题日益突显,对此,美国海军也开始注重这一点,并逐步尝试在先进潜艇耐压壳体建造时,应用钢 HY-80、HY-100、HY-130,将钢 HSLA-801、HSLA-100 应用到非耐压壳体中,主要是以往经验中,利用匹配强度焊缝金属时,导致焊缝热影响区产生氢致裂纹的问题。所以,为了解决这种裂纹问题,应当进行预热处理,并做好层间温度、焊后热处理温度,

这直接增加了焊接成本。为有效降低焊接费用,同时也有效防止热影响区出现开裂的问题,西方国家开展了低匹配强度焊缝可行性研究,并通过实验进行了有效验证,经过对这种低匹配焊缝时的检验,可以看出该技术能够很好地适应各种负载条件,有利于提高结构完整性。从美国实践看,将该种技术应用在了“海狼”号、新型攻击型核潜艇的焊缝上。实践证明,美国潜艇、航空母舰无论是应用 HY 系列钢还是使用 HSLA 系列钢,引入低匹配强度焊缝技术后,都可以大大降低预热、层间温度和焊后热处理温度,甚至直接取消,这可以很大程度上减少热影响区的开裂敏感性<sup>[5]</sup>,从而有效提升生产率,最大程度上降低建造成本。根据美国海军船厂数据统计,在劳动力、材料、生产率等方面,应用该技术后,一艘航空母舰会节约成本大约 1000 万美元,而潜艇则可以节约 1500 万美元。

美海军舰艇在后续研究中,还尝试使用与屈服强度 552-900MPa(80 - 130ksi) 钢焊接相适应的焊接材料,这类焊接材料可以取消或者大大降低预热温度,在 20 世纪 90 年代,开发了符合专利焊条,该焊条符合美国海军 MIL - E - 23765/2E 焊条性能要求,即“熔敷低碳贝氏体-铁素体焊缝用焊条”(焊条 A)、“高强度低合金钢保护金属极电弧焊先进焊条”(焊条 B),为美国航空母舰、潜艇高强度钢壳体焊接提供了有力支持。两个焊条的化学成分和美军标焊条比较情况,如表 1 所示。

## 2 高强度耐腐蚀紧固件材料开发与应用

现阶段,潜艇用 MoneK 500 合金紧固件,会出现较为严重的腐蚀问题,为了解决这一问题,同时也减少维修成本,进一步延长潜艇使用寿命,美军加大力度开发高强度船用级紧固件,从其研究具体内容看,除了制定具体的高强度紧固件指南之外,还进行了 MP98T 材料的腐蚀试验。此外,为进一步明确加工具体条件,开始尝试制造出一小批量大直径 MP98T 紧固件,对进行了性能评定,最终提出修改紧固件订购标准的建议,为解决紧固件腐蚀问题提供了有力支撑。

分析 MP98T 材料可知,主要是建立在宇航用材料 MP159 之上,经过冷加工、时效处理后,与性能指标保持一致。这种材料的强化机理主要就是利用基体内部固态相,经由冷加工时结构的转变,发生多相反应,主要是因为合金内含有高钴。如表 2 所示,为合金的化学成分,而对应的机械性能主要为:屈服强度(0.2%)为 1173MPa(170ksi),极限抗拉强度为 1276.5MPa(185ksi),断裂韧性  $\geq 625.5\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (200ksi  $\cdot \text{in}^{1/2}$ ),伸长率为

表1 美军标焊条与焊条 A、焊条 B 化学成分比较

元素	MIL-E-23765/2E 焊条 /%		焊条 B 申请范围 /%	焊条 A 申请范围 /%
	MIL-100S	MIL-120S		
C	<0.08	<0.1	0.01-0.05	<0.06
Mn	1.25-1.80	1.40-1.80	0.70-1.80	1-2
Si	0.20-0.55	0.25-0.60	0.20-0.40	0.2-0.5
Cr	<0.3	<0.60	<0.80	-
Ni	1.40-2.10	2.0-2.80	2.0-9.0	2-4
Mo	1.40-2.10	0.3-0.65	0.40-1.50	0.3-1
V	-	-	<0.01	-
Cu	<0.25	<0.25	<1.0	<0.5
Ti	<0.1	<0.1	<0.03	<0.05

表2 MP98T 紧固件的化学成分

化学成分 (按照 AMS 5842) /%							
Co	Ni	Cr	Fe	Mo	Ti	Nb	Al
36	25	19	9	7	3	0.6	0.2

20%，断面收缩率为 55%。现阶段，MP98T 合金紧固件最大直径可以制作成 89 毫米，满足了部分核潜艇使用需求。

### 3 Ti-5111 钛铁合金

20 世纪 80 年代末，美国相关机构进一步研究，最终研制成 Ti-5111 钛合金，这类材料与以往 Ti 合金相比，在强度方面要更高，并且成本非常低。Ti-5111 钛合金的强度较强，具有非常明显的可焊性，并且在耐海水应力、腐蚀开裂能力方面都表现出较为明显的优势。在实际应用中，要比 Ti 6A 14V ELI 钛合金更为适用。目前，Ti-5111 合金已经加工成 6-51 毫米厚度板材，还可以制成条材、棒材、锻件、铸件。此外，也可以使用钨极气保焊制成 25.4 毫米、51 毫米厚度的焊件，通过激光锤击试验，可以进一步增强其疲劳强度，在此基础上，通过对其在海洋中实践应用性能的评定，发现 Ti-5111 钛合金具有中等强度、较好的耐蚀性、优良韧性、室温抗蠕变性等诸多特性，可以成为非常实用的紧固件材料，符合艇用紧固件使用需求。

### 4 结语

总而言之，通过本文对美国、法国、澳大利亚等国家在潜艇耐压壳体结构材料开发与应用情况以及高强度耐腐蚀紧固件材料开发与应用、Ti-5111 钛铁合金的分析，不难发现，新型金属材料及焊接技术的研制

与使用，可以很好地提高潜艇隐蔽性，提升其抗爆能力，尤其是低匹配强度焊缝金属技术的应用，可以很好地降低建造成本，同时，也很大程度上提高了潜艇安全可靠，有助于降低维修成本，我国军队在研究中可以积极借鉴、学习。

### 参考文献：

- [1] 谭宁, 张庆, 仲捷. 浅析超声无损检测技术在金属材料焊接中的应用 [J]. 百科论坛电子杂志, 2020(04):798-799.
- [2] 薛亚飞, 罗子艺, 韩善果, 等. 一种异种金属材料焊接前的预处理方法, 异种金属材料焊接产品及其焊接方法 :CN112620856A[P].2021-04-09.
- [3] 陈禹臻, 唐茂, 郭子杨, 等. 探析金属材料焊接成型中主要缺陷及控制策略 [J]. 南方农机, 2022,53(14):160-162.
- [4] 宗震霆. 超声无损检测技术在金属材料焊接中的应用探究 [J]. 世界有色金属, 2021(04):123-124.
- [5] 邵占雷. 金属材料焊接中超声无损检测技术的应用 [J]. 工程建设 (重庆), 2020,03(04):155-156.