

关于 LPG/LNG 船用材、 结构、强度及制造

文 选 集



江西

1987

中国造船工程学会船舶力学学术委员会 疲劳断裂学组
上海科技协会上海力学学会
中国钢结构协会海洋钢结构专业协会

U674-53

273

87

296616

目 录

1、赴挪威和法国考察液化气运输船的报告.....	王应伟	(1)
2、关于5083铝合金焊缝的低温冲击韧性.....	李标峰	(5)
3、Ni9钢410℃脆性的初步研究.....	张弗天 李少敏 郭蕴宜	(14)
4、06AlNbCuN(06铝铌铜氮)低温钢的焊接试验研究.....	陈家本 俞冠浩 唐翠宝	(20)
5、LNG贮罐用铝合金厚板性能的研究.....	陈祖秀	(33)
6、压力式LPG货舱容器在试水状态下的应力分析.....	裴俊厚 汪广海	(42)
7、LNG贮藏舱技术评述.....	汪广海	(59)
8、LNG船B型液舱的疲劳与裂纹扩展分析.....	洪烈君 陈伯真 徐汉涛	(72)
9、薄膜式液化天然气(LNG)船低温材料选择.....	陈国虞 张成俊	(88)
10、LPG贮罐的焊接.....	陈家本译	(100)



赴挪威和法国考察液化气运输船的报告

中船总公司技术部主任 王应伟

(一) 简 况

经国家经委和科委批准，中国船舶工业总公司应国外厂商邀请，派出以技术部主任王应伟同志为团长的中国液化气运输船考察团，于一九八六年九月二十日至十月十一日赴挪威和法国考察。考察团一行共八人，成员有国家经委机电局陈明翰、交通部闫积荣、中船总技术部程天柱、七〇二研究所汪广海、七〇八研究所张克明、江洲造船厂扬云华和中船总造船工艺研究所胡斌同志。

我国天然气和石油气贮量丰富，国内开发和利用的前景以及出口的前景很好。当前，解决运输装备技术是使天然气和石油气的开采、贮存、运输和利用成为完善系统的主要环节。用液化气运输船水运，这是运输天然气和石油气的重要方法之一。世界上现在已有七百多艘、总容量达一千五百万立方米的液化气运输船。我国尚无液化气运输船，近年来向外租用这类船只运送可燃气出口。交通部决定要建立我国的石油气运输船队并进而建立天然气运输船队，近期准备先订造小型石油气运输船作为发展的第一步；远洋运输部门和一些地方工交部门也正在酝酿订造液化气运输船，国外船东也已经向我国询价订造这类船舶。为此，船舶工业部门开发液化气运输船已势在必行。国家经委海上石油设备领导小组业已批准中船总进行液化气船的开发研究，中船总也已安排有关设计科研单位对液化气船的相关课题展开预研工作。

根据上述背景，考察团这次赴挪威和法国的主要任务是：了解先进国家液化气船技术状况和发展经验，为国内确定液化气船发展途径等重大问题以及液化气船的科研设计等具体技术问题提供建议方案，并为引进相关技术和进行技术合作进行综合性调研分析。

考察团在挪威和法国，以卡瓦拿（KVAERNER）集团和阿尔斯通（ALSTHOM）集团为主要对象，考察了液化气运输船的设计、建造和使用技术，参观了液化气船的研究设计单位、船厂和配套设备厂以及以液化气为原料的化工厂、燃气公司和液化气的卸货码头等，同这些单位以及挪威、法国的船级社、石油公司等讨论了发展液化气船的有关问题，并考察了与液化气船以及液化气运输有关的单位和相关的技术。

考察团在我国驻外大使馆商务处以及挪威、法国有关政府部门、民间团体的协助下，顺利地完成了考察任务，取得了较大的收获，并与外商取得了技术合作的一致意向，此外，还收集到一批较有价值的资料。考察结果也证实原定考察计划和考察对象的选择都是比较恰当的。考察团在外团结一致，努力工作，遵守外事纪律，较大幅度地节约了外汇开支（开支为预定计划的37%）。

这次考察团的组成包括有上级机关主管同志和使用部门的主管同志，中船总有领

导船舶科技工作的负责同志和主管船型开发的同志，还有船舶科研、设计和工艺研究单位以及造船厂的科技人员。这些同志对液化气船从不同的方面有所研究，经过考察全团同志对我国发展液化气船有较全面的评议和设想。并拟对进一步推动我国液化气船的发展提出建议和意见。

(二) 收获和体会

1、较全面地考察了当前国外液化气船技术状况和水平

近年来，国内各有关单位虽然已开始从设计、工艺、配套、检验、使用等方面研究液化气船，进行了不少开发性工作，但由于国内尚未正式开始设计建造这类船舶，所以对这类船舶缺乏全面认识，更谈不上经验。

此次对挪威、法国这两个最早设计制造液化气船且至今技术仍居世界领先地位的国家作了较系统的考察，对石油气船和天然气船这两大类液化气运输船，全压力式、半加压半冷冻式这三种液化气的方式，以及莫斯液罐式、因凡钢薄膜式液舱和9% Ni 不锈钢薄膜式液舱这三种低温液货舱技术有了较全面的认识。

通过考察，对于三种液化气的方式的技术难度、装货适应性和设备配套的复杂程度，有了较充分的认识；考察中对于三种液货舱，特别是对其中两种不同材料、不同型式的薄膜式液舱的设计技术和制造安装工艺，作了较周密的调查和了解，取得了一批资料，还了解了可供参考的国外船厂和船东的看法和对分析意见。

2、对液化气船技术有了客观的认识

在对国外液化气船技术状况作了较全面的了解的基础上，考察团认为对该类船的技术难度和挪威、法国的科技水平有了较充分的认识并能作出较客观的评议。大家一致的看法是，液化气船是当代世界上有代表性的新船型，但其技术并不是高不可攀的。当前我国有条件、有能力开发这类船舶；当然也决不可轻视这类装载危险品的船舶发展经验值得我们借鉴，其逐步成熟了的设计思想和工艺技术值得我们引用。

从压力式液化气船需要的耐压技术来看，国内比之于国外，并不存在需要攻关的难题；从半压力半冷冻式液化气船需要的技术来看，国内已掌握了材料焊接工艺，冷冻设备也是可以解决的；至于莫斯液罐式低温液舱技术，其中工艺方面，国内已有所研究，可以进一步掌握，但有关材料和设备尚待国内安排落实或在开始时采用进口材料制造；薄膜式液舱的安装的工艺技术虽然相对容易一些，但薄膜的加工和安装设备较复杂，需要引进专利，薄膜材料国内也尚待安排落实，在建造这类船舶时，初期也需采用进口材料和设备。

3、对液化气船的发展途径有了分析判断的基础

挪威和法国已有了设计、制造液化气船的成熟技术，并有液化气船营运的长期实践经验，据两国有关部门介绍并从有关资料了解，二十五年来（从第一艘液化气船建成投入营运以来），挪、法未曾有过因船舶本身技术问题而发生的液化气船事故。考察团实地考察了挪威一艘已有十多年船龄的半冷冻式石油气运输船，该船仍在继续正常地为大型化工基地运送液化气，虽然船体已有较多的锈蚀，但观察液罐及装卸系统制冷设备等依然完好。考察团还参观了法国一个重要的煤气基地，该基地用大型天然

气运输船自阿尔及利亚运来液化天然气，然后加热气化再加压成高压气体，通过管道供全巴黎及有关地区使用。多年来，这个基地运转正常，成为巴黎的重要能源供应地。另据介绍，法国北部核电站和液化气船码头附近，也并无相互干扰的担忧。

以国外的经验看，尽管安全技术必须充分考虑和解决，但对发展这类船舶无需过多疑虑。

对于发展石油气运输船的途径，过去意见是首先发展全压力式的，求其简单、经济和便于管理。经考察并作分析，考察团的同志倾向于不必一定要从简单的形式起步，而可以把起步点定在较高水平上，即一开始就可着手发展半加压半冷冻式的石油气运输船，这种类型的船舶载货品种范围较广因而比较灵活，可望改善船舶营运经济性和提高船舶对货源的适应性，也不需要增加特殊的岸上设施，而且从技术上看我国也完全可以做得到的。

对于我国发展天然气运输船，过去一般的看法是为时尚早，通过考察，了解到：一方面三种型式的液货舱技术已成熟，并不“神秘”；另一方面则是要全面掌握技术需要做许多工作，需要相应的时间。过去日本的做法是三种技术分别从挪威和法国都引进，以掌握技术，争取造船订单，结果取得了成功。我国也应当加紧掌握天然气运输船的技术，以不误时机，争取能在不久具备建造天然气运输船条件。

4、考察并了解了液化气船相关技术的基本情况

除了液化气船液舱技术外，考察团对其他关键性的配套设备的有关问题也进行了调查，如考察了液货泵的生产厂，考察了液货泵、制冷设备在液化气船上的实际应用情况，考察了液化气船与码头间的装卸货接口设备及其使用情况，对设备的技术状况有所了解，对运行安全性有较深刻的印象。

考察团在挪、法船级社考察时，听取了这两个著名的船级社对液化气船检验问题所作的虽概略但较为全面的介绍，并参观了作随机冲荡试验等液化气船重要试验项目的试验装置，观察了试验情况，还从船级社得到了一批关于液化气船技术和测试、检验的资料，从船检的角度较多地了解了液化气船的技术关键。

为了能从各个侧面了解国外液化气船的发展状况，考察团还访问了挪威一些有经验的船长以及法国石油公司和煤气公司等单位，从使用角度了解液化气船技术及营运问题。总的结论是，只要设计、制造和使用得当，液化气船是安全的，其危险性“不大于油轮”，船龄“二、三十年毫无问题”。这些基于长期实践总结的意见对于我国发展液化气船不无参考价值。

5、与国外厂商探索了技术合作的可能性和前景

挪、法有关厂商一致认为我国有天然气、石油气资源优势以及船舶工业力量的优势，发展液化气船在所必然，由于欧洲造船极不景气，同我国在液化气船等方面进行合作，对他们是有利可图的。考察团经过考察认为挪、法两国掌握有液化气船技术和专利，我国如果从头做起去掌握这些技术，显然要费时费力，至于挪、法长期实践积累的经验对我们来说更为可贵，所以有借鉴国外技术和经验的需要。在彼此认识到优势的情况下，考察团与外商探讨了技术合作的前景，并与挪威卡瓦拿集团共拟了意向书，与法国阿尔斯通集团的大西洋船厂以及法国研制因凡钢薄膜式和9%Ni钢薄膜式液货舱的厂商（GAZ TRANSPORT和TECHNIGAZ）商讨了合作的有关问题。合

作意向的主要点是：双方以各自的优势在液化气船技术方面进行合作，以互相有利且有竞争力的方式进行合作，以争取为双方或第三方建造液化气船。考察团认为，当前世界性航行萧条，造船不景气，我国正好利用时机发展高技术难度的船种，并利用挪、法等国激烈竞争的局面，争取实现对我国有利的合作条款。

（三）建议和意见

1、关于我国液化气船的发展途径

综合各方面的情况，我国液化气船发展途径宜是：先石油气运输船后天然气运输船；在发展石油气运输船时先小型，后大、中型为妥；石油气运输船的型式建议首先发展半加压半冷冻式的；在发展石油气运输船的同时，要积极研究天然气运输船及其关键工艺技术，结合我国的具体情况继续深入对比分析各种型式低温液货舱的技术经济性，以便确定发展方向。

2、组织起来研究并完善石油气、天然气的开采、运输和使用系统

随着我国石油工业和天然气工业的发展以及化工、电力等部门的发展，用液化气船运送石油气和天然气以沟通产气和用气，这已是势在必行，建议国家经委组织交通、石油、化工等部门研究石油气、天然气的开采、运输和使用等方面的问题，使石油气和天然气的开采、运输和使用早日成为完善的系统。

3、积极做好船型预研设计，加强相关技术的研究工作

我国船舶工作已具备发展液化气船的技术条件和生产能力，但液化气船是一种高技术难度的船型，运载的是危险品货物，船舶工业部门要重视这类船型，做好船型预研和预设计工作，并加强和加紧液化气船液舱材料焊接等工艺的研究和应力分析等试验，以及关键设备的研究和技术储备。以便接到船舶订货即可设计并制造出高质量的液化气船来。

4、建议先发展半压力半冷冻式石油气船，请交通部尽快提出任务书

建议交通部考虑首先订造半压力半冷冻式石油气船，并能尽快提出任务书，以便中船总进行各项具体安排，保证“七五”国内建造液化气船的需要。

5、采用联合设计为主的形式引进国外液化气船技术

鉴于国内缺乏液化气船设计建造的实践经验，为了缩短与世界先进水平的差距，建议采用与国外联合设计的形式引进技术在国内造船。在造船时对于国内尚未解决的部分材料和配套设备，适当进口装船。如船东需要，可申请国外船级社认可。

6、组织国内“考察”，评议国内研究成果

拟组织一次国内“考察”，邀请有关部门和有关部门的同志参观中船总承包液化气船研究任务的单位（七〇二所、中船总船舶工艺研究所、七二五所等）、设计单位（七〇八、七〇一所）和造船厂（大连造船厂、江洲造船厂）。并拟开一次会议，对近年来国内研究液化气船有关课题取得的成果进行评议。

总之：考察团建议在上级领导和组织下，各方面配合，努力做好各项工作抓紧开发液化气船。

关于5083铝合金焊缝的低温冲击韧性

七二五所 李标峰

(一) 前 言

自本世界五十年代末以来,由于石油及天然气资源的大量开发利用,促使石油气和天然气的液化、贮存和运输等技术迅速发展,对低温贮罐用材料也提出了要求。与此同时,厚板铝合金的焊接工艺、焊接材料及焊接接头性能等方面也进行了广泛深入研究,许多国家相继建造了一批批贮罐及海运的球罐。

液化天然气主要成份是甲烷(CH_4)。液化后天然气的体积只有原来的1/625,因此,天然气在液态下进行贮存或运输是最为经济。由于液化天然气(LNG)是在 -162°C 进行贮存及运输的,那么就要求制作贮罐用材料必须具有良好的低温性能。

目前制造低温贮罐用材主要是9%Ni钢及铝合金,这两种材料都有好的低温性能。选用铝合金有许多优点,省材料就是其中之一。以建造容量为 2万m^3 贮罐为例(1):铝与钢的比重是1:3、贮罐壁板的厚度铝与钢的比是2:1、这样铝与钢材料用量的比例是2:3。自七十年代末以来,用5083铝合金制作海运球罐发展迅速(2,3),板厚一般在25~200mm范围,球罐直径高达30米,每只球罐用铝量近千吨是用铝的大户。

陆上用贮罐主要根据静载荷设计,虽然也考虑地震和风力等的影响,但LNG运输船中的铝球罐却不同,要考虑承受由于波浪冲击而产生的动载荷。这种独立式球罐在设计时采用“泄漏安全”概念,即万一液货舱开始出现裂纹,这艘船应能在液货舱破坏前进港进行修复(4)。为了满足这一要求,许多国家对焊接接头综合性能进行了广泛研究(5),尤其对接头的韧性及疲劳性能更是进行深入的研究(6,7)。

夏比(Charpy)V型缺口冲击试验是评定材料韧性在工业上广为采用的试验方法。在美国、法国船级社的船舶建造和入级规范有关低温使用的材料(8)、液化气体运输船用材料(9),等章节中,对低温用钢提出要做低温夏比冲击试验的要求并规定了标准值,但对5083型铝合金则不要求进行韧性试验。这是认为铝合金是面心立方晶体结构的材料,无低温脆性,所以就没有提出夏比V型缺口冲击值的要求(5,10)这样,目前低温贮罐用铝合金焊接接头性能指标,除了接头强度与接头冷弯值外,未能找到其它力学性能指标。

几年来我所对国产的几种铝-镁系合金的性能是否能满足作LNG贮罐材的要求进行了试验研究。在焊接方面,对焊接接头性能进行了鉴定,并在焊接工艺及调整焊丝成份方面进行了大量的工作。在研究工作中测定了焊缝金属的夏比冲击值,发现冲击值随着试验温度下降有降低的趋势,在 -196°C 的冲击值要明显的低于室温冲击值,几次试验结果重复了以上的现象。为了分析焊缝金属低温致脆的原因,做了金相及扫

描电钻等分析，现将试验及分析结果概要的介绍如下。

(二) 试验及其结果

1、试验用材：

焊接试验用铝板有两种：国产的5083板与西德的5083板，厚度分析为25mm与12mm。焊丝也有两种：国产的5183丝与日本的5183丝。国产的5083板用国产的5183丝进行焊接，而进口板则用进口丝焊接。两种板材、焊丝及两组焊缝的化学成份列于表1。使用的板材均为退火状态

表1 板材、焊丝及焊缝的化学成份

名 称	化学成份 %					
	Mg	Mn	Cr	Ti	Fe	Si
国产5083板	4.43	0.66	0.10	<0.05	0.28	0.12
国产5183丝	4.89	0.68	0.12	0.12	0.17	0.12
以上两种材料组成的焊缝	4.78	0.66	0.11	0.14	0.15	0.09
西德5083板	4.59	0.69	0.074	0.024	0.31	0.24
日本5183丝	5.07	0.62	0.06	0.097	0.20	0.15
以上两种材料组成的焊缝	4.93	0.69	0.074	0.079	0.23	0.17

2、焊接工艺：

两种试板均开单V形坡口，坡口为70°。焊丝直径均为 $\phi 4$ mm。

焊前试板及焊丝均按常规酸洗法进行清洗并烘干。试板在刚性夹紧下进行焊接，采用手工钨极氩弧焊、单面多道焊。电流： $\delta = 25$ mm板为320—360 安， $\delta = 12$ mm为260—280 安。焊丝，焊缝平整、表面光亮。

3、试样：

夏比V型缺口冲击试样用铣床下料及加工。V形铣刀的R以及加工完试样的V形缺口均经数字放大镜检查合格。

4、试验结果：

母材及焊缝的室温、低温及夏比冲击值列于表2

从表2 可以看出：

a、室温时焊缝金属的冲击值略高于母材的冲击值。

表2 母材及焊缝的夏比冲击值

试 样	夏比冲击值 $\text{kg} \cdot \text{m} / \text{cm}^2$	
	室 温	-196°C
国产5083母材	3.22	2.98
西德5083母材	2.54	1.98
国产板的焊缝	3.34	0.75
进口板的焊缝	3.38	0.94

* 五个试样平均值

b、在-196°C时，母材的冲击值稍有降低，但焊缝的却严重下降，呈脆性断裂。

c、在-196°C时，进口材焊缝的冲击值略高于国产板焊缝的冲击值。

从试样的宏观断口可以清晰的看出，室温试样断口（照片1左）呈韧性状（纤维状），而-196°C的试样断口（照片1右）呈脆性状。

为了解试验温度对夏比冲击值的影响，做了系列温度试验。表3列出了进口材焊缝在不同温度时的冲击值。

表3 试验温度对焊缝冲击值的影响

试验温度	+24°C	0°C	-78°C	-120°C	-150°C	-196°C
夏比冲击值 $\text{kg} \cdot \text{m}$	2.55	2.5	2.46	2.41	1.89	0.73

从表3可以看出，焊缝金属的冲击值是随温度下降而逐步降低，呈现出脆性的倾向。国产的5083板与5183焊丝所组成的焊缝呈现了完全相同的倾向。

（三）金相及断口分析

为了分析焊缝金属在低温时致脆原因，对母材及焊接接头各区进行了金相及断口的分析。

1、金相分析：

用常规金相对母材及焊接接头各区的组织特征进行了分析。无论是母材或是接头其金相组织组成情况大致相仿，均为 $\alpha + \beta + \text{MnAl}_6$ ，但 β 相的分布及形态却有较大差别。

a、母材：从偏光组织看，进口5083板呈现明显的变形晶粒。而国产的5083板在变形晶粒中还有些再结晶特征，从照片2（国产5083板）可以看出，原轧制纤维状变

形晶粒已发生再结晶现象, β 相的分布已看不出明显的条带特征, 且沿晶界分布形成较清晰的网络。而进口5083板(照片3)保持典型轧制状组织特征, β 相分布是呈纤维状的条带特征。

b、焊缝: 观察了两种材料焊接接头各区的组织特征。从偏光组织看, 进口5083板焊缝均为等轴状晶粒, 但国产5083板的焊缝除轴状晶粒外, 还呈现明显的粗、细晶带。这两种焊缝中 β 相的分布呈现与各自母材相同的特征。进口板的焊缝中 β 相呈弥散均匀分布(照片4)而国产板的焊缝中 β 相几乎连成网络。(照片5)

β 相的网络分布常导致性能(包括腐蚀性能)降低, 这可能是国产5083板的焊缝在低温时冲击值低于进口板焊缝的一个重要原因。

2、断口分析:

利用JEM-35C扫描电镜对母材及焊缝断口进行了微观分析。两种母材在室温冲击下均属韧性断口, 呈等轴韧窝, 且方向性分布(照片6), -196°C 冲击断口也表现明显的韧窝组织, 但也有沿晶断的特征。(照片7)

室温的焊缝断口为全韧性细小等轴的韧窝状组织, 析出物也几乎是细小等轴的(照片8), 也可见“泻雪状”形态(照片9)。

-196°C 焊缝冲击断口大部份为沿晶脆断特征(照片10)。在断口中也能见到少量的沿晶塑性(照片11中箭头所指)。进口板材的焊缝中韧性状区域所占面积要大于国产板焊缝中的同类区域。二次裂纹内有时还保持某些粘连特征(照片12)。

从照片12可见沿晶界而除有粒状颗粒外, 是比较光滑的。在平滑断面上高倍下可见到有更小的析出物成串分布在界面上(照片13箭头方向)。

经上述的试验分析, 冲击断口的特征已比较清晰。母材及室温焊缝断口是韧性断口, 虽有极少数的沿晶断的特征, 但绝大多数呈韧窝状。焊缝金属在 -196°C 时的冲击断口是脆性断口, 属沿晶断裂。国产板的焊缝与进口板的都属同一性质。在焊缝的脆性断口中仍有部份沿晶塑性区, 这一塑性区域在进口板焊缝中所占此例要比国产板的大。

(四) 讨论

铝是面心立方结构, 没有低温转变倾向。但在我们多次试验研究中发现, 5083铝合金的母材在 -196°C 时冲击值稍有降低, 而焊缝金属则呈脆性断裂, 国产板的焊缝与进口板的焊缝断裂特征相同。日本文献〔5〕有关5083厚板焊缝夏比V形缺口冲击性能, 同样有随着试验温度下降而降低的倾向, $\delta = 25\text{mm}$ 板降低得缓慢些, 而 $\delta = 187\text{mm}$ 在 -196°C 时冲击值也是低于 $1\text{ kg} \cdot \text{m} / \text{cm}^2$ 。

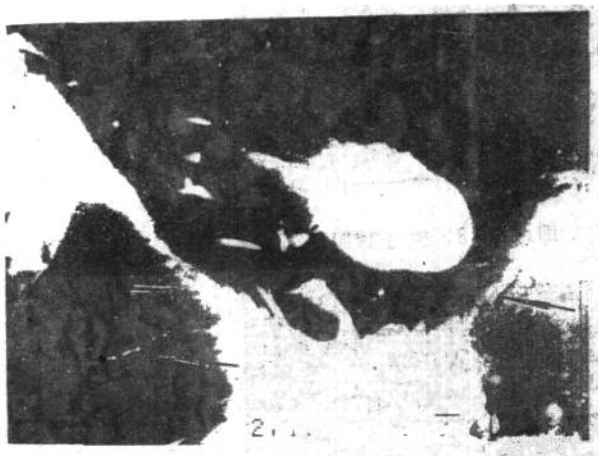
为了分析致脆原因, 我们对脆性的焊缝断口进行了微观分析, 高倍下发现晶界面上有许多极微小的析出物(照片13), 这些析出物的成份, 形成特性以及是否是致脆因素, 正待进一步分析。我们希望得到国外的5083焊缝金属, 以作对比试验、查找冶金及工艺方面影响因素。

虽然理论上认为铝合金无低温脆性倾向, 美国、法国船级社对用作液化气贮罐铝合金也无低温韧性要求, 但从我们试验中发现5083铝合金焊缝在低温时存在着脆性倾

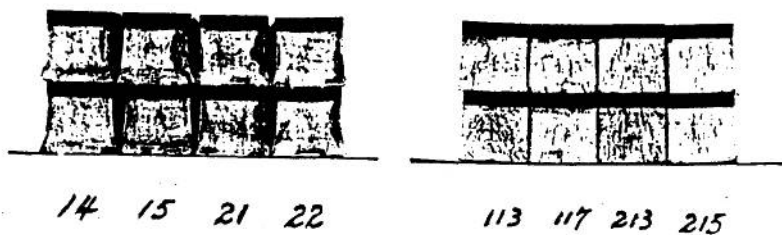
向，这一事实如何判别，有待商榷。

参 考 文 献

- (1) 《轻金属熔接》，№1，1982年。
- (2) 《第七届国际船舶结构会议论文集》，舰船材料编辑室。
- (3) 《轻金属熔接》№11，P. 98，1982年。
- (4) 《第八届国际船舶结构会议论文集》，舰船材料编辑室。
- (5) 《船舶轻金属委员会第16回报告书》，P 104—168. 昭和50—51年。
- (6) K.A.Kelesy," Advance in Cryogenic Engineering ", Vol.27.1978年。
- (7) A.ya. Ishchenko," Advance in Cryogenic Engineering",Vol.26 1980
- (8) 美国船级社，《钢质船舶建造和入级规范》第二分册：材料，“低温材料”.P P. 13—16。
- (9) 法国船级社，《钢质海船入级和建造规范》，第七章，“液化气体运输船用材料”.P. 76—82。
- (10) "Scandinavian Journdl of Metallurgy" 4 (1975) 121—130。



照片13 沿晶析出的细小粒子×9400



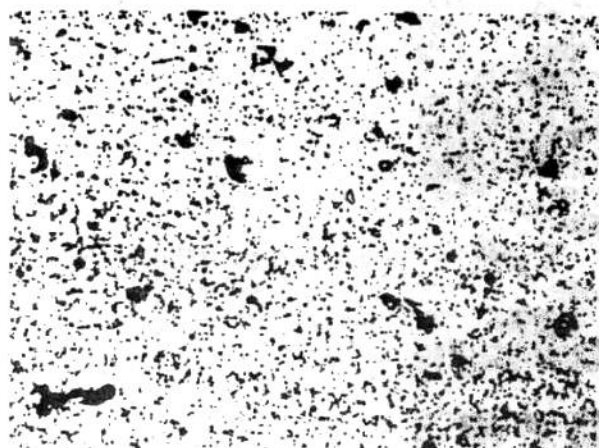
照片1 复比冲击试样宏观断口



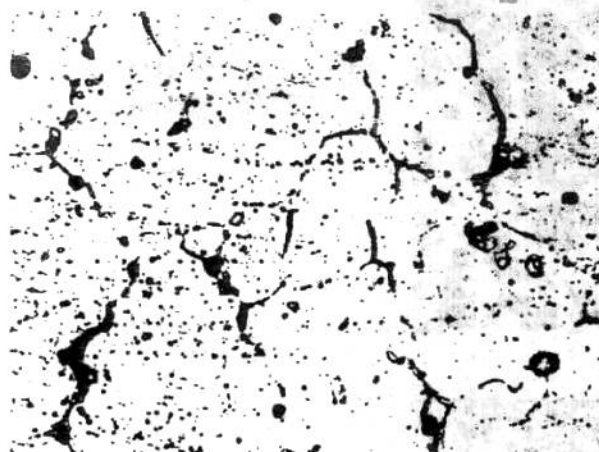
照片2 国产5083板金相组织×340



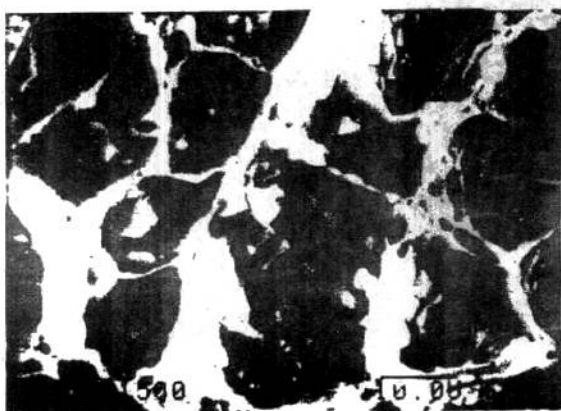
照片3 进口5083板金相组织×340



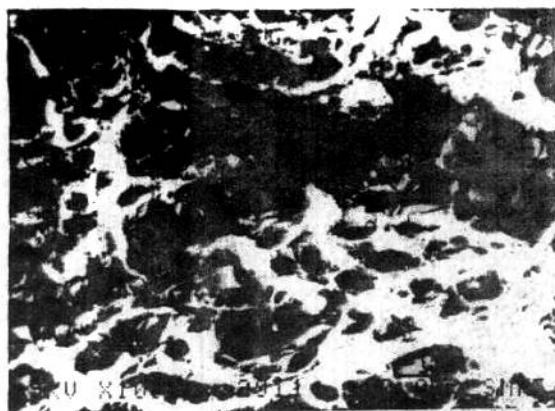
照片4 进口5083板的
焊缝组织 $\times 1000$



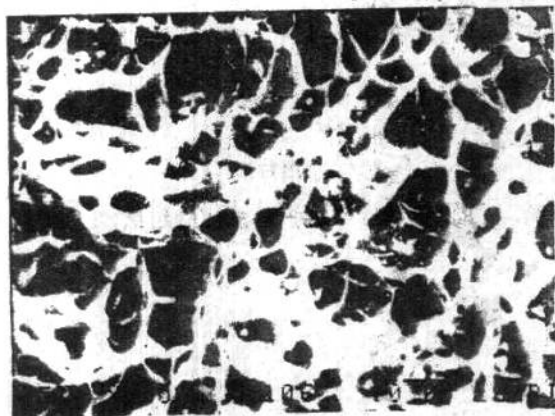
照片5
国产板的焊缝组织 $\times 1000$



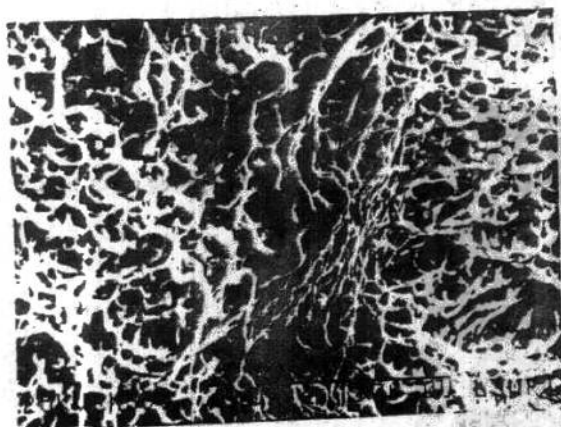
照片6 室温母材断口 $\times 1500$



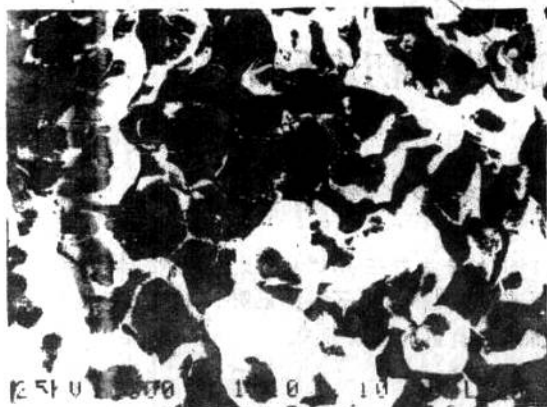
照片 7 -196°C母材断口×1000



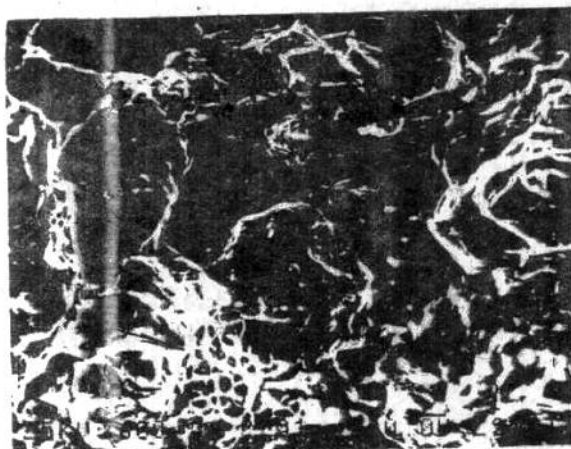
照片 8 室温的焊缝断口



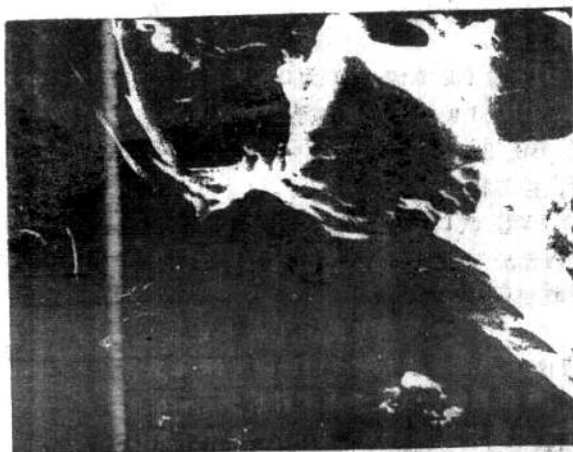
照片 9 室温的焊缝断口



照片10 焊缝在 -196°C 时
冲击断口形貌 $\times 1000$



照片11 -196°C 时焊缝金属
冲击断口有少量沿晶塑性
 $\times 600$



照片12 二次裂纹内粘连特征 $\times 5400$

Ni9钢410°C脆性的初步研究

中国科学院金属研究所 张费天 朱少敏 郭蕴宜

提要 研究了Ni9钢在CHT、IHT处理后并在410°C时效后的低温韧性及断口形态、组织的关系,分析了部份Auger电子谱。证明:410°C脆性与淬火态的低温脆性在晶界和亚晶界上析出和集聚有关。

(一) 前言

金属材料的脆性,对于在低温下使用的铁素体型钢有其特殊重要性。由于它是依靠适宜的热处理获得足够的低温韧性的,故存在着因处理不当或难以避免的加热所引起的回火脆性问题。业已证明,在410°C附近加热引起的脆化最为严重(1)。但经过一般热处理(简记为CHT: 870°C1h·WQ+410°C1h·A·C)与经过 $\alpha+\gamma$ 相区热处理(简记为IHT: 800°C1h·WQ+670°C1h·WQ+410°C·A·C)后两者的表现仍有很大区别。

(1) IHT处理后, -196°C冲击值比CHT处理者高出一倍左右。

(2) IHT处理后的回火脆化温区比CHT处理者小。这些表明两类热处理的脆化有共性,也有区别。研究它们的410°C回火时的脆化过程,有助于揭示410°C脆性的本质。

(二) 实验方法

1、材料及热处理

实验用材为电弧炉生产的Ni9钢。成份(以Wt%计)为C: 0.08; Ni: 9.05; Mn: 0.69; Si: 0.32; S: 0.006; P: 0.010。热轧至6mm厚。

在410°C回火时间为2、5、10、20、60、300、1500min,回火时间小于60min时,在铅浴炉中进行,余在箱式炉中进行,控温精度 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 。

2、冲击试样横向取样, Charpy V型缺口,尺寸为5×10×550实验前样品浸入液氮中至少10min,取出后在5秒内完成冲击。

在扫描电镜上观察冲击断口及经过恒电位深腐蚀后的冲击断口和全相样品。恒电位深腐蚀的目的是使铁素体溶蚀掉。

3、在LAS-3000型Auger谱仪上探查新鲜断口上杂质吸附状况。样品在 5×10^{-10} mmHg环境中打断,立即不断地测定Auger电子谱,测点时束斑直径为:~1 μm 面扫描面积为210×210 μm 。实验条件为加速电压 $E_p=5000\text{V}$; 样品电流=0.5 μA ; 时间常数0.3s; 调制电压 $V_{\text{mod}}=2\text{V}$ 。

(三) 实验结果

1、 -196°C 冲击韧性 410°C 保温时间的关系如图1所示。随着保温时间延长, IHT处理样品的 -196°C 冲击韧性几乎不变, 但下降速率逐渐降低。

2、 -196°C 冲击断口形态如图2所示。其中2a为CHT短时回火后的断口, 属准解理开裂, 解理面大致与断面平行, 说明准解理主要是正应力造成的, 有少量晶间断裂, 断裂面上布满了小韧窝, 且与主断面角度较大, 表明它主要是剪应力造成的。随着保温时间增加, 沿晶界断裂增多, 且断面很光滑(图2b)。保温25h后, 断裂完全沿晶界进行, 有小韧窝的, 垂直于主断面方向的小断面已经很少(图2c)。与CHT处理成鲜明对照的是: IHT处理后断口形态是比较稳定的。图2d是IHT处理并在 410°C 保温25h后的断口形貌。其晶粒比较细小, 断口形态包括准解理、韧窝、沿晶断、二次裂纹等。它具有较大的冲击功是自然的。

3、图3是经不同热处理后, 金相磨片的深腐蚀组织。在IHT处理后, 有大量的片状或针状相, 其状态几乎不随 410°C 保温时间而改变; 在CHT处理后, 沿原始奥氏体晶界或亚晶界上析出新的相, 比较图3a和3b, 可见保温时间延长的作用是使原始晶界和亚晶界上析出物逐渐增厚。

图4则显示经深腐蚀后断口的组织形态。图4b表示经IHT处理并在 410°C 保温5min的断口。其表现与金相形态相同。在 410°C 保温2min至25h范围内, 断口形态几乎没有变化。在CHT处理后, 断口的解理面上呈现规则排列或不规则的点状(事实上是针状)的析出物。随着在 410°C 保温时间延长, 可见析出物聚集长大。当保温25h后, 断裂完全沿晶进行(图4a.c)

4、鉴于Ni9钢的组织是多相复合的, 故同一断口各点的Auger谱并不相同。图5表示几个典型的Auger谱。由于存在着相当大的背底, 故计算值不够准确。经常断口上富集的元素是氧、碳、硫, 此外再未发现其它元素富集现象。在所有的测量中都发现氧富集。对于IHT+ 410°C 2min样品, 除氧以外几乎无其它元素富集于表面上。IHT+ 410°C 25h处理的样品, 大多数测点有S, O, 无C, 而少数测量点却是有O, C, 无S。总计测量9个点, S出现7次, C出现2次, 而扫描则基本上无C, S明显富集。总的情况是, 它与短时保温(2min)情况相近。而经CHT+ 410°C 2min处理后, 除S, O外, C峰出现较多, 仅一个测量点无碳峰。在CHT+ 410°C 25h处理后C、S、O峰均普遍存在。

(四) 讨论

1、由图1可知, 在 410°C 保温过程中, 经IHT处理的Ni9钢, 其 -196°C 冲击韧性基本保持稳定, 而经CHT处理者, 则持续不断的脆化。故其低温韧性是两个因素制约的: 淬火态材料的韧性和由于在 410°C 保温造成的韧性损失。

两类热处理并在 410°C 短时回火(2min)后的低温韧性基本相同。其断口主要是准解理形态(图2a)。IHT处理后的断口形态上表现出晶粒尺寸较小, 可能是它的低温韧性略高的原因。随着回火时间增加CHT处理后的断口上, 沿晶界断裂逐渐增多, 沿晶界断的小断面也越光滑(图2b), 直到回火25h的典型的非塑性沿晶