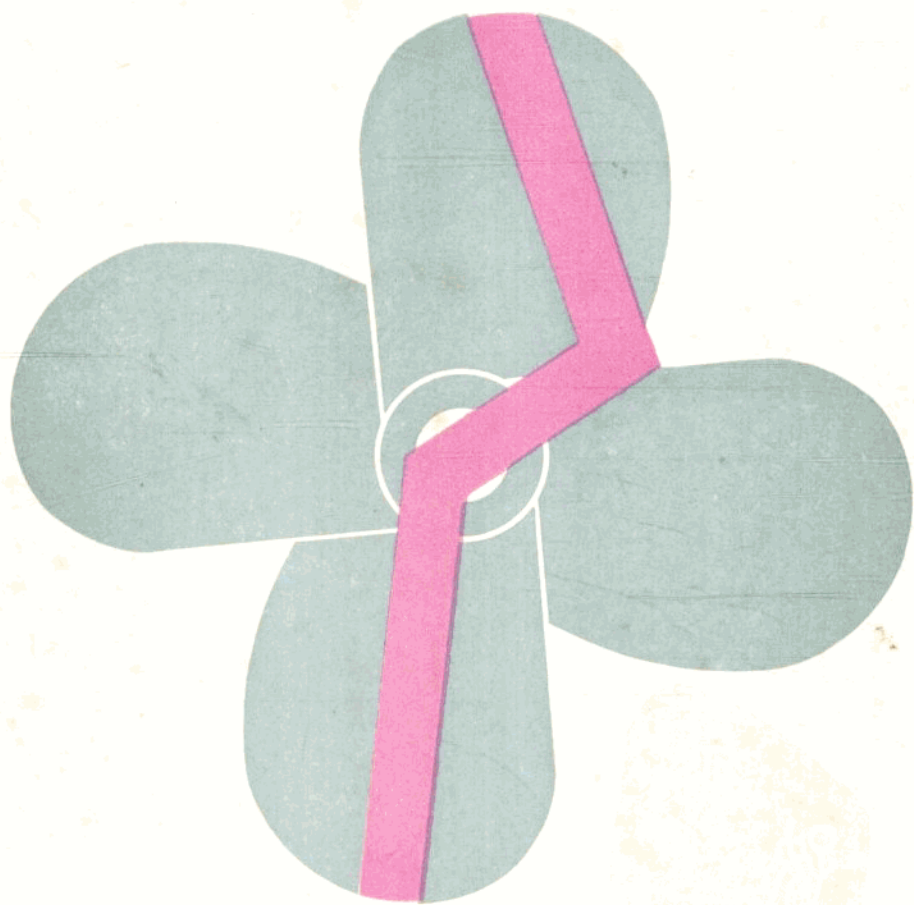


大型舰船螺旋桨断裂事故分析

中国造船工程学会



国防工业出版社

大型舰船螺旋桨断裂事故分析

中国造船工程学会

国防工业出版社

内 容 简 介

本文集介绍我国生产大型舰船螺旋桨的经验及所存在的一些问题,重点介绍大型舰船螺旋桨断裂事故的调查分析,并从螺旋桨设计、工艺和材料研究等方面提出了一些解决措施。同时,对国外这方面情况也作了概要地介绍。

本文集可供从事舰船螺旋桨设计、生产、使用等部门有关人员参考。

大型舰船螺旋桨断裂事故分析

中国造船工程学会

*

国防工业出版社 出版

国防工业出版社印刷厂印装 内部发行

*

787×1092¹/₁₆ 印张10¹/₂ 243千字

1982年5月第一版 1982年5月第一次印刷 印数: 0,001—2,000册

统一书号: N15034·1999 定价: 1.65元

出版说明

螺旋桨是舰船动力系统的一个重要部件，也是目前舰船航行的主要推进装置。一九六九年我国开始生产大型整铸螺旋桨，解决了我国大型舰船的用桨问题，为发展我国造船事业、航运事业和保卫国防作出了贡献。

但是，由于过去工艺上存在的一些问题没有很好解决，又缺乏先进的测试手段，使产品质量上存在一定的问题，在新船试航和远洋航运中，发生了数起断桨事故，影响海上航运安全。为了查明原因、解决问题，有关部门组织科研、生产和高等院校等单位，成立了“大型螺旋桨断裂原因调查分析”小组，经过两年多的工作，基本上查明了造成断桨事故的原因，提出了解决措施。

为此，我会召开了“大型舰船螺旋桨断裂原因分析”技术讨论会。到会代表从产品设计、生产工艺、材料研究、断口金相学、断裂力学等方面对断桨事故进行了分析讨论，总结交流了大型螺旋桨的生产经验，提出了改进产品质量、解决防断措施以及今后的科研任务。

本文集主要根据会上发表的技术报告，并参考其他有关资料，由六机部 725 所赵九夷、601 所赵忠义二同志作了技术上审核加工，最后汇编成册。本文集在汇编中，六机部科技局董世家同志审核了原稿并提出了宝贵意见。在此，对所有致力于本文集编辑出版的同志们表示谢意。

由于螺旋桨断裂事故分析仅仅是开始，而且分析工作是一项多学科的综合性课题，对一些问题还有待于深入探讨，因此本文集一定会存在不少缺点和错误，敬请广大读者参与这方面讨论，并把经验、意见和要求告诉我们。

中国造船工程学会

目 录

一、ZHA167-5-2-2 大型螺旋桨断裂原因分析	1
二、ZHMn55-3-1 万吨轮螺旋桨断裂原因初步分析	27
三、大型舰船螺旋桨断裂原因分析	35
四、ZHA167-5-2-2 大型整铸螺旋桨毛坯表面裂纹原因分析	43
五、船用螺旋桨断裂原因及腐蚀产物分析	52
六、舰船螺旋桨用铜合金的断裂韧性和应力腐蚀倾向	72
七、大型船用螺旋桨铸件的凝固过程及裂纹缺陷形成机理研究	82
八、铜合金脱成分腐蚀的研究	90
九、对大型螺旋桨安全系数的探讨	101
十、无镍高锰铝青铜合金 (ZQA113-7-4-3-1) 介绍	114
十一、断口显微分析方法	124
十二、国外舰船用螺旋桨材料	144
十三、国外大型螺旋桨断裂情况综述	156

一、ZHA167-5-2-2大型螺旋桨断裂原因分析

725 所 赵九夷 黄克竹 张在春 何金重
大连造船厂 贺传忠 孙秀荣 张元祥 刘德明

用高强度黄铜 ZHA167-5-2-2 生产的大型整铸螺旋桨,相继有 1 号舰右桨、2 号舰左桨以及 15000 吨油船 (大庆 31 号、大庆 45 号、大庆 46 号、大庆 48 号); 24000 吨油船 (大庆 62 号); 12000 吨货船 (大冶号) 等大型舰船螺旋桨发生了断裂事故。

事故发生后,我们进行了调查,取了断桨样品,运用光学显微镜、电子显微镜、电子探针、扫描电镜等断口金相学所采用的现代分析仪器和方法,对断口样品进行了分析,并对大庆 46 号断桨进行了全面的解剖试验。

本文从材料角度出发,针对 ZHA167-5-2-2 材料生产的大型整铸螺旋桨的断裂原因,就近两年来所进行的解剖分析工作予以介绍,并提出解决这一问题的意见,供有关部门参考。

这些断裂螺旋桨,使用时间不到三年,有的尚未交付使用,在舰船试航中就发生了断裂。一个大型螺旋桨,价值几十万元,加之毛坯加工困难,生产周期长,达不到设计要求的使用时间,就发生了断裂,不仅在经济上造成很大损失,而且严重的影响了战备训练和海上的运输安全。因此,必须抓紧时间,尽快采取措施,解决这个问题。现将断裂原因分析及解剖试验结果介绍如下:

(一)断桨的断口情况及其断裂原因分析

1. 1 号舰右桨及 2 号舰左桨

桨的设计数据

直径 D : 3.64 米;

叶数 Z : 3 叶;

重量 G : 7.3 吨;

旋转方向: 左、右各一个。

螺距 H : 4.91 米;

螺距比 H/D : 1.348;

盘面比 AZ/AD : 1.0;

1 号舰右桨是 1970 年 5 月生产的,毛坯加工时发现,一叶片导边部位有裂纹,铲除后,发现内部有夹渣。用磷青铜进行了补焊。1973 年装舰试航中,该叶片导边断掉,断口长 500 毫米,厚 40 毫米。

从断口处看出,金属内部有夹渣和气孔。这是由于铸型潮湿,当液体金属进入型腔后,形成大量气体和二次氧化渣造成的。再加上表面用磷青铜进行了焊补,强度很低,叶片导边受力后,发生了断裂。

为修补该桨,又重新翻铸一块导边,用 ZHA167-5-2-2 铸造焊芯,采取氩弧焊方法进行了焊补。补好后,1975 年 5 月装到 2 号舰上,同年 7 月开始试航。共航行 200 多小时。1976 年 1 月进行高速和拖载试航时,突然舰身振动,航行不正常,派潜水员下水检查螺旋桨,发现右桨一个叶片导边断掉,左桨导边有穿透性裂纹,试航无法进行,单桨驶回厂

换桨。

经检查,右桨原来用氩弧焊修补的叶片没有折断,只是在叶根夹渣没有铲除干净和未焊透的地方形成了长340毫米的裂纹和孔洞,如图1-1所示。

另一个叶片导边断掉,断口长920毫米,如图1-2所示。

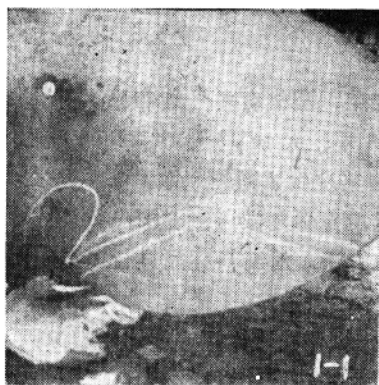


图1-1 叶片导边补焊位置

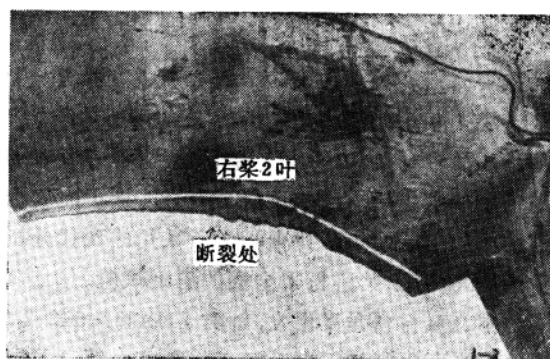


图1-2 右桨另一叶片断裂情况

从断口观察,断面呈凸凹不平,金属内部有大量的夹杂和气孔。其断裂原因与前一个叶片相同,均因铸造缺陷削弱了金属强度,在外加应力作用下,发生了断裂。

从断口处取样做金相分析,金相组织中有大量的黑色不连续的网状物。经电子探针定性分析发现,这些黑色不连续网状物,是含铁量超过60%的富铁夹杂物。如图1-3所示。这些夹杂物大大削弱了材质的机械性能。

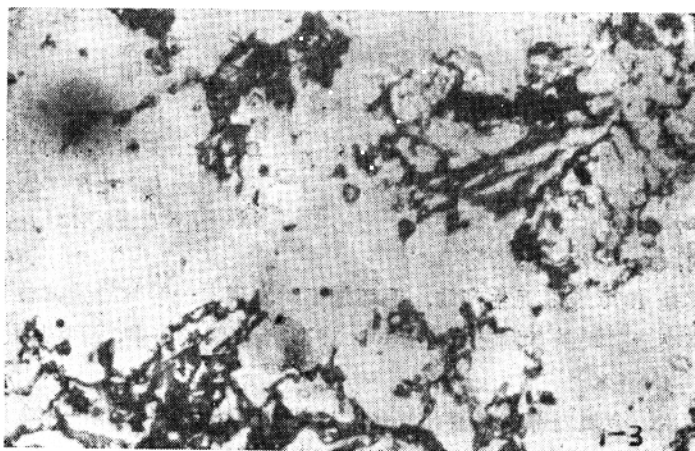


图1-3 含有大量富铁夹杂的金相组织(未经浸蚀) $\times 200$

2号舰左桨是1975年初生产的,5月装舰,7月开始试航。试航情况同右桨。经检查2号叶片导边0.7R处有一条170毫米长的穿透性裂纹,如图1-4所示。

该叶片因毛坯铸造缺陷,在压力面和吸力面上共21处被补焊过。其中最大的补焊面积为 158×40 毫米²,深70毫米。补焊方法采用ZHA167-5-2-2焊条电弧焊。导边处的裂纹

是因补焊质量较差，裂纹穿过导边边缘的补焊处热影响区和导边内部的补焊处形成的。



图1-4 左桨导边因补焊质量差形成的裂纹

2. 大庆 31 号船断桨

桨的设计数据

直径 D : 4.6 米;
螺距比 H/D : 0.788;
叶数 Z : 4;
旋转方向: 右;
转数 N : 165 转/分;

螺距 H : 3.58 米;
盘面比 AZ/AD : 0.62;
重量 G : 9.7 吨;
主机功率 PHP: 9000 马力;
航速 V : 16 节。

该桨是 1973 年 5 月生产的。装船后，经过两年的使用，于 1975 年 8 月，航行在南京至秦皇岛的途中，发生了断裂事故。经进船坞检查发现，螺旋桨 3 号叶片从 0.48 R 处折断掉入海中，如图 1-5 所示。其余三个叶片导边及叶梢均有长短不同的裂纹。

从宏观断口观察看出，在导边边缘有腐蚀痕迹。这是由于裂纹产生后，被海水冲刷腐蚀造成的。从裂纹区向里，可看到晶粒粗大、表面粗糙的裂纹扩展区，如图 1-6 所示。

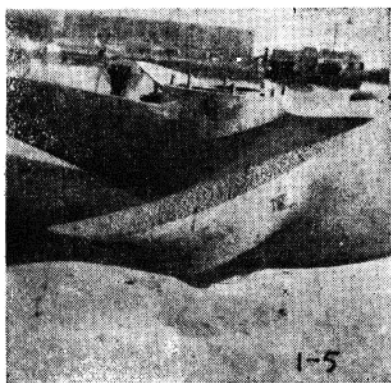


图1-5 大庆31号船断桨



图1-6 裂源区及裂纹扩展区的宏观断口

断口的末端——随边，是断口的最后撕裂区，从这里可以看到明显的放射状花样——脆性撕裂断口。图 1-7 为该桨整个断口的示意图。

从宏观断口上看出，裂纹区由于应力腐蚀开裂后，在海水的不断冲刷作用下，显得比

较光滑。向里的裂纹扩展区，由于金属的晶粒粗大，可以看到一个个方向不同的晶面，这是应力腐蚀开裂的特征。裂纹的最后撕裂区，由于外加载荷大于剩余部分所能承受的力量，裂纹急速扩展，造成脆性断裂，断口呈放射状线条。从断口横断面观察，可以看到是穿晶断裂，如图 1-8 所示。

对裂源区作二次复型电子显微镜观察，可以看到脆性晶间断裂形态。如图 1-9、图 1-10 所示。



图1-7 大庆31号船断桨的断口形态

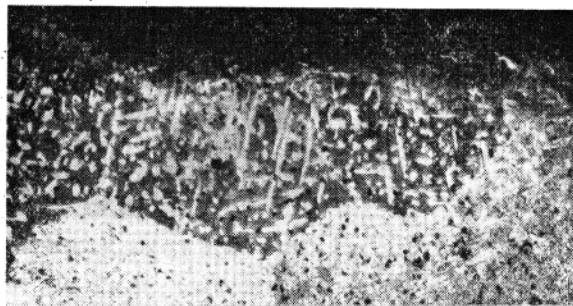


图1-8 随边撕裂区的穿晶断裂形态 ×40

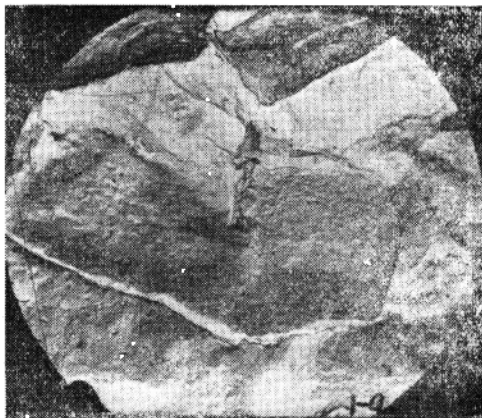
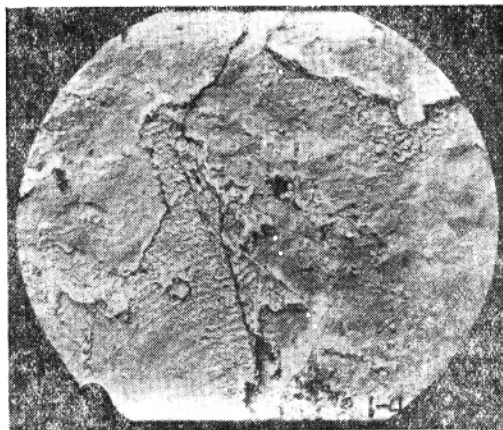


图1-9 晶间断裂二次复型电子显微镜照片 ×2500

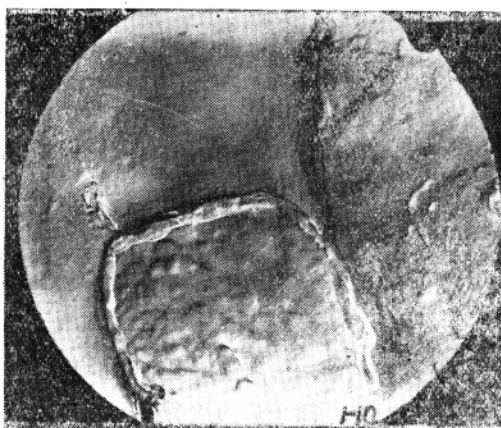
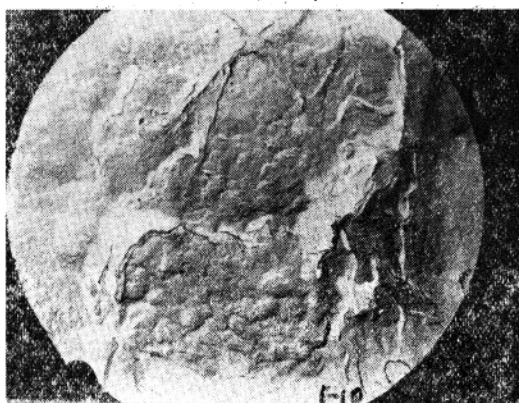
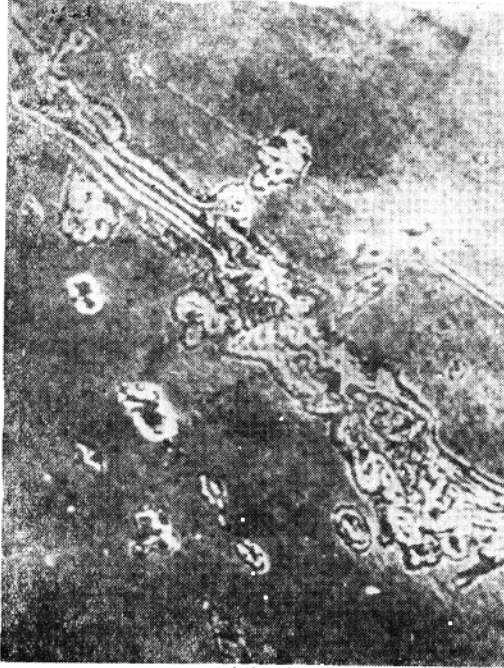


图1-10 脆性穿晶断裂二次复型电子显微镜照片 ×2500

从裂纹扩展区进行复型作电镜观察，发现还有塑性穿晶断裂形态，见图 1-10。

通过对两个区域的电子显微镜观察和比较确定，该断口是属于以脆性为主的脆性-韧性混合断口。

对裂纹前端和边缘的脱锌腐蚀部位，取样作电子探针观察，发现其脱锌形式呈“塞状”腐蚀。这种“塞状”脱锌腐蚀，比一般黄铜的层状腐蚀具有更大的危险性，因为它深入基体内部，应力腐蚀开裂就是沿着这些脱成分腐蚀区开始，如图 1-11 所示。对该区域进行了探针半定量分析，紫红色“塞状”条带中的铜含量为 92.4%，锌含量为 2%。



二次电子相



Zn的K α X射线相

图1-11 铝黄铜“塞状”脱锌腐蚀电子探针照片 $\times 330$

通过金相组织观察，发现叶片导边的边缘是单一 β 相。 β 相是体心立方结构的脆性组织，其强度高而塑性差，在海水中容易产生脱锌腐蚀和应力腐蚀开裂，如图 1-12 所示。断裂浆的裂纹，首先沿着 β 相的晶界开始，在外加应力的不断作用下，裂纹逐渐向基体内部穿晶延伸。随着叶片厚度的增加，冷却速度缓慢，逐渐有细小的 α 相析出，如图 1-13 所示。但细小的 α 相也阻止不住裂纹的扩展，最后造成整个叶片断裂。这是应力腐蚀开裂导致的最后结果。

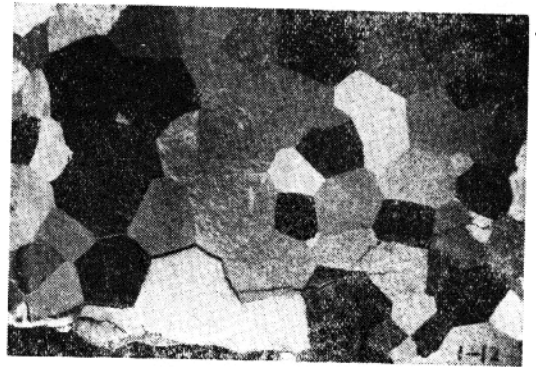


图1-12 导边边缘单一 β 相及沿晶应力腐蚀开裂 $\times 10$

该浆叶片边缘之所以出现单一 β 相，从附表 1 中看出，该浆的化学成份不合格，铜含量比规定成份低 0.38%，铁含量低 0.32%。锌当量偏高(46%)，造成冷却速度较快的叶片

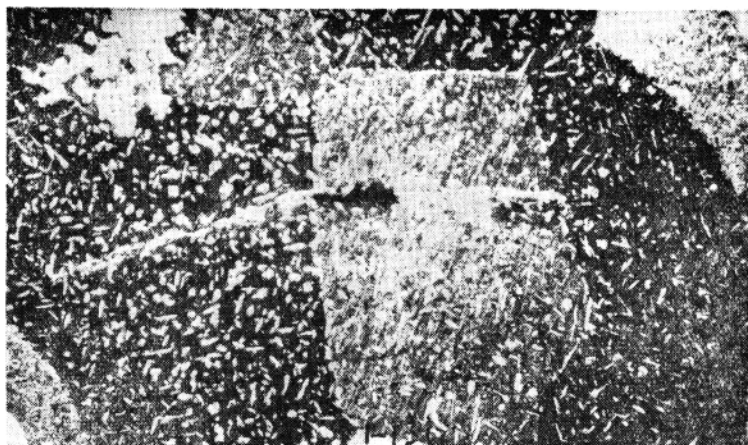
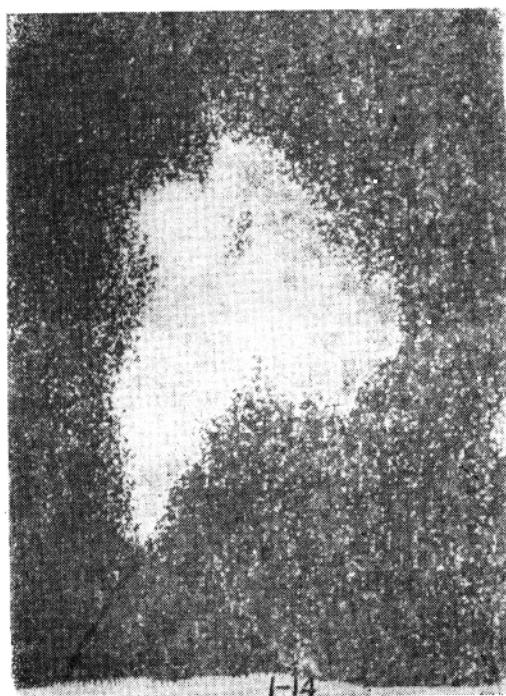
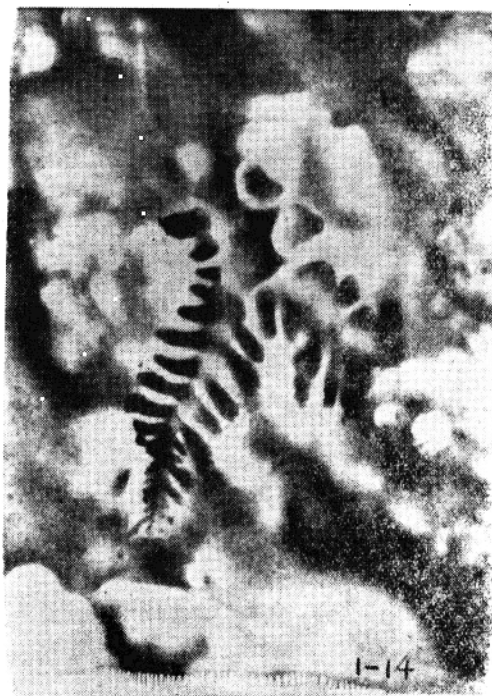


图1-13 从导边边缘向里逐渐有 α 相析出，裂纹穿晶延伸 $\times 40$

边缘出现单一 β 相。铁是该合金中细化晶粒，强化基体的主要元素。由于含量低，并有铁的富集或偏析，如图1-14所示，因此造成合金晶粒粗大。



铁的二次电子相



铁的 $K\alpha$ X射线相

图1-14 合金中铁的富集电子探针照片 $\times 2000$

铁含量低，并产生富集，是由于熔化温度低(1040°C)和浇注温度低，过冷度小造成的。由于以上原因，造成了该浆的机械性能不合格，如附表1中所示，延伸率只有10.5%，冷弯角 20° 就开裂。这就加速了该浆的破断过程。因此，该浆的使用时间仅仅两年，就完

全破断。

对于 ZHA167-5-2-2 合金，一般应使其铝、锌含量控制在中等成份，才能保证组织中 α 相占整个基体的 20~30%，在这种成份下，合金具有最好的使用性能。

3. 大庆 45 号及大庆 46 号船断桨

该两只螺旋桨的设计数据和大庆 31 号船桨相同。两桨的化学成份和机械性能如附表 1 所示，都合格，断口形态及断裂位置均相似，如图 1-15 所示。

大庆 45 号船桨是 1974 年 2 月开始使用。1975 年 2 月当该船航行到营山岛附近时，发生了突然的折断事故，使用时间只有 1 年，断掉落入海中的 2 号叶片，断裂位置在 $0.4 R$ 处，断口总长 1.4 米，最大厚度 120 毫米。

大庆 46 号船桨是 1973 年 11 月装船使用，1975 年 3 月在航行中，3 号叶片突然折断。使用时间为 1 年零 4 个月。断裂位置在 $0.38 R$ 处，断口形态与大庆 45 号船断桨相似。图 1-16 为断桨的断口全貌。

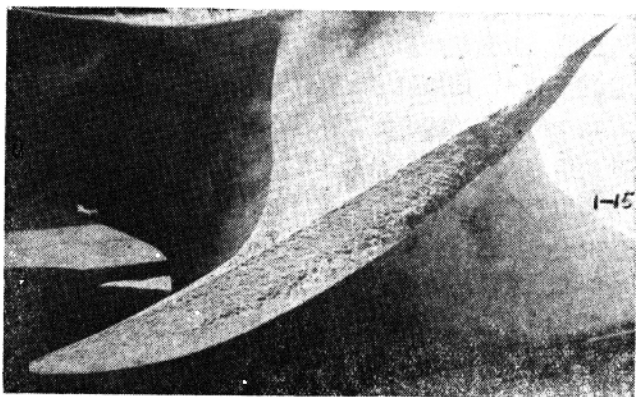


图1-15 大庆46号船断桨形态

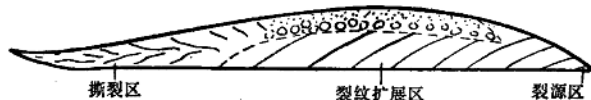


图1-16 大庆46号船桨的断口形态

从断口形态上看出，在随边一端有明显的“人”字形花样。“人”字形花样是材料发生脆性断裂的显著特征。“人”字开口方向为裂纹发展方向。沿着“人”字的指向观察断口中间部分，发现该部位有隐约可见的“贝壳”状条纹。“贝壳”状条纹的存在，是材料疲劳断裂的宏观特征。因此，该桨初步可以认为是属于疲劳断裂。这些“贝壳”状条纹，好像是一些同心圆弧，同心圆弧的圆心通常认为是疲劳断裂的裂纹源。该断口“贝壳”状条纹的圆心指向导边。因此，该桨断口的疲劳源在导边。

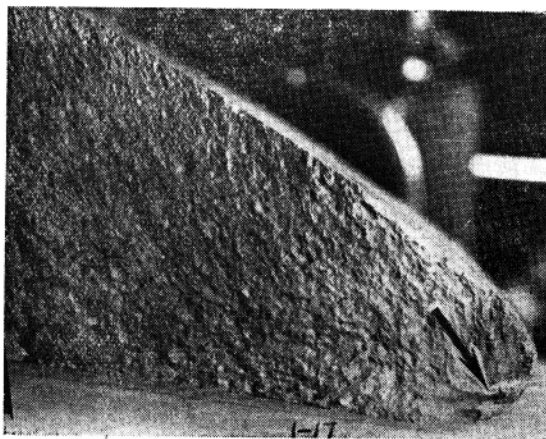


图1-17 具有冷隔缺陷的裂源区

从断口的宏观形态，可以将整个断口分为三个区域：即裂源区、疲劳扩展区和最后撕裂区。

叶片导边裂源区，断口表面较光滑平坦。经观察，在该区域有明显的铸造缺陷——冷隔。两个断桨的断裂源均如此，如图 1-17 所示。

在裂纹附近有紫红色的脱锌腐蚀痕迹。螺旋桨叶片上,一旦有裂纹产生,在腐蚀介质中,裂纹的尖部就会成为电化学腐蚀的阳极,裂纹的旁边沉积有腐蚀产物,成为阴极。在这种电化学腐蚀作用下,加速了裂纹的扩展。

在裂源区,除了冷隔之外,还发现有铸造缩松,如图 1-18 所示。缩松处在叶片厚度为110 毫米,距推力面 10 毫米的位置。

上述铸造缺陷,是处在叶片受力最大部位,成为桨叶断裂的裂纹源。在正常的情况下,即螺旋桨无铸造缺陷或不存在有损螺旋桨强度的焊补时,螺旋桨的使用寿命应该是和船龄一致的(对大型民用船舶螺旋桨,在不受意外损伤的情况下)。根据有关资料统计,一个黄铜螺旋桨,可使用 13 年左右;一个青铜螺旋桨,可使用 17 年左右。上述两桨,属于成分和性能都合格的高强度 铝黄铜 螺旋桨。

由于在桨叶的 $0.38R$ 和 $0.4R$ 处导边,分别存在有冷隔裂纹,导致了使该两桨的使用时间只有一年左右,就发生了破断,使用寿命不及一个合格螺旋桨寿命的十分之一。

从一般的疲劳试验可知,疲劳断裂分三个阶段,即疲劳源的形成、疲劳扩展过程和最后的脆性瞬时断裂。前两个阶段占整个疲劳寿命的 90% 以上的时间,而疲劳源的形成,对于不同的材料在不同的腐蚀介质中,其形成的时间是不同的,这需要进一步研究腐蚀疲劳核心和疲劳源的形成机理及其测试方法,才能测定出各种螺旋桨材料疲劳源的形成时间,求出螺旋桨的总寿命。

目前,用断裂力学的方法可以测出各种螺旋桨材料在腐蚀介质中的裂纹扩展速率,计算出螺旋桨在有预裂纹存在情况下的疲劳寿命,也称为螺旋桨的剩余寿命。

对裂纹源作二次复型电子显微镜观察,发现该处为穿晶断裂,断裂面上具有韧性“微坑”并有腐蚀痕迹。如图 1-19 所示。

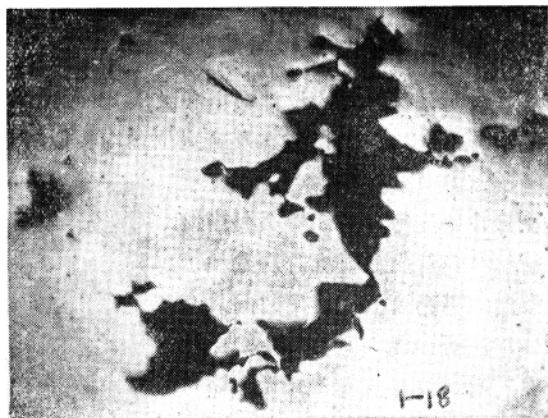


图1-18 裂源区的铸造缩松 ×10

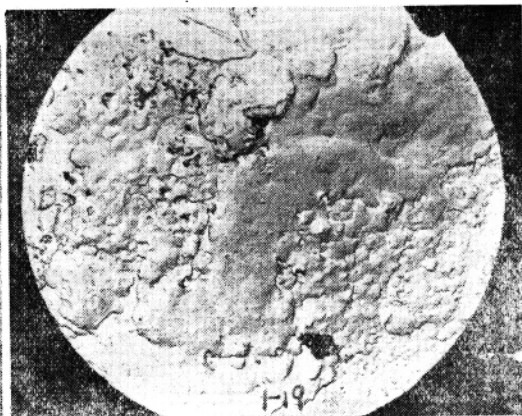
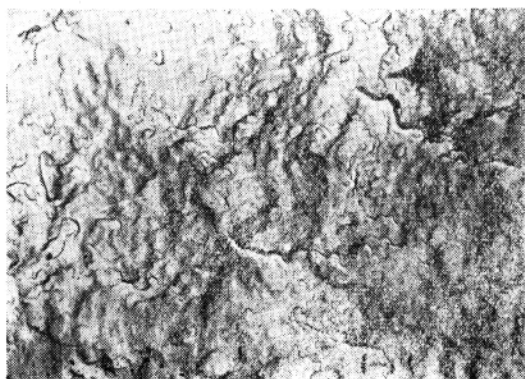


图1-19 裂纹源作二次复型穿晶韧性断裂 ×5000

在裂纹扩展区，从宏观断口上可以看出，以裂纹源为中心逐渐扩展开的“贝壳”状条纹，并伴有腐蚀痕迹。疲劳辉纹占整个断口面积的五分之三。用电子探针扫描观察，可以看到明显的疲劳线和腐蚀痕迹。如图 1-20 所示。

对该区进行二次复型电子显微镜观察，发现该区还具有明显的辉纹条带。这种辉纹条带是疲劳断口的显微特征，如图 1-21 所示。

这种晶间面和疲劳条带的同时出现，是腐蚀疲劳显微特征。这和宏观看到的断口在腐蚀介质中形成的“贝壳”条纹特征是一致的。因此，该叶片的断裂属于腐蚀疲劳断裂。

叶片的随边，是断口的最后撕裂区，宏观上具有“人”字花样脆性断口。这是由于裂纹不断扩展，有效断面逐渐减小，当裂纹发展到临界值时，叶片发生瞬时撕裂。断口形态如图 1-22 所示。

对撕裂区作电子探针扫描观察，发现断口具有“河流”花样解理断裂特征，如图 1-23 所示。

解理断裂是疲劳断裂的最后破坏形式，裂纹的传播速度极快。这种破坏，无论在航空或航海发展史上，都曾给人类造成了极大的危害，这是一种灾难性的破坏。

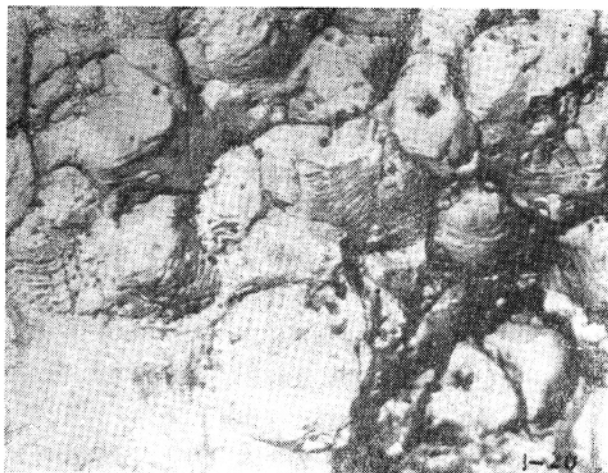


图1-20 晶间断裂和腐蚀痕迹 ×500

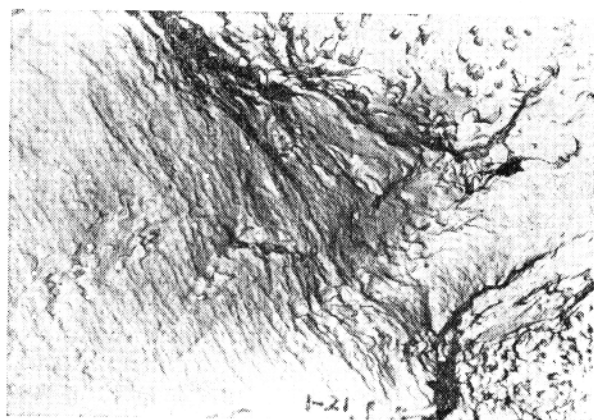


图1-21 疲劳辉纹特征 ×5000

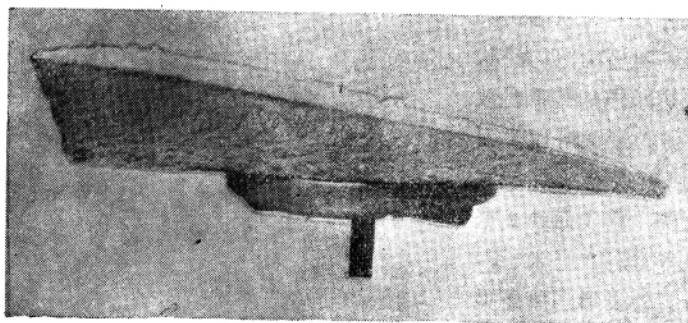


图1-22 随边撕裂区，脆性断口

除此之外,在断口的最后撕裂区还发现有明显的撕裂微坑,这可能起源于位错堆积处或 α 相上。这表明该材料的韧性较好。这从大庆46号船断桨的最后撕裂区有较大的塑性变形和明显的纤维状结构上也可以看出。

综上所述,大庆45号和大庆46号船断桨,属于有预裂纹情况下的腐蚀疲劳断裂。预裂纹是由于铸造冷隔引起的。冷隔的位置分别在 $0.38R$ 和 $0.4R$ 处,它成为腐蚀疲劳断裂的裂纹源。其余三个未断叶片,经着色探伤检查,均未发现裂纹和铸造缺陷。因此,这三个叶片虽然也经过同样情况下的使用,都仍然保持完好无损。由此可以认为:在保证材料成分性能完全合格的基础上,还必须保证产品没有危及使用安全的铸造缺陷。

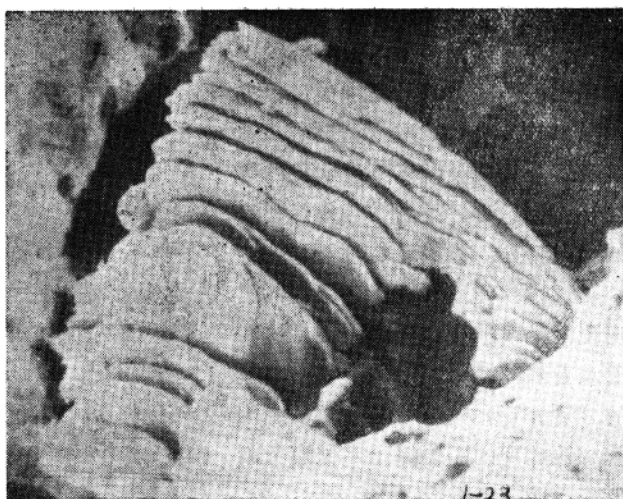


图1-23 断裂区的“河流”花样 $\times 500$

4. 大庆62号船断桨

桨的设计数据

直径 D : 5.57 米;
重量 G : 14.36 吨;
叶片数 Z : 4;
转数 N : 122 转/分;
主机功率PHP: 12500 马力;

螺距 H : 4.4088 米;
螺距比 H/D : 0.79;
盘面比 AZ/AD : 0.60;
航速: 15.30 节。

该桨为1975年4月出厂。1977年元月,正当该船满载快速航行在途中时,一个叶片突然断掉。使用时间只有一年零六个月。断裂位置在 $0.3R$ 处,如图1-24所示。

该桨的化学成分和机械性能如附表1所示,均合格。又从图1-25可见:断口中部有明显的“贝壳”状条纹,这说明该桨同样是属于腐蚀疲劳断裂。裂纹源位于桨叶压力面 $0.3R$ 处的最大厚度线上。在裂纹源处取样观察发现:离表面约2毫米处有一个3毫米宽,10毫米长,不规则的孔洞,其外表形态象是夹杂物被海水浸泡脱落后遗留下的,如图1-26所示。

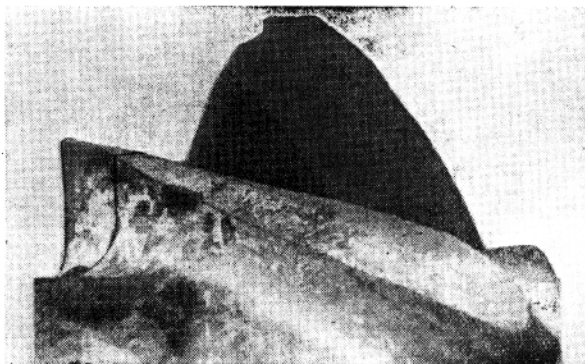


图1-24 大庆62号船桨断裂形态

夹杂物的存在，减弱了螺旋桨该部位材料的强度，夹杂物形成的孔洞，成为疲劳断裂的裂纹源。

在接近裂纹源的裂纹扩展区，可以看到辐射状台阶和线痕。从它们之间的距离可以判断，裂纹初期发展比较缓慢。早期开裂的裂纹表面，由于长期被海水浸泡，表面生成一种铁锈色。从铁锈色的深浅不同，可以看到不断向外扩展的腐蚀疲劳条纹。这些条纹愈接近最后撕裂区，铁锈色愈浅，说明裂纹生成的愈晚。

同前几个桨的断裂情况一样，由于裂纹不断扩展，叶片有效截面不断减小，最后承受不了外加载荷的作用而快速破断。从最后撕裂区同样可以看到“人”字形花样脆性断口。

综上所述，该桨和大庆 45 号，大庆 46 号船断桨一样，属于有预裂纹存在下的腐蚀疲劳断裂。

在该桨的另一个叶片的 $0.3R$ 处压力面最大厚度线上，有 140 毫米长的两条裂纹。取下后者沿裂纹分开，距表面 5~10 毫米处，有 5 毫米长，3 毫米宽的两个孔洞。这是该叶片即将断裂的初期形态。

由此进一步证明，压力面受力最大部位的铸造缺陷，是造成这类螺旋桨早期腐蚀疲劳断裂的主要原因。

对大庆 62 号船断桨的寿命估算：

为了验证大庆 62 号断桨的使用寿命，测定了 ZHA167-5-2-2 材料的裂纹扩展速率。试验采用 PW3-10 型程序控制高频万能疲劳试验机。用三支点弯曲试样(20×40×190 毫米)，支点最大跨距是 160 毫米。试验前在试样上用钼丝切割 0.1 毫米宽，3 毫米深的缺口，试样成分和机械性能见下表。

化 学 成 分 (%)					机 械 性 能					
Cu	Mn	Al	Fe	Zn	σ_b (公斤/毫米 ²)	δ_5 (%)	$\sigma_{0.2}$ (公斤/毫米 ²)	HB (公斤/毫米 ²)	σ_k (公斤·米/厘米 ²)	E (公斤/毫米 ²)
65.27	2.18	4.83	2.08	余量	68.75	15.4	35.0	187	5.5	1.01×10^4

试验在室温下空气中进行，载荷为正弦波形。最大载荷 $P_{max}=1500$ 公斤，最小载荷 $P_{min}=300$ 公斤。试验过程保持载荷不变，频率为 140 次/秒。裂纹扩展量，用两台读数显

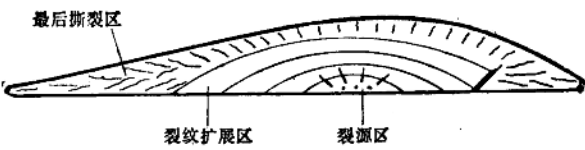


图1-25 大庆62号船断桨断口区域分布情况

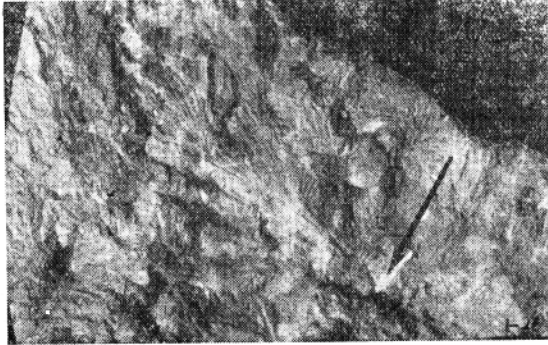


图1-26 裂纹源处铸造缺陷宏观形态

显微镜在试样两个表面直接读出。

裂纹扩展速率按下式整理：

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

式中 a —— 裂纹长度；

N —— 循环次数；

ΔK —— 应力强度因子幅度；

C 、 m —— 裂纹传播的材料常数。

将 (1) 式取对数：

$$\lg da/dN = \lg C + m \lg(\Delta K) \quad (2)$$

实测数组 $(\Delta K_i, (da/dN)_i)$ 数据，在双对数坐标纸上作图，如图 1-27 所示。

根据 (2) 式可求出 C 和 m 的数值，并用最小二乘法校验。试验测得：

$$da/dN = 1.2 \times 10^{-9} (\Delta K)^{2.35} \quad (3)$$

桨叶上的铸造缺陷位于推力面 $0.3R$ 最大厚度处，实测断口的初始裂纹长 10 毫米，宽 5 毫米。断裂时，疲劳扩展的最终尺寸为：长 900 毫米，宽 140 毫米。其受力状态可以认为在有限板上存在半椭圆形的表面裂纹，受到弯曲应力，则 ΔK 的表达式为：

$$\Delta K = m_B \cdot \Delta \sigma \sqrt{\pi \frac{a}{Q}} \quad (4)$$

式中 m_B —— 系数；

$\Delta \sigma$ —— 交变应力幅度；

Q —— 裂纹形状校正系数。

$$Q = \Phi^2 - 0.212 (\Delta \sigma / \sigma_{0.2})^2 \quad (5)$$

$$\Phi = \int_0^{\pi/2} [\sin \phi + (a/l)^2 \cos \phi]^{1/2} d\phi \quad (6)$$

式中 $\sigma_{0.2}$ —— 屈服强度；

ϕ —— 椭圆积分。

将 (1) 式积分得：

$$N = \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C(\Delta K)^m} da \quad (7)$$

式中 a_i —— 初始裂纹深度(毫米)；

a_f —— 瞬时断裂前的临界裂纹深度(毫米)。

将 (4) 式代入 (7) 式得：

$$N = \frac{2}{(m-2) \cdot C (m_B \cdot \Delta \sigma \sqrt{\pi/Q})^m} \left(\frac{1}{a_i^{\frac{m-2}{2}}} - \frac{1}{a_f^{\frac{m-2}{2}}} \right) \quad (8)$$

试验测得： $C = 1.2 \times 10^{-9}$ ， $m = 2.35$ ，螺旋桨实际受力状态，交变应力幅度不大于

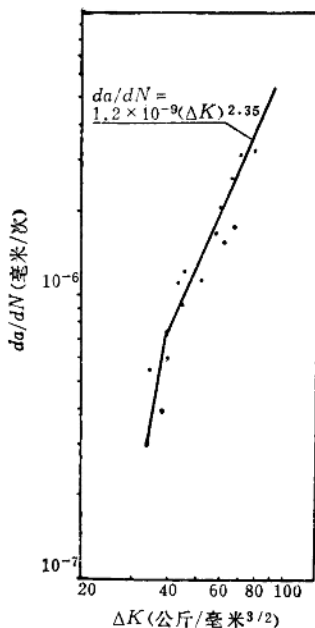


图1-27 ZHA167-5-2-2材料疲劳裂纹扩展速率曲线