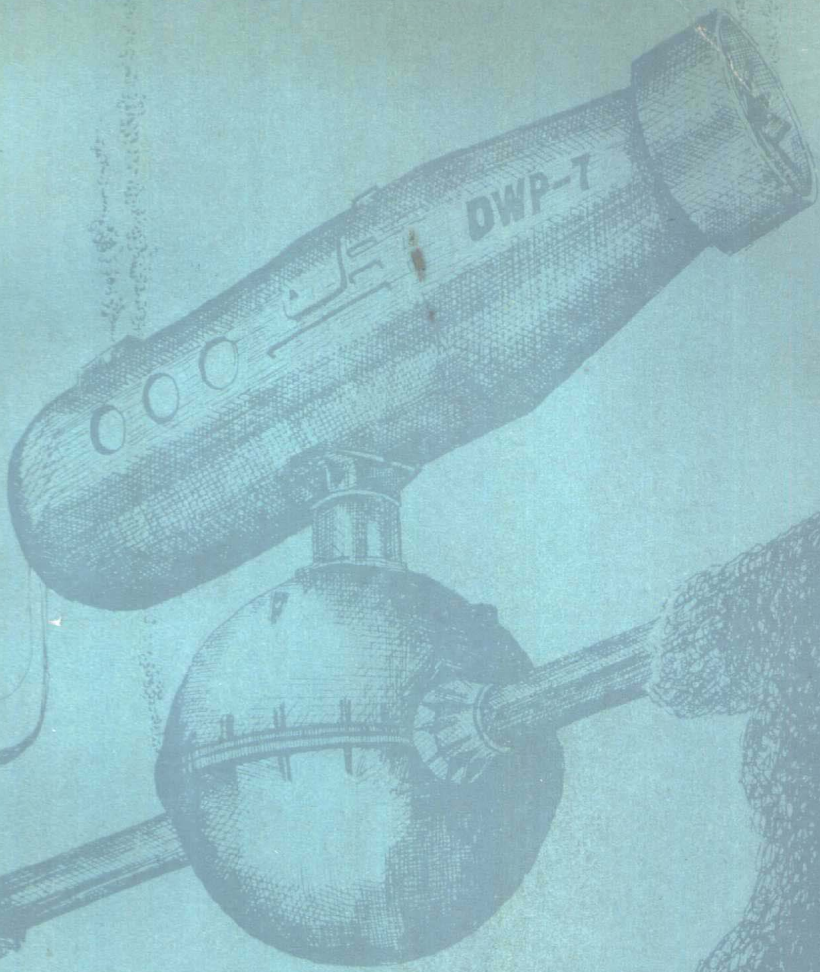


293



0755

近海设施的水下焊接

英国焊接协会辑

近海设施的水下焊接

英国焊接协会辑

郭照人译

中国建筑工业出版社

本书是英国焊接协会1976年度编辑的水下焊接工艺的论文集。书中对国外近年取得进展的深水干式焊接设备和焊接工艺做了全面的介绍和讨论，其中也叙述了饱和潜水技术的应用及湿式焊接技术等，并提出了有关水下焊接发展前景的种种设想。

UNDERWATER WELDING
FOR OFFSHORE INSTALLATIONS
THE WELDING INSTITUTE
Abington Hall Abington Cambridge CB16 AL
1 9 7 7

* * *

近海设施的水下焊接

郭照人 译

*

中国建筑工业出版社出版（北京西郊百万庄）
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
中国建筑工业出版社印刷厂印刷（北京阜外南礼士路）

*

开本：850×1168毫米 $\frac{1}{32}$ 印张：5 $\frac{1}{8}$ 字数：136 千字
1981年4月第一版 1981年4月第一次印刷
印数：1—1,530册 定价：0.96元
统一书号：15040·4021

前 言

水下焊接，尤其是生产平台、管线等近海设施的建造、修理日益增长的需求，突出地显示着建立其专门的技术与工艺以供商业应用的研究与发展的紧迫性。

这些设施的构件的制造，如果是在车间内或陆地现场中，无疑地，只要严格执行焊接工艺规程是足以保证焊接接头的整体性与操作的安全性的；但是，如果焊接是在水下进行的，那么，一旦出了事故，就可能是灾难性的。正因为如此，世界各国有关的管理人员、制造行业与用户正普遍要求开展这一领域内的问题与发展的广泛讨论。

有鉴于此，1976年焊接协会、英国能源部及水下技术学会联合举办了一次国际讨论会，对英国北海采油设施水下焊接的现状进行了评论，并提出了有关水下焊接发展前景的种种设想。由于该主题带来的巨大兴趣与动人的前景，我们认为有必要使讨论会上所提出的资料得以更广泛地加以利用。本书就作为水下焊接技术与实践的关于目前发展水平的重要评论与读者见面。

出版象本书这样的焊接技术专门领域方面的研究著作是焊接协会的既定方针；这里的全部论文是着眼未来的发展而选入的。对于我们工作上的任何建议，始终是我们所期待与欢迎的。

联系负责人

J.L. 桑德尔斯

目 录

前 言

一、为什么要进行水下焊接	H. C. 科顿 (1)
二、近海工程材料水下焊接的潜可焊性问题	P. H. M. 哈特 (7)
三、手工电弧焊条水下湿式焊接法	C. E. 格拉布斯, O. W. 塞斯 (15)
四、干式高压半自动水下焊接	D. J. 利恩霍尔, D. E. 吉布森, H. J. R. 贝弗里奇 (47)
五、干式水下操作室焊接	A. V. 高迪恩诺, D. 格罗夫斯 (65)
六、焊接协会关于水下焊接的研究	A. W. 斯托克 (80)
七、有关深水焊接的问题与设想	R. 古德费洛 (95)
八、日本水下焊接的发展概况	M. 浜崎, M. 渡边 (107)
九、电弧等离子体研究用的深水模拟器	A. R. 莫斯, W. J. 扬 (125)
十、水下切割技术述评	A. W. 斯托克 (137)
参考资料	(156)

一、为什么要进行水下焊接

H.C.科顿

十年前，水下焊接的发展水平，不妨说有点像下面所描述的情景：一名潜水员在仅仅是几英尺深的水里拚死地修补一条沉船的漏洞，……凑凑合合地把水排走，勉勉强强地使沉船再度漂浮起来。这样的技术水平，对于修理损坏或锈蚀了的管桩或许是够用了，但终究不能充分可靠地用于正规结构物的关键性的接头。或许国际上有一两支强大的海军早已掌握了关于海底焊接的宝贵秘密，但对于绝大多数别的国家来说，那时候，别说尚未解决水下焊接的各种问题，有的甚至是否需要水下焊接这一问题都还不曾正式提出过。然而，时至今日，这个问题终究是被突出地提到日程上来了。

五年前，谁曾想过石油输出国组织提高油价的措施，竟会引致人们对于海底焊接观念上如此重大的突破。原油价格的突然上涨把从未开采过的地区的产油的可能性列入了经济利害关系举足轻重的范围；削减以至切断石油供应的威胁又加强了拥有自己稳定的石油供应的迫切性。深海，一向被认为是无法采油因而不久前连碰都没碰过它一下的特殊的区域，就因此被突然地提高到空前显要的地位了。现在大家已认识到，开发深层海域并不像预料的那样是不能有所作为的。由此，便开始了一定程度的冒险，进行了一系列的大胆的研究与试验。

又过去了两、三年，在我新近参加的一次会议上，作业深度在360米上下的、拥有高度结构完整性的熔敷焊接能力已得到了

确认。在这样大深度下的焊接无疑是要产生一些难题的，即便如此，但毕竟已有了一定的根据可以认为任何这方面的难题都是可以克服的。

到目前为止，种种水下焊接的装置，一言以蔽之，都仅仅是设置于四周有水的环境里的一个电弧。几乎在每一项具体的应用中，只需要把一个电弧挪到某种高压室内，在干燥的环境中运用它就行了，而根本用不着什么系统的专门的学问。这种高压室一般是很小的，也有的是相当大的，可以容纳几名焊工在高压室内轮班作业，以便潜水焊工得以就地休整。以上所述，在本书的其余文章中还将作出更详尽的论述。另外，本书还将介绍在湿的或半湿的条件下采用现代化的技术实践所达到的种种成就。

诚然，不能认为有了高压室就一揽子地解决了修理工作的全部问题了。事实上，现有的高压室只能用于诸如管线修理或管与管间的逐段连接，而未见用于深水中垂直位置的管状部件的焊接或单独用于复杂的网状结点的连接。好在目前近海生产平台所见的损坏都仅限于溅泼区——即空气与海水接触面附近的地带。但是也因为在水深超过90米处，生产平台与大型管线的有关的操作经验还很有限，所以说，这类设备潜在的修理上的需求，仍然是不容忽视的问题。

水下焊接，尤其是在恶浪滔滔的海洋溅泼区与大深度区域，之所以可能实现，与其它技术上的革新创造一样，始终要求有关的科技研究人员运用其机敏与匠心，在相当广泛的范围内大量地攻克种种难关，以获取累累的成果。水下机械操作的新方法，复杂的技术装备，无损探伤试验设备及摄象装置的采用等等，也都成为深水作业的现实课题。现在，已能使水下干式焊接看起来就像是人们早已熟悉了陆上的焊接一样。在事故监测员看来，一个人在位于300米深度的高压操作室内进行焊接一定是轻而易举的。但是，事实远非如此，这也许是潜水焊工在外表上显得比较轻松自如，若论他们技艺上的熟练程度，几乎人人都够得上技师水平。但是由于高压室处于十分复杂因而并不那么稳定的环境里，制成

的焊缝必然地会比在正常气压环境下有更多的缺陷。虽然是预计到了的,因为水头的冲击自然要给高压室施加外、而实际遇到的问题却比预料的还要复杂得多。当高压室内的 P , 比如为 5、10、20 巴 (0.1 兆帕) 或以上时,不仅会使焊接操作本身复杂化,而且还会对电弧区中常见的许多化学、物理的变化过程如氧化、蒸发、热效应及电离化等也产生明显的影响,而它们又从不同的方面在不同程度上制约着焊接接头的质量与性能。

这些问题在本书中均有详细的讨论。本文仅指出一点:当前,深度达 150 米上下的地带,在相应的工作条件下,已经能制成足可付诸实用的焊件。肯定地,我们可以预期由于知识、技术、工艺上的日新月异的进步,即使在更大的深度下,也能制成优质的焊件。

修 理 与 检 验

钻井、生产平台、喷油口及其它海上设备,都是经受了严格的检查才交付使用的。在经过一定的使用期以后,就会发现有一些必须及时修理的损伤。在海水溅泼区,由于设计与结构上局部错误的影响可以因波动力的冲击而扩大,特别是构件的表面还往往因为海底生长物孳生,而加大了对于海浪的阻力。在深度更大的地带,因风暴、波动力及潮汐的影响比溅泼区要小得多,所以与溅泼区比较起来,焊接上出现的问题大不相同。在溅泼区所出现的损伤,可以用机械联固手段如螺栓、铆钉、夹板以至混凝土来修理,但用焊接方法来修理则更令人感兴趣,因为它只需在结构物原有的条件下进行修理。

常见的办法是用水箱把位于溅泼区的损伤部分与风暴、海浪等隔离开来,以便进行常规的检查与焊接修理。使用高压操作室来进行焊接便是这一传统技术实践的延续与推广。

日常的修理工作大多见于浅海或海水溅泼区。在 30 米深度以内,多数有关潜水与焊接的问题,已获解决。更大深度区域内出

现的损伤，比如是由海面掉下几十吨重的管桩之类的构件或由潮汐、拖网板等外力及锈蚀等引起的损伤，是很难避免的。因此，对于深海，随深度层次而剧增的作业费用以及各类抢修应急的手段是不容忽视而应当有所准备的。

海底新建设

水下焊接当然不仅仅限于修理作业。有的已在压强为15巴左右的高压操作室内用焊接作业来连接设置于海底的管线、立管以至管系。以往对海底的管线等总是用螺栓、法兰盘来联固或把管端提升到海面上来焊接。无论采用哪种连接方式，完成一项连接总得化费7~20天的时间，当然确切的工时须看具体采用的连接方式。此外，完成这么一项连接，费用也是相当高昂的。

大深度的海底焊接试验取得了一定的成功以后人们就用水下焊接来连接成排的管线与立管。随着石油勘探扩展到海洋的更深的层次，使用海底井源也越来越普遍。这类设备自然也是很复杂的。还可能因为从海面跌落什么笨重的部件而引起意外的损伤。因而水下焊接就将成为处理这类事件的不可缺少的手段。

焊接的取舍

焊接，由于它方便、经济，常被用作建造与修理的手段。但不能认为在大气中应用是相当理想的一些准则，必然地，也完全适用于海底。

选取水下焊接作为修理方式是可行的。尤其是当管道的损伤牵涉到管道的夹圈或者提升距离过长而不适于传统的海面焊接时，在海底修理中可以采用像潜水帽一样巧妙的密封装置。此时，评定方法的优劣还要看作业的规格、所需的工时、设备利用率及成本。若先不计成本过高等极端情形，当修理需要在海面上进行时，则海底管线的提升、修理、再沉降等步骤就是关键的。海面

修理以往是相当流行的，把它用于海底管线的斜接、矫直已能达到相当高的质量标准。

海底焊接虽然比海面焊接需要更高的成本，但有时却是非它不可的。比如，管线在提升与沉降的过程中有一些管线由于互相挤压、碰撞而搅在一起。而且大直径的管线还得预先排水，否则会给修理作业设置障碍。对深度更大的海底可以不用提升的作法，而只需在法兰或别的机械联固手段中作出抉择。在这种场合下，联固与熔焊究竟选用哪一种更为适宜，还未最后解决。

展 望

到目前为止，有关的评论仅限于油气田的勘探与开采。其实，海床及海底地幔的矿藏也是很丰富的。把沉睡于海床的巨量的锰结核及其它矿瘤挖掘出来，肯定会给近海探索者以优厚的报酬。作家儒勒·凡尔纳所描述过的海底机械化的石油工业的试探性步骤足以表明，焊接技术是不可缺少的，其它海洋工业的发展，也只会为焊接技术提出更高的要求，例如，海底耕作、海底放牧等等，总之，还举不出有什么海洋活动是不需要水下焊接的。

在富有实践经验的焊接工程师的研究工作中，有很多水下焊接试验证实了：水下焊接也需要某些不大被人们所注意的传统准则来作指导，这些准则在大气中的正常环境里进行焊接已被公认是必须加以遵守的。例如，用湿式焊条在湿式环境中，焊接HY80、HY100之类的钢材，如不加以预热，要不是降低要求的话，那就注定是要失败的。

焊接协会提出的最初的试验结果以及政府主管这一工作的委员会都认为，对于质量上要求较高的焊件，采用湿式焊接是不适宜的。这个结论本身或许是意义重大的。但更要紧的是应当同时阐明，湿式焊接是有前途的，因为对于不同的应用有其不同的质量要求。必须弄清的是在什么样的范围内湿式焊接是相宜的。

焊接当然不是水下作业所需解决的唯一问题。事实上，基本

焊接作业还需要：清理，切割，坡口加工，夹具的设计，装配接头的其它固定装置，焊缝检验及焊后处理等等项目。总之，为了把水下焊接作为专门的工艺技术建立起来还需要作出大量精密的试验、严格的审定与大量后续的研究发展工作。

此外，还需要研究杂散电场对于潜水员健康上的影响以及比如电弧等离子体切割等所用的较大电流与较高的电压下的安全措施等。在深水中焊接，由于必需的防护服装及维持生命的装备，使手工焊接很不方便以致几乎无法实现。又因减压时间过长，因此，自动焊接及遥控手段就将是必不可少的了。这样复杂的技术手段当前在应用上虽然还不普遍。但是在能见度较低、工件的几何形状有利于实现机械化等条件下，自动化及遥控手段还是很令人感兴趣的。

大多数的水下焊接活动还只限于使用具有短电缆、低电压、压强为一巴的干式环境中常见的那些电源与操作方法。在深水焊接中，已有了把具有陡降外特性的电源应用于金属焊接的例子。长长的沉重的电缆，虽然笨拙，但没有它就不能使电弧的电源特性适应焊接方法。把压强只有一巴时的正常操作的有关焊接概念简单化地推广到四周有相当高的压强与遥远的深水场合，恐怕是相当危险的。因此，迫切需要弄清压强对焊接方法的影响及与之配套的电源类型。

或许会有崭新的焊接方法能很好地适应海底这一新奇的环境。即便是现有的新焊接法如电弧等离子体焊、摩擦焊与爆炸焊等，也还会有未被发现的或虽已发现但仍有待深入探讨的大量有价值的特性。

二、近海工程材料水下焊接 的潜可焊性问题

P. H. M. 哈特

引 言

本文的意图是考虑潜在可焊性问题，这些问题是在北海采油设施以及其它的近海设施的焊接实践中提出来的。这里不拟一般性地陈述常见的焊接工艺。而要讨论的是水下焊接的方法以及海水深度对可焊性的影响问题。

材 料

近海设施中可焊性的头一个问题就是材料问题。就目前所知，近海设施中所用的焊件都是钢制的。有人认为在海水溅泼区，甚至有蒙乃尔合金包层的，一般地也只需在两个钢制构件间进行水下焊接。

这里常用的钢材类型，可以按屈服强度由小到大地排成自低碳钢（270牛/毫米²）到高强度钢（690牛/毫米²）的一个长长的序列。尽管它们之间的化学特性可能有着显著的差别，如低碳钢 BS（英国标准）4360，43 D级（碳-锰-铌型）与高强度钢 A514（淬火与回火，铬-锰-钒-硼型），但从潜可焊性的角度来看，它们都属于同一类型。化学成份的改变会引起可焊性每一个方面的问

题在不同程度上的变化。因此，不必列出钢材的全部类型。因为材料类型的知识并不比化学组成成份方面的知识更重要。而后者才是制作合格焊件时确定需要采取某些预防措施的依据。北海采油设施所用的钢材大多是BS4360，50 D级（碳-锰-硅-钼型或碳-锰-硅-铝型）或与其相近的修正型，或API（美国石油学会标准）5L X65使用的新式控制轧制的含有碳-锰-硅-铬-钼-铝成份的钢或经过淬火与回火的含有碳-锰-硅-钼-铝成份的钢。

可 焊 性

在正常环境的压强、温度及气氛条件下的焊接与湿式的或水下操作室的焊接，在许多方面涉及同一类型的潜可焊性问题。这些潜在问题中，首先是在焊接过程中或刚焊完时，焊件产生裂纹的问题。例如，层状撕裂，在焊缝金属与热影响区内的氢致（冷）裂纹、凝缩（热）裂纹等；其次，是在使用期间产生裂纹的问题。例如，从焊缝及热影响区的缺陷部位产生的脆性断裂，而这些缺陷又是由不适当的韧度、应力腐蚀裂纹及疲劳裂纹引起的。

水下焊接的几个方面

在考虑水下焊接可能产生的牵涉到上述可焊性问题的潜在危险的某些变化以前，有必要简短地、定性地叙述一下在正常环境与在水下环境之间焊接的差别。湿式水下焊接与最现代化的水下操作室焊接都需要周围介质的压强略高于正常环境下焊接的压强，且这中间的压强差随着作业现场的深度而相应地加大。压强一增加对电弧特性便有直接的影响，这已在别的文章中作了论述；同时，根据热力学的基本规律还不可避免地影响着全部化学反应的动力学与平衡，这里指的是电弧弧柱及焊缝熔池的那些化学反应。而且它们确能影响碳与氧的含量水平。

在湿式焊接中，焊接冷却率显著地增加了，比在正常环境同

等条件下的焊接要增加得快得多。而且不能像正常环境下的焊接那样，只要改变热输入（或叫弧能）便可以大大地改变焊接冷却率；而在水下焊接中，热输入的改变并不能使焊接冷却率有多大的变化。此外，湿式焊接的特点还在于极大提高了电弧气氛中的氢氧水平（源自水的离子化），焊缝金属的氢氧水平也就远远地高于正常环境下焊接的相应水平，同时也高于热影响区的相应水平。下面逐项讨论上一节指出的可焊性的每个方面的情况。

氢 致 裂 纹

需要考虑水下焊接对氢致裂纹的特殊影响，也就是考虑引起氢致裂纹的那些支配因素。业已证实，氢致裂纹仅在下列诸条件同时实现时才有可能，这些条件是：

1. 充分数量的氢；
2. 充分水平的张应力；
3. 充分敏感的显微结构；
4. 约150℃以下的温度（敏感性较高的钢材温度稍高）。

下面顺序讨论水下焊接中上述诸因素的影响问题。

1. 氢水平

前已述及，在湿式焊接中，焊缝金属的氢水平可以显著地增加，因此，湿式环境中的水下焊接龟裂的危险也就随之显著地增加。有资料指出，根据有限的研究表明熔解型的手工金属电弧焊对降低实际氢水平可能有一定的作用，但要使氢水平确实低于正常环境下焊接的相应水平仍缺乏有效的办法。又在水下操作室焊接中，若其电弧的气体保护效率不高，则经潮湿的室气氛一污染仍会增加氢水平，从而也就超出正常环境下焊接的氢水平。同样地，若操作室的密封不严或熔解材料不那么洁净也会增加氢水平。

不过，即便是所有这些情况都不出现，由于局部加压导致的液态钢中氢溶解度的提高，焊缝中实际氢水平也会高于正常环境下的相应水平。基于这一理由，可以预料在正常环境下的焊接中，

任何潜在氢都不会转变为焊缝氢的场合，在水下焊接中都会增加焊缝中的氢。而在正常环境下气体保护裸焊丝焊接中，潜在氢与焊缝中实际氢之间的关系表明，有50%到100%的有效潜在氢成为焊缝中的氢。又在正常环境下使用焊剂-焊芯与带药皮焊条的手工金属焊条电弧焊，潜在氢有相当大的余量是起作用的，随着作业现场压强与水深的增加，它们就导致氢水平的增加。

2. 应力

有人认为，水下焊缝残余应力水平相当于正常环境下的焊缝的相应水平，在水下操作室焊接时的情况可能是这样的。但在湿式焊接中，局部淬火的影响可能改变残余应力的大小与分布，但尚未最后确定任何这类的变化范围。

3. 敏感的显微结构

一般地说，显微结构的硬度越大，氢致裂纹的敏感性也越大。冷却率的任何增加，通过温度范围的变化，会增加热影响区及焊缝的硬度，因而增加了龟裂的危险。在湿式焊缝内，冷却率的显著增加引起了硬度的增加，随之而来的是龟裂危险的增加。在高压室内也可能有冷却率的增加。但这严格地依赖于高压室的大小以及高压室沿焊缝延展的比例。电弧效率的变化即弧能消耗转化为电极板的热的比率，预计随着电弧效率变化的优劣程度将会影响到冷却率。

4. 温度

许多在正常环境下的焊接方法，特别是预热温度在100℃以上的那些焊接方法，要避免焊缝由于热传导而冷却到正常环境温度时所出现的失氢裂纹。在这部分热循环中冷却率的任何增加都会降低失氢能力，因而也就增加了龟裂的危险。具有大高压室的水下操作室焊接也可能增加冷却率，当然，这只是在热循环的低温端，比如，在100~150℃以下时，才有意义。根据潜水员的报告，这可能是由于下述情况所引起的：材料附近有水湿或主要是由于钢板表面接触氮室气氛以及它们具有较大的热收缩而加速冷却的。

总之，随着氢水平的增加与冷却率的提高，氢致裂纹的危险，预料无论对湿式焊接或对更现代化的操作室焊接都能随之增加（特别是随着水深的增加），而其中湿式焊接的增加则更为显著。

层 状 撕 裂

在材料的厚度方向塑性较低の場合，即便是仅有十分轻微的约束的接头，层状撕裂可能使氢在龟裂/撕裂的过程中不起显著作用；不过，在材料厚度与向塑性较高的場合下，以及在正常环境的焊接中，层状撕裂只是一种可能性，氢致裂纹则仍可能产生。为此，上几节列举的因素表明氢致裂纹的增加也会对层状撕裂有一些不利的影响。

凝 缩 裂 纹

凝缩裂纹的主要构成因素目前已经予以确定。焊缝金属中碳、硫、磷的水平增加与锰水平的减小，增加了产生凝缩裂纹的危险。诚如以前所指出过的，压强增加的结果，使正常焊缝熔池的化学反应起了一定的变化。例如，已经确定，具有碱性药皮焊条的手工金属电弧焊焊缝的碳、氢水平的增加高于在正常环境下焊接同类焊缝的相应水平。这可能是由于弧气体中的二氧化碳的分压力增加所引起的，它改变了化学反应 $\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{C}_{\text{Fe}} + 2\text{O}_{\text{Fe}}$ 的平衡。在湿式焊接中由于前面提到过的其它理由，特别地，其氧水平可以是比较高的。较高的氧水平又可能使碳含量及锰、硅等还原剂水平减小。而锰水平较低肯定对于防止凝缩裂纹是不利的。

在正常环境下可能产生的脱硫程度是增大还是减小目前还不清楚，但是从热力学的角度来考虑，脱硫程度反会减小是可以确信的。同时，还可以肯定在正常环境下焊接时，从溶剂中摄取磷量可能会增大。预料水下焊缝内会发生元素碳、锰、硫、磷等的水平的变化。所以，凝缩裂纹的危险会相应地增加。

韧 度

1. 焊缝金属

良好的韧度来自精细晶粒的显微结构与具有高抗裂性能的低屈服强度之间的平衡,它来自具有良好耐塑性断裂的低杂质含量。而导致较硬的显微结构,即引出较高屈服强度的任何成份上的改变都不会改进显微结构的特性。例如,细化针状铁素体晶粒的大小会收缩一定量的前共析的铁素体或上贝氏体,这是有害的,尤其是在耐断裂性能方面。任何引起成份上较高杂质含量的变化,对耐塑性断裂都将是不利的。而后者对于通过分类委员会弯曲试验的标准是特别重要的。对于焊缝冷却率以及焊缝凝缩率方面明显增加的湿式焊缝中,杂质的沉陷(在正常环境下焊接时可作为熔渣漂浮出来),可能增加夹杂的含量并且减少耐塑性扯裂,以及硬度、屈服强度的提高,因而还是降低了耐断裂性能。

2. 热影响区

在热影响区内,除了瞬时的氢水平增高外,预计不会有成份上的变化。在标准的装配焊接中,从焊缝扩散出来而导入热影响区的氢达到充分低的水平,所以到焊缝正式经受使用压力的时候,也看不出任何残留氢的不利影响。在正常环境下焊接而成的修理焊缝,在焊后可以比标准装配焊缝更迅速地承受应力,而并未发现有何问题。不过,在许多近海设施的修理中,修理焊缝在焊后可能很快就承受使用压力,且氢水平的瞬时增加对断裂韧度的影响尚须重新评价。对于在焊缝及热影响区产生比正常环境下焊接有更高氢水平的焊接技术,上述影响是特别重要的。

在操作室内焊接时,操作室的形式对变形的冷却率的影响并没有增加。与正常环境焊接同等场合下的显微结构预计不会发生变化,同时预料断裂韧度也不会发生变化。在湿式焊接中,冷却率的急剧提高会产生具有相当硬度的热影响区,尽管变化的细节取决于实际的成份,但预计会对热影响区的韧度有不利的影响。