

海洋平台结构中的疲劳问题

中国科学院力学研究所 曾春华

近三十年来,人们将注意力逐渐转向海洋,因为人们认识到海洋不仅是海上交通和军事活动的重要场所,而且海洋还蕴藏着巨大的资源,包括数以亿吨计的石油资源和矿物资源。世界上许多国家都投入大量的人力和物力进行大规模的海洋开发。70年代以来,海洋科学技术获得了迅速的发展,相信不久,人类将进入海洋开发的新时代。

海洋平台结构大多是由许多管子构件组成的空间结构,因为这种结构具有重量较轻、静力强度储备较大、制造施工方便以及水动力特性良好等特点。但在这种结构中,管接头很多、接头的形式多样,大小不一,接头处往往会出现很高的应力集中,应力集中系数常高达20以上,不仅影响管结点的静强度,而且也严重影响着平台结构的疲劳强度。加上海洋环境因素(浪、风、流、冰、地震等)严峻多变,而且是重复性的恶劣载荷,致使海洋平台结构的疲劳破坏事故不断发生。其中最严重的一次是1980年3月27日在挪威发生的事故。这天,北海南部的风速达到18米/秒,海浪的高度为7米,一座 Alexander L. Kielland 号五条腿的半潜式石油钻塔突然倾倒,海水迅速浸没甲板,20分钟后,钻塔全部倾覆,沉入海底,123个技术、工作人员丧生。事后,人们对这一世界上最严重的近海事故进行调查分析,发现事故是由于横向支撑大腿的五条拉筋中的一条疲劳破坏引起的,疲劳裂纹起源于拉筋中的一个仪器承窝的不良烧焊点。

血的教训唤起了人们对海洋平台结构疲劳问题的重视,现在世界各国都逐渐认识到,在海洋工程结构的任何分析中,最重要的研究项目之一就是结构的疲劳分析和疲劳寿命估算。

海洋平台所涉及的疲劳问题

上面提到,海洋平台结构一般是由许多管子构件组成的一个空间结构。管与管之间连接的型式很多,常见的有T型、双T型、Y型、K型、双K型、TK型、Z型、X型等。这样的一个复杂空间结构,在浪、风、流、冰、地震、腐蚀等恶劣环境下工作,所涉及的疲劳问题比起地面结构来说,肯定要广泛和复杂得多。

目前,海洋平台结构所涉及的疲劳问题主要有以下几个方面:

1. 应力集中系数的确定 管接头有很高的应力集中现象,它不仅影响管接头的静强度,也严重地影响管接头的疲劳强度。不少实际钻井平台结构,破坏往往都是由于管接头承受海洋交变波浪载荷引起的疲劳破坏,且起源于接点高应力区的初始缺陷。因此,结点的应力集中程度对平台结构的疲劳分析和疲劳寿命估算起着很重要的作用。

对于管接头,一般认为载荷是由支管传给主管。在这种受力情况下,由于支管与主管相

连接处几何形状很不规则,所以在该处应力分布很复杂,最大应力通常发生在支管与主管相交处的最低点(即热点)。热点的最大应力 σ_{max} 与支管在外力作用下的名义应力 σ_n 之比,就定义为管结点的应力集中系数SCF:

$$SCF = \sigma_{max} / \sigma_n$$

目前,研究管接头应力集中和强度的方法有四种,即光弹性试验法、钢质模型试验法、塑料模型试验法以及计算方法。钢质模型和塑料模型试验法比较直观和方便,即用应变片、应变带或应变丛直接贴在结点焊趾端部进行测量。光弹性试验法一般用三维光弹模型试验,采用冻结切片法测量焊趾处的局部应力和沿厚度方向的应力变化。计算方法分有限元法和解析法两种。有限元法大都采用矩形、四边形、三角形薄壳有限元,它简单经济并有现成的程序可用。解析法依据的是弹性圆柱形薄壳基本方程组。以前认为解析法难以应用到管接头这么复杂的结构上,现在由于计算机的出现,解析法与现代计算技术相结合,从而使偏微分方程组的求解得到了一些解决。

2. 疲劳载荷谱的测量与处理 海洋平台结构会受到浪、风、流、冰、地震载荷或它们的组合载荷的作用,而在大多数情况下,主要的环境载荷是波浪载荷。一些国家的统计表明,中等海况的波浪在疲劳破坏中起主要作用,因此疲劳分析一般都从中等海况出发考虑。

离岸海面波浪是一个随机现象,它与风速、吹风时间、水深和海底特征等许多因素有关。波浪环境是由一系列海况及每一海况出现的概率表示的,每一海况可由一个参数(波高)或多个参数(如波高、频率)来表示。为了获得设计用的波浪资料,必须进行长期的(一年或更长时间)观测,得到波高、频率或周期的长期统计数据,从而推出“波浪分布图”。

过去十多年里,人们广泛采用波高和周期的目测数据,但是这种方法已经证明有两个主要缺点。第一,它的波谱公式是建立在分析波浪参数的基础上,例如有效波高和平均跨零周期,必须进行从目测资料到分析波浪数的统计转换。第二,目测波浪资料,尤其是从商船上估计的目测周期资料是很不可靠的。所以现在一般都采用仪器测量波高和周期,如用压力传感器、波浪标杆和波浪浮标广泛地收集这些资料,不久还可用卫星遥感技术记录海洋波浪资料。

波浪谱的统计处理方法目前有两种:一种是离散波分析法或离散规则波法。每一个有效波高和平均跨零周期的组合,可形成一个规则波,用它单独作用于结构,可得出结构的响应。总合海况规则波的结构响应,计及相应的出现概率,再应用线性累积损伤理论,就可估算结构的疲劳寿命。这种方法就是离散波分析法。目前,规则波法仍然是海洋结构物强度分析的一个有力方法。另一种是谱分析法,它是考虑波浪的随机特性并用统计方法去描述海况的一种方法。一般认为,在一个短时间内(几小时),海面升起的时间历程是符合高斯分布的,并且是一个具有窄带功率谱密度的平稳随机过程,因此对每一海况,可用其功率谱密度函数来反映其特性。功率谱密度函数反映了波浪中每种频率成分的能量分布。在谱分析法中,除了由实测波浪记录得出海况的波浪谱外,可根据海况的参数(有效波高和平均跨零周期)选用适当的波谱来表达,从而建立波谱与表征海况参数之间的关系。这种谱分析法中,需要由表征海况的波浪谱求出结构中各物件的应力响应谱。对于线性体系来说,输入谱和响应谱的关系可通过传递函数来表示,即 $S_\sigma(\omega) = [TF(\omega)]^2 S_\eta(\omega)$,式中 $S_\sigma(\omega)$ 为应力响应谱, $S_\eta(\omega)$ 为输入谱, $TF(\omega)$ 为传递函数。传递函数是频率 ω 的函数,其物理意义就是单位波高引起的应力范围。在结构是确定的情况下,传递函数完全是一个确定

性问题,不包含概率问题。

载荷谱的实测和分析是海工结构疲劳寿命估算中的重要问题,如何从实测谱得出试验实用谱,各国对这问题仍在探索中。

3. 管接头疲劳曲线的试验研究 管接头的疲劳曲线(即 $S-N$ 曲线)是进行结点疲劳分析的最基本资料,也是疲劳设计的基础。

表示应力振幅 S_a 或最大应力 S_{max} 与疲劳寿命 N 之间的关系曲线就叫做疲劳曲线。疲劳曲线目前主要通过试验确定,即在一定的应力比 $R(=S_{min}/S_{max})$ 下,在疲劳试验机上试验一组标准试样或构件,它们分别在不同的最大应力 S_{max} 下施加交变载荷(可在每一应力水平下试验一个或多个试样),直至破坏,记下每个试样或构件破坏时的循环次数 N ,以 S_{max} 为纵坐标, N 为横坐标,将试验结果点在坐标上就可得出在指定 R 下的 $S-N$ 曲线。

实际上,一个结构所受的载荷往往是随机的或变幅的,即 R 值并不是固定不变的。这样就需要在不同 R 值下做一族 $S-N$ 曲线,也就是说平台设计必须有许多基本的 $S-N$ 曲线,这实际上是困难的。但是我们可以应用修正的Goodman图去求出与实际应力范围所引起破坏等效的应力范围,即用Goodman图来转换出我们所需要的曲线。

必须指出,通常由疲劳试验得到的数据是比较分散的,加上受材料、成分等的限制,试验数据点是有限的。如何从这样分散和有限的数中应用统计理论去求出精确的 $S-N$ 曲线,是一个十分值得探讨的课题。目前,整理 $S-N$ 曲线实验数据中大多采用带概率的 $P-S-N$ 曲线。

另外,影响 $S-N$ 曲线的因素很多,对于不同材料、不同应力比、不同应力集中、不同加载形式以及不同的结构, $S-N$ 曲线差异很大。如何找出这些因素的影响规律,并在平台结构疲劳分析中加以考虑,也是一个十分迫切需要解决的课题。

4. 平台结构疲劳累积损伤规律的研究 大量的工程实践表明,海洋平台结构物的破坏大多数是疲劳造成的。一般情况下,在零件或结构物的局部,由于应力或应变集中,如果又是在循环载荷作用下,就产生局部塑性变形的累积,从而形成了微观疲劳裂纹。如果循环载荷继续作用,裂纹会不断扩展成宏观裂纹,最后达到临界尺寸和导致破坏。一般,疲劳破坏可以分为四个阶段:疲劳成核,微观疲劳裂纹形成,宏观疲劳裂纹扩展和最后断裂。目前大多数人把前二个阶段统称为疲劳的无裂纹寿命阶段或疲劳裂纹形成阶段,把后二个阶段统称为疲劳的有裂纹寿命阶段或疲劳裂纹扩展阶段。

在许多实际海洋平台结构中,它是不允许出现宏观裂纹的,也就是说,这些零件或结构的使用寿命主要是无裂纹阶段寿命。如何估算变幅载荷下平台结构的无裂纹阶段寿命,这就需要疲劳的累积损伤理论。累积损伤理论就是研究在循环载荷下,如何描述和计算损伤,疲劳损伤按什么规律累加,损伤累积到什么程度结构或材料就会发生疲劳破坏,以及有哪些因素影响损伤的累积等方面的一种理论。它是裂纹形成阶段疲劳寿命估算的关键。

现在,已提出的累积损伤公式有几十个,分为线性累积损伤理论、修正线性累积损伤理论和实验分析中得出的经验半经验公式三种。目前在平台结构的疲劳分析中,大多采用比较简单方便的Miner线性累积损伤理论。Miner理论指出,结构在承受 r 个不同的应力循环时,可用下式来定义疲劳损伤:

$$D = \sum_{n=i}^r \frac{n_i}{N_i}$$

式中 n_i 是在应力范围 σ_i 下的实际循环次数, N_i 是在应力范围 σ_i 下破坏所需的循环次数(一般可以从 $S-N$ 曲线查得)。Miner 认为当 $D = 1$ 时结构或材料就发生疲劳破坏。

应当指出, Miner 理论是十分粗略的, 许多研究者都指出, 结构发生疲劳破坏时, D 值并不为 1, 有时甚至与 1 偏差很大, 应该采用修正线性理论或其它理论。由于疲劳破坏事故与日俱增, 所以如何准确地估算出安全寿命, 即如何找到更普遍适用的累积损伤规律, 仍然是一个十分迫切要解决的课题。

5. 海洋平台结构疲劳裂纹扩展规律的研究 众所周知, 海洋平台结构绝大多数都属于焊接结构, 而焊接结构又是难以避免缺陷的。这种缺陷在交变载荷的重复作用下, 会发生缓慢裂纹扩展, 当裂纹达到某一临界尺寸时, 就会导致突然的破坏。为了确保平台结构的安全使用, 就必须研究管状接头在波浪载荷作用下的疲劳裂纹扩展特性, 这种特性包括疲劳裂纹扩展门槛值的确定, 裂纹扩展规律的选择以及影响疲劳裂纹扩展的因素如应力比 R 、频率、温度、介质等。

疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} 又称为“界限应力强度因子幅值”。大量实验表明, 当材料的应力强度因子幅值 $\Delta K < \Delta K_{th}$ 时, 疲劳裂纹便不会扩展; 当 $\Delta K > \Delta K_{th}$ 时, 疲劳裂纹便开始扩展。因此把 ΔK_{th} 称为疲劳裂纹扩展的门槛值, 它是平台结构安全使用的一个重要参数。如何用试验方法和数值计算方法确定这门槛值, 是一个正在开始探讨的课题。

疲劳裂纹扩展规律的研究已有几十年的历史, 到目前为止已得出几十个有关的疲劳裂纹扩展公式, 现在较常用的是 Paris 公式, 即

$$\frac{da}{dN} = c (\Delta K)^m$$

式中 da/dN 表示疲劳裂纹扩展速率, c 和 m 是材料常数, $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ 是应力强度因子幅值。从这公式我们便能计算出疲劳裂纹扩展寿命 N_f :

$$N_f = \int_{a_0}^{a_c} \frac{1}{c (\Delta K)^m} da$$

式中 a_0 是初始裂纹尺寸, a_c 是临界裂纹尺寸。

用 Paris 公式预言疲劳裂纹扩展寿命时, 必须解决下列几个问题。首先, 必须确定构件上的初始裂纹尺寸 a_0 。初始裂纹尺寸包括材料的冶金缺陷(非金属夹杂、第二相粒子等)、冷热加工和装配过程中构件表面产生的最初裂纹尺寸、使用中受环境腐蚀而产生的裂纹尺寸等。初始裂纹尺寸 a_0 一般可用无损探伤确定。其次, 必须确定应力强度因子 K , 对于具体结构可查表或用公式求出 K 。最后还需确定破坏判据, 并且通过破坏判据确定结构的临界裂纹尺寸 a_c 。临界裂纹尺寸就是构件发生破坏时的裂纹尺寸, 对于不同的材料, 有不同的确定原则: 高韧性、低中强度材料, 可根据构件净截面应力达到材料拉伸强度极限时的裂纹长度来确定 a_c ; 低韧性、高强度材料, 可以根据材料的临界应力强度因子 K_{Ic} 或 K_{IIc} 所确定的裂纹尺寸来确定 a_c 。

必须指出, 上面谈到的疲劳裂纹扩展寿命都是针对常幅加载情况的。对于变幅加载的情况或随机加载的情况, 将会更加麻烦。由于影响疲劳裂纹扩展的因素很多, 如平均应力、过载峰值、加载次序、加载频率和温度等, 所以预计疲劳裂纹扩展寿命的方法变得十分复杂。

海洋平台结构受到的载荷都是随机的,目前还没有十分好的预计方法,有待于进一步研究。

6. 影响海洋平台结构疲劳因素的研究 海洋平台结构,由于在恶劣的环境和多变的载荷下工作,所以其疲劳寿命受到许多因素的影响,例如加载形式、平均应力(或应力比 R 值)、尺寸效应、焊接材料的焊缝形状、表面状况、钢材质量和环境等。

大量实验数据表明,表面稍有缺陷或划伤,常成为极危险的应力集中处。疲劳裂纹多起于构件的表面,这是因为:*a.*作用在实际结构上的载荷通常很复杂,而且几乎总是引起弯曲和扭转,这些载荷降低了表面的最大抗力。*b.*表面是对机械损伤和化学损伤(腐蚀、氧化、脱碳等)最敏感的地方,在许多场合下,由于表面受腐蚀和脱碳,结构的表面强度低于内部的强度。*c.*突然的应力变化(如焊接的不连续)或结构的缺陷引起的峰值应力在表面是最高的。*d.*加工过程中产生的刀痕,或切削过程中以及熔焊过程中产生的切口效应也总发生在表面。

不少研究者都指出,对于海洋平台结构,管接头的尺寸对疲劳强度影响甚大。试验表明尺寸越大,疲劳强度越低。平板试件中的试验结果也是这样。在海洋平台结构的设计中,对于这些影响因素必须加以考虑。目前这方面的资料还很缺乏。

7. 腐蚀疲劳研究 腐蚀疲劳是指结构件既受循环应力的作用,又受到腐蚀环境的侵蚀,在两者共同作用下的一种更为严重的腐蚀-机械破坏形式。腐蚀疲劳与一般疲劳的区别是腐蚀介质环境,具体表现在下列几方面:

*a.*在腐蚀环境中工作的零件,表面在腐蚀疲劳中变色,除不锈钢和氮化钢以外,在淡水或盐水中的腐蚀表面有铁锈产生。

*b.*腐蚀疲劳中所形成的裂纹数目,比空气中常规疲劳所产生的裂纹数目更多。

*c.*腐蚀疲劳的 $S-N$ 曲线没有水平部分,即使在腐蚀性不强的环境中(如淡水)试验得的疲劳曲线也没有水平部分。对于腐蚀性强的环境下所得的 $S-N$ 曲线,下降坡度就更为显著。

*d.*腐蚀疲劳强度与应力循环的频率有关。即在腐蚀环境下,疲劳损伤主要由试验时间而定,频率愈低,同一循环数下的损伤愈大。

腐蚀疲劳现象在工程中经常出现,如钢、钛合金、铜合金的舰船推进器、轴、舵,海空飞行飞机上的铝合金构件,发电厂的热交换器、透平叶片,化学工业中的泵轴泵杆,气田的岩钻,飞机发动的叶片等经常出现腐蚀疲劳破坏事故。尤其在海洋平台结构中,腐蚀疲劳是一个更为突出的问题。

腐蚀疲劳是一个较复杂的问题。由于它的影响因素很多,包括材料、环境、应力、时间、温度等,因此要从冶金材料学、应用力学、腐蚀电化学、工程设计等方面进行综合的研究。

腐蚀疲劳分为气相腐蚀疲劳和溶液腐蚀疲劳。因为处在实际状态下的所有金属元素不断地力图恢复到它们与氧和其它元素化合的自然状态,所以氧或水蒸汽的存在要影响疲劳强度并不使人感到意外。早期的关于在空气中和真空中的疲劳强度性能的实验指出,在这两种介质中,钢、铝和镁合金的疲劳强度有一些不同,铜和铅在空气中的疲劳强度却比在真空中有显著的变化。严格说来,只有在真空中的疲劳才是真正的纯疲劳现象。空气本身就是一种腐蚀介质,这种腐蚀环境会促进材料塑性变形的不均匀分布。在循环应力的继续作用下,在塑性滑移严重的地方会产生疲劳裂纹和促使裂纹扩展,直到裂纹尖端处的应力强度因子超过临界应力强度因子时,就发生快速断裂,导致材料最后失效。溶液中的腐蚀疲劳与气相腐

蚀疲劳不同。溶液（如水）中的疲劳过程实际上是与电化学腐蚀过程有关，它没有真正的疲劳极限出现，在腐蚀环境中循环不管时间延续多久，断裂总会发生。

过去人们总把腐蚀疲劳与应力腐蚀混淆在一起，其实二者是两个根本不同的概念。应力腐蚀是指结构件在静拉应力和腐蚀环境共同作用下所导致的脆性断裂，它是只在特定的腐蚀介质环境中才会发生；腐蚀疲劳却不受此限制，在任何介质中承受循环交变应力均会出现。腐蚀疲劳没有真正的疲劳极限存在，即没有临界极限强度因子存在，而应力腐蚀却有一个临界应力强度因子 K_{Isc} ，在这个值以下应力腐蚀不会发生。目前，人们对应力腐蚀的研究较多，而对腐蚀疲劳研究则还未很好地开展。对于腐蚀疲劳的机理、理论、腐蚀疲劳与电化学之间的关系，影响腐蚀疲劳的因素以及提高腐蚀疲劳性能等问题，都急待进行深入的研究。

国外研究现状

由于海洋平台结构中疲劳问题的突出和重要，因此世界各国都十分重视海洋平台的强度分析，特别是疲劳强度的分析。英、美、法、西德、日本和西欧各国都围绕着疲劳问题开展了多方面的研究，取得了一些进展，并且都制订了自己国家近海结构设计、建造和检验规范。美国制订了一个较全面的海上结构物的疲劳研究计划。日本也相应地制订一个海上结构物疲劳研究的三年计划。欧洲共同体（英、法、西德、荷兰和意大利）和挪威六国在海洋焊接结构物疲劳和腐蚀疲劳方面制定了一个六年研究计划，并在1981年10月于巴黎召开了一个专门的总结会。国际上还多次召开专门会议，总结和交流这方面的研究成果，展开学科讨论；探求新的研究方法。如每年都召开一次的“离岸工程学术讨论会”上都十分强调要深入开展疲劳和腐蚀疲劳的研究。

1. 日本的研究计划与进展 近年来，日本对于滨海平台结构，围绕着三个主要问题进行研究：

①完成了几种不同型式的管接头缩小模型的疲劳试验，并探讨了材料因素对管接头疲劳裂纹形成寿命的影响。如泽柳政弘，福冈哲二人在管接头疲劳强度的实验研究方面做过九种类型的T型接头试验。这九种类型包括主管尺寸一定，变化支管的外径，或管子尺寸一定，改变接头的加强方法，得到一些非常有意义的结果：

a. 无加强T型接头的疲劳强度与其静破坏载荷有密切关系，交变载荷与破坏载荷的比（ ΔS ）和疲劳寿命之间构成下列关系式：

$$\Delta S = 1.99 \times N_c^{-0.203} \quad (N_c = \text{裂纹形成寿命})$$

或 $\Delta S = 2.60 \times N_f^{-0.188} \quad (N_f = \text{疲劳破坏寿命})$

b. 管接头部分的疲劳强度一般取决于接头交叉部位产生的局部最大应变 $\Delta \varepsilon$ ，其平均疲劳寿命可由下式推算：

$$\Delta \varepsilon = 0.01327 \times N_c^{-0.1006}$$

又如大竹、阪本、田中等人采用单调和周期加载，对营运中的海洋结构物的八个实尺度接头进行了试验，包括八个焊接和三个铸造的N型管接头，证实：

a. 高强度焊接接头的静力断裂型式与低碳钢接头的不同，其断裂受主管管壁上沿主管与受拉支管之间焊趾扩展裂纹的支配，因此焊接接头的疲劳强度可根据焊趾处最大应力来预报。

b. 常规的S-N曲线，如美国焊接学会的 α 曲线，适用于高强度钢管接头疲劳寿命的预计。

c. 部分加厚主管管壁对于改善接头的静强度和疲劳强度是十分有效的。

d. 使用铸造接头代替焊接接头, 接头的疲劳寿命可增加3倍。

②发展了基于有限元法的计算程序系统, 以分析管接头交叉处附近的详细应力应变分布。如日本已证明接头的最大静强度可根据美国石油学会标准推荐的冲剪应力理论计算方法来作可靠的预报。接头的应力集中系数可用圆柱壳理论导出的分析方法或用Ikesen公式估算, 并建立了相应计算程序。对于疲劳分析和寿命估算方法方面, 日本新日铁公司已对“NP”平台建立了相应的寿命计算程序。

③从事海洋平台结构腐蚀疲劳的研究。日本对于海洋平台的腐蚀疲劳问题十分重视。如日本东京大学高野太雄和冈村弘夫教授曾对不锈钢, 304*, 316*, 45*, CrMo钢等不同钢种进行过广泛的腐蚀疲劳性能研究, 得出大量可供设计使用的数据。在腐蚀与非腐蚀介质中疲劳裂纹形成与扩展的对比研究中, 也曾广泛地研究过, 还研究了一些影响腐蚀疲劳性能的因素。

2. 美国的研究计划与进展 美国对海洋事业也很重视, 现在全国已有34所大学设有海洋工程课程。许多公司和协会投入大量的人力和物力进行海洋科学的研究。围绕着海洋平台结构物的疲劳问题已开展了多方面的研究, 目前主要集中于下列几个课题进行试验与研究:

①美国焊接研究协会已完成对滨海固定平台结构管接头设计有关资料的评论, 得出静强度的设计标准。

②美国石油学会已完成海水和阴极保护对近海工程结构焊接钢疲劳性能的影响研究。

③美国石油学会和船舶结构委员会以概率作为滨海结构疲劳设计标准的基础, 根据实测载荷谱进行疲劳研究, 用海上记录所得出的应变数据以及断裂力学方法进行疲劳裂纹的研究。

④船舶结构委员会和壳牌石油公司正进行船用焊接钢的长期腐蚀疲劳以及海水腐蚀疲劳问题的研究, 已评述现有资料, 综合设计标准和计划未来的研究工作, 并在有阴极保护、极低的裂纹扩展速率下研究疲劳裂纹的扩展。

⑤壳牌石油公司和石油生产公司正进行疲劳计算程序和接头计算程序的研究。石油公司滨海结构协会正进行管接头的有限元分析, 在焊接区用三维等参单元模型、网格自动生成方法进行分析。

3. 欧洲共同体的研究计划与进展 欧洲共同体和挪威六国曾共同制订了1975—1980海洋焊接钢结构在疲劳和腐蚀疲劳载荷下工作性能的研究计划, 有40多个实验室参加, 耗资二千多万美元, 目的是研究焊接管结点在海水环境下的疲劳性能。

①进行了管接头的应力分析。欧洲共同体首先围绕设计应力的定义, 即S-N曲线中应力S的选择问题进行了系统的研究, 然后分别采用钢质模型、塑料模型、光弹模型以及有限元方法, 对T, X, Y, K和TK型管接头进行大量的应力分析。对复杂接头、环加强接头也进行了研究。并编有A_sA_s, SESAM, SATE, TTTUS, NASTRAN程序。对上述四种应力分析方法进行过比较, 发现它们之间的差别在15%以内。

②进行了管接头的疲劳试验。欧洲共同体共做了300只管接头的疲劳试验, 其中英国进行了T, K, KT型管接头模型试验24只, 荷兰进行T, X型管接头试验40只, 意大利进行Y型管接头模型试验20只, 法国进行X型接头模型试验10只, 挪威进行T, Y, K型管接头模型试验11只, 取得大量的数据, 为制订规范和平台设计提供了依据。

加载形式大都采用轴向加载、面内和面外弯曲等。加载设备除利用疲劳试验机(如MTS改进型250KN和2500KN液压伺服疲劳试验机等)外, 还使用了疲劳千斤顶。

在管接头疲劳试验中, 裂纹出现是以裂纹出现处邻近焊缝趾部的应变幅值降低15%来定义的。但此裂纹很小, 需要放大镜才能观察到。因此, 挪威规定可见裂纹为30mm, 这一

裂纹在一般试验条件下都可观察到。

挪威还得到一个重要的结果，证明管接头中表面裂纹与内部裂纹的扩展率都是均匀的，不出现加速裂纹扩展现象，这与通常的裂纹扩展率的指数公式是很有差别的。

③研究了影响管接头疲劳寿命的因素。这些影响因素包括尺寸大小、加载形式、焊缝、焊接材料、钢材、循环比、加强环和海水等腐蚀介质。

荷兰做过管结点尺寸对疲劳强度影响的试验，证明接头尺寸越大，疲劳强度越低。平板试件的试验结果也这样。

英国对 $\phi 168\text{mm}$ 的模型试验证明，在加轴向力或平面弯曲的同时，如果再在弦杆上加轴向压力，则会提高疲劳极限。

英、西德、荷兰等国试验表明，循环比 R 对焊接接头的疲劳强度没有什么影响，但对平板结构，则 $R = -1$ 时的疲劳强度较 $R = 0$ 时增加17—70%。

所有试验都表明，所用焊接金属成分对焊接疲劳强度没有什么影响。焊趾几何形状、焊缝不完全贯穿及灌浆加强管接头等对疲劳强度的影响，还需进一步地试验。

意大利管接头加强环的试验表明，有加强环接头的承载能力和疲劳持久限都有所提高。

荷兰做过3只T型接头的疲劳试验，证明在海水中的疲劳寿命只为空气中的40%。

温度对管接头在海水中的疲劳强度有较大的影响。英国的试验表明海水温度为 5°C 时，海水中接头的疲劳寿命与空气中没有什么差别，但当温度升至 20°C 时则二者差别很大。

世界各国都十分重视海洋平台结构中疲劳问题的研究。由于疲劳现象本身的机理和理论都还没有搞清，所以必然会给海工结构疲劳研究带来许多困难。不过，在开发海洋和向海洋索宝的形势所迫之下，在各国的共同努力之下，可以预期，人们在不久的将来不但可以掌握海洋平台疲劳破坏的规律，而且定能有效地防止它的发生。

参 考 文 献

- (1) Torgeir, Moan., Design of Offshore Steel Structure (1980).
- (2) Hallan, M.G., Heaf, N.J., Wooton, L.R., Dynamics of Marine Structures (1977).
- (3) Furnes, O., Fixed Offshore Platforms—Design, Safety and Performance, Glasgow Univ(1978).
- (4) Kallaby, J., Price, J.B., Evaluation of fatigue considerations in the design of framed offshore structures, OTC 2609 (1976).
- (5) Visser, W., On the structure design of tubular joints, OTC 2117 (1974).
- (6) API Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms, 12th Edition (1981).
- (7) Carlsen, C.A., Nordenstrom, N., Int. Symp. on Advances in Marine Technol. (1979): 643, 670.
- (8) 泽柳政弘, 福冈哲二, 管接头疲劳强度的实验研究, 三井造船投报, 104, 昭和54年1月.
- (9) 大竹, 阪本, 田中等, Static and fatigue strength of high tensile strength steel tubular joints for offshore structures, 10th Ann. Offshore Technology Conf. Proc., Vol. 3 (1978): 1747—1755.
- (10) 陈真伯, 夏永年, 海洋钻井平台管状接头的静强度计算与疲劳分析(1981, 9).
- (11) 邱明世, 金属的腐蚀疲劳综述(1978, 5).
- (12) 石理国, 莫润福等, 近年来国内外海洋钢结构管柱接头强度研究进展, 力学进展, V.12.3 (1982): 238—264.
- (13) 高野太刀雄, 冈村弘夫, 水溶液环境下の疲労き裂進展にちよびす各重要因の检讨, 日本机械学会讲文集, No.790—799.

FATIGUE OF OFFSHORE PLATFORM STRUCTURES

Zeng Chun-hua

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)