

• 试验研究 •

海洋石油结构钢低温疲劳实验系统的研究

中国科学院力学研究所 (北京市100080) 段梦兰

石油勘探开发科学研究院机械研究所 温厚微 张兴钧 熊小妹

石油大学 (北京) 方华灿

摘要 为解决石油平台在辽东湾海域的低温疲劳问题,借助MTS试验机,建立一套低温疲劳实验系统,实现了低温疲劳实验中疲劳裂纹的观察和测量,以获取平台结构钢在低温下的疲劳裂纹扩展速率的可靠数据。该系统解决了低温疲劳实验中存在的关键技术问题。

关键词: 海上构筑物 低温 疲劳 裂纹扩展 试验

一、引言

众所周知,我国渤海辽东湾海域处于高纬度区,冬天温度较低,约达 -25°C ,且低温的持续时间长(约4个月)。石油平台长期在这样的低温环境中承受恶劣海洋环境载荷的作用,其焊接缺陷(夹渣或不完全熔合)成为裂纹源。低温下焊接区断裂韧性的减小很容易出现不稳定扩展,直至失稳的快速扩展和断裂^[1],给平台的安全作业带来极大危险。出于这些结构在低温下的安全考虑,必须防止这种从缺陷生长出来的疲劳裂纹产生不稳定扩展。因此,如何获得平台结构钢在低温下的疲劳裂纹扩展速率的可靠数

据,已成为辽东湾石油平台安全设计、作业以及确定这些结构的探伤检查周期等诸方面的迫切要求。

本文旨在介绍在美国MTS 810.13型试验机上如何实现低温疲劳实验,以获得平台结构钢在低温下的疲劳裂纹扩展速率的可靠数据。为此,选择了用于平台建造的日本钢材A 537进行了实验,其主要机械性能和化学成分如表1、2。

二、低温疲劳实验的冷却系统

如何形成一个低温环境,并在所需要的时间内将温度稳定在一定的低温温度上,是低温疲劳实验的关键所在,也即要建立一个

表1 A537钢的主要机械性能

(MPa)

屈服点 σ_s	抗拉强度 σ_b	断后伸长率 δ , %	弹性模量E
352	492~630	>22	1.983×10^5

表2 A537钢的主要化学成分

%

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.24	0.15~0.5	<0.03	<0.035	<0.04	0.35	0.25	0.25	0.08

完整的冷却系统。借助试验机现有设备（它自带一个环境箱），建立了如图1所示的试验系统。

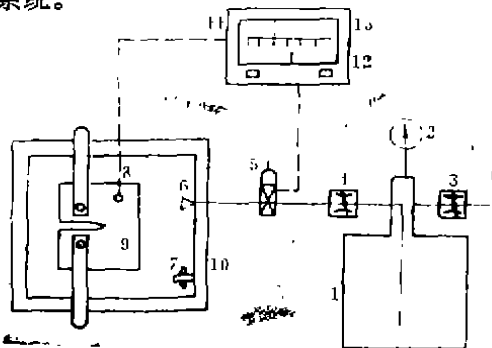


图1 MTS机低温疲劳实验系统

液氮瓶1是特制的，容积为40 L，顶端口为一个带有压力表2和两个流量控制阀3、4的顶盖。阀3的功能是一个压力控制阀，通过调节它可以控制瓶内压力，使工作温度更为稳定。阀3的另一个作用是充当安全阀，在工作时必须开启，以防止瓶内压力积蓄而爆炸。阀4是控制进入环境箱10的液氮流量，通过它可以把温度控制在指定的很小范围内。但是，通过阀3和4还不能把温度控制在相当高的精度内，因此，设置了电磁阀5。

风扇7的作用是降低箱内的温度梯度，使箱内温度均匀。11为温度控制盘，上面有两个温度指针12和13。指针12为设置的实验温度，即实验所要求的那个温度。指针13通过热电偶8探测出试件9表面的实际温度，与电磁阀5形成一个温度反馈系统，即当13的实际温度小于12的实验温度时，通过电磁阀5增大液氮流量而提高箱内温度，直到13指针和12指针重合。当13指针超过12指针时，电磁阀5就自动减小流入环境箱的液氮流量，直至两指针重合。这样，通过温度控制盘、热电偶8和电磁阀5组成的温度反馈系统，可精确地控制实验的温度。

现在我们知道，阀3主要是作为安全

阀，对温度的调节只起很小的作用，而阀4可以较为准确地调节液氮流量。如果操作熟练和有经验，可以借助压力表2的读数将温度控制在 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 的误差范围内，但缺乏经验时温度波动相当大。阀5除了精确控制液氮流量外，主要起反馈作用，使温度控制自动化。温度盘11的刻度范围为 $-75\sim 315^{\circ}\text{C}$ ，如果超出了这一范围的实验，可以通过阀4来实现温度的控制。

三、低温封闭环境中 疲劳裂纹的测量

进行低温疲劳实验时，由于试件被置于封闭的低温环境中，对直接观测裂纹就形成了很大的困难。一种不可取的方法是停机开箱直接观测。这种方法一方面会影响实验的结果，另一方面特别繁琐。但更重要的是开箱后空气中的水气大量涌入低温箱中，凝结于箱内表面和试件上，造成如下两个问题：一是试件很快生锈，表面有大量铁锈遮盖了裂纹，严重情况下无法对裂纹继续观测。二是继续进行试验时环境箱内充满了水雾，无法看清箱内情况，这种状态要延续很长一段时间。因此，做低温疲劳实验时采取停机开箱直接观测法是不可取的。

为此，我们采取了如下两种测量裂纹的方法。

1法：望远镜辅助测量法

为了能直接读出裂纹的长度，在环境箱观察窗口的前面放置一台 $\times 60$ 的显微望远镜，该望远镜与试件的方向及距离可以任意调节，一般放在观测和工作最方便的位置。

采用这种方法时需预先将试件裂纹扩展方向的表面打磨得相当光滑明亮，然后沿扩展方向用相当细的线标上刻度。我们用显微望远镜相当清晰地观察到裂纹尖端所到达的刻度，从而准确地测量出裂纹长度。用这种方法测裂纹长度的要求是，试件裂纹扩

展表面必须光亮,环境箱的观察窗口必须擦干净,目的是能清楚地看到裂纹尖端;其次是如前所述,不能让水气进入环境箱,即整个实验过程必须始终保持低温。

我们认为,望远镜辅助测量法是低温疲劳实验中一种有效、简单而又准确的方法。

2法:柔度法

对于标准紧凑拉伸试件,常常用柔度法来间接地测量试件的裂纹长度。该方法是凭借试件的刀口柔度与裂纹长度的关系,利用应变规测量出刀口的柔度而间接地得到裂纹长度的方法。文献〔2〕使用了如下柔度与裂纹长度*l*的关系式:

$$\begin{aligned} \frac{V}{F} = \frac{1}{bE} & \left[-2466.7 + 27078.2 \left(\frac{l}{L} \right) \right. \\ & - 115069 \left(\frac{l}{L} \right)^2 + 24700 \left(\frac{l}{L} \right)^3 \\ & \left. - 248010 \left(\frac{l}{L} \right)^4 + 101658 \left(\frac{l}{L} \right)^5 \right] \end{aligned} \quad (1)$$

式中 *F*——施加载荷

b——试件厚度

L——试件有效长度

E——材料的弹性模量

必须指出:上述关系式是错误的。我们经过计算,得到的柔度公式为:

$$\begin{aligned} \frac{V}{F} = \frac{1}{bE} & \left[771.07 - 349.31 \left(\frac{l}{L} \right) \right. \\ & + 1484.39 \left(\frac{l}{L} \right)^2 - 318.63 \left(\frac{l}{L} \right)^3 \\ & \left. + 3199.33 \left(\frac{l}{L} \right)^4 - 1311.39 \left(\frac{l}{L} \right)^5 \right] \end{aligned} \quad (2)$$

我们用式(2)得到裂纹长度值*l*,和方法1测得实际观测值*l₁*,以及二者的比较误差*e*列于表3。所使用的应变规的量程应该是0~10(电平值),而我们的结果是3~11,即刀口位移对应为13.5~17.5 mm。

在这段有效区间内,柔度法的最大误差为2.148%,最小误差为0.013%,超过这一范围误差大于2%。

表3 柔度法和望远镜辅助测量法比较

电平值 <i>V</i>	裂纹长度观测值 <i>l₁</i> (mm)	裂纹长度计算值 <i>l₂</i> (mm)	误差 <i>e</i> , (%)
3.37	23	23.44	1.893
3.70	25	25.38	1.511
4.06	27	27.18	0.660
4.48	29	29.00	0.013
4.98	31	30.90	0.311
5.52	33	32.72	0.856
6.23	35	34.83	0.487
7.10	37	37.11	0.296
8.00	39	39.21	0.526
8.48	41	40.98	0.055
10.34	43	43.87	1.879
11.00	44	44.95	2.148

因此,我们认为在应变规有效范围内,由式(2)计算出的结果是有效的,柔度法是可靠的。但超过这一范围应变规则失效,必须改用方法1对裂纹继续观测。

四、实验过程中必须注意的几个经验问题

(1) 试件裂纹扩展表面必须打磨光滑明亮,刻度线要准确细小。

(2) 实验过程中切忌开箱,切忌温度回复到室温。

(3) 实验结束后立即用风扇去除室内水气,防止试件和机器生锈,影响对试件断口表面的观察和电镜分析等。

(4) 普通应变规对温度变化相当敏感,应选用特殊的消除温度影响的应变规,否则必须精确控制温度,以保证柔度法测量的可靠性。

五、平台结构钢A537的低温裂纹扩展实验

利用本文的实验系统,对A537钢进行了低温裂纹扩展实验。实验是在石油勘探开发

科学研究院机械研究所的美国 MTS 810.13 型试验机上进行的。实验采用 ASTM 标准紧凑拉伸试件, 其结构尺寸如图 2 所示。实验温度为 238 K、273 K 和 303 K, 使用正弦波常幅载荷, 加载频率为 11 Hz, 具体条件是:

$T = 238 \text{ K}$ 和 303 K 时, $\bar{F} = 39.20 \text{ kN}$, $F_{\max} = 68.60 \text{ kN}$, $R = 0.14$; $T = 273 \text{ K}$ 时, $\bar{F} = 46.00 \text{ kN}$, $F_{\max} = 78.40 \text{ kN}$, $R = 0.25$ 。其中, \bar{F} 为平均载荷, F_{\max} 为最大载荷, R 为应力比, T 为绝对温度, K 为热力学温度单位, 开尔文。实验结果如图 3, 实验结果讨论见文献 [3、4], 本文不再赘述。

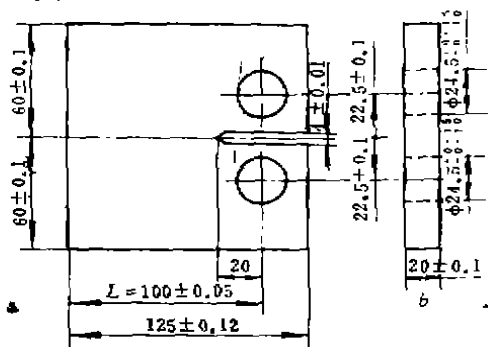


图 2 紧凑拉伸试样

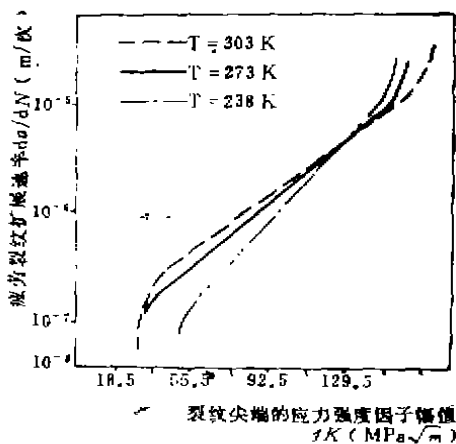


图 3 A537 钢的低温裂纹扩展特性

六、结论

本文在 MTS 试验机上成功地建立起一套低温疲劳实验系统, 解决了实验温度的控

制和低温密封环境中疲劳裂纹的观察与测量等技术关键问题, 提出了裂纹长度的望远镜辅助测量法, 修正了文献 [2] 提出的柔度公式, 并总结出低温疲劳实验中可能遇到和必须注意的有关问题, 为今后低温疲劳实验创造了条件。

参考文献

- 1 段梦兰等. 渤海老二号平台被冰推倒的调查结论. 石油矿场机械, 1994, 23(3): 1~4
- 2 Jata K. V. et al. Fatigue at Low Temperatures. ASTM STP 857. Stephens R. I., Ed., 1985: 102~120
- 3 Fang Huacan et al. Proceedings of OMAE'93. England, UK. June, 1993.
- 4 方华灿等. 渤海石油平台用钢 A537 在不同温度下的疲劳裂纹扩展特性. 石油大学学报(自然科学版), 1992, 16(4): 41~45

中国石油和石化工程研究会 简介

中国石油和石化工程研究会是在有关部门和企事业单位支持下, 由有志于推动石油和石化工程技术进步、经济发展的科技和管理人员为主组成的群众性科技组织。创建于 1984 年, 原名为中国石油和石化设备研究会, 1990 年 7 月经原能源部批准, 更名为现名。该会随国家机构改革的变迁, 先后挂靠在原国家经委和能源部, 现挂靠在国家经济贸易委员会, 同时为中国工业经济协会团体会员, 中国工程咨询协会团体会员以及中国科技技术协会的联系团体。

该会发展跨部门和跨行业的联系, 紧密结合我国石油和石化工业的需要, 发挥人才优势, 对石油和石化工程技术、生产和市场经济等有关问题, 开展调研、咨询、技术交流、技术评估、可行性研究、国内外技术经济合作、市场开拓、兴办经济实体等活动, 旨在为促进石油和石化工业的技术进步、生产和经济发展服务。