

液化天然气储罐用预应力锚具的静载试验研究

黄颖¹ 赵勇² 朱万旭¹ 付委¹ 蒋业东¹
陆明俊¹ 兰进军¹ 肖红文¹ 韦伟¹ 唐小萍¹

(1 柳州欧维姆机械股份有限公司 柳州 545005 2 上海同济大学建筑工程系 上海 200092)

摘要:液化天然气混凝土外罐中采用预应力技术,要求预应力锚具产品符合欧洲标准ETAG013的有关试验要求,以满足其低温使用要求。文章着重介绍了OVM公司19孔低温锚具的静载试验过程及结果。

关键词:液化天然气 LNG储罐 低温 预应力 锚具 低温静载试验

1 引言

LNG (Liquefied Natural Gas), 即液化天然气的英文缩写。天然气是在气田中自然开采出来的可燃气体,主要成分由甲烷组成。LNG是通过在常压下气态的天然气冷却至 -162°C ,使之凝结成液体。天然气液化后可以大大节约储运空间和成本,而且具有热值大、性能高等特点。天然气作为一种公认的优质、清洁、安全的能源,将成为21世纪消费量增长最快的能源,占一次性能源消费的比重将越来越大。目前在世界能源结构中天然气的比重为23%,而我国不到3%,尚处于起步阶段。我国从20世纪60年代开始着手LNG的研究,现已在广东深圳、福建、上海等地建成了多座LNG接收站,而到目前为止,建造LNG储罐的混凝土外罐中所采用的预应力锚具,仍然全部采用进口产品或国外品牌的产品。在发展国产化低温储罐用预应力锚具中,OVM公司率先开发了新型的低温锚具。为验证该预应力锚具产品的性能,根据欧洲认证标准ETAG013:2002 POST-TENSIONING KITS FOR PRESTRESSING FOR STRUCTURES中的要求进行了静载及疲劳检验试验。本文将着重介绍OVM公司19孔低温锚具的静载试验过程及结果。

2 试验检验标准

当锚具使用环境温度低于 -50°C 时,预应力混凝土储罐等建筑物如果采用常规材料生产的锚

具,其受力性能会发生明显变化,造成锚固性能降低,甚至破坏,因此对应用于低温环境的锚具应进行低温性能检验,保证锚具的可靠锚固性能。欧洲标准ETAG013的附件B.1.2中对低温静载试验做了详细要求,试验组构件与常温试验相同,分级张拉到 $80\%F_{pk}$ 保压1小时,随后温度降低到规定的低温(-196 ± 5) $^{\circ}\text{C}$,为模拟拉伸件随着低温容器温度升高引起若干损耗而导致的应力变化,试验中对拉伸件在室温抗拉屈服力 $F_{p0.1k}$ 和80%荷载水平之间进行10个加载循环,见图1。最后,预应力筋的荷载以每分钟0.002最大应变速率逐渐增加,直到破坏。要求锚固效率达到95%,破坏应是预应力筋断裂,而不是锚具部件的破坏导致。

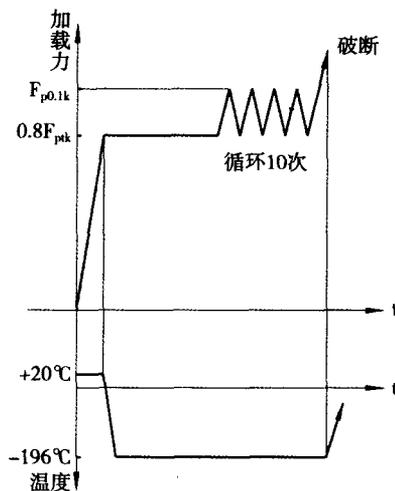
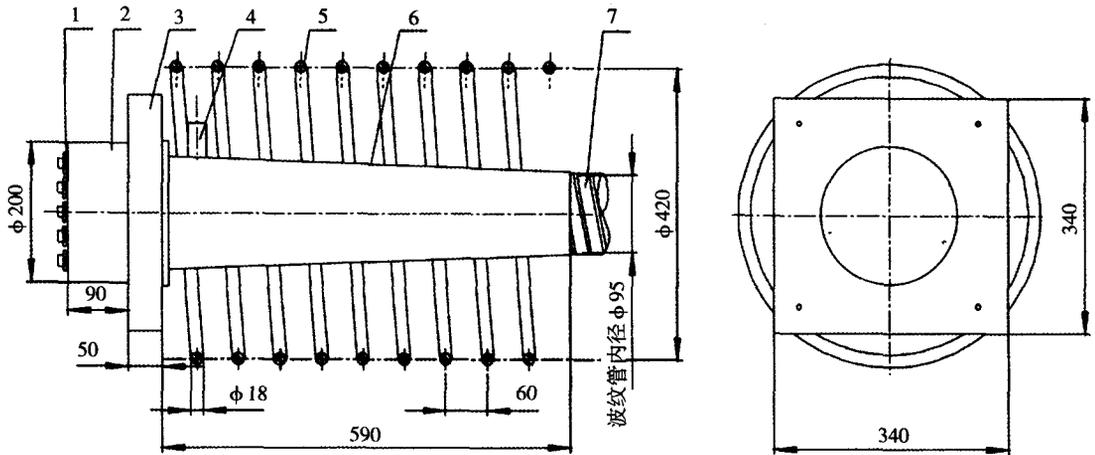


图1 低温荷载试验的试验程序图

3 试验加载装置

针对LNG储罐所用预应力锚具的使用规格，

选择OVM.DW15-19锚具作为试验对象，锚具结构及尺寸见图2。



1 夹片 2 锚板 3 垫板 4 灌浆孔 5 螺旋筋 6 喇叭管 7 波纹管

图2 OVM.DW15-19锚具结构示意图

3.1 试验组件

3.1.1 预应力筋

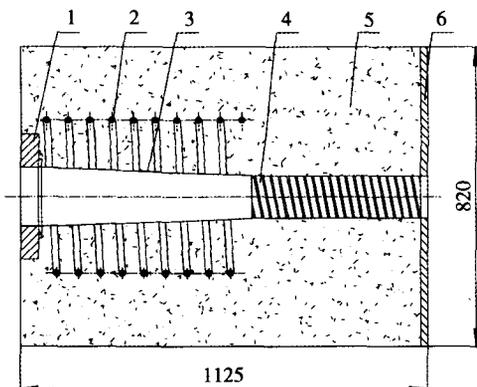
由19根符合英国规范BS5896-1980的低松弛预应力钢绞线组成，公称直径15.7mm，公称破断荷载 $F_{pk} = 5301\text{kN}$ （按1860级计算），公称截面积 $A_p = 2850.00\text{mm}^2$ （单根截面积为 150mm^2 ）。试验用单根钢绞线实测极限破断力为297.3kN，极限延伸率为6.6%。

3.1.2 锚固系统

OVM.DW15-19 锚具，由工作夹片、锚板、锚垫板（含喇叭管）、螺旋筋等组成。

3.1.3 混凝土试件

如图3所示低温试验锚固块，由C50混凝土制成。



1 垫板 2 螺旋筋 3 喇叭管 4 波纹管 5 混凝土 6 钢垫板

图3 低温试验锚固块

3.2 试验装置

试验装置由试验锚固块、试验支架、加载设备及测量设备组成，试验装置示意图见图4，试验采用YDC120Q千斤顶进行单根预紧，分级加载时采用YCW500A千斤顶，保压后采用YCW900A千斤顶破断。测力传感器为12000kN，位移传感器量程为300mm，试验过程温度采用热电偶，测温不确定度为 1°C 。

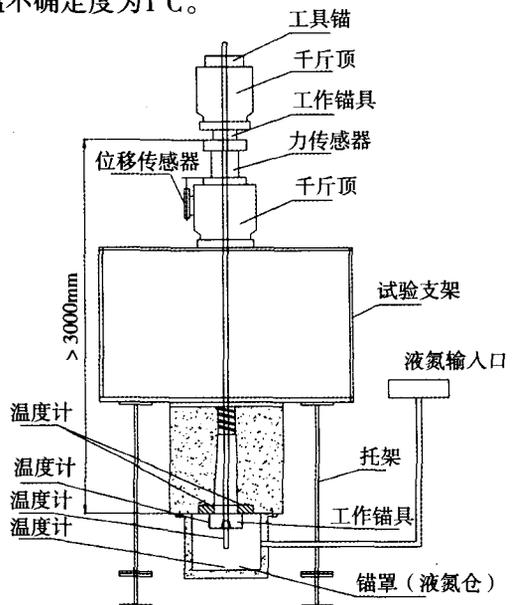


图4 试验装置示意图

4 试验过程

(1) 将样品、预应力筋安装在标定过的试验装置中（见图5），每根钢绞线先用单根张拉

千斤顶张拉到公称破断力 F_{pk} 的10%。共安装6个热电耦用于测量试验过程中关键零部件的温度,其中2个在钢垫板后端,在制作混凝土试件时已装入。在张拉千斤顶上安装位移传感器,用于测量钢绞线的伸长量。在锚板及钢绞线处装上位移传感器,用于测量锚板变形及钢绞线位移(见图6)。

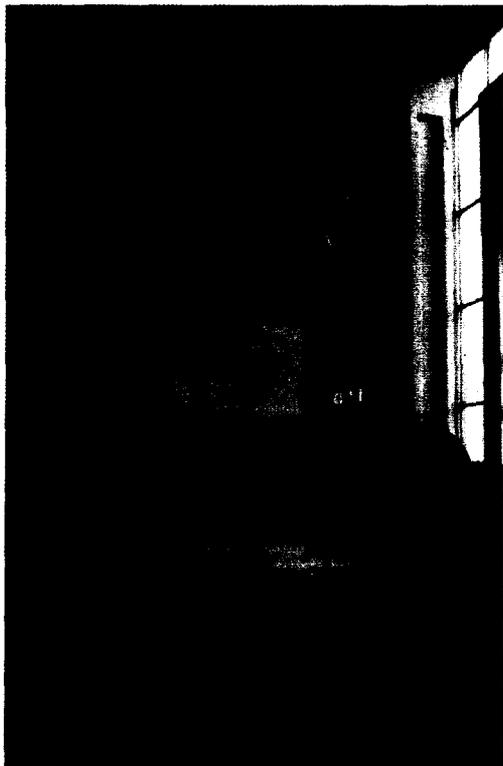


图5 试验装置

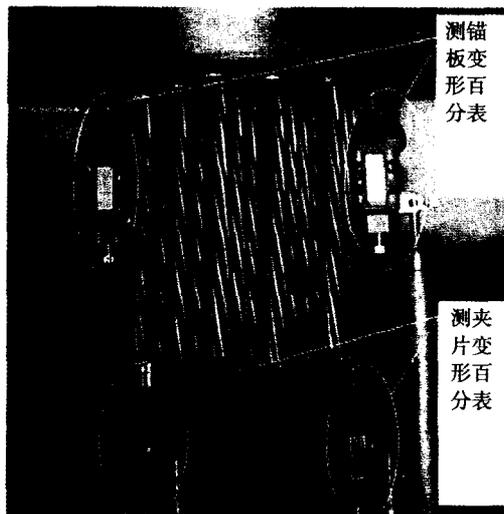


图6 安装百分表测量钢绞线中心丝位移及锚板变形

(2)用YCW500A千斤顶按每分钟100MPa的恒定速度张拉预应力筋,张拉步骤按拉伸件公称破断力 F_{pk} 的20%,40%,60%和80%逐级进行。张拉到80% F_{pk} 后,放张锚固,然后用YCW900A千斤顶补张到80% F_{pk} ,保压一小时,在逐级加载过程中,测量锚板变形及夹片和钢绞线的位移。在保压过程中安装低温端锚具的锚罩(液氮仓),保压后输入液氮(见图7)将温度降低到 $(-196 \pm 5)^\circ\text{C}$ 。

(3)安装在锚垫板背部的热电耦温度稳定后,循环张拉10次,张拉力范围是钢绞线常温时的公称破断力 $0.8F_{pk}$ 至公称屈服力 $F_{p0.1k}$,($0.8F_{pk} = 0.8 \times 279 \times 19 = 4240.8\text{kN}$, $F_{p0.1k} = 246 \times 19 = 4674\text{kN}$)。

(4)循环加载完成后,预应力筋的荷载以每分钟0.002最大应变速率逐渐增加,直至破断。

(5)卸荷后停止输入液氮,等锚具下端升温后,拆除锚罩及上、下两端锚具,观察并测量锚板尺寸,检查锚具是否损坏。



图7 向下端锚具的锚罩(液氮仓)内倒入液氮

5 试验结果

5.1 锚板

在未组装试验组件进行试验前,以及做完试验将夹片拆除后,对试验用锚板尺寸及厚度进行测量,检测其变形量,测量位置见图8。检测变形量见表1。

由表中数据可见,锚板外径最大变形量常温端为0.18mm,低温端为0.04mm,且低温端的底部直径收小,与常温端变形量比较,考虑是在低温环境下材料收缩所致;每块锚板在厚度方向共

测5个点, 变形量最大0.12mm, 证明无论常温端或低温端锚板直径及厚度变形量极小, 锚板强度足够。

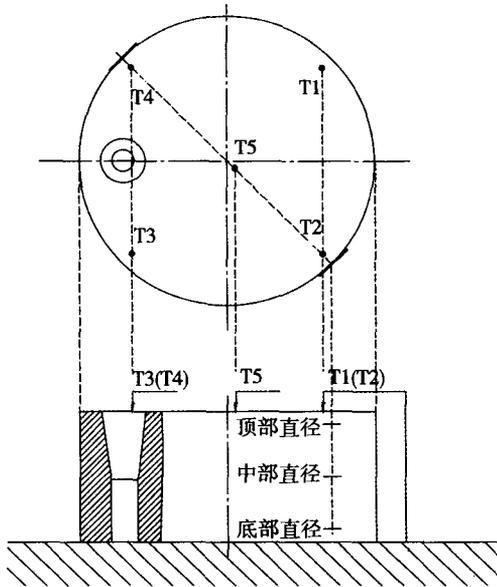


图8 锚板直径、厚度变形量测量位置

表1 试验前后锚板直径、厚度变形量

位置	上端锚板 (常温端)	下端锚板 (低温端)
顶部直径	0.18	0.01
中间直径	0.05	0.02
底部直径	0.04	-0.04
T1	-0.08	-0.04
T2	-0.12	-0.12
T3	-0.06	-0.08
T4	-0.04	-0.04
T5	-0.06	-0.04

5.2 夹片与钢绞线跟进量、锚板变形量

在分级张拉时, 任选两根钢绞线, 测量下端的夹片与钢绞线跟进量、锚板锥孔边的锚板变形量, 钢绞线跟进量分测中心丝与边丝数值。见图6及图9, 测量数据见表2。

由表中数据可见, 钢绞线中心丝与边丝的移动量相当, 基本未滑移。夹片跟进量与张拉力值对应, 跟进时受力均匀, 相应的锚板孔周边变形最大为1.17mm, 对应表1锚板试验前后变形量可知为受力时的弹性变形, 锚板强度足够。

5.3 张拉力-位移、力-时间和位移-时间关系曲线

张拉过程中, 通过计算机数据采集, 绘出张拉力-位移、力-时间和位移-时间的关系曲线, 见图10。张拉力与位移的关系曲线可看到, 在常温时张拉到 $0.8F_{pk}$ 前的线性很好, 保压后向下锚具端的锚罩内加入液氮, 力值有所增长, 在钢绞线常温时的公称破断力 $0.8F_{pk}$ 至公称屈服力 $F_{p0.1k}$ 之间进行10次循环时, 重复性较好, 逐步加载至极限力的过程中钢绞线常温段仍走出明显塑性。

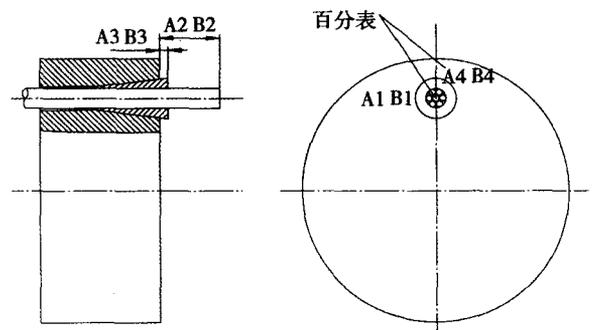


图9 锚板变形及夹片、钢绞线位移测点

表2 锚板变形及夹片、钢绞线位移量

分级张拉	钢绞线1 (位移mm)				钢绞线2 (位移mm)			
	中心丝	边丝	夹片跟进	锚板变形	中心丝	边丝	夹片跟进	锚板变形
	A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3	B4
$0.05F_{pk}$	0	0	0	0	0	0	0	0
$0.2F_{pk}$	0.8	1.0	0.4	0.2	1.0	1.0	0.5	0.22
$0.4F_{pk}$	2.1	2.0	1.6	0.51	2.53	2.0	1.6	0.56
$0.6F_{pk}$	3.3	3.0	2.7	0.79	3.82	3.2	2.6	0.85
$0.8F_{pk}$	4.8	4.0	3.9	1.07	5.3	4.2	3.7	1.17

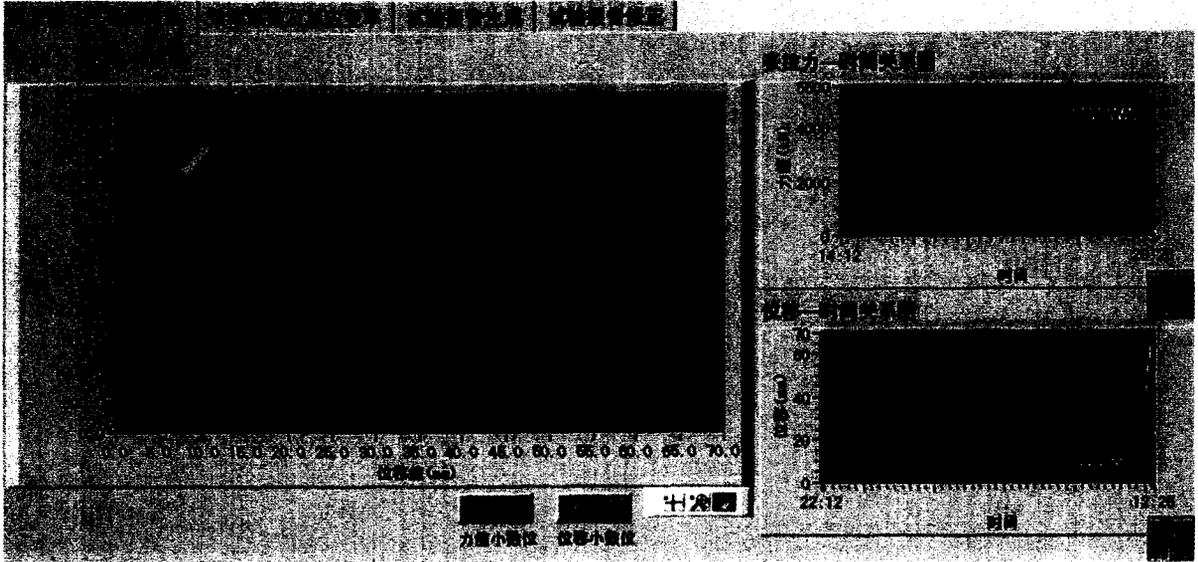


图10 张拉力-位移、力-时间和位移-时间的关系曲线

5.4 试验结果

张拉过程，对张拉力、位移及试验温度的记录见表3，图11为循环加载时的温度。

表中所示，此次试验测量到的最大荷载 $F_{tu}=5476kN$ ，最大荷载下延伸率 $\epsilon_{Tu}=2.81\%$ ，锚固效率系数按式(1)计算：

$$F_{tu} / F_{pm} = 5476 / 5648.7 = 0.969 \quad (1)$$

张拉力和延伸率都达到要求，为了保护低温设备，试验未拉至破断。将试验后锚具拆下后检

查，常温端的锚板、夹片与低温端的锚板、夹片、锚垫板均完好无裂纹。照片见图12。

按以上试验方法，使用不同钢绞线生产厂家的低温钢绞线，共做了9组OVM.DW15-19试验，结果见表4，均能满足以上要求。

在前期试验过程中，曾采用普通的后张预应力群锚进行试验，在低温试验过程中发生过锚具材料碎裂，并对试验设备造成损伤，因此提醒我们在锚具材料的选择上应进行严格控制。

表3 荷载、位移及温度记录

测量	荷载 (kN)	位移 (mm)	延伸率 (%)	温度 (°C)					
				液氮仓通道1	锚板1通道2	锚板2通道3	钢绞线通道4	锚垫板1通道5	锚垫板2通道6
0.05F _{pk}	268.6	0	0	-	-	-	-	-	-
0.2F _{pk}	1062.8	-0.3	0.18	-	-	-	-	-	-
0.4F _{pk}	2123	-0.9	0.45	-	-	-	-	-	-
0.6F _{pk}	3183	-1.4	0.67	-	-	-	-	-	-
0.8F _{pk} 第一次达到	4238.6	-2.0	0.93	-	-	-	-	-	-
0.8F _{pk} 保压后	4178.4	8.7	0.92	24.9	24.7	23.3	24.1	23.5	22.9
1.0F _{p0.1k} 第1次循环	4680	10.0	0.96	-195.0	-194.8	-196.9	-195.9	-178.8	-166.3
0.8F _{pk} 第1次循环	4235	7.4	0.89	-195.1	-194.8	-196.9	-196.0	-179.0	-166.5
1.0F _{p0.1k} 第10次循环	4675	12.4	1.03	-195.2	-194.9	-197.0	-196.1	-178.0	-167.3
0.8F _{pk} 第10次循环	4236	9.6	0.95	-195.2	-194.8	-197.0	-196.0	-177.9	-167.2
极限荷载	5476	74.2	2.81	-195.3	-194.8	-197.0	-196.1	-171.5	-164.2

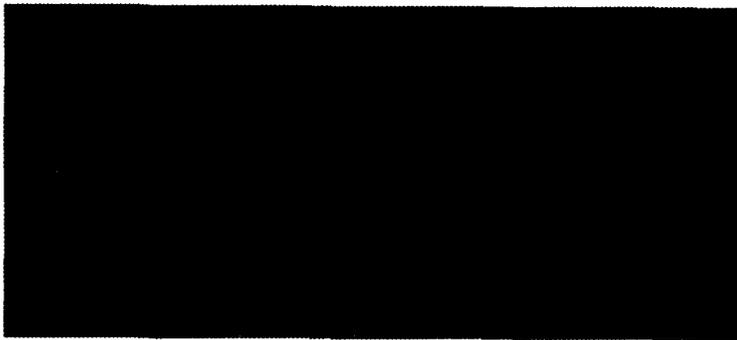


图11 循环到第9次时各测点的温度

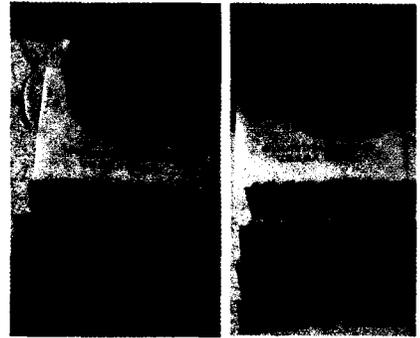


图12 试验完成后两端锚具完好

表4 静载试验结果汇总表

试件编号	锚具型号	破断时传感器读数 (kN)	计算极限拉力之和 (kN)	锚固效率系数 (%)	总应变 (%)	破坏情况
1-1	OVM.DW15-19	5339	5648.7	95	2.46	锚具正常, 绞线未断丝
1-2	OVM.DW15-19	5476	5648.7	97	2.81	锚具正常, 绞线未断丝
1-3	OVM.DW15-19	5370	5648.7	95	2.17	锚具正常, 绞线未断丝
2-1	OVM.DW15-19	5310	5443.5	98	2.45	锚具正常, 绞线断2丝
2-2	OVM.DW15-19	5214	5443.5	96	2.17	锚具正常, 绞线未断丝
2-3	OVM.DW15-19	5250	5443.5	96	2.22	锚具正常, 绞线未断丝
3-1	OVM.DW15-19	5274	5532.8	95	2.18	锚具正常, 绞线未断丝
3-2	OVM.DW15-19	5294	5532.8	96	2.22	锚具正常, 绞线未断丝
3-3	OVM.DW15-19	5504	5532.8	99	2.87	锚具正常, 绞线未断丝

5.5 试验结论

通过以上试验得知, OVM.DW15-19锚具在 $(-196 \pm 5)^\circ\text{C}$ 低温环境下进行静载试验, 满足欧洲标准ETAG013: 2002 POST-TENSIONING KITS FOR PRESTRESSING FOR STRUCTURES的要求。

6 结论

针对LNG储罐预应力锚具使用特点和要求, OVM公司经过多年的研究, 研制成功了OVM.DW15型低温锚具。除进行以上19孔锚具静载试验, 还进行了多次其他孔位的低温静载试验研究, 总结低温锚具的研究结果, 可得如下结论:

(1) 开发的OVM.DW15型锚具, 在低温环境锚固效果好且性能稳定, 锚具完好, 满足LNG

储罐预应力锚具的工程应用, 为低温储罐用预应力锚具国产化奠定了基础;

(2) 在整个试验过程中, 锚具组件均无裂纹产生, 各零件材料选择合适;

(3) 进行低温静载试验, 须多考虑安全防护。

参考文献

- [1] ETAG013: 2002 POST-TENSIONING KITS FOR PRESTRESSING FOR STRUCTURES
- [2] GB/T14370-2007, 预应力筋用锚具、夹具和连接器[S].
- [3] 束廉阶, 朱益民, 楼海英. 20000m³液化石油天然气钢筋混凝土储罐后张法预应力施工技术[J]. 建筑施工, 2001(12): 100-105
- [4] 袁中立, 闫伦江. LNG低温储罐的设计及建造技术[J]. 石油工程建设, 2007(10): 19-22
- [5] 魏运均, 朱万旭, 田德胜. 浅谈大型低温液化气储罐结构及锚固[J]. 山西建筑, 2007(11): 88-89