

X65 深海卷管综合评价

周晓锋, 史庆志, 张传友, 韩永明, 宁玫, 李效华

(天津钢管集团股份有限公司技术中心, 天津, 300301)

摘要: 全球范围内海上石油和天然气的产量增长迅速, 尤其是在深海, 结果导致对于输送它们的管线管提出了更加严格要求。卷管式铺管法是 20 世纪开始发展起来的一种新型的海上铺管法, 具有铺设速度快成本低的特点。卷管式铺管法要求管线管有优良的机械性能、焊接性和耐腐蚀性能, 特别是抗疲劳断裂性能。本文作者对一批 $\Phi 323.8 \times 20\text{mm}$ PSL2 X65 管线管进行了综合评价试验, 评价结果完全满足深海用卷管的要求。

关键词: 深海; 管线管; 卷管; 综合评价

Comprehensive Evaluation of X65 Subsea Reel Linepipe

Zhou Xiaofeng, Shi Qingzhi, Zhang Chuanyou, Han Yongming, Ning Mei, Li Xiaohua

(Tianjin Pipe (Group) Corporation R&D Center, Tianjin, 300301)

Abstract: The oil and gas production in offshore regions worldwide is taking place in increasingly deep waters, as a result of which the requirements for the linepipe intended to transport the hydrocarbons produced are becoming more stringent. Reel-lay method configuration was a new pipe laying method developed in the 20th century, with the laying speed fast and low cost. Reel-lay method requires that the linepipes shall have excellent mechanical properties, weldability and corrosion resistance performance, especially anti-fatigue fracture performance. The author had done the comprehensive evaluation for the production of $\Phi 323.8 \times 20\text{mm}$ PSL2 X65 linepipe. The evaluation result indicates that these linepipes can satisfy the requirements of subsea reel linepipe completely.

Key words: Subsea; linepipe; Reel linepipe; Comprehensive evaluation

0 前言

随着科学技术的进步和人类对海洋石油资源认知水平的不断提高, 海洋油气勘探开发已从浅海走向深海, 甚至超深海。深水油气开发已成为世界石油工业的热点和科技创新的前沿。海洋石油、天然气勘探、开发, 油气集输问题成为海上

油气田开发研究的重要课题之一。卷管式铺管法是 20 世纪开始发展起来的一种新型的海上铺管法，具有铺设速度快成本低的特点。由于深海油气开采的作业环境通常在水下 1000m 以上，作业环境非常苛刻，卷管式铺管法用管线管相对于一般的管线管，在化学成分、几何尺寸、表面质量、机械性能、焊接性能、断裂韧性、疲劳抗力、耐腐蚀能力、止裂特性和产品可追溯性等方面有着更高的要求。

1 卷管式铺管法^[1]

卷管式铺管法是将管道在陆地预制场上接长，然后卷在专用滚筒上，送到海上进行铺设施工的方法。该方法的优点是 99.5% 的焊接工作可以在陆地完成，典型铺设速度可高达 1000m/h，平均约 600m/h，海上铺设时间短，成本低，每段管道可连续铺设，作业风险小。每个专用的卷管滚筒都和特定的铺管船一起搭配使用，普通卷管的管径可以从 2in. 到 12in. 不等，单层管的最大铺设管径可以达到 18in.，最大作业水深可以达到 1800m。这种铺管法需要的主要设备包括：陆地接长预制场地、卷管滚筒、管道矫直器、铺管船和其他常规施工机具设备等。

2 PSL2 X65 管线管的卷管评价试验

天津钢管集团股份有限公司生产了 1800t $\Phi 323.8 \times 20$ mm PSL2 X65 管线管，安排生产时就考虑了深海卷管技术要求（主要有 Technip OED-TP-104 和 Total GS EP PLR 201），从中随机挑取样管，按照 X65 钢级深海卷管的技术要求进行综合评价试验。

2.1 化学成分^[2~3]

此批 X65 管线管采取以低 C 含 Mn 钢为基础辅以微合金元素强化的钢种设计，利用少量的 Cr、Mo 元素提高钢的淬透性；利用 Nb、V 元素的微合金强化原理提高材料的强韧性指标；降低 P、S 含量，以减少中心偏析和 A 类 MnS 夹杂物；添加适量的 Cu、Ni 元素提高抗腐蚀能力；控制总 Al 量和降低 N 含量保证 $Al : N \geq 2$ 。钢种的成分上限见表 1，统计了成品管化学成分的 CEV 和 Pcm 直方图见图 1。

表1 钢种化学成分上限表

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
Max.	0.11	0.35	1.30	0.010	0.003	0.10	0.20
元素	Cu	Ni	V	Nb	Ti	Al	Ca

Max.	0.20	0.20	0.070	0.040	0.010	0.060	0.0060
------	------	------	-------	-------	-------	-------	--------

注：1) $CEV=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15$

2) $Pcm=C+Si/30+(Mn+Cr+Cu)/20+Ni/60+Mo/15+V/10+5B$

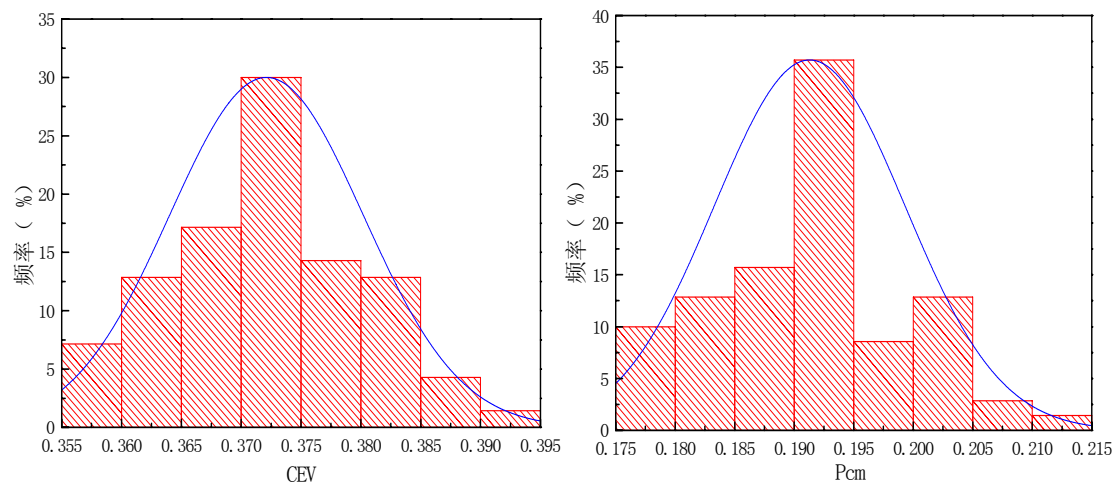


图 1 成品分析 CEV 和 Pcm 直方图

由图 1 可以看出此次炼钢生产实现了对各个元素的精确控制，使得 CEV 和 Pcm 完全在设定的目标值范围内，并且完全满足深海卷管对化学成分的要求。

2.2 拉伸性能试验

按照标准要求拉伸性能取纵向 $\Phi 12.7\text{mm}$ 的圆棒试样，生产检验屈服强度的范围是 470~570MPa，抗拉强度的范围是 565~650MPa，满足 X65 深海卷管的屈服强度和抗拉强度波动范围 $\leq 100\text{MPa}$ 的要求；生产检验的屈强比范围是 0.83~0.88，满足 X65 深海卷管标准屈强比 ≤ 0.89 的要求；断后伸长率的范围是 26~33%，满足 X65 深海卷管标准伸长率 $\geq 25\%$ 的要求；均匀伸长率 $\geq 10\%$ ，满足 X65 深海卷管标准均匀伸长率 $\geq 8\%$ 的要求。此次生产拉伸性能波动范围比较小，这与炼钢成份的精确控制和设置 CEV、Pcm 目标值有关。

2.3 冲击韧性试验

采用 $10\text{mm}\times 10\text{mm}\times 55\text{mm}$ 的横向 V8 冲击试样进行 -10°C 冲击韧性试验，生产检验 -10°C 的冲击功范围是 260~330J，远远大于 X65 深海卷管标准全尺寸冲击功平均值 $\geq 100\text{J}$ 的要求，说明管子韧性比较好。同时进行了屈服强度为 490MPa 和 540MPa 的成品管从 $+20^{\circ}\text{C}$ 到 -80°C 的系列冲击韧性试验，其韧脆转变温度都能保证在 -80°C 以下，足以说明此钢种具有优良的低温性能。

2.4 硬度试验

测量成品管横向维氏（HV10）硬度，生产检验的硬度平均值在 200HV10 左右，满足 X65 深海卷管标准硬度 $\leq 250\text{HV10}$ 的要求，并且统计内中外硬度发现内中外硬度最大差别不超过 15HV10，说明管子内中外性能非常均匀。

2.5 金相分析

对成品管进行金相分析，其组织如图 2 所示，为B_回+F，晶粒度为 9 级。



图 2 生产样金相

2.6 腐蚀试验

按照 NACE TM 0177-2005 标准对分别对 X65 管线管母材纵向（试样编号 1）和母材预加载 5%应变（试样编号 2）后进行三点弯曲 SSC 试验，试样施加实际载荷 545MPa 的 80%，在标准溶液 NACE-A 中浸泡 720h，溶液开始 PH 值为 2.7，结束 PH 值为 3.5，试验温度为 23~27℃。按照 NACE TM 0284-2003 标准分别对 X65 深海卷管进行母材纵向（试样编号 1）和母材预加载 5%应变（试样编号 2）后进行 HIC 试验，经过 NACE-A 溶液浸泡 96h。试验结果见表 2。

表 2 腐蚀试验结果

试样编号	HIC 试验结果			屈服强度 (MPa)	SSC 试验结果
	CLR	CTR	CSR		
1	0	0	0	545	未出现断裂及裂纹
2	0	0	0	/	未出现断裂及裂纹

表 2 试验结果表明X65 管线管应变前后的SSC和抗HIC试验都能通过抗腐蚀评价试验。有资料显示^[4]：加入 0.2%左右Ni和Cu能产生较好的抗硫化氢效果，C，S含量低，CEV小，也有利提高抗硫化氢能力。

2.7 应变时效

深海卷管在施工中要承受反复的拉压变形，为此进行了从2.5%到7.5%应变

和250℃保温1h的时效，分别加工成Φ12.7mm的圆棒试样进行拉伸试验和10mm×10mm×55mm的横向V8冲击试样进行-30℃冲击韧性试验，不同应变下的拉伸曲线见图3，时效敏感性系数与应变的关系如图4所示。同时还进行了5%应变和250℃保温1h的时效，加工成10mm×10mm×55mm的横向V8冲击试样进行从+20℃到-80℃系列冲击韧性试验，相同应变下的时效敏感性系数与温度的关系如图5所示。

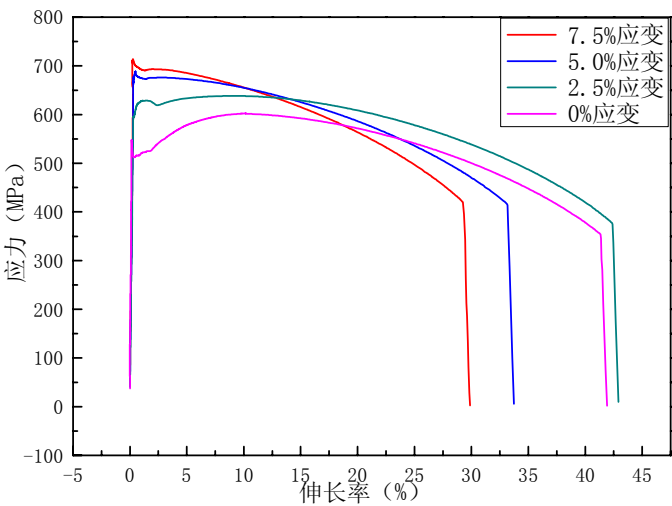


图 3 不同应变下的拉伸曲线

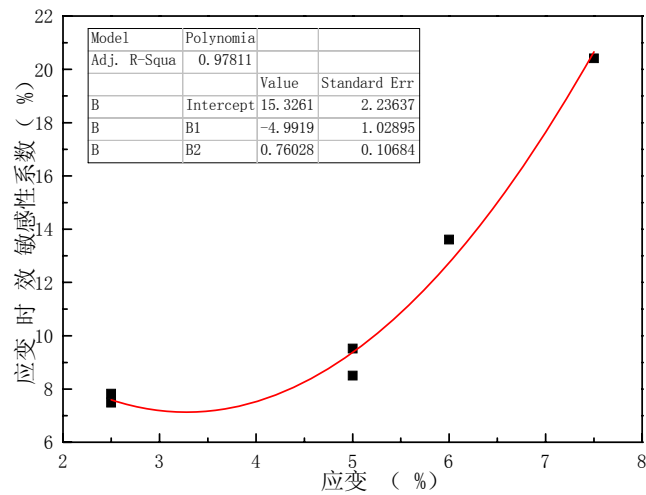


图 4 应变与时效敏感性系数的关系

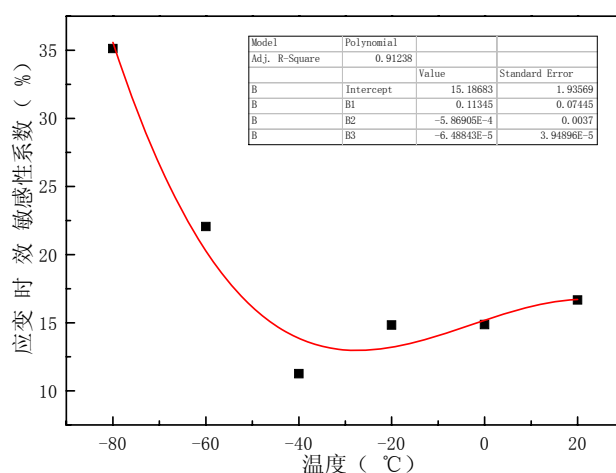


图 5 温度与时效敏感性系数的关系

应变时效敏感性系数反应了管材对应变时效的敏感性，应变时效敏感性系数越大，说明管材对应变时效越敏感，应变时效后的管材韧性越差，钢变脆。X65 深海卷管要求进行 5.0%的应变时效，从图 3、4、5 可以看出 5.0%应变时效后管子仍然具有很好的塑性。

2.8CTOD 试验

CTOD(裂纹尖端张开位移)断裂韧度是评价钢材及焊接接头抗脆断裂特性的重要参量。通过 CTOD 试验不但可以选择材料韧度，而且可以为结构的安全可靠性的评定提供试验依据。为此依据 BS 7448-1: 1991 标准在 MTS 810-23 试验机上以 3.0mm/min 进行加载，进行成品管母材（母材屈服强度 540MPa，抗拉强度 635MPa）的 SE(B)试样 CTOD 试验。试验结果三个 δ_m 的值分别为 1.303、1.388 和 1.291mm，足以说明此批 X65 管线管韧性很好。

2.9 模拟焊后热处理

根据 GS EP PLR 201 标准：每 25mm WT，在 600°C 下保温 1 小时。 $\Phi 323.8 \times 20$ mm 规格管子应进行 600°C 下保温 48min，然后空冷，模拟焊后热处理，进行 $\Phi 12.7$ mm 的圆棒拉伸试验，结果见表 3，同时进行了模拟焊后热处理前后横纵向 10mm×10mm×55mm 的 V8 系列冲击韧性试验，结果见图 6。

表 3 模拟焊后热处理拉伸性能比较

试样号	试样取向	屈服强度	抗拉强度	伸长率	屈强比	备注
1	纵向	545	630	46	0.87	母材
2	纵向	530	610	34	0.87	模拟焊后热处理 600°C×48'

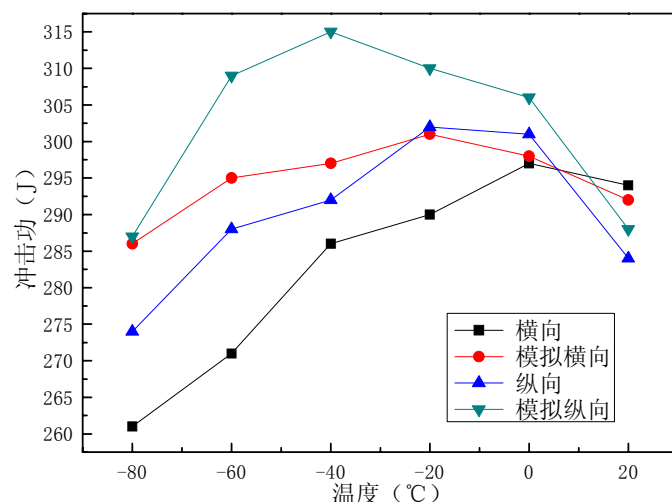


图 6 模拟焊后热处理前后系列冲击

由表 2 和图 6 结果可以看出模拟焊后热处理的管子与母材相比屈服、抗拉强度略有降低，但是横纵向的冲击性能有所改善。

2.10 焊接试验

对 X65 管线管按照 API 5L 要求进行坡口加工，采用 SMAW 方法，使用 557GS 焊条进行焊接，按照 API 1104 标准要求进行评价试验，评价内容包括：拉伸、刻槽、冲击、侧弯、金相。

2.10.1 拉伸

拉伸试样长 230mm，宽 25mm，在拉伸试验机上拉断，得到焊接试样的抗拉强度。拉伸性能数据见下表 5。

表 5 拉伸试验结果对比

试样号	试样取向	试验温度	抗拉强度	备注
1	纵向	20	615	母材
2	纵向	20	625	母材
3	纵向	20	635	焊接
4	纵向	20	630	焊接

断裂位置为母材，满足标准要求焊接试样的抗拉强度大于或者等于管材规定的最高抗拉强度的规定，拉伸性能合格。

2.10.2 刻槽

进行 2 组刻槽试验，刻槽试样长 230mm，宽 25mm，使用线切割在试样焊缝断面中心刻槽，每个槽深度约为 3mm。刻槽试样在拉伸机上拉断，刻槽断裂试样的断裂面完全是焊透和熔合的，无任何气孔，刻槽试验合格。

2.10.3 冲击韧性

保留焊缝位置取四组 10mm×10mm×55mm 的横向 V8 冲击试样，四组冲击试样的刻槽位置分别在焊缝中心、熔合线、熔合线外 2mm 和熔合线外 5mm，进行 -30℃冲击韧性试验，结果见下表 6。结果表明焊缝的冲击性能合格。

表 6 焊接冲击试验结果

试样号	取向	温度	AK1	AK2	AK3	AKv	A1	A2	A3	Av	备注
1	纵向	-30	157	130	160	149	100	100	100	100	焊缝中心
2	纵向	-30	263	222	228	238	100	90	100	97	熔合线
3	纵向	-30	236	230	236	234	100	100	100	100	熔合线外 2mm
4	纵向	-30	206	272	286	255	90	100	100	97	熔合线外 5mm

2.10.4 侧弯

进行 2 组侧弯试验，侧弯试样长 230mm，宽 13mm。将侧弯试样以焊缝为中心位置放置在下模上，焊缝表面与模具成 90°，施给上模压力，将试样压入下模内，直到试样弯曲成近似 U 形。焊缝处无裂纹，侧弯满足标准要求。

2.10.5 金相

焊接接头的宏观组织可分为三个部分：（1）中心焊缝区；（2）靠近焊缝的热影响区（3）母材金属。热影响区可分为：（1）熔合区；（2）粗晶粒区；（3）细晶粒区；（4）部分相变区。焊缝组织宏观形貌见图 7，焊缝组织见表 7。

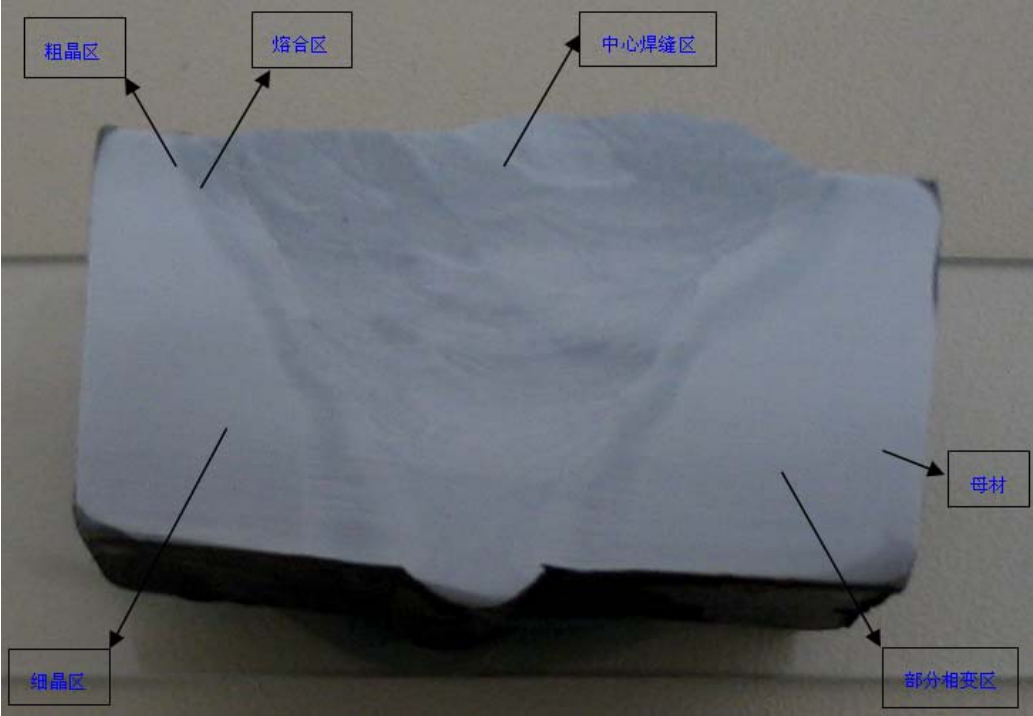


图 7 焊缝组织宏观形貌

表 7 焊缝组织宏观形貌

位置	夹杂物（级）	组织	晶粒度
----	--------	----	-----

	A		B		C		D			
	细	粗	细	粗	细	粗	细	粗		
母材	0	0	0.5	0	0	0	0.5	0	B _回 +F	9.0 级
焊缝	/	/	/	/	/	/	/	/	F+B+T（粗大柱状晶）	/
粗晶区	/	/	/	/	/	/	/	/	B+T	5.0
过渡区	/	/	/	/	/	/	/	/	F+T	9.0
细晶区	/	/	/	/	/	/	/	/	F+T	10.0

2.11 残余应力测试

由图 8 所示环切法测量无缝钢管的残余应力，计算公式如下：

$$\sigma_r = Et \left(\frac{1}{D_0} - \frac{1}{D_f} \right) (1 - \nu^2)$$

其中： D_f 为开缝后的外径平均值 $D_f = \frac{D_{f1} + D_{f2} + D_{f3}}{3}$ ，单位 mm；

D_0 为开缝前的外径平均值 $D_0 = \frac{D_{01} + D_{02} + D_{03}}{3}$ ，单位 mm；

ν --泊松系数 0.30；

E —弹性模量，单位 MPa，取 $E=20.6 \times 10^4 \text{MPa}$ ；

t 平均壁厚，单位 mm。

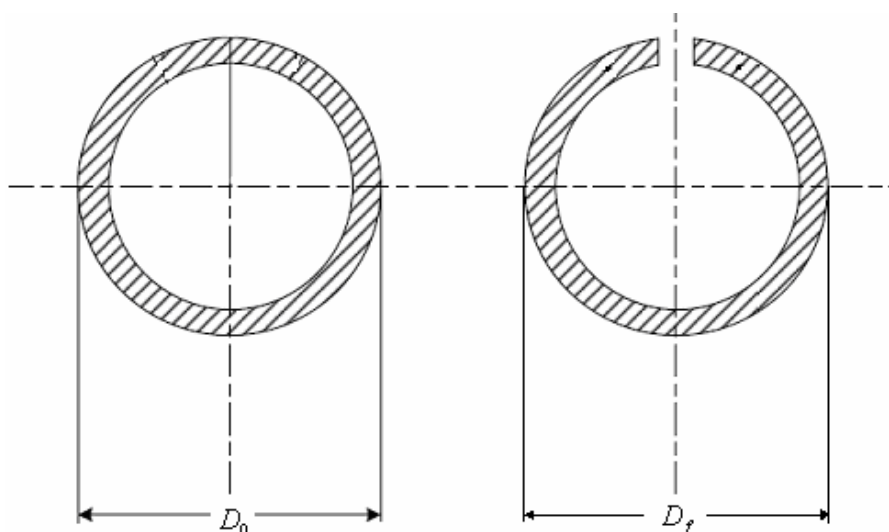


图 8 环切法测量残余应力图

将测量并记录的相关数据带入上面残余应力计算公式计算得到残余应力值为 75.34MPa，占实际屈服强度的 14.22%。

2.12 压扁试验

取 120mm 长 $\Phi 323.8 \times 20\text{mm}$ X65 管线管根据公式 $H = \frac{(1+0.07)t}{0.07+t/D}$ 要求进行压扁试验，压扁曲线见图 9。压扁处钢管内外表面没有裂纹和开裂。

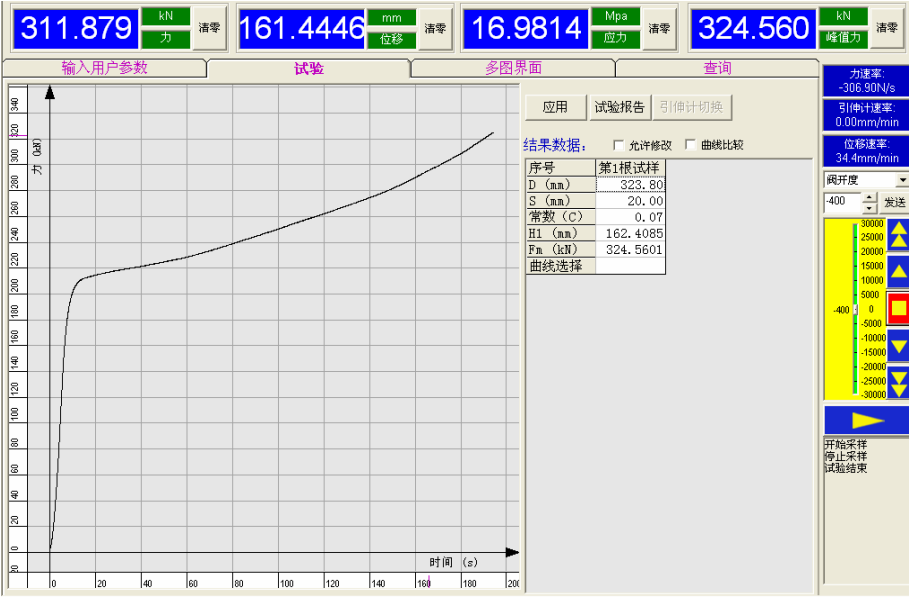


图 9 压扁曲线

2.13 压溃试验

深海管线都铺设在深度1000m以上的海底，管子要承受很大的海水压力，所以很有必要进行整管的压溃试验。取一段4m长 $\Phi 323.8 \times 20\text{mm}$ X65管线管进行压溃试验，压溃曲线见图10。

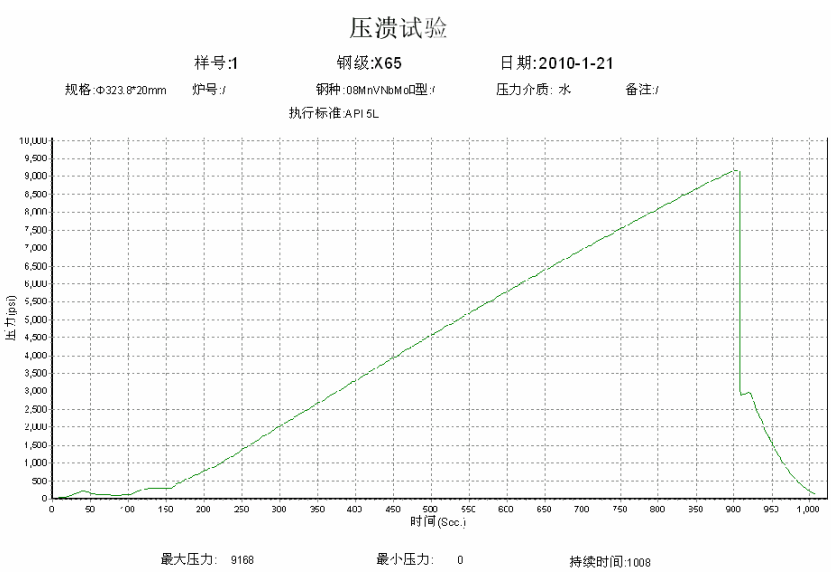


图 10 压溃曲线

将试验前测量并记录样管的外径和壁厚数据带入 API 5C3 给出的计算套管

压溃值的计算公式 $p_P = f_{ymn} \left[A_C / \left(\frac{D}{t} \right) - B_C \right] - C_C$ 中, 计算出 X65 管线管的理论压溃值为 6800psi (46.88MPa), 样管实际压溃值为 9168psi (63.21MPa), 实际压溃值为理论的 134.83%。

3 结论

(1)X65 管线管化学成份完全满足深海卷管要求, 并且炼钢生产做到了对成分的精确控制, 设定了 CEV 波动范围, 为降低性能波动提供了保证。

(2)X65 管线管的拉伸、冲击和硬度这些指标完全满足深海卷管的严格要求; X65 管线管的系列冲击韧性试验结果表明此钢种的韧脆转变温度在-80℃以下, 低温性能优良; 管体为B_田+F组织, 晶粒度为 9 级。

(3)X65 管线管应变前后的 HIC 和 SSC 腐蚀试验表明 X65 管线管应变前后都具有良好的抗腐蚀性能, 满足深海卷管的要求。

(4)X65 管线管的应变时效试验和母材的 CTOD 试验表明此批生产的 X65 管线管具有良好的塑性和韧性, 满足深海卷管的要求。

(5)X65 管线管的模拟焊后热处理试验表明模拟焊后热处理对管子力学性能影响不大, 但是对冲击性能有所改善。

(6)X65 管线管对进行了焊接评价试验, 评价内容包括拉伸、刻槽、冲击、侧弯和金相, 这些完全满足 API 1104 标准要求。

(7)测量了 X65 管线管的残余应力, 残余应力值为 75.34MPa, 占实际屈服强度的 14.22%; 进行了 X65 管线管的压扁试验, 压扁处钢管内外表面没有裂纹和开裂; 进行了 X65 管线管的压溃试验, 实际压溃值为理论的 134.83%。

(8)X65 管线管进行的综合评价试验结果表明: 天津钢管集团股份有限公司已经成为国内首家能够生产 X65 深海卷管管线管的无缝钢管企业, 并已具备了批量生产能力。

4 参考文献

- [1] 叶伟. 海底管道新型铺管方法[D]. 浙江: 浙江大学, 2006
- [2] 胡克迈, 傅继成, 张传友. X56 钢级海底无缝管线管的研制[J]. 钢管, 2006(1): 43~46
- [3] 肖鸿光. HSL450S 海底管线管的开发[J]. 钢管, 2008(2): 23~28
- [4] 殷光虹, 施青, 孙元宁. 管线用钢氢致裂纹(HIC)影响因素分析[J]. 钢管, 2004(6): 20~26

作者简介

周晓锋(1979.3—)，男，汉族，河北省昌黎人，硕士，工程师，天津钢管集团股份有限公司技术中心，从事轧管工艺研究和新产品开发。

作者联系方式

地址：天津市东丽区津塘公路 396 号天津钢管集团股份有限公司技术中心

电话：022-24803113-8033；13821492084

传真：022-24801140

邮编：300301