

# 大口径高钢级螺旋埋弧焊管强度测试影响因素分析

Analysis for Factors Affecting Strength Testing of SAWH Pipe with Large Diameter

熊庆人<sup>1,2,3</sup>, 冯耀荣<sup>2,3</sup>, 张建勋<sup>1</sup>, 赵文轸<sup>1</sup>, 刘川<sup>1</sup>

(1 西安交通大学 材料科学与工程学院, 西安 710049; 2 中国石油天然气集团公司 管材研究所, 西安 710065; 3 中国石油天然气集团公司 石油管工程重点实验室, 西安 710065)

XIONG Qing-ren<sup>1,2,3</sup>, FENG Yao-rong<sup>2,3</sup>, ZHANG Jian-xun<sup>1</sup>, ZHAO Wen-zhen<sup>1</sup>, LIU Chuan<sup>1</sup>

(1 School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2 Tubular Goods Research Center of CNPC, Xi'an 710065, China; 3 The Key Laboratory for Mechanical and Environment Behavior of Tubular Goods of CNPC, Xi'an 710065, China)

**摘要:** 针对西气东输二线用大口径高钢级螺旋埋弧焊管, 采用两种试样进行拉伸试验。综合分析影响螺旋焊管强度测试的因素, 如试样形式、试验方法等。研究结果表明: 不同形式试样测定的螺旋焊管管体横向往屈服强度值是包辛格效应、形变强化效应及组织等因素综合作用的结果; 包辛格效应是影响其屈服强度测试结果的主要因素; 测定屈服强度时采用的总伸长量应根据胀环试验测定的管体实际屈服强度值确定。

**关键词:** X80 螺旋埋弧焊管; 拉伸试验; 包辛格效应; 形变强化; 胀环试验

中图分类号: TG457.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)06-0040-05

**Abstract:** The several issues such as the type of specimen and the test procedure which affects the strength testing of SAWH pipe are analyzed. It is presented that the yield strength value of base metal in transverse direction of SAWH pipe from different kinds of specimen may be affected by many factors, such as Bauschinger effect, strain hardening effect, bending angle of the specimens and micro-structure etc. The yield strength values were measured by two kinds of tensile specimen cut from SAWH pipe for the 2<sup>nd</sup> West-East Pipeline Project, the results show that Bauschinger effect is the main factor affected the yield strength measurement for the SAWH pipe used in the 2<sup>nd</sup> West-East Pipeline Project. It is suggested that the total elongation in total extension under load method for high grade SAWH pipe should be verified by ring expansion test.

**Key words:** X80 SAWH pipe; tensile test; Bauschinger effect; strain hardening; ring expansion test

在中国, 石油天然气特别是作为洁净能源的天然气的需求正在迅猛增长, 为了提高管道输送能力, 降低管道建设成本和运行成本, 迫切需要大规模采用高强度管线钢。

西气东输工程和陕京二线工程使用了 X70 钢级的管线钢管, 使我国跟上了国外的发展水平; 中油集团实施的 X80 管线钢应用工程, 首次将国产大口径 X80 螺旋埋弧焊管应用于西气东输冀宁联络线上, 进一步缩短了同国际先进水平的差距。目前正在建设的西气东输二线管道工程是世界上最长的 X80 输气管道, 管输量高达 300 亿立方米/年。不论长度、钢级、管径、壁厚还是输送压力和天然气组分, 西气东输二线

工程都堪称世界之最。

拉伸性能是管线钢管最基础和最重要的性能指标, 它是管道设计和安全评定的基础。对于低强度管线钢及螺旋焊管, 国内一直用展平的板状试样来测试其强度。但是, 在用这种试样测试高强度管线钢管, 如国产大口径 X80 螺旋焊管的强度时, 却遇到了有关试样形式、试验方法等方面的问题。关于高强度钢管的强度测试问题, 国际上有关研究机构如 EPRG, Trans Canada, EUROPIPE 等进行了一些研究<sup>[1-3]</sup>, 但其数据来源主要是 UOE 焊管, 涉及高强度 SAWH 焊管的较少。本工作对在国产高钢级螺旋焊管强度测试过程中存在的问题进行初步的分析和研究。

1 管线钢强度测试存在的问题

1.1 试样形状

API Spec 5L<sup>[4]</sup> 规定, 拉伸试样可以是全截面试样、板状试样或圆棒试样。管体横向板状试样应在室温下展平, 厚度为全壁厚, 对于外径大于 168.3mm 的钢管, 试样标距内宽度为 38.1mm。管体横向圆棒试样应从未压平的管段上截取, 可采用套取的办法进行加工, 根据管径和壁厚的不同, 试样标距内直径可为 12.7、8.9、6.4mm。

对于 X70 及以下钢级的螺旋钢管, 拉伸试验通常采用板状试样。在 X80 螺旋焊管的研制和试生产评价过程中, 采用板状试样进行拉伸试验, 常出现屈服强度偏低的情况, 有时甚至低于标准规定的下限值 (552MPa)。对于高钢级管材屈服强度测试时应该采用的试样类型, 有关的研究表明, 传统展平试样对屈服强度较低的钢管而言是适用的, 但对高强度钢管已不再适宜<sup>[2]</sup>。这一结论对高强度螺旋焊管是否适用, 本研究进行了一些对比试验。

1.2 试验方法

API Spec 5L 第 43 版 6.2.1 规定, 管线钢和钢管的屈服强度应为试样标距长度内产生 0.5% 总伸长 (用引伸计测定) 时所需的拉伸应力, 即采用负载下的总伸长法测出的  $R_{t0.5}$ 。

API Spec 5L 第 43 版 9.10.2.1 规定, 拉伸试验方法应符合 ASTM A370 钢产品力学试验方法及定义<sup>[5]</sup>的要求。而 ASTM A370 的 13.1.3 采用的负载下的总伸长法的注 6 中规定: 在采用负载下的总伸长法确定材料的屈服强度时, 如果屈服点不超过 80,000 psi (550MPa), 则总伸长量应为标距长度的 0.005, 即 0.5%; 但是如果屈服点超过了 80,000 psi, 除非将负载下的总伸长量增加, 否则这种方法无效。

这样在 X80 级别管线钢出现以后, API Spec 5L 6.2.1 与 ASTM A370 13.1.3 的注 6 出现了矛盾: 若按 6.2.1 的规定进行试验, 测得的是  $R_{t0.5}$ , 但按 ASTM A370 13.1.3 的注 6, 此结果是无效的, 而应该将负载下的总伸长量增加, 但增加多少并没有明确规定, 因此目前还是测定  $R_{t0.5}$ 。

1.3 试样制备过程

从直缝焊管管体上切取的横向板状试样是弯曲的, 而对于螺旋焊管, 由于成型方式的缘故, 从管体上切取的横向试样不仅存在弯曲, 还存在翘曲, 试样展平比较困难。如果试样平直度不够, 则可能会导致测试值低于实际值<sup>[6]</sup>。采用圆棒试样可减少试样平直度的影响, 但却去除了母材的表面部分。

2 试样准备及试验过程

2.1 试样准备

试验用钢管均为螺旋缝埋弧焊管, 钢级为 X60 和 X80。X80 钢管有两种管径, 一种为 1016mm, 另一种为 1219mm; X60 钢管管径为 1219mm。样品钢管的壁厚为 10.3~18.4mm。样品情况如表 1 所示。

表 1 SAWH 焊管样品情况  
Table 1 Type and geometry of SAWH

Serial number	Number	Steel grade	Out diameter/mm	Wall thickness/mm
1	84	X80	1016	14.6
		X80	1016	14.6
		X80	1016	14.6
2	85	X80	1016	15.3
		X80	1016	15.3
		X80	1016	15.3
3	87	X80	1016	17.5
		X80	1016	17.5
		X80	1016	17.5
4	6	X60	1219	10.3
		X60	1219	10.3
		X60	1219	10.3
5	B3	X80	1016	17.5
6	B11	X80	1016	14.6
7	P	X80	1016	14.6
8	A	X80	1219	18.4

2.2 试验过程

在距焊缝 90 的母材位置取横向拉伸试样, 试样形式有板状试样和圆棒试样两种。板状试样在室温下进行了展平, 试样标距内宽度为 38.1mm, 厚度为钢管原壁厚, 标距长度为 50mm。由于钢管壁厚和引伸计标距长度的限制, 所取圆棒试样直径为 6.4mm, 标距为 25mm, 加工时未进行展平。

3 试验结果及分析

3.1 试样形状对强度测试的影响

3.1.1 对抗拉强度的影响

将采用板状试样和圆棒试样测得的抗拉强度值示于图 1。由图 1 可以看出, 数据点基本上分布在对角线的两侧, 接近对角线, 说明两种形式的试样测得的抗拉强度值基本一致。

抗拉强度表征了塑性金属材料的光滑试样承受单向拉伸载荷时的实际承载能力, 它代表金属材料的最大均匀塑变抗力。对于同一种材料, 无论试样形式如何, 承受单向拉伸载荷时, 其承载能力相同, 因此, 板状

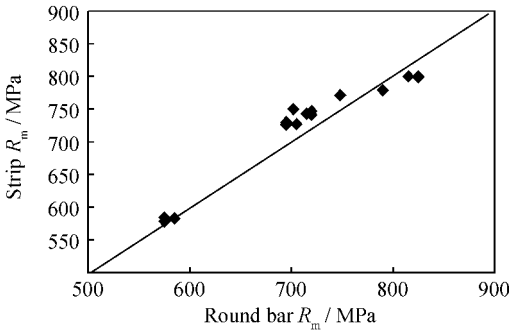


图 1 板状和圆棒试样的抗拉强度

Fig. 1 Ultimate tensile strength from the flattened strip and the round bar specimens

试样与圆棒试样测得的抗拉强度基本相同。对于高钢级大壁厚钢管, 由于冷却速度和变形量的不同, 造成近表面组织与心部组织有所差异, 而且钢级越高、壁厚越大, 差异也越大。近表面组织较为细小, 板条状和粒状贝氏体的体积分数明显多于心部, 且 MA 岛的分布更为均匀、细小。而在心部由于冷却速度较慢, 多边形和块状铁素体的体积分数明显增多, MA 岛也较为粗大 (如图 2 所示)。圆棒试样去除了表面部分, 因此其抗拉强度可能低于板状试样。

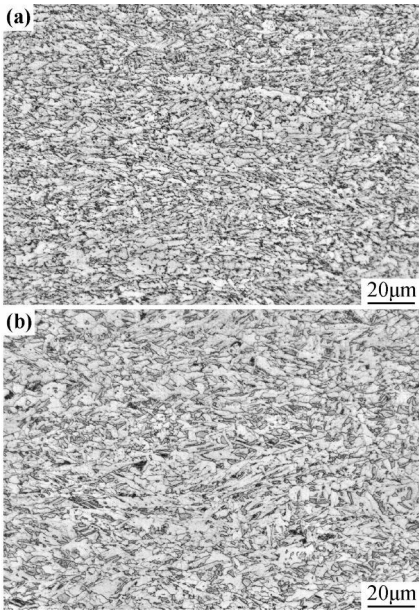


图 2 X80 高钢级厚壁钢管组织形态  
(a) 近表面; (b) 壁厚中心

Fig. 2 Microstructure of X80 high grade and heavy wall thickness pipe  
(a) near surface; (b) middle of wall thickness

为了进一步了解试样形式对抗拉强度测试结果的影响, 对西气东输二线用 X80 螺旋缝埋弧焊管采用不同形式拉伸试样进行了大量的拉伸试验, 其抗拉强度测试结果如图 3 所示。由图 3 可见, 数据点基本上分

布在对角线的两侧较窄的范围内, 说明板状试样与圆棒试样的测试结果基本相同, 与以上的分析基本吻合。

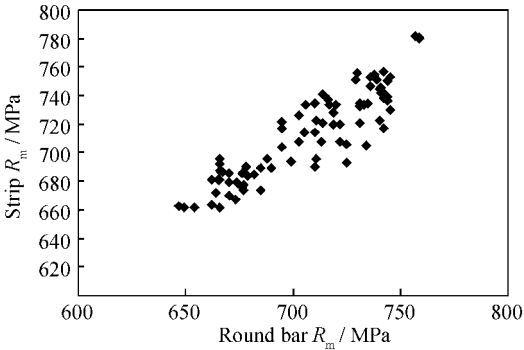


图 3 西气东输二线用螺旋焊管两种试样抗拉强度测试结果  
Fig. 3 Ultimate tensile test results by two kinds of specimen of X80 SAWH pipe for the 2<sup>nd</sup> West-East Pipeline Project

3. 1. 2 对屈服强度的影响

根据测试结果, 将采用板状试样和圆棒试样测得的屈服强度值示于图 4。可以看出, 当强度较低时 (X60), 板状试样的屈服强度低于圆棒试样; 当强度高时 (X80), 数据点分布在对角线的两侧, 但比较散乱, 距对角线的距离差异较大, 即板状试样屈服强度的测试值, 有的比圆棒试样低, 有的比圆棒试样高, 而且相差值亦不太稳定。通过分析螺旋缝埋弧焊管的成型及取样过程, 造成这种现象的原因是多方面的。

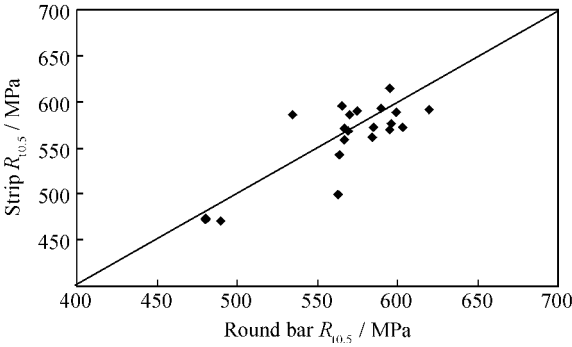


图 4 板状和圆棒试样的屈服强度

Fig. 4 Yield strength from flattened strip and round bar specimens

3. 1. 2. 1 包辛格效应

通常, 金属材料经过预先加载产生少量塑性变形, 而后再同向加载, 屈服强度升高; 反向加载, 屈服强度降低的现象, 称为包辛格效应 (Bauschinger effect)。管线钢在制管过程中和随后的拉伸试样的制备和试验过程中, 要经受拉压反复应变。具体地说, 就是螺旋焊管在制造过程中首先要拆卷, 然后成型; 板状试样在加工时要进行冷展平, 这一过程中材料的变形方向与成

型时的变形方向相反,这就导致了板状试样拉伸试验的测试结果必然包含了包辛格效应的影响,即包辛格效应会引起板状试样屈服强度的降低。而圆棒试样在加工时不允许冷压平,可以认为没有产生包辛格效应。从这个角度看,板状试样的屈服强度测试值要低于圆棒试样。

3.1.2.2 试样的弯曲度

API Spec 5L 标准只是要求板状试样在加工时要进行冷展平,但对展平的程度并没有做出明确规定。实际上,试样的弯曲度对板状试样的屈服强度测试值影响很大。图 5 表示了西气东输二线用螺旋焊管取样进行拉伸试验,板状试样具有不同弯曲度时,屈服强度的测试结果。文献[4]对拉伸试样弯曲度对屈服强度测试值影响的原因进行了较为详细的分析,这里不再赘述。因此,在加工板状试样时,必须严格控制试样的弯曲度。

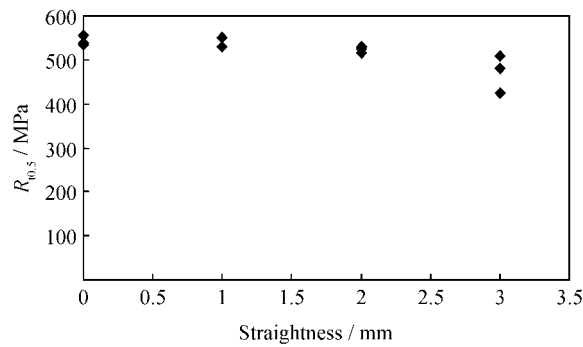


图 5 板状试样直度对屈服强度的影响

Fig.5 Effect of strip specimen straightness on measured yield strength value

3.1.2.3 加工硬化

从另一方面来说,从螺旋缝埋弧焊管截取的管体横向拉伸试样,除了沿周向的弧形弯曲外,由于成型方式的缘故,还存在程度不同的翘曲。因此,螺旋焊管的管体横向拉伸试样比 UOE 焊管的管体横向试样更加难以展平,而且强度愈高愈难展平,往往需要多次压平。这样就会由于冷变形使试样产生加工硬化,引起屈服强度升高。加工硬化决定于材料的应力-应变曲线,其是否存在屈服平台和屈服伸长的程度对管线钢的变形硬化有重要影响<sup>[7]</sup>。图 6 为拉伸试验时测得的 6 号(X60)和 87 号(X80)试样的应力-应变曲线。可见,X60 等强度较低的管线钢由于应力-应变曲线存在屈服平台,形变硬化现象不明显;X80 等高强度管线钢具有连续的屈服行为,形变硬化现象较为明显。因此,从 X80 钢管上截取的横向板状拉伸试样在冷压平后,由于形变强化效应,屈服强度会有所升高。

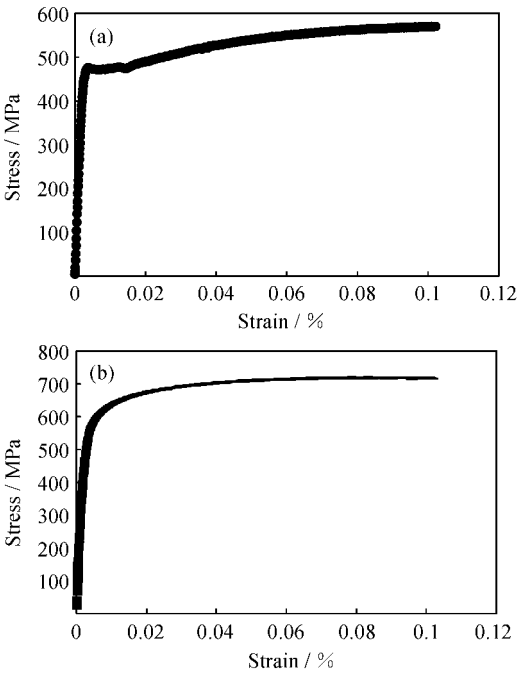


图 6 6# 和 87# 试样的应力-应变曲线

(a) 6# 试样; (b) 87# 试样

Fig.6 Tensile stress-strain curves of 6# and 87#

(a) 6# specimen; (b) 87# specimen

3.1.2.4 组织差异

综上所述,螺旋焊管母材近表面组织中粒状贝氏体等强度较高的组织含量较多,且 MA 多弥散分布,而心部一般块状和多边形铁素体量较大,屈服强度较低。这种心部和表面的组织差异,随着壁厚的增大而增大。板状拉伸试样的厚度为钢管的原壁厚,既包含心部组织,也包含近表面组织。圆棒试样在加工时,去除了母材表面部分。这样,板状试样的屈服强度就要高于圆棒试样,而且钢级越高、壁厚越厚,近表面和心部组织差异越大,板状试样和圆棒试样屈服强度的差异也越大。

图 4 所得的试验结果是上述多种因素综合作用的结果:包辛格效应较大或试样的弯曲度较大时,板状试样的屈服强度会低于圆棒试样;当后两个因素作用较为明显时,其屈服强度会高于圆棒试样。

图 7 表示了采用不同形式拉伸试样对西气东输二线用 X80 螺旋缝埋弧焊管进行拉伸试验的屈服强度测试结果。从图 7 可以看出,大部分圆棒试样的屈服强度测试值高于板状试样。这说明对于西气东输二线用 X80 1219mm 18.4mm 螺旋缝埋弧焊管,进行拉伸试验时,在上述各因素中,包辛格效应(还有板状试样弯曲度)的影响较为明显。

部分板状试样的屈服强度高于圆棒试样,这主

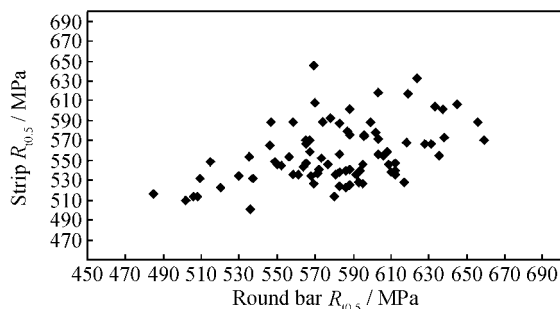


图7 西气东输二线用螺旋焊管两种试样屈服强度测试结果

Fig. 7 Yield strength test results of X80 SAWH pipe for the 2<sup>nd</sup> West-East Pipeline Project by two kinds of specimen

要是因为组织因素的影响较为明显。其典型组织如图8所示。可见,其壁厚中心的块状铁素体及珠光体含量明显多于近表面处,故圆棒试样测得的屈服强度较低。

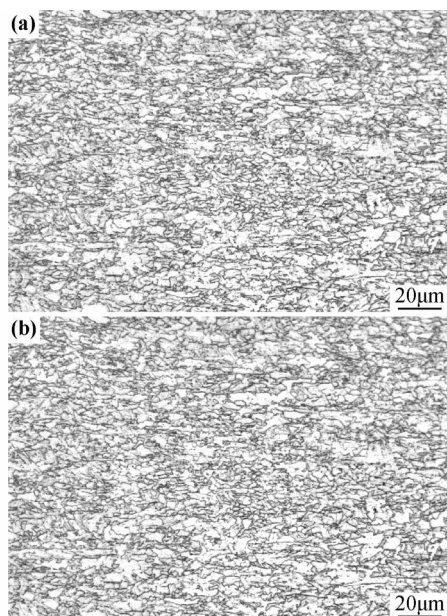


图8 螺旋焊管管体壁厚不同部位处的显微组织

(a) 管体表面组织; (b) 管体壁厚中心处组织

Fig. 8 Typical microstructure of X80 SAWH pipe

(a) surface microstructure of base metal;

(b) microstructure in middle of pipe wall thickness

### 3.2 实验方法对强度测试的影响

对于板状试样,在试验过程中测定了  $R_{t0.5}$ ,  $R_{t0.6}$  和  $R_{t0.7}$ , 对于圆棒试样,测定了  $R_{p0.2}$ ,  $R_{t0.5}$  和  $R_{t0.6}$ 。结果示于图9和图10。

从图9可以看出,对于板状试样, X60 钢级试样的  $R_{t0.5}$ ,  $R_{t0.6}$  和  $R_{t0.7}$  的测试值基本相同; X80 钢级的几组试样,  $R_{t0.6}$  比  $R_{t0.5}$  大约高出 20MPa,  $R_{t0.7}$  比  $R_{t0.6}$  高出 12~22MPa。这一结果是由 X60, X80 钢的应力应变

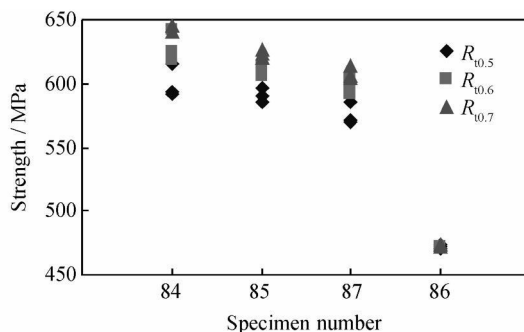


图9 板状试样的  $R_{t0.5}$ ,  $R_{t0.6}$ ,  $R_{t0.7}$

Fig. 9  $R_{t0.5}$ ,  $R_{t0.6}$  and  $R_{t0.7}$  of strip specimen

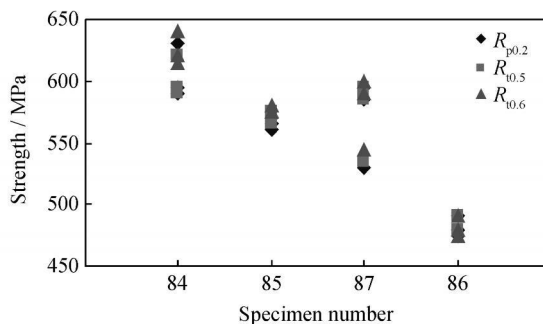


图10 圆棒试样的  $R_{p0.2}$ ,  $R_{t0.5}$ ,  $R_{t0.6}$

Fig. 10  $R_{p0.2}$ ,  $R_{t0.5}$  and  $R_{t0.6}$  of round bar specimen

曲线的特点决定的(见图6), X60 钢的应力-应变曲线有屈服平台,而 X80 钢具有连续的屈服行为。

图10的测试结果显示,无论 X60 或 X80 焊管,圆棒试样的  $R_{p0.2}$  与  $R_{t0.5}$  的测试值基本相同,  $R_{t0.5}$  与  $R_{t0.6}$  的测试结果亦表现出与板状试样相同的规律,只是部分试样  $R_{t0.5}$  与  $R_{t0.6}$  的差值较小,最小为 5MPa。

屈服强度测试时,应用胀环试验对焊管管体的实际屈服强度进行测试,选取  $R_{t0.5}$ ,  $R_{t0.6}$ ,  $R_{t0.7}$  中与之最接近的一个作为屈服强度的测试指标,以便解决 API Spec 5L6. 2. 1<sup>[4]</sup> 与 ASTM A370 13. 1. 3<sup>[6]</sup> 的矛盾。

## 4 结论

(1) 螺旋焊管管体横向拉伸试样的试样形式对抗拉强度的测定影响不大。

(2) 不同形式试样测定的螺旋焊管管体横向屈服强度值是包辛格效应、试样弯曲度、形变强化效应及组织等因素综合作用的结果。

(3) 对螺旋焊管不同形式试样的  $R_{p0.2}$ ,  $R_{t0.5}$ ,  $R_{t0.6}$  及  $R_{t0.7}$  进行了比对,建议测定屈服强度时采用的总伸长量应根据胀环试验测定的管体实际屈服强度值进行确定。

(下转第 49 页)

的反应活性区,使镀锌层耐蚀性能明显提高。

4 结论

(1) 硅烷偶联剂 KH-560 处理后的钝化膜在 5% NaCl 溶液中的电化极化曲线表明: KH-560 能影响镀锌层的电极反应过程,自腐蚀电流密度降低,提高镀锌层的耐腐蚀能力。由阻抗谱分析知,其极化电阻比空白试样有所增大,耐蚀性能接近铬酸盐钝化试样。

(2) 盐水浸泡实验结果及钝化膜表面分析表明: KH-560 钝化的水平已接近铬酸盐钝化,腐蚀速率已下降到未钝化试片的 36%。

参考文献

[1] 王双红,刘常升,单凤君. 镀锌板的有机硅烷钝化技术及其研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2008, 20(1): 35- 37.

[2] DIKINIS V, NIAURA G, REZAITE V. Formation of conversion silicate films on Zn and their properties [J]. Transactions of the Institute of Metal Finishing, 2007, 85(2): 87- 93.

[3] ARAMAKIK R. Preparation of chromate-free, self-healing polymer films containing sodium silicate on zinc pre-treated in a cerium ( ) nitrate solution for preventing zinc corrosion at scratches in 0.5M NaCl[J]. Corrosion Science, 2002, (44): 1375- 1389.

[4] 高红云,张招贵. 硅烷偶联剂的偶联机理及研究现状[J]. 江西化工, 2003, (2): 30- 33.

[5] ZHU D Q, VAN O W J. Enhanced corrosion resistance of AA 2024-T3 and hot-dip galvanized steel using a mixture of bis-[ triethoxysilylpropyl] tetrasulfide and bis-[ trimethoxy-silylpropyl] amine [J]. Electrochimica Acta, 2004, 49: 1113- 1125.

[6] MONTEMOR M F, TRABELSI W. Modification of bis-silane solutions with rare-earth cations for improved corrosion protection of galvanized steel substrates[ J]. Progress in Organic Coatings, 2006, 57: 67- 77.

[7] MONTEMOR M F, FERREIRA M G S. Analytical characterization of silane films modified with cerium activated nanoparticles and its relation with the corrosion protection of galvanised steel substrates[ J]. Progress in Organic Coatings, 2008, 10: 56- 64.

[8] 李振中,温变英,谭英杰. PP/ SiO<sub>2</sub>纳米粒子复合材料中偶联剂用量的确定[ J]. 华北工学院学报, 2001, 22 (2): 95- 97.

[9] 王雪明,李爱菊,李国丽,等. 金属表面制备 KH-560 硅烷膜涂层的工艺研究[ J]. 中国表面工程, 2004, (6): 27- 31.

[10] 王雪明,李爱菊,李国丽,等. 金属表面 KH-560 硅烷膜的粘结性能研究[ J]. 机械工程材料, 2005, 29(11): 8- 10.

[11] 吴海江,卢锦堂,陈锦虹. 热镀锌钢表面硅烷膜耐蚀性能的初步研究[J]. 腐蚀与防护, 2006, 27(1): 14- 17.

[12] 廖秀娟. 镀锌板的稀土钝化工艺的研究[ D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008. 40- 44.

[13] 吴海江,卢锦堂,孔纲. 热镀锌钢表面钨盐与硅烷处理后的耐蚀性能[J]. 腐蚀与防护, 2007, 28(7): 353- 356.

[14] CABRAL A M, DUARTE R G. A comparative study on the corrosion resistance of AA2024-T3 substrates pre-treated with different silane solutions composition of the films formed[ J]. Progress in Organic Coatings, 2005, 54: 322- 323.

收稿日期: 2009-11-20; 修订日期: 2010-03-15

作者简介: 韩利华(1972 ),男,博士,副教授,研究方向为电化学保护及缓蚀剂的研制,联系地址: 唐山市新华西道 46 号,河北理工大学教务处(063009),E-mail: tshlh@ heut. edu. cn

(上接第 44 页)

参考文献

[1] JFE Steel Corporation. Production and application of grade X80 line pipe[ A]. The International Symposium Proceedings on X80 Steel Grade Pipelines [ C ]. Beijing: Department of Science & Technology, China National Petroleum Corporation, 2004. 300- 305.

[2] GLOVER A. Research and application of X100 and X120[ A]. The International Symposium Proceedings on X80 Steel Grade Pipelines[ C]. Beijing: Department of Science & Technology, China National Petroleum Corporation, 2004. 164- 165.

[3] KNAUF G. Pipeline safety full scale behavior of high strength steels[ A]. The International Symposium Proceedings on X80 Steel Grade Pipelines [ C ]. Beijing: Department of Science & Technology, China National Petroleum Corporation, 2004. 237- 238.

[4] API SPECIFICATION 5L, Forty-Third Edition- 2004, Specification for line pipe[ S].

[5] ASTM A 370-07a-2007, Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products[ S].

[6] 熊庆人,霍春勇,申善颖. 拉伸试样弯曲度对屈服强度测试值的影响[ J]. 理化检验 物理分册, 1998, 1: 16- 17.

[7] 高惠临. 管线钢组织性能焊接行为[ M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1995.

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目 (2007-05Z-01-01)

收稿日期: 2009-02-16; 修订日期: 2009-11-09

作者简介: 熊庆人(1969 ),女,高级工程师,西安交通大学博士研究生,从事管线钢与管线管领域的试验研究工作,联系地址: 陕西西安电子二路 32 号,管材研究所(710065),E-mail: xiongqr@ tgrc. org