X100 螺旋埋弧焊管焊接 HAZ 微区组织与性能研究

张建勋[1]，孙 茜[1]，毕宗岳[2,3]，牛 辉[2,3]
（1.西安交通大学 材料科学与工程学院，西安 710049；
2.国家石油天然气管材工程技术研究中心，陕西 宝鸡 721008；
3.宝鸡石油钢管有限责任公司 钢管研究院，陕西 宝鸡 721008）

摘 要：针对 X100 螺旋埋弧焊管焊接热影响区(HAZ)的硬化与软化现象，研究了微区组织形态及 M-A 岛分布对 HAZ 显微硬度和微冲剪强度的影响规律。研究结果表明，显微硬度在 HAZ 的粗晶区出现局部升高，而在细晶及混晶区位置出现局部降低现象，显微硬度与微冲剪强度有一定的对应关系，即硬度值偏高的区域剪切强度也偏高；焊接 HAZ 的粗晶区为粗大粒状贝氏体，而细晶区为准多边形铁素体与多边形铁素体，混晶区组织为粒状贝氏体与铁素体的混合，母材为细小粒状贝氏体。组织中 M-A 岛含量分布规律为粗晶区—细晶区—混晶区依次减少。影响 HAZ 微区性能的主因是显微组织形态及其含量，HAZ 微区组织中的铁素体使得 HAZ 软化，而 M-A 岛使得 HAZ 硬化，而且含量越多，影响越大。

关键词：X100 管线钢；螺旋埋弧焊管；微区组织
中图分类号：TG113.26　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-3938(2012)12-0005-06

Research on Microstructure and Performance in Welding HAZ of X100 SAWH Pipe

ZHANG Jianxun[1], SUN Qian[1], BI Zongyue[2,3], NIU Hui[2,3]
(1. *School of Materials Science and Engineering, Xian Jiaotong University, Xi'an* 710049, *China*;
2. *National Petroleum and Gas Tubular Goods Engineering Technology Research Center, Baoji* 721008, *Shaanxi*, *China*;
3. *Baoji Petroleum Steel Pipe Co.*, *Ltd.*, *Baoji* 721008, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: In this paper, aimed at the softing and hardening in welding HAZ of X100 SAWH Pipe, the influence regulars of the microstructure and M-A island distribution on HAZ microhardness and micro impact shearing strength were investigated. The results showed that microhardness increases locally in the coarsed grain heat affected zone(CGHAZ), and slightly reduces in the fined grain heat affected zone(FGHAZ) and incomplete heat affected zone(ICHAZ). Simultaneously, there is corresponding relationship between microhardness and micro impact shearing strength, meaning the micro impact shearing strengh is high if the microhardness is high in the same region. The microstrucure of CGHAZ is granular bainite (GB), the quasi-polygon ferrite and polygon ferrite in the FGHAZ, the GB and ferrite in the ICHAZ, and the tiny GB in base metal. The content of the M-A island microstructure gradually decreases from the CGHAZ, FGHAZ, ICHAZ, to the base metal. The microstructure and its content are the main influecne factors to HAZ performance, the ferrite in microstructure can soften HAZ and the M-A island microstructure harden HAZ , and the influence is larger with the content of the ferrite and M-A island increasing.

Key words: X100 pipeline steel; SAWH pipe; microstructure performance

0 前 言

管线钢在焊接过程中，焊缝金属和焊后形成的热影响区(HAZ)强度、韧性等力学性能与母材相比都有所不同[1]。常规的拉伸试验只能测出整个焊接接头的平均强度，而对于焊缝、热影响区的局部性能并不能准确测量，史耀武等人[2]采用微剪切试验方法对高强度管线钢焊接接头的局部性能进行了测试，得出距焊缝中心不同距离的剪切强度分布，并通过计算得出对应区域的屈服强度及抗拉强度，与硬度测试结果形成对比；文献[3]针对管线钢焊接接头不同区域的剪切强度、剪切韧性及剪切塑性进行了研究分析。对于焊接接头的韧性而言，冲击韧性和断裂韧性已经成为其必不可少的衡量标准，国内外的许多学者多采用夏比冲击试验及 CTOD 试验对该韧性进行研究分析[4-5]。由于热影响区是焊接接头的薄弱环节，因此采用热模拟技术对该区域的韧性分析在许多报道中也有出现，并与微观组织进行综合分析[6]。Shin 等针对 X70 和 X80 两种管线钢的冲击韧性进行了研究，指出针状铁素体的有效晶粒尺寸对其冲击韧性的影响[7]。

高钢级管线钢在焊接后形成的焊接接头中，每个区域都会含有不同程度的 M-A 组元，尤其以热影响区最为严重，直接影响到该区域的性能。管线钢焊接热影响区中的 M-A 岛通常是以岛状或条状分布在铁素体基体及铁素体板条间，其形态及数量等因素对热影响区韧性的变化有影响。研究表明，条状 M-A 岛更容易诱发裂纹，在加载过程中，M-A 岛两端产生应力集中，极易同铁素体基体脱离或者开裂，成为起裂源，导致韧性的下降。尤其当条状 M-A 岛的平均弦长大于 2 μm 时，后果最为严重；而当 M-A 岛以细小块状弥散分布时，有利于提高韧性。文献[8]对母材和热影响区粗晶区及再热临界粗晶区中 M-A 岛进行统计分析，母材中 M-A 岛分布均匀，弦长较小，韧性较好，而粗晶区弦长较大，韧性极差。文献[9]主要针对碳含量不同的低合金钢做了研究分析，对粗晶区中 M-A 岛的平均弦长及所占的比例进行统计比较，并对其形态进行定义：当 M-A 岛的颗粒直径大于 2 μm 时为大颗粒形态，当 M-A 岛最大弦长与最小弦长比值大于 4 时为条状颗粒。对于高钢级管线钢焊接接头而言，热影响区的粗晶区中 M-A 岛基本以条状为主，分布在晶界及晶内，对韧性造成影响；而细晶及混晶区中的 M-A 岛以块状形式弥散分布，对韧性并未造成严重的影响，相反在一定程度上可以提高韧性。

Mohandas T 等针对高强度低合金钢的热影响区软化性能进行了研究，认为焊接形式、母材成分以及冷却时间的改变都会得到不同的软化区域，其软化宽度及软化程度也会出现明显的不同[10]；Bang K S 和 Kim W Y 利用热模拟技术对 TMCP 细晶铁素体钢的热影响区软化进行了预测研究，认为随着热输入的增加，软化区域宽度逐渐增大，而软化区域的硬度最小值不断减小[11]，针对焊接接头的抗拉强度也进行了分析，得出了拉伸断裂位置位于热影响区； Akihiko Takahas 与 Hiroyuki Ogawa 也对高强度管线钢的软化特征进行了研究[12]。

虽然针对软化特征已经有很多学者进行了研究，但并未对形成机理做出一致的结论，还需要进一步的探讨及分析。笔者从显微组织和 M-A 岛含量分析了 X100 螺旋埋弧焊管焊接 HAZ 的性能及其影响因素。

1 试验材料与方法

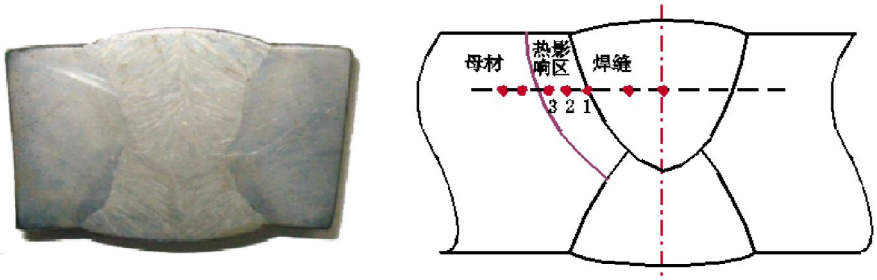
试验材料取自螺旋埋弧焊管，其规格为 ϕ 1 219 mm×15.3 mm。焊管母材为 X100 管线钢，其化学成分见表 1。

表 1 X100 管线钢化学成分 %

w(C)	w(Mn)	w(Ni)	w(Cr)	w(Cu)
0.05	1.95	0.39	0.28	0.21
w(V)	w(Nb)	w(Mo)	w(Ti)	w(B)
0.01	0.07	0.25	0.014	0.000 3

在螺旋埋弧焊管上取金相试样进行组织分析，分别在粒度为 240#，400#，600#，800#，1000#，1200#，1500# 砂纸上打磨，然后利用颗粒度为 2.5 的金刚石抛光膏进行机械抛光，最后采用 5%的硝酸酒精溶液进行腐蚀。利用 LEICA-DMIRM 多功能光学显微镜将显微组织放大 500 倍观察。采用 FEI Quanta 600 扫描电镜对焊接接头的显微组织进行了更精密的观察研究。

显微硬度是表征材料软硬程度的一种最直观的指标，本研究采用硬度测试仪对焊接接头不同区域的显微硬度进行了测定。加载力为 1 N，间隔 0.3 mm 取点，保载时间为 10 s。该硬度测试的布点形式为沿垂直于焊缝中心的方向，从焊缝中心到母材依次取点，如图 1 所示。



（a）试样　　（b）硬度测试位置

图 1　微冲剪切试样和显微硬度测试位置

微冲剪强度试验与硬度试验取点方式相同，采用多试样方法，试样厚度为 0.4 mm，间隔 0.5 mm，沿垂直于焊缝中心的直线，即焊缝—热影响区—母材的过渡，对焊接接头的剪切强度进行评价分析，试验的测试速率为 0.2 mm/min。显微硬度与微冲剪切强度试验结果如图 2 和图 3 所示，其中 HAZ1，HAZ2，HAZ3 分别代表热影响区粗晶区、细晶区及混晶区。

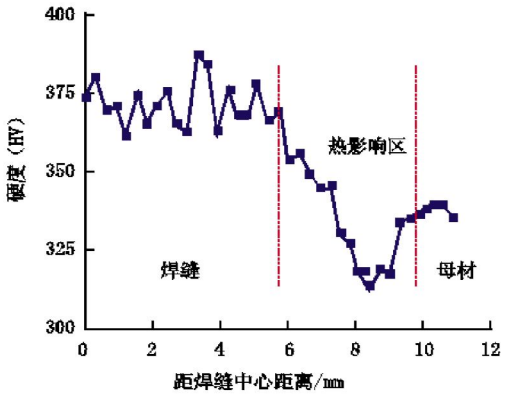


图 2　焊接接头显微硬度分布

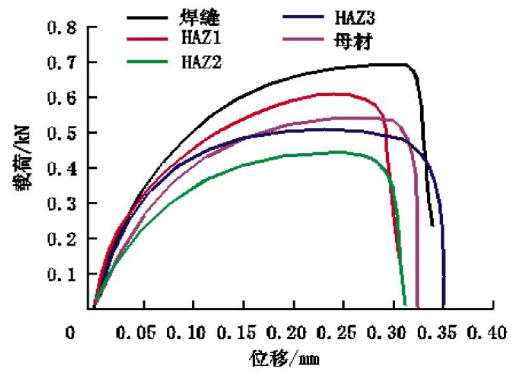


图 3　焊接接头微区冲压位移–载荷曲线

2　结果与讨论

对 X100 螺旋埋弧焊管焊接接头各个区域的组织组成、硬度分布、微剪切强度分布进行了研究，并着重分析了焊接接头各个区域组织与性能间的关系及影响因素。

2.1　焊接接头显微硬度

焊接 HAZ 实际上是靠近焊缝区域的经过不同热处理过程的母材。由于离焊缝的距离不同，具有不同的峰值温度，会形成不同的组织，进而在硬度上也会表现出一定的差异。

采用显微压痕法对焊接接头的硬度进行测试，结果如图 2 所示。由图 2 可见，焊接 HAZ 出现显微硬度值偏低的现象，较母材相比下降约 30 HV，出现了局部软化区，位于焊接热影响区的细晶区或混晶区域。关于在 HAZ 出现软化的机理并未见大量的研究，但其原因可能是由于该区间的铁素体回复与再结晶现象，导致位错密度下降而造成的。

同时，在热影响区的粗晶区硬度值较母材略微偏高，为局部脆化现象，该区域的尺寸约为 2 mm，与粗晶区宽度相吻合；焊缝区域的硬度值最高，平均约为 370 HV，而母材的硬度平均值为 340 HV，热影响区的最高值约为 360 HV，最低值约为 310 HV，即分别对应脆化及软化区域。

2.2　焊接接头微冲剪强度

对于管线钢而言，其熔化焊接接头的微区性能是有差异的，而采用常规的拉伸试验只能测出整体焊接接头的平均性能，其局部性能不能被精确测试。而采用微冲剪试验法能够对管线钢焊接

接头的局部性能进行测试，得出距焊缝中心不同距离的微剪强度分布，并通过计算得出对应区域的屈服强度[13]。

本研究微冲剪试验得到如图 3 所示的载荷–位移曲线。图 3 中标出了焊接微区各个区域的微冲剪载荷–位移曲线。

将图 3 中的最高点对应的载荷定义为最大剪切载荷。通过对距焊缝中心不同距离区域的最大剪切载荷整理并进行最大剪切强度换算，可以得到如图 4 所示的剪切应力分布曲线，图 4 中的 HAZ1， HAZ2， HAZ3 点对应热影响区的粗晶区、细晶区及混晶区。

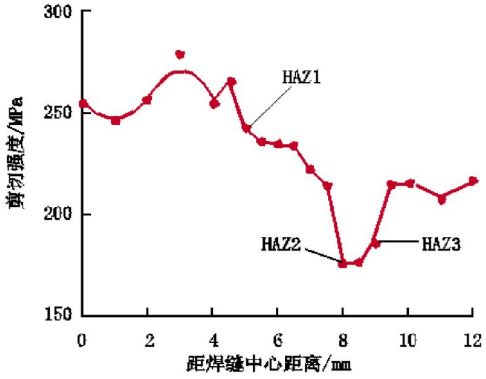


图 4　焊接接头微区剪切强度

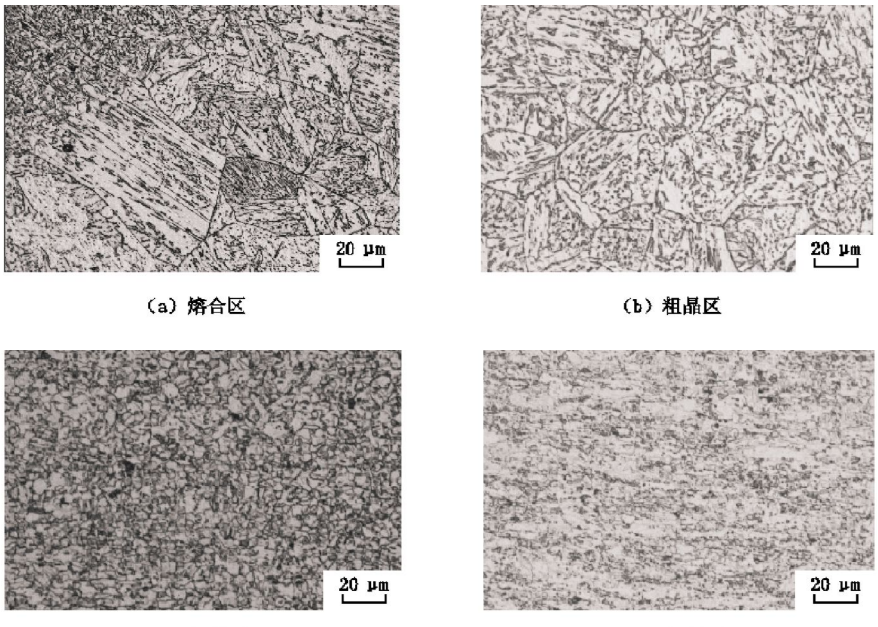
从图 4 中可以看出，该曲线与硬度曲线的趋势刚好吻合，即在焊缝处剪切强度最高，热影响区的粗晶区较母材强度值偏高，细晶与混晶区强度值偏低，同时也进一步说明脆化区强度较高，软化区强度相对较低；但就其结果来看，变化程度并不是很严重。

综上所述，对于该管线钢的焊接接头而言，焊缝—热影响区—母材在硬度和强度上都存在一定程度的差异，且两者具有相同的趋势：焊缝较高，母材次之，热影响区出现不同程度的脆化及软化现象。

2.3　影响焊接接头性能的因素

图 5 为 X100 螺旋焊管焊接 HAZ 组织分布。由图 5 可见，焊接熔合区处的晶粒要远大于粗晶区，但两者组织均为粒状贝氏体(GB)；当峰值温度达到 A_{C3} 以上 20~30 ℃时，会发生完全奥氏体化，使得晶粒细化，冷却后得到晶粒细小的铁素体组织及部分 M–A 组元。与粗晶区不同的是，该区域组织组成是晶粒尺寸较均匀且细小的块状铁素体，包括多边形铁素体(PF)及准多边形铁素体(QF)，称为细晶区；混晶区组织为少量细小铁素体(F)与粒状贝氏体的混合组织，两者呈带状分布，而母材则是细小的粒状贝氏体。与粒状贝氏体相比，铁素体具有更低的硬度。

在热影响区的这几个区域中，显微组织中都存在 M–A 岛，而高碳量的 M–A 岛为硬质颗粒，其含量越多，则硬度值越高。分析可知，熔合区—粗晶区—细晶区—混晶区—母材过渡中，M–A 岛含量逐渐降低，如图 6 所示。



(a) 熔合区　(b) 粗晶区

(c) 细晶区　(d) 混晶区

图 5　X100 螺旋焊管焊接 HAZ 组织的 OM 影像

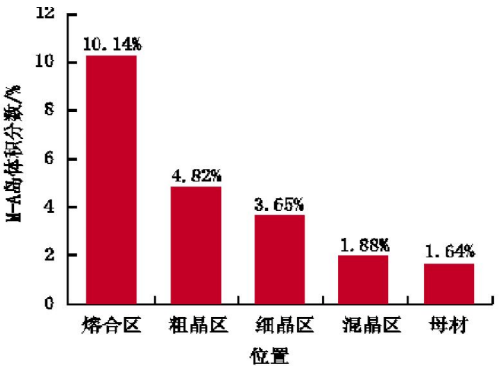
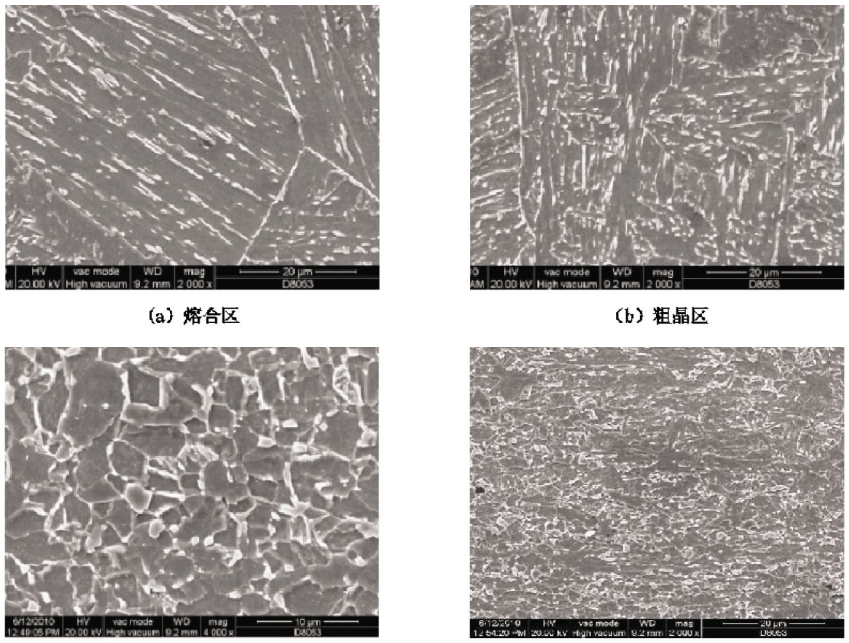


图 6　母材与 HAZ 的 M-A 岛分布

同时，M-A 岛的形态也会在一定程度上影响硬度值的变化。图 7 为焊接 HAZ 组织的 SEM 图，熔合区与粗晶区基本以条状及棒状为主，且平均弦长较大，而细晶区与混晶区为细小块状及颗粒状，平均弦长较小，分布均匀。除此之外，由于 M-A 岛中马氏体为硬相组织，奥氏体为韧相组织，故两者的比例也会使得该区域的硬度值发生变化。

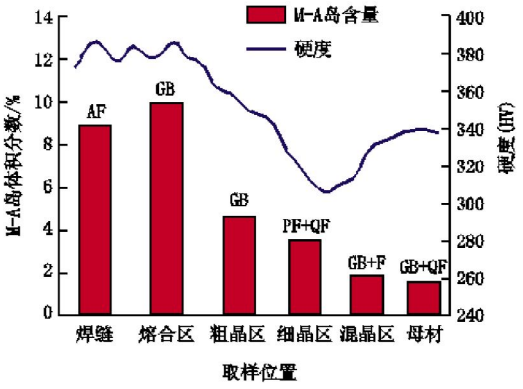
将焊接 HAZ 的组织与硬度变化汇总于图 8 中，可以较为清楚地分析影响软化的因素。由图 8 可见，细晶区硬度值较母材下降，即出现一定程度的软化现象，其原因在于细晶区显微组织出现了细小的铁素体，而该组织较粒状贝氏体具有较低的显微硬度；另一方面，从 M-A 岛含量(见图 6)可见，从焊缝到母材逐步下降，理应引起硬度的进一步减低，但混晶区和母材的硬度还较高，因此 M-A 岛对软化现象的影响则为次要因素。



(a) 熔合区　(b) 粗晶区

(c) 细晶区　(d) 混晶区

图 7　X100 螺旋焊管焊接 HAZ 组织的 SEM 图



AF—针状铁素体 GB—粒状贝氏体 QF—准多边形铁素体
PF—多边形铁素体 F—铁素体

图 8　影响焊缝与 HAZ 硬度的综合因素

3　结　论

(1) 对于 X100 管线钢管螺旋焊缝，在焊接 HAZ 的粗晶区处出现局部脆化，在细晶及混晶区位置出现局部软化现象；显微硬度与微剪强度有着一定的对应关系，即硬度值偏高的区域微剪强度也明显偏高，反之亦然。

(2) 焊接 HAZ 显微组织是决定 HAZ 显微硬度与强度的主要因素。HAZ 的细晶区出现的铁素体是引起 HAZ 软化现象的主要原因。

(3) 焊接接头中 M-A 岛含量是影响其显微

硬度和强度变化的次要因素。在焊接 HAZ 中，从粗晶区—细晶区—混晶区—母材，其 M-A 岛含量依次减少，但显微硬度和强度在混晶区和母材有所提高。

致谢：本研究得到宝鸡石油钢管有限责任公司科研基金的支持，以表感谢。

参考文献：

[1] 李鹤林. 天然气输送钢管研究与应用中的几个热点问题[J]. 焊管,2000,23(03):43-61.
[2] 史耀武,周宁宁,刘新平,等.微剪试验及对焊接接头力学性能的评价[J].焊接学报,1994,15(04): 235-240.
[3] ZHANG X P,DAM L. Estimation of the Local Mechanical Properties of Pipeline Steels and Welded Joints by Use of the Microshear Test Method[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping ,1998(75):37-42.
[4] 范玉然,刘宇,李烨铮,等.X100 高强度管线钢冲击韧性分析[J].科学技术与工程,2008,08(24):1671-1819.
[5] 何小东,马秋荣,王长安,等.高强度管线钢焊接接头不同缺口位置的断裂韧性研究[J].焊管,2009,32(08):21-25.
[6] 李为卫,刘亚旭,高惠临,等.X80 管线钢焊接热影响区的韧性分析[J].焊接学报,2006,27(02):43-46.
[7] SANG YONG SHIN , BYOUNGCHUL HWANG , SUNG-HAK LEE,et al. Correlation of Microstructure and Charpy Impact Properties in API X70 and X80 Line-pipe Steels [J]. Materials Science and Engineering A,2007(458): 281-289.
[8] 孟凡刚,陈玉华,王勇.管线钢局部脆化区的 M-A 岛[J].焊接技术,2007,36(01):13-14.
[9] 朱亮,陈剑虹.热影响区软化焊接接头应力分布特征及强度预测[J].焊接学报,2004,25(03):48-52.
[10] MOHANDAS T, MADHUSUDAN REDDY G. Heat Affected Zone Softening in High-strength Low-alloy Steels [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999 (88):284-294.
[11] BANG K S,KIM W Y. Estimation and Prediction of HAZ Softening in Thermomechanically Controlled-rolled and Accelerated-cooled Steel[J].Welding Journal, 2002,81 (08):174-179.
[12] AKIHIKO TAKAHAS, HIROYUKI OGAWA.Influence Hydrogen on Softened Heat-atfected Induced Cracking of a High Zone on Stress Strength Line Pipe Oriented Steel [J]. ISIJ International, 1995, 35(10): 1190-1195.
[13] 孙茜. X100 管线钢焊接接头组织与性能研究[D].西安:西安交通大学,2011.

作者简介：张建勋(1958—)，男，西安交通大学教授、博导，主要从事材料焊接与连接、材料结构强度与可靠性研究。

收稿日期：2012-08-15
编辑：刘志军

X80 级抗大变形钢管实现国产化

2012 年 11 月 5 日，由宝鸡石油钢管有限责任公司、中国石油集团渤海石油装备制造有限公司、鞍山钢铁集团公司、江苏沙钢集团有限公司 4 个单位研制的 X80 级抗大变形钢板和钢管，通过了“X80 级基于应变设计地区用 ϕ1 219 mm×26.4 mm 直缝埋弧焊管、X80 级基于应变设计地区用 26.4 mm 宽厚板”新产品鉴定。这是继 X80 级 ϕ 1 219 mm 螺旋焊管、直缝焊管、热煨弯管等产品国产化后，中国石油天然气集团公司在管材设计和制造上取得的又一进步。

中国石油天然气集团公司副总经理、党组成员廖永远出席了鉴定会并讲话。他表示，X80 级抗大变形钢板和钢管通过新产品鉴定，是中石油落实国家创新战略，推动企业技术进步，加快新产品、新工艺在国家重大工程应用上所取得的又一重要成果。中国管道建设正处在方兴未艾的时期，市场无限，机遇难逢。

为满足我国油气管网建设对高钢级管线钢的巨大需求，中国石油天然气集团公司 2009 年启动“西气东输二线管道工程关键技术”重大科技专项。两年多来，经过自主创新和艰苦拼搏，X80 级抗大变形钢管研制取得重大突破，打破了国外同类产品的垄断。

此次通过鉴定的 X80 级抗大变形钢管,将在西气东输三线等重大管道工程建设中全面应用。宝鸡石油钢管有限责任公司、中国石油集团渤海石油装备已具备大批量生产 X80 级抗大变形钢管的能力。

(李红丽 供稿)