

# 当前管线钢管研究的热点问题探讨

王晓香

(中国金属学会轧钢分会焊接钢管学术委员会,河北 青县 062658)

**摘 要:** 随着石油天然气资源的开发和发展,对油气长输管道的综合性能要求越来越高,管线钢管也向着高强度、大直径和大壁厚的方向发展。介绍了当前管道建设的发展动向,以及对管线钢管提出的更高的要求。分析讨论了当前管线钢管研究中出现的热点问题,指出了我国在这些方面与国际先进水平的差距。

**关键词:** 管线钢管; 热点; 超高强度; 发展

中图分类号: TE-9

文献标志码: A

文章编号: 1001-3938(2012)03-0005-06

## Discussion on Current Research Hotspots of Line Pipe

WANG Xiao-xiang

(Welded Pipe Academic Committee of China Metal Association Steel Rolling Branch, Qingxian 062658, Hebei, China)

**Abstract:** Along with exploitation and development of petroleum and gas, the performance requirements for long-distance transmission oil and gas pipeline is higher and higher, and the development of line pipe is towards high strength, large diameter and heavy wall thickness. In this article, it introduced development trend of current pipeline construction, put forward higher requirement for line pipe, analyzed and discussed hotspots occurred in current line pipe research, pointed out the difference between China and international advanced level on these aspects.

**Key words:** line pipe; hotspot; super high strength; development

### 1 当前管道建设的发展动向

目前,随着油气资源的开发和发展,偏远荒漠地区和苛刻环境油气资源的开发已提上议事日程。由于油气资源远离消费市场,如何安全经济地输送油气已成为管道建设是否可行的关键问题,特别是天然气的输送效益更为重要。为取得可行的经济效益,需要不断降低管道建设成本,提高输送效益。因此,当前油气长输管道建设呈现以下几个特点。

#### 1.1 单管输气量不断提高

以我国为例,早期四川和西北地区的天然气管道采用 X52 及以下钢级、 $\phi 426$  mm 以下管径的管线钢管,设计年输气量在 10 亿  $\text{m}^3$  以下;陕西一线第一次采用了 X60 级  $\phi 660$  mm 管线钢管,设计年输气量提高到 33 亿  $\text{m}^3$ ;西气东输一

线采用 X70 级  $\phi 1016$  mm 管线钢管,设计年输气量提高到 170 亿  $\text{m}^3$ ;最近建设的西气东输二线管道采用 X80 级  $\phi 1219$  mm 管线钢管,设计年输气量提高到 300 亿  $\text{m}^3$ 。

这种单管输气量不断提高的趋势仍在持续。当前国际上新一轮的巨型天然气长输管道,单管输气量将达到 450~500 亿  $\text{m}^3/\text{a}$  的水平。干线一般采用 X80 钢级,具有输送距离长、更高工作压力和大管径输送的特点。具有代表性的项目是正在建设的俄罗斯巴甫年科沃—乌恰天然气管道,管线长度 1100 km,采用 K65(类似于 X80)  $\phi 1420$  mm 管线钢管,输送压力为 11.8 MPa,单管设计输气量约 500 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ ,计划于 2012 年第三季度进行系统调试。另一个有代表性的项目是拟在北美建设的阿拉斯加北坡天然气外输管道,管道的输送能力约为 465 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ ,管线长度 2737 km,采

用 X80 级  $\phi 1219$  mm 管线钢管, 将阿拉斯加北坡丰富的天然气资源输送到加拿大和北美市场。

我国也已在规划研究未来多条西气东输管道(西三线—西八线)的方案, 包括将单管输气量提高到 400~500 亿  $\text{m}^3/\text{a}$  的多种方案都在研究之中。由于西气东输二线采用的 X80 级  $\phi 1219$  mm 管线钢管, 12 MPa 工作压力的方案只能达到 300 亿  $\text{m}^3/\text{a}$  的输气能力, 要将输气能力进一步提高到 400~500 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ , 只能进一步提高输送压力和管径。目前, 我国正在进行采用 X80 级  $\phi 1422$  mm 管线钢管的方案论证。

### 1.2 服役条件要求更加严酷

这些服役条件包括极低设计温度下的韧性要求。如  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下的 DWTT 剪切面积; 输送富气介质要求的高止裂韧性; 输送含  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{CO}_2$  等成分介质的抗腐蚀要求; 通过地震、滑坡及不连续冻土带等恶劣地质灾害区的应变能力; 以及深水海底管道的抗压溃能力等等。

### 1.3 对管线管的性能要求更高、更全面

这就要求管线钢管的标准和技术条件更加完善, 对管线管的技术要求更为全面。不仅对钢管的力学性能要求更加苛刻, 而且由于管道钢级、管径和壁厚的不断提高, 对保证现场环缝焊接质量和进度的要求更加迫切, 从而要求钢管具有低的碳当量和高可焊性, 同时要求钢管能够适应施工时的冷弯变形。

### 1.4 要求更加可靠的质量保证

现代管线钢管的质量要求越来越高, 如何通过现代化的信息系统提高管线钢和钢管制造厂的质量保证能力, 全面满足管道项目规范要求, 是取得重要管道项目客户信赖的关键条件。

### 1.5 要有良好的经济性

目前, 不断提高管线钢管的输送效益, 提升管线钢管的经济性, 以节约管道建设投资。但是, 在满足多种严格技术要求的前提下, 如何提高管线钢的生产效率和收益率, 降低成本, 成为在日益激烈的竞争中取胜的关键之一。

## 2 当前管线钢管研究的几个热点问题

### 2.1 第三代高性能管线钢的开发

管线钢从 X65 及以下钢级的铁素体-珠光体

型管线钢发展到 X70 和 X80 钢级针状铁素体型管线钢, 取得了很大的进步, 不仅钢管的屈服强度提高到了 555 MPa, 而且具有优良的断裂韧性, 其低温夏比冲击功 CVN 值可做到 300 J 以上, 同时具有良好的 DWTT 性能和钢管的可焊性, 为此, 在西气东输一线和西气东输二线等天然气长输管道项目中得到了大量的应用。但同时也暴露出了一些问题, 如 X80 针状铁素体型管线钢的屈强比较高, 常常突破 API SPEC 5L 给出的 0.93 的上限, 而且对应变时效比较敏感, 钢管在防腐过程中  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  以上的短时加热后, 其屈服强度和屈强比显著上升, 可能超出钢管技术条件要求, 而且烘烤后的应力-应变曲线形状有较明显的改变, 可能从圆屋顶型变为吕德斯延伸型, 不利于要求纵向应变性能的基于应变设计的应用。当提高强度级别时, 这一趋势更加明显。

为了解决这些问题, 设计出了新的制造技术。通过管线钢轧制过程的组织调控, 制造出具有一定比例软硬相的双相组织管线钢, 在具有高强度和高韧性的同时, 又具有较低的屈强比和应变时效倾向。其中比较典型的有日本 JFE 钢铁公司采用 HOP(在线热处理)技术开发的 HIPE 钢, 以及最近北京科技大学尚成嘉教授领导的研究团队采用多相组织调控技术开发的第三代低合金钢。

第三代管线钢(X70)的特点是: 屈服强度可实现平稳控制, 抗拉强度在 700 MPa 左右, 屈强比低于 0.8, 均匀延伸率大于 10%, 同时具有优良的低温冲击韧性和 DWTT 性能。制管冷加工后屈服强度平均只增加 20 MPa, 而抗拉强度增量更加明显, 增加了 40 MPa, 有利于对钢管屈强比的控制, 表现出优良的抗制管应变性能, 能够解决高钢级管线钢应变时效敏感性问题的。由于第三代管线钢采用了多相组织, 其高均匀延伸性质将大大提高钢管抗变形性能, 有望在基于应变设计的管线中得到广泛应用。第三代多相组织 X100 管线钢同样具有低屈强比( $\leq 0.8$ )、高强度和高韧性、抗应变时效性能好、均匀延伸高( $\geq 8\%$ )的特点, 有利于提高 X100 管线的安全性。

### 2.2 超高强度管线钢管的开发和应用

目前列入 API SPEC 5L 的超高强度管线钢管共有 X90, X100 和 X120 三个钢级, 但目前的

研究开发工作主要集中在 X100 上。X100 管线钢的开发始于 1994 年前后，从壳牌石油公司要求主要钢管生产商提供样品管的推动开始。X120 的开发，则是由美孚公司与钢管制造厂之

间的合作研究开始的。2000 年前后，钢管开发水平得到了很大的提高，在全尺寸气体爆破试验之外，开始了小规模建设试验段和试运行的情况，试验段的建设情况见表 1 和表 2。

表 1 世界上已建 X100/X120 管线试验段的情况

建设时间	项目	钢级	规格/mm×mm	长度/km	备 注
2002 年秋	西部通道	X100	$\phi$ 1 219×14.3	1	$\phi$ 1 219 mm×12 mm X80 管道的旁路
2004 年冬	戈丁湖	X120	$\phi$ 914×16.0	1.6	$\phi$ 610 mm×7.7 mm X70 管道的旁路
			$\phi$ 914×13.2	2	
2006 年夏	斯提兹维尔	X100	$\phi$ 1 067×14.3 大应变直缝埋弧管	5.5	$\phi$ 1 067 mm×13.4 mm X80 管道的旁路
			$\phi$ 1 067×12.7 螺旋埋弧焊管	2	
2007 年	麦凯堡	X100	$\phi$ 762×9.8 螺旋埋弧焊管	2	钢管由加拿大 IPSCO 提供
2009 年冬	NCC North Star	X100	$\phi$ 1 067×14.1	5	采用基于应变设计方法，钢管由新日铁提供
2010 年冬	NCC Red Earth	X100	$\phi$ 1 067×14.3	2.5	采用基于应变设计方法，钢管由 Europipe 提供
待定	Dikens, Verdie	X100	$\phi$ 1 067×14.1	37	全部基于应变设计

表 2 已建试验场试验段的情况

建设时间	项目	钢级	规格/mm×mm	长度/km	备 注
2003	TAP	X100	$\phi$ 1 219×18.4/16.6	0.7	Eni 集团
2006	Spadeadam	X100	$\phi$ 1 219×19.8	0.8	住友金属

国外 X100 管线钢管的开发研究内容主要有管材标准、性能及测试方法、环缝焊接工艺及性能、无损检测、现场冷弯、基于应变的设计方法、相关标准和规范的建立和完善、X100 钢管的断裂控制(包括全尺寸爆破试验)及 X100 钢管整体性能对天然气长输管道适用性的研究。

经过十多年的研究开发，国外先进钢管厂家已经掌握了 X100 管线钢管的制造技术，产品的性能和稳定性有很大的提高，能够批量稳定供应 X100 级 UOE 钢管。但国外开发的 X100 螺旋埋弧焊管的壁厚较小，只有 12.7 mm，难以适应未来大输气量管道的要求。

我国超高强度管线钢的开发始于 2006 年，巨龙钢管与鞍钢、南钢和宝钢合作，先后开发了 X100 和 X120 直缝埋弧焊管，少数样本的性能指标接近国外同类产品水平，但研究的深度和开发的程度与国外还有很大差距。特别是 X100 钢管对天然气长输管道适用性的研究几近空白，还未达到试验段建设要求，全尺寸爆破试验还未开展。

我国 X100 管线钢管的实际工业化应用进展

缓慢，究其原因主要是由于 X80 到 X100 跨距过大，要同时提高管线钢的强度和韧性十分困难；管道环向应力超过 450 MPa 之后的断裂控制问题没有解决；管道的环缝焊接也存在问题。根据我国批量生产西气东输二线 X80 钢管的力学性能分析，X90 的强韧性匹配比较容易达到，可以实现依靠管体韧性自止裂。为此，我们提出了同时开展 X90 开发研究的建议，得到了中石油集团公司领导的重视和支持，在 X90 螺旋、直缝埋弧焊管的开发方面取得了较大进展，这是具有中国特色的超高强度管线钢管开发技术路线，有可能较快取得突破，在国际上率先实现 X90 钢管的工业化应用。

### 2.3 高强度钢管断裂控制研究的新进展

天然气长输管线的延性断裂扩展控制是断裂控制方案的核心内容。目前采用的确定止裂韧性的方法主要是 Battelle 双曲线(TCM)方法。该方法是著名的断裂扩展和止裂的预测方法，通过断裂速度曲线和气体减压曲线来分析裂纹的扩展或止裂。断裂速度曲线通过夏比冲击吸收功的函数表示，该方程是在韧性低于 100 J 的传统低韧性钢的基础上形成的。在 20 世纪 70 年代，夏比冲击吸收功曾被作为确定止裂能量的一个判断标准。当前，管线钢的韧性早已超过 100 J，同时强度也大大提高。由于断口分离和上升平台能引起钢的性能变化，



导致对高强钢止裂能量的预测出现了偏差。

TCM 方法对于 X70 以下的低钢级管道是适用的, 对于 X70 和 X80 管道, 在经过适当修正后也能够适用。因此, 在西气东输一线和西气东输二线的断裂控制方案制订中, TCM 方法起到了关键作用。但是, 近年来进行的多次 X100 超高强度钢

管的全尺寸气体爆破试验结果表明, 这种方法难以直接应用于确定 X100 超高强度管道的止裂韧性, 如图 1 所示。图 1 说明 X100 钢管的预测止裂韧性与实测值有很大出入。特别是第一次 Demo 试验中的 4 个点(椭圆框内), 即使采用大于 1.7 的修正系数, 也不能做出正确的止裂韧性预测。

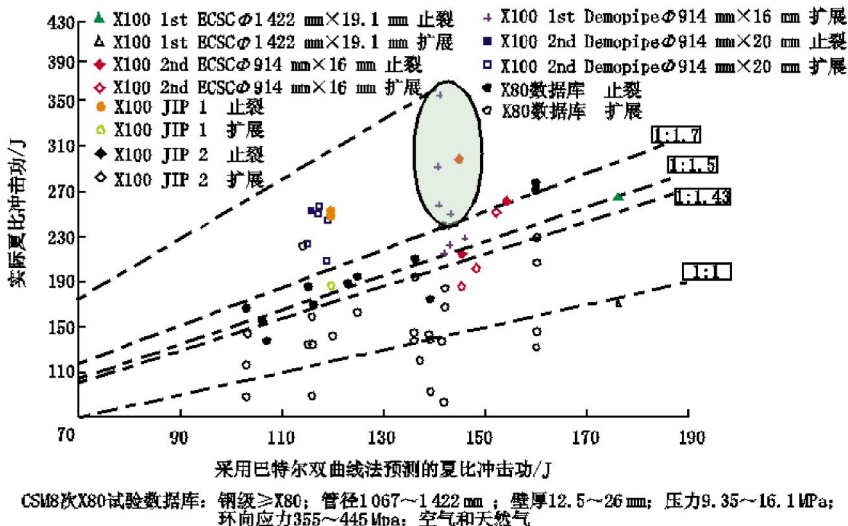


图 1 高强度钢管气体爆破试验实测止裂韧性与预测值的关系

鉴于现有的预测模型难以正确预测高强度管线钢管的止裂能力, 世界各国对 X100 管线钢管的止裂韧性预测进行了大量的研究。这些研究中有代表性的是日本住友金属和加拿大 TCPL 所进行的研究工作。

日本住友金属对影响止裂韧性预测的关键因素进行了研究。通过分析认为, 试样厚度对断裂韧性的影响被认为是造成 TCM 方法中断裂速率预测出现偏差的原因, 因为 DWTT 试样的厚度和钢管的厚度相同, 补偿了厚度对结果的影响, DWTT 冲击功比较适合作为对韧性的评定指标, 这个通过新开发的部分气体爆破试验得到证实。在此基础上, 采用 HLP 方法和新开发的断裂速率曲线提出了住友模型, 作为一种新的高压输气管道断裂扩展和止裂性能的预测模型。基于住友模型的预测, 计划并实施了 X100 全尺寸断裂扩展试验。将 X100 级  $\phi 914 \text{ mm} \times 19.05 \text{ mm}$  钢管加压到 22.07 MPa(对应于 76.8% SMYS), 然后进行爆破试验, 试验结果如图 2 所示。

与过去的全尺寸断裂扩展试验不同的是, 试验的所有钢管采用等韧性排布, 以证实韧性排布对裂纹扩展止裂长度的影响。试验成功地证实了两侧

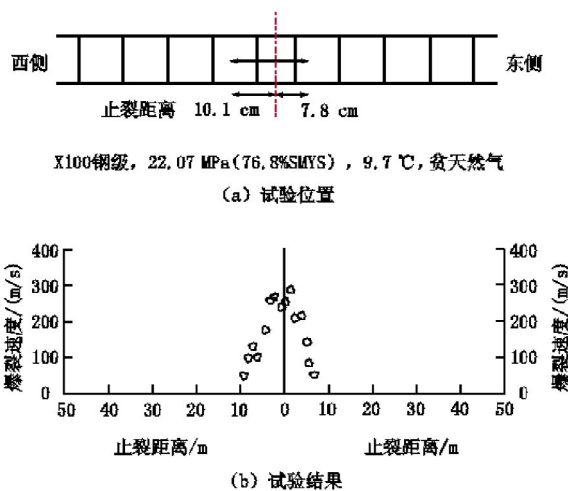


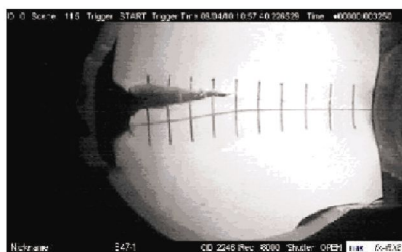
图 2 日本住友金属的等韧性排布爆破试验

的延性断裂扩展均在短距离内止裂, 说明甚至在超过 20 MPa 的高压下, X100 钢管也可能具有足够的自身止裂能力。这与传统的阶梯形韧性排布爆破试验的结果有很大差异, 表明等韧性排布更接近实际工况, 其结果对于确定止裂韧性更有价值。

日本住友金属认为, 在采用阶梯形韧性排布时, 起裂管的韧性低, 距起裂管较近的钢管韧性也较低, 造成过高的断裂速度在爆破管中传播,

而高断裂速度使钢管的延性断裂阻力降低，是造成止裂预测偏差的主要原因。根据住友模型分析了不同梯度韧性排布对止裂距离的影响。分析指出，即使是 10 J 的韧性梯度，就会使止裂距离从 13 m 扩大到 20 m，而 50 J 的韧性梯度则将使止裂距离扩大到 58 m。

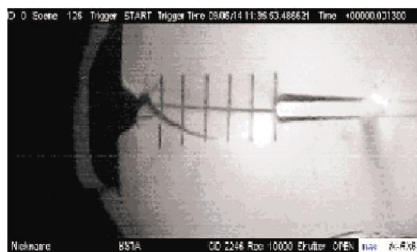
加拿大 TCPL 着重研究了断裂速度对管线钢延性断裂阻力的影响。TCPL 认为，落锤撕裂试验比冲击夏比试验能够更好地表征延性断裂阻力这一点虽然已成为共识，但传统的落锤撕裂试验获得的断裂速度太低(15.2~18.3 m/s)，而全尺寸爆破试验中的断裂速度为 91.4~305 m/s。因此，



(a) 图像一

依靠传统的落锤撕裂试验并不能获得在实际高速断裂情况下的阻力数据。

加拿大 TCPL 和哥伦布工程力学公司(EM-CC)合作开发了一种背面开槽的落锤撕裂试样以获取更高的断裂速度。把落锤撕裂试样的宽度从标准的 76.2 mm 增加到 127 mm，并在试样背面开槽，增加韧带长度，以获取更多的稳态数据；采用仪器化的锤头测量仪器，测量动态冲击过程的负载；采用数字化的高速视频摄像技术，获取动态断裂图像和荷载-位移曲线、稳态能量或单位面积能量。采用数字化高速视频摄像技术获取的动态断裂图像如图3所示。



(b) 图像二

图3 采用数字化高速视频摄像技术获取的动态断裂图像

试验结果表明，从断裂速度在少于 10~160 m/s 大范围内测得的断裂韧性数据与断裂速度有非常好的相关性，试验数据证实了断裂韧性取决于断裂速度的预测。在此基础上对 TCM 模型进行了改进，提出将单位断裂面积稳态断裂能作为动态断裂韧性的测量，纳入高速延性断裂的建模和预测，提高了其对 X100 止裂韧性预测的适用性。

研究结果也为止裂器的设计提供了重要的指导意义。研究表明，断裂速度也影响止裂器的设计，在较高压力下的管道可以获得较高的断裂速度。止裂器应能将断裂速度降低到稳态断裂点以下的断裂速度水平以实现止裂。富气输送管道的断裂应在单个止裂器内完全停止。

#### 2.4 焊管的大型化和厚壁化

目前，天然气长输管道出现了大型化的趋势，单管输气能力将提高到 500 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ ，出现了对 X80 大直径厚壁钢管的需求。如安塞乐米塔尔公司率先开发了壁厚 21.6 mm 的 X80 板卷，并在土耳其的伊尔斯亚斯钢管厂(ERCIYAS)制成 6 248 t 外径 1 422 mm 螺旋埋弧焊管；俄罗斯新建的巴甫年科沃—乌恰天然气管道，采用 K65 级  $\phi$  1 420 mm 直缝埋弧焊钢管，壁厚达到 23.0 mm、27.7 mm 和

33.4 mm；拟建的阿拉斯加天然气管道，采用 X80 级  $\phi$  1 219 mm 直缝埋弧焊钢管，壁厚 23.7 mm、31.6 mm 和 37.9 mm；希腊的柯林斯制管厂为爱尔兰天然气公司西柯利至米德尔顿管道批量生产了壁厚 19.1 mm 的 L450MB (X65)直缝高频焊管，并且成功试制了 X60 级  $\phi$  609.6 mm $\times$ 25 mm 的钢管。我国正在研究未来多条西气东输管道的规划，其中也包括管径 1 422 mm 的方案，一级地区 X80 钢管的厚度可能达到 21.4 mm，三级地区 X80 钢管的厚度也可能超过 30 mm。因此，X80 级  $\phi$  1 422 mm $\times$ 21.6 mm 的螺旋埋弧焊管、壁厚大于 32 mm 的 X80 级  $\phi$  1 422 mm 直缝埋弧焊管以及  $\phi$  660 mm $\times$ 25.4 mm 的高频直缝焊管是未来焊接管线管大型化的可能规格。

#### 2.5 螺旋焊管的复兴和预精焊工艺的推广应用

螺旋焊管历史悠久，早在 19 世纪 80 年代就已经出现，直到 1958 年研究出内外双面焊接工艺技术后，螺旋埋弧焊管在世界范围内才得到发展。1960 年以后，双面焊接螺旋埋弧焊管开始日益广泛应用。20 世纪 60—70 年代是螺旋埋弧焊管的第一次快速发展期。

20 世纪 70—80 年代，由于螺旋埋弧焊管工

艺落后、产品质量差等因素,导致螺旋埋弧焊管的应用迅速减少。

20 世纪 90 年代初,由于螺旋埋弧焊管制造技术方面取得显著的进步,并且新一代螺旋埋弧焊管性能优良且经济性好,进入 21 世纪以来,螺旋埋弧焊管在高压油气输送管道上的应用更是突飞猛进。许多国家纷纷在天然气长输管道上大规模应用螺旋埋弧焊管,其中最为典型的事例是美国近几年建设的两条 X80 级天然气长输管道、我国的西气东输和印度的东气西输管道都大量采用螺旋埋弧焊管,螺旋埋弧焊管的应用比例都超过了 70%。

近年来,对高质量螺旋埋弧焊管的需求推动了预精焊机组建设的飞速发展。某些国际石油公司在制管工厂预审时只审核预精焊机组,这表明是否采用两步法工艺对重大管线投标有一定的影响。目前全世界螺旋埋弧焊管预精焊机组已超过 20 条,其中印度新建的预精焊机组已超过 10 条,土耳其 1 条,中国 4 条,美国新建的 4 条制管机组均为预精焊机组。

## 2.6 焊管机组的数字化和信息化

新一轮油气管道建设要求更高质量的焊管,仅仅靠手工递送传票的方式已经不适应新的管道建设对焊管质量管理的要求。特别是大直径海底管道不仅要求具有极高的质量保证,而且要求很高的钢管几何尺寸精度。在数字和信息技术高度发达的 21 世纪,信息化的浪潮席卷全球,为焊管机组实现高度信息化提供了雄厚的技术基础。为了应对管道建设对钢管日益提高的质量要求,20 世纪末欧洲焊管企业率先进行了焊管企业信息化改造,以不断改善过程控制,提高产品质量。

现代焊管企业在机组单机自动化、信息化的基础上向全线数字自动化、网络化、智能化发展。先进焊管企业不仅实现了焊管机械设备的数字自动控制,而且焊接、热处理电源和无损检测装置也实现了全数字化控制。数字化和信息技术不仅用于先进制管设备的运行控制,也用于成型、焊接过程的有限元分析,不仅可以实时监控焊管质量,而且具备了数据分析和处理能力,通过内部控制和预警来提高质量保证能力和持续改进。

现代焊管企业质量管理和控制的核心是生产控制和信息系统,具有代表性的是欧洲钢管公司的 PRODIS 系统。它与工艺和质量参数自动检测

系统相连接,从材料到成品钢管的生产全过程和各中间阶段实行不间断的监控,为钢管生产提供持续的质量保证,并记录所有的质量数据和客户的要求。焊接过程通过多通道记录仪对焊接参数实行不间断的监控,当发现焊接参数,如电弧电压、电流等发生异常时,对电压和电流突变(表明熔池中可能存在缺陷)的位置进行标识,同时对下道检验工序 X 射线检查站自动发出异常预警信息,给出管号和缺陷部位信息,使 X 射线检查站能够准确定位探伤,并对内焊缝的超声波探伤进行补充检验,同时提前通知焊工主动进行检查。这样,不仅及时消除了该缺陷,而且在进行下一根钢管的焊接之前就能进行必要的检查和调整,防止类似事件再次发生。

欧洲钢管公司采用激光实时检测和监控,通过严格的过程控制,实施严格的直线度和椭圆度的内控标准,实现了北溪管道严格的管径、壁厚尺寸公差和等级要求,达到了管端椭圆度不超过 5.0 mm 的要求。

我国只有宝钢等少数企业实现了高度的焊管质量信息化控制,多数企业还停留在手工记录和传递的阶段,与国际先进水平差距巨大。欧洲先进的螺旋埋弧焊管预精焊机组,实现了钢管自动传送、自动起停弧和焊接、自动记录焊接参数和信息等,三套精焊机组只有两人值守。

## 3 结 语

当前管线钢管正向高强度、大直径和大壁厚发展,对钢管的几何尺寸精度和性能要求越来越高,对焊管机组的信息化和自动化提出了更高的要求。超高强度管线钢管的开发应用对断裂控制提出了新的要求。螺旋埋弧焊管的大量应用对预精焊技术推广应用的要求更加迫切。在向焊管强国迈进的过程中,我们应加强对上述热点技术的研究,通过对国外先进技术的消化吸收和再创新,促使我国管线钢管技术向世界先进水平迈进。

作者简介:王晓香(1946—),男,教授级高工,中国金属学会轧钢分会第五届焊管学术委员会主任委员,石油管材专标委专家委员,《焊管》、《钢管》杂志编委。

收稿日期:2011-11-20

编辑:李 超