深海管线用 X70 厚壁管线钢的组织及性能分析 *

牛爱军[1,2]，罗卓辉[3]，毕宗岳[1,2]，牛　辉[1,2]，黄晓辉[1,2]，刘海璋[1,2]
（1.国家石油天然气管材工程技术研究中心，陕西 宝鸡 721008；
2.宝鸡石油钢管有限责任公司 钢管研究院，陕西 宝鸡 721008；
3.中国石油天然气集团公司，北京 100007）

摘　要：通过对深海管线服役工况的分析，总结了深海用管线钢的技术特点，表明高强度、大壁厚、小径厚比管线钢管是深海用管线钢管的发展趋向。通过采用低 C 高 Mn，Nb 和 Ti 微合金化的成分设计和 TMCP 工艺控制，开发出了深水用 X70 钢级、厚壁 36.5 mm 管线钢，其全壁厚组织以均匀细小的针状铁素体+少量 M/A 岛为主。对钢板进行了实物力学性能测试，测试结果显示：屈服强度 480~550 MPa，屈强比≤0.82，-20 ℃下冲击功 410 J 以上，横向和纵向 DWTT 断口纤维率为 100%，该深海管线用 X70 厚壁管线钢达到高强度、低屈强比、高韧性和优良低温抗动态撕裂能力的良好匹配。

关键词：深海管线用钢；X70 钢；大壁厚；热机械控制工艺(TMCP)；微观组织；力学性能
中图分类号：TG113　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-3938(2014)10-0005-06

Analysis on Microstructure and Properties of X70 Pipeline Steel with Heavy Wall Thickness Used for Deep-sea Pipeline

NIU Aijun[1,2], LUO Zhuohui[3], BI Zongyue[1,2], NIU Hui[1,2], HUANG Xiaohui[1,2], LIU Haizhang[1,2]
(1.*Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods*, *Baoji* 721008, *Shaanxi*, *China*; 2.*Steel Pipe Research Institute*, *Baoji Petroleum Steel Pipe Co.*, *Ltd.*, *Baoji* 721008, *Shaanxi*, *China*;
3.*China National Petroleum Corporation*, *Beijing* 100007, *China*)

Abstract: Through analysis of deep-sea pipeline service conditions, it summarized the technical characteristics of deep-sea pipeline steel, and showed that high strength, heavy wall thickness and small diameter-thickness ratio are the development trend for deep-sea pipeline steel pipe. By using high Mn, low C and Nb, Ti micro-alloying composition design, and TMCP process, the X70 pipeline steel with 36.5 mm thickness used in deep-sea pipeline was developed. The main microstructure of full thickness consists of uniform fine acicular ferrite and a small number of M/A island. The yield strength of steel plate arrives 480~550 MPa, the yield ratio ≤0.82, the impact energy over 410 J at -20 ℃, the fiber fracture rate is 100% of horizontal and vertical DWTT, which achieves good matching with high strength, low yield ratio, high toughness and excellent dynamic tear resistance at low temperature.

Key words: pipeline steel for deep water; X70 steel; heavy wall thickness; thermo mechanical control process(TMCP); microstructure; mechanical properties

* **基金项目**：国家高技术研究发展计划(863 计划)课题：深海高压油气输运高强厚壁管材关键技术研究(2013AA09A219)。

0 前 言

海洋油气储量丰富，勘探发现有近 50%来自深水，因此，资源开发向海洋、尤其是深海进军已成必然趋势[1]，深海油气勘探开发技术已成为当前全球能源领域研究的热点问题[2]。

随着能源开发逐渐从陆地走向海洋甚至深海，要求油气输送管线钢管具有可靠性高、强度高、韧性好(特别是低温冲击韧性和止裂韧性好)、焊接性良好、抗腐蚀(SCC 应力腐蚀开裂和 HIC 氢致开裂)和抗大变形等性能，深海厚壁管线钢开发是亟待解决的一个重要问题，以适应深海管线钢管向高性能、高钢级、大壁厚和高尺寸精度发展的要求[3]。海底油气输送管道作为海洋石油天然气运输最快捷、最经济和最有效的运输方式，是海上油气田开发与生产不可或缺的生命线工程，将会对深海管线用钢产生巨大需求[4]。

1 深海管线服役工况分析

深海环境十分恶劣和复杂，海底管道工作在低温、高压、强腐蚀的海洋环境中，不仅承受着内外压力、轴向力、弯矩等静载荷和温度荷载的联合作用，而且还要承受交变的外压、波浪、海流的动载荷的作用，使管道承受着多种载荷的联合作用并引发多种形式的破坏[5]。

1.1 力学行为分析

海底管线在整个寿命期内会受到海浪、海流、外压等环境载荷及温度应力、操作压力等工作载荷的作用；偶尔还会遭遇到地震等特殊自然灾害[6]。在深海管线的铺设、安装、使用过程中存在在位、悬跨、铺管等多种作业状态，不同工况所受环境载荷存在较大差别。管线在深海环境中受到外压、内压、温度载荷、悬跨导致的弯矩载荷以及地震等载荷的作用，为了保障管线的安全运行，海底管线在深海环境服役时需要满足强度、韧性及塑性等性能要求[7]。

1.2 腐蚀行为分析

海水是丰富的天然电解质，海水中几乎含有地球上所有化学元素的化合物，成分非常复杂。除了含有大量盐类外，海水中还含有溶解氧、海洋生物和腐败的有机物，这些都为发生腐蚀创造了良好的条件[8]。此外，海水温度、流速以及 pH 值等因素都对海水腐蚀有很大的影响。管道外部腐蚀主要由海洋环境造成，腐蚀是危害海底管线的重要因素，酸性环境下管线腐蚀更易于发生，海底管线通常采用牺牲阳极、阴极保护、涂覆防腐层、增加腐蚀裕度等方式克服管线腐蚀问题[9]。

2 深海用管线钢的技术特点

深海环境十分复杂，海底管道对管线钢材料、管道焊接、施工、维护等提出了比陆上更高的要求。因此，对深海用管线钢的强度、韧性、抗压性能、耐腐蚀性能、尺寸精度等指标都有着严格的要求[10-11]。由海底管线标准 DNV-OS-F101 可知，为了满足深海管线的施工安全，海底管线不仅要求钢管的横向强度，同时还要求纵向强度。水深大于 2 100 m 后，深海的环境更恶劣，对管线的各项性能要求也更高。随着铺设深度的增加，海底管线的抗压溃性愈来愈重要，钢管的壁厚和钢管圆度的要求更加严格，同时钢管的直径与钢管壁厚的比值减小，小直径和厚壁化已成为深海管线钢管的主要特点[12]。深海温度低，压力大，对钢管的断裂韧性要求更高。深海溶氧量增加，海水、海泥和海底微生物造成钢管腐蚀行为更加复杂；对 H_2S 和 CO_2 含量的油气介质来说，在深海管道高压输送条件下，腐蚀将加剧。受深海浪涌和洋流的影响，钢管应具有良好的纵向强韧性、塑性以及抗疲劳能力[13]。同时，在管材屈服强度提高的同时还应考虑屈强比和可焊性等方面的要求。迄今为止，海底管线钢的最高钢级为 X70 [14]，已用于多条海底管线工程，表 1 给出了相关技术规范对 X70 海底管线钢管的主要性能要求[15]。

由表 1 可以看出，深海用管线钢管的力学性能指标非常严格，要求高强度、良好的低温夏比冲击韧性和止裂韧性，同时要求较低的屈强比。

针对深海油气管线倾向于采用高强度、大壁厚、小径厚比钢管的发展趋势，结合我国海洋油气管线发展现状，依据海底管线相关技术规范和深海用管线钢的技术特点，宝鸡石油钢管有限责任公司在国内率先开展了 X70 级 36.5 mm 厚壁管线钢的开发。综合考虑了制管过程中的包辛格效应及加工硬化对制管后钢管性能的影响，管线钢的主要力学性能设计指标见表 2。

表 1　X70 海底管线焊接钢管力学性能要求

管线规范	管体拉伸性能				A_{kV}/J	S_A/%	HV_{10}	*CTOD*/mm
	$R_{t0.5}$/MPa	R_m/MPa	$R_{t0.5}/R_m$	A_{50}/%				
DNV-OS-F101	485~605	570~760	≤0.93	按 API 5L 计算	T_{min}(设计温度) 单值：≥40 平均值：≥50	T_{min}(设计温度) 单值：≥70 平均值：≥85	≤300	≥0.15
南海 LW3-1	485~605	570~760	横向：≤0.92 纵向：≤0.90	板状：≥22 棒状：≥17	-20 ℃下 管体：单值≥83，平均值≥111； 焊缝及热影响区：单值≥40，平均值≥50	0 ℃下 单值≥70， 平均值≥85	≤260	≥0.20

表 2　X70 级 36.5 mm 厚壁深海用管线钢主要力学性能设计

拉伸性能				-20 ℃冲击性能				-20 ℃ DWTT		HV_{10}
$R_{t0.5}$/MPa	R_m/MPa	A_{50}/%	$R_{t0.5}/R_m$	A_{kV}/J		F_A/%		S_A/%		
				单值	平均值	单值	平均值	单值	平均值	
450~600	535~750	≥26	≤0.82	≥180	≥210	≥80	≥90	≥75	≥85	≤240

3　深海用 X70 厚壁管线钢板材开发

3.1　成分设计

为了满足深海用管线钢的力学性能要求，采用低 C 高 Mn，Nb 和 Ti 微合金化的成分设计，加入微合金化元素 Nb，V 和 Ti，合金元素 Mo，Ni，Mn，Cu 和 Cr 等。微合金化的重要目的是提高再结晶终止温度，细化晶粒，强化组织，同时微合金元素的碳氮化物在高密度位错及亚结构上析出，会产生明显的析出强化效应[16]。为保证深海用管线钢具有优异的焊接性能和良好的低温韧性，w(C)严格控制在 0.07%以下，加入较高的 Mn 以达到所要求的强度，降低合金化成本。通过加入适量的 Mo，Ni，Cu 和 Cr，使试制钢板轧后在一个较宽的冷速范围内获得细小、均匀的贝氏体/针状铁素体组织。加入较高的 Nb，以充分发挥其细晶强化和析出强化的作用。此外，考虑到海洋环境及输送介质对管材的腐蚀影响，在炼钢过程中，采用钙处理和洁净钢冶炼技术，严格控制钢中的 S，P，N 和 O 等夹杂物，以降低由于夹杂物对板材塑性、韧性、疲劳强度和抗腐蚀性等引发的危害。深海用 X70 厚壁管线钢化学成分设计见表 3。

表 3　X70 深海用管线钢的化学成分　%

w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(S)	w(P)	其他	Pcm
0.04~0.07	≤0.35	1.5~1.70	≤0.003	≤0.008	Nb，Ti，Mo，Ni，Cu，Cr	≤0.19

3.2　生产工艺控制

深海用 X70 级 36.5 mm 厚壁管线钢板的试制在鞍钢 5 500 mm 双机架轧机宽厚板生产线上完成。采用控制轧制、轧后加速冷却的控轧控冷工艺(TMCP)生产。钢水冶炼采用复合喷粉脱硫工艺进行预脱硫处理，通过自动数模控制进行脱磷脱碳，在出钢过程中加入铁合金及铝进行粗合金化及脱氧处理，采用炉外 RH 精炼及真空脱气工艺。根据目标硫含量喂入适量 Ca-Si 线进行夹杂物形态控制，连铸过程中严格控制结晶器锥度和中间包过热度，严格实施恒拉速浇铸。加热炉均热段温度≤1 250 ℃，既保证合金元素充分固溶，又防止奥氏体晶粒粗化。轧制分两阶段进行，第一阶段在奥氏体再结晶区轧制，第二阶段在奥氏体未再结晶区轧制。轧制均采用较大的道次变形量和较高的累积压下率，轧后迅速进入加速系统冷却，使变形的奥氏体向针状铁素体和粒状贝氏体转变，以获得细小、均匀的显微组织。

通过对轧制温度及钢板厚度的严格控制，保证均匀控制钢板的温度和变形，减小残余应力，获得良好的板型。

3.3 钢板性能分析

3.3.1 拉伸性能

对钢板分别做横向和纵向拉伸，拉伸性能结果如图 1 所示。从图 1 可以看出，钢板的横向和纵向拉伸性能均符合表 2 中的拉伸性能设计指标，屈服强度分布在 480~550 MPa 之间，屈强比≤0.82。钢板的横向屈服强度高于纵向屈服强度。经研究分析表明，钢板在轧制过程中，晶粒发生的纵向变形量比横向变形量大，所以横向晶粒比纵向细小，而晶粒细化可以提高钢的强度，所以钢板的横向屈服强度高于纵向屈服强度。

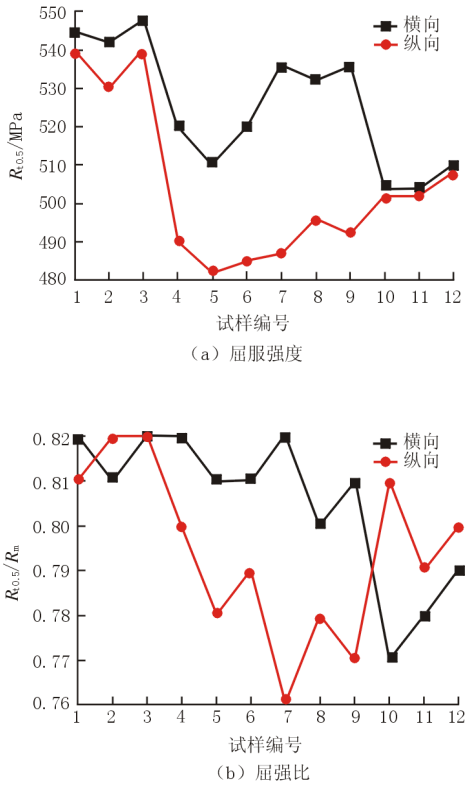


图 1 钢板拉伸性能试验结果

3.3.2 冲击性能

对钢板做横向及纵向冲击试验，结果如图 2 和图 3 所示。从图 2 可以看出，钢板的横向和纵向冲击性能良好，在–20 ℃下最小冲击功在 410 J 以上，有充足的富余量。从图 3 可看出，钢板的横向和纵向冲击在 90% *FATT* 下的冷脆转变温度低于–70 ℃，具有优异的低温韧性。

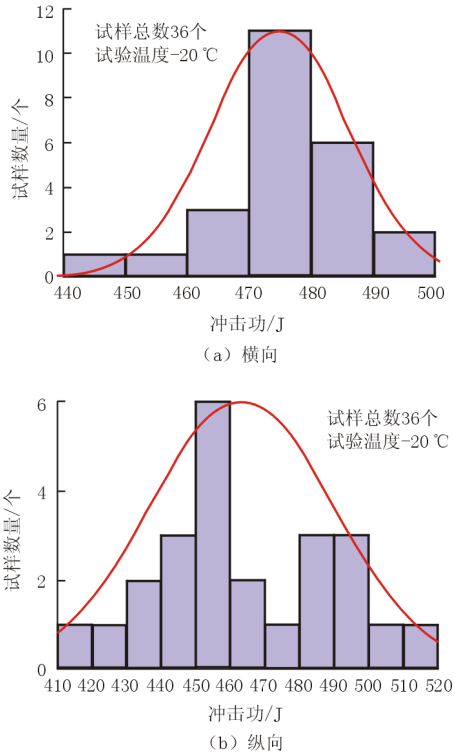


图 2 钢板夏比冲击性能试验结果

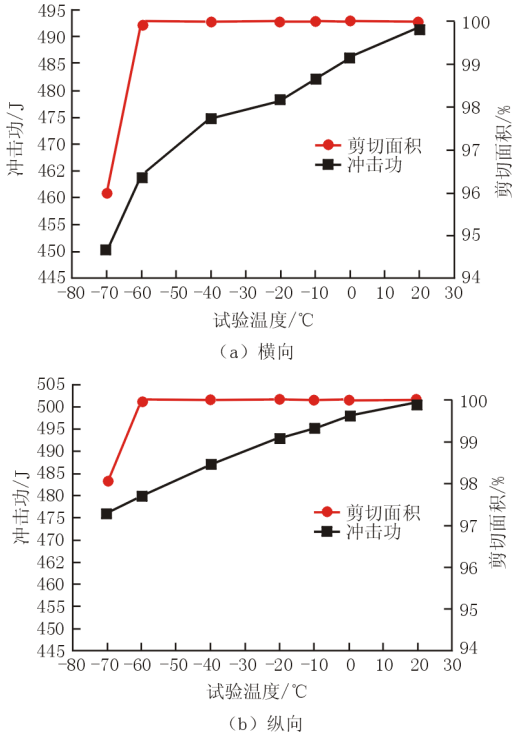


图 3 钢板系列温度夏比冲击试验结果

3.3.3 DWTT 性能

对钢板做横向和纵向系列温度落锤试验，试验结果如图 4 所示。从图 4 可看出，试验温度为–40 ℃时，钢板的横向和纵向剪切面积在 85% 以上，钢板的横向和纵向落锤性能均较好。

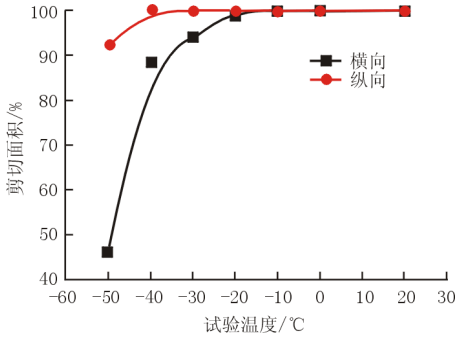
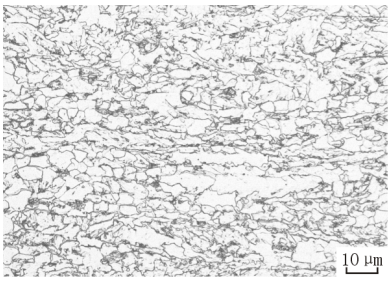


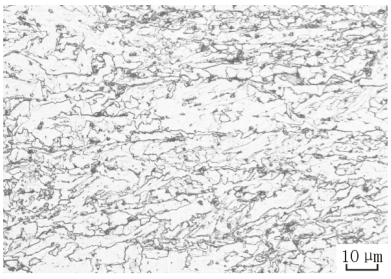
图 4　钢板系列温度 DWTT 试验结果

3.3.4　组织分析

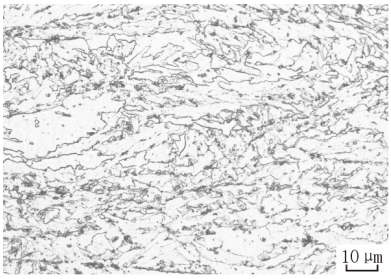
图 5 和图 6 分别是钢板的显微组织和扫描电镜照片。从图 5 可以看出，试制钢板的组织类型以针状铁素体为主，在钢板表面由于入水温度较低出现了一些多边形铁素体组织。组织整体上均匀细化，扫描电镜结果显示，组织中的M/A岛颗粒尺寸细化，形状规格，分布弥散。



（a）表面

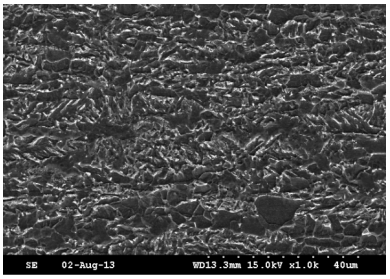


（b）1/4壁厚

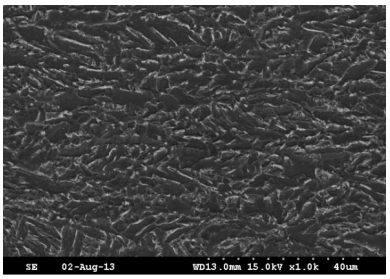


（c）1/2壁厚

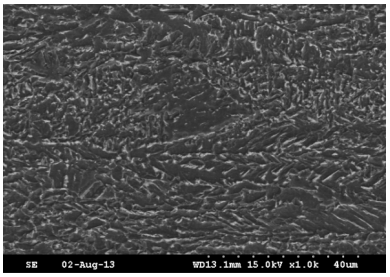
图 5　钢板的显微组织



（a）表面



（b）1/4壁厚



（c）1/2壁厚

图 6　钢板的扫描电镜组织

3.3.5　硬度

图 7 是对钢板硬度检测结果的统计图。从图 7 可以看出，试制钢板的维氏硬度值主要分布在 200~215HV_{10} 之间，最大硬度不超过 230HV_{10}，满足海水腐蚀及 H_2S 应力腐蚀条件下对管线钢的硬度要求。

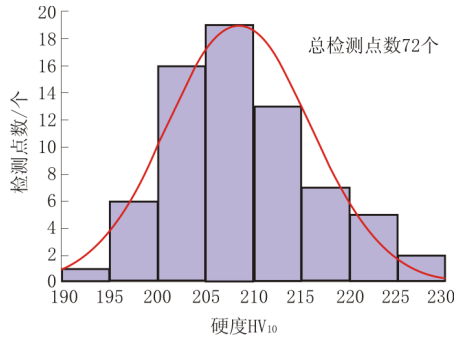


图 7　钢板硬度统计分布图

4 结 论

（1）随着能源开发逐渐从陆地转向海洋甚至深海，深海服役工况对管材性能提出了更严格的要求，深海管道用高强度厚壁管线钢板材开发是亟待解决的一个重要问题。

（2）恶劣复杂的深海环境对深海用管线钢的强度、韧性、抗压性能、耐腐蚀性能、尺寸精度等提出更为严格的指标要求，高强度、大壁厚、高性能管线钢板材研发需要适应深海管线向高强度、厚壁、小径厚比钢管发展的趋势。

（3）通过采用低 C 高 Mn，Nb，Ti 微合金化的成分设计和 TMCP 工艺控制，开发出的深海用 X70 级 36.5 mm 厚壁管线钢板，其全壁厚组织以均匀细小的针状铁素体+少量 M/A 岛为主，钢板性能达到高强度、低屈强比、高韧性和优良低温抗动态撕裂能力的良好匹配。

参考文献：

[1] 潘继平，张大伟，岳来群，等. 全球海洋油气勘探开发状况与发展趋势[J]. 中国矿业，2006，15(11)：1-4.
[2] 李清平. 我国海洋深水油气开发面临的挑战[J]. 中国海上油气，2006，18(02)：130-133.
[3] IZUMI TAKEUCHI，JUN FUJINO，AKIO YAMAMOTO，et al. The Prospects for High-grade Steel Pipes for Gas Pipelines[J]. Pipe & Pipelines International，2003，48(01)：33-43.
[4] 马坤明，孙国民，雷震名，等. 海底管道的管材选用探讨[J]. 材料开发与应用，2012，27(04)：106-109.
[5] 李树森，刘敏，左秀荣. 深海管线用钢开发及应用[J]. 热加工工艺，2013，42(18)：23-26.
[6] 赵冬岩，余建星，岳志勇，等. 含缺陷海底管道屈曲稳定性的数值模拟[J]. 天津大学学报，2009，42(12)：1067-1071.
[7] 徐志刚，彭红伟. 深水海底管道安全保障技术[J]. 中国造船，2009，50(增刊)：898-904.
[8] 杨晓明岩，陈明文，张渝，等. 海水对金属腐蚀因素的分析及预测[J]. 北京科技大学学报，1999，21(02)：185-187.
[9] 高荣杰. 海洋腐蚀与防护技术[M]. 北京：化学工业出版社，2011.
[10] 李少坡，姜中行，李永东，等. 海洋用耐蚀大壁厚 X70 管线钢开发[C]//第八届(2011)钢铁年会论文集. 北京：[s.n.]，2011.
[11] 赵冬岩，余建星，王琮，等. 基于风险的海底管道安全评估方法研究[J]. 海洋技术，2010，29(01)：56-59.
[12] 李中平，熊祥江，陈奇明，等. 大壁厚海底管线钢 X70 工艺试验[J]. 宽厚板，2011，17(05)：1-3.
[13] 陈奇明，李中平. 大壁厚 31.8 mm 海底管线用钢 X70 的研制[J]. 热加工工艺，2010，39(18)：42-43.
[14] 张晓刚. 近年来低合金高强度钢的进展[J]. 钢铁 2011，46(11)：1-9.
[15] DNV OS-F101—2010，Submarine Pipeline Systems[S].
[16] YIN S B，SUO X J，LIU Q Y，et al. Influence of Deformation on Transformation of Low-carbon and High Nb-containing Steel During Continuous Cooling [J]. Journal of Iron and Steel Research，International，2010，17(02)：43-47.

作者简介：牛爱军（1980—），男，工程师，主要从事油气管材的新产品开发及新工艺、新技术研究工作。

收稿日期：2014-08-03
编辑：李红丽

三高集团为印度尼西亚卡拉卡托(KHI)集团设计制造的 SG/508 高频直缝焊管生产线完成安装

卡拉卡托(KHI)集团是印度尼西亚国家最大的国营钢铁企业，2014 年 9 月底，三高集团为该公司制造的全套生产线由一条 508 高频焊管生产线和一条 508 精整生产线组成，生产线包括：上料、矫平、铣边、开口成型(三高成型法)、闭口成型、高频焊接、焊缝探伤、内外刨疤、中频感应加热、空冷、水冷、定径、切断、取样、内冲洗、平头倒棱、水压试验、超声波管体探伤和焊缝探伤等装备，另外还预留了超声波板探、测长称重喷码、涂油等工位。

该生产线是三高集团出口的一条完整的大型装备，采用了先进的具有自主知识产权的三高成型法，在出厂前的极限试车中，可制造钢管壁厚最厚达到 25 mm，最薄达到 3 mm，并且在同类成型法的生产线上，已经生产出 ϕ610 mm×3 mm 的不锈钢内衬管。应 KHI 的要求，该生产线还采用了卷对卷生产工艺，省去了占地和投资都比较大的活套装置。

（大连三高集团报道）