

宝钢 HFW 石油套管的研发现状和前景

史宏德, 田青超, 丁维军, 赖兴涛, 谷中莹

(宝山钢铁股份有限公司, 上海 201900)

摘要: 重点对宝钢 HFW 石油套管的开发现状、已开发的 HFW 石油套管技术难点和工艺特点进行了阐述, 并对宝钢今后 HFW 石油套管的研发前景进行了讨论。指出宝钢 HFW 石油套管的发展应突出炼钢+制管+管加工及质量一贯制的优势, 实现差异化发展; 扩展已开发产品的规格和产量, 研发大直径厚壁 K55、高抗挤以及耐蚀石油套管。

关键词: HFW; 石油套管; 宝钢; 研发现状; 前景; J55; K55

中图分类号: TG443; TE832 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2311(2013)06-0005-04

Present R & D Situation and Development Prospect of HFW Oil Casing in Baosteel

SHI Hongde, TIAN Qingchao, DING Weijun, LAI Xingtao, GU Zhongying

(Baoshan Iron and Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

Abstract: Elaborated in the article is the R & D of HFW oil casings in Baosteel, focusing on the present development situation, and the technological difficulties and process characteristics of the HFW casings as have been developed. Moreover, the R & D prospect of the HFW casings of Baosteel is discussed. It is pointed out that for further developing the HFW oil well pipes in Baosteel, the superiority of steel-making+pipe manufacturing+pipe processing, and consistent quality control should be taken, differential development be realized, product mix and output of the products as have been developed be expanded and increased, and large-sized heavy wall K55 casing and, high collapse-resistant casing and anti-corrosion casing be researched and developed.

Key words: HFW; oil casing; Baosteel; present R & D situation; prospect; J55; K55

按成型方式, 石油套管分为无缝钢管和焊管两种类型, 相对于无缝钢管而言, 焊管的最显著特点是壁厚尺寸精度高, 抗挤毁性能好, 同时还具有制造流程短、生产效率高、规格范围宽、节能、生产成本低、产品性价比高等优点; 因此, 国外(如美国、德国、日本、韩国等)的石油套管普遍采用高频焊(High Frequency Welding, 简称 HFW)管替代无缝钢管, 国内油田也在逐步推广使用^[1]。

宝山钢铁股份有限公司(简称宝钢股份)Φ610 mm HFW 直缝焊管机组自 2005 年投产、2006 年形成批量生产能力以来, 已研发出 H40、J55、K55、

M65、L80-1、N80-Q、N80-1 及 P110 等钢级 HFW 石油套管系列产品, 包括 7 个外径(219.08 ~ 508.00 mm)、46 个规格(表 1), 基本满足了产品大纲的要求, 已累计向国内外油田及其他用户供货 50 万 t^[2-3]。

1 J55 套管技术难点和工艺特点

与其他焊接方法相比, 高频焊显著特点是无金属填充物(如焊丝); 因此, 在焊接工艺稳定的情况下, 焊接质量很大程度取决于钢带质量。例如, 宝钢 Φ610 mm HFW 直缝焊管机组生产的 J55 套管, 其原有化学成分是一种以 C、Mn 为主要强化元素的钢种, 不含 Nb 元素, 热轧钢带存在中心偏析^[1]。可制造 J55 石油套管范围为 Φ219.08~508.00 mm,

史宏德(1954-), 男, 高级工程师, 首席工程师, 从事 HFW 焊管研发、工艺技术、质量控制等工作。

表1 宝钢已开发的 HFW 石油套管产品规格

钢级	外径×壁厚					mm
H40	Φ244.48×7.92	Φ273.05×7.09				
J55				Φ339.72×8.89		Φ508×11.13
	Φ219.08×6.71	Φ244.48×8.94	Φ273.05×8.89	Φ339.72×9.65	Φ406.4×9.53	Φ508×16.13
	Φ219.08×8.94	Φ244.48×10.03	Φ273.05×10.16	Φ339.72×10.92	Φ406.4×16.66	Φ508×12.70
K55				Φ339.72×12.19		
	Φ219.08×6.71	Φ244.48×8.94	Φ273.05×8.89	Φ339.72×9.65	Φ473.08×11.05	Φ508×11.13
	Φ219.08×8.94	Φ244.48×11.99	Φ273.05×10.16		Φ473.08×12.19	
M65			Φ273.05×10.16			
L80-1		Φ244.48×11.99		Φ339.72×12.19		
N80-Q		Φ244.48×8.94				
	Φ219.08×6.71	Φ244.48×10.03	Φ273.05×8.89	Φ339.72×10.92		
	Φ219.08×7.72	Φ244.48×11.05	Φ273.05×10.16	Φ339.72×12.19		
			Φ273.05×11.43			
		Φ244.48×11.99				
N80-1			Φ273.05×10.16	Φ339.72×12.19		
P110	Φ244.48×11.05	Φ273.05×11.43	Φ339.72×12.19			

其中 Φ219.08 mm 和 Φ244.48 mm 两个规格所用钢带带宽分别为 700 mm、770 mm，是窄带，为了不浪费热轧产能，通常使用热轧 1 420 mm、1 560 mm 宽带沿中心线纵剖而成。由于热轧钢带存在成分偏析，且 1/2 部位(钢带中心)偏析较严重，制管后中心偏析带位于焊缝处，在线焊缝正火热处理后，在焊缝热影响区偏析带上有条状马氏体存在，API 标准不允许套管存在未回火马氏体，所以需增加整管热处理来消除，由此而增加了生产成本。针对以上问题，宝钢股份设计了两种调整 J55 套管用钢带化学成分的试验方案^[1]。

方案 1：在材料设计上通过降碳来减轻钢带中心偏析， $w(C)$ 为 0.17%~0.20%，比原有化学成分低 0.075%，减轻了碳偏析；Si、Mn 含量与原有成分相同。用方案 1 试制后，钢带中心偏析减轻，但焊缝正火热处理后热影响区偏析带上仍然存在少量马氏体^[1]。

方案 2：在材料设计上通过降碳、降锰来减轻钢带中心偏析， $w(C)$ 为 0.13%~0.18%，比原有化学成分低 0.105%，减轻了碳偏析； $w(Mn)$ 为 0.60%~1.00%，比原有化学成分低 0.30%，减轻了锰偏析，使焊缝在线正火热处理后不存在马氏体组织^[1]；加入微量 Nb 补偿因降碳、降锰而导致的强度损失，改善管加工工艺性能并防止套管螺纹黏结；加入微量 Ca 净化钢液，促使 MnS 球化，提高材料的综合性能^[4]。按方案 2 成分设计的 J55 钢带，制管

后焊缝热影响区不会出现马氏体，组织和强度均满足 API Spec 5CT 标准要求。

2 K55 套管技术难点和工艺特点

K55 钢级石油套管的屈服强度范围在 379~552 MPa 之间，抗拉强度大于 655 MPa，其特点是材料的屈强比很低(0.58~0.84)。从材料化学成分设计而言，普通的碳锰钢是实现低屈强比的理想选择，如广泛用于生产 K55 钢级无缝钢管的 37Mn5 钢种，其 $w(C)$ 约 0.37%、 $w(Mn)$ 约 1.3%。37Mn5 轧后材料屈服强度在 450 MPa 左右，抗拉强度在 700 MPa 以上，屈强比 0.64，可以满足 K55 钢级力学性能的要求^[5]。

HFW 套管的生产工艺流程是：炼钢→连铸→热轧成板卷→板卷头尾剪切对焊→板带成型→焊接→在线焊缝热处理或整管热处理→管加工→出厂检验等。板卷头尾剪切对焊工序是实现多卷连续生产、体现 HFW 焊管生产效率的关键工序。但是，由于板卷头尾对焊要求材料的碳当量低，一般要求碳当量 CE_{IIW} 小于 0.43，否则容易造成断带，严重影响生产效率。由于 37Mn5 钢种的碳当量 CE_{IIW} 达到 0.58，结合焊管的生产工艺特点，这一钢种显然不适于生产 K55 钢级 HFW 石油套管；因此，K55 钢级 HFW 石油套管生产的技术难度在于，材料设计须保证在低的碳当量下获得低的屈强比。

宝钢股份 HFW 成型方法采用的是先进的排辊

成型技术,为获得优良的焊缝性能提供了保障。在成型过程中,钢带通过各架轧机的轧辊,逐渐按照所设计的孔型系统弯曲到理想管坯的形状^[3],是一个连续的、动态的变形过程。在这一过程中,伴随着钢带横向的弯曲变形,同时产生拉伸、压缩及回弹,表面及板厚方向的剪切变形,以及边缘纵向拉伸和挤压变形等^[6]。各种变形的应力状态十分复杂,但是应变量 ε 可以使用以下公式估算:

$$\varepsilon=t/(D+t) \quad (1)$$

式中 t ——钢带厚度, mm;

D ——焊管外径, mm。

实践证明,通过采取降碳、采用合金化以及热轧时控制冷却等手段,可以生产出力学性能满足 K55 钢级要求的热轧板卷。如对于某终轧温度大于 860 ℃,卷取温度为 570 ℃的热轧板卷,其屈服强度为 478 MPa,抗拉强度 697 MPa^[5]。对于中等直径的 $\Phi 273 \text{ mm} \times 10.16 \text{ mm}$ 规格套管,制管后应变约 3.6%,根据应力应变曲线,当发生 3.6%的应变时,制管后屈服强度将升高至 563 MPa 左右,已超过 K55 钢级的屈服强度要求范围^[5]。对于这种热轧板卷,为了保证制管后屈服强度小于 552 MPa,制管后的应变不得大于 3.0%。

K55 钢级不同规格 HFW 套管如果以 3.0%的应变量为界限,只有 $\Phi 339.72 \text{ mm} \times 9.65 \text{ mm}$ 、 $\Phi 406.4 \text{ mm} \times 11.13 \text{ mm}$ 、 $\Phi 473.08 \text{ mm} \times 11.05 \text{ mm}$ 、 $\Phi 508 \text{ mm} \times 12.7 \text{ mm}$ 、 $\Phi 508 \text{ mm} \times 11.13 \text{ mm}$ 等规格 HFW 套管的应变小于 3.0%,也就是说,在不考虑板卷性能波动的理想的情况下,只有上述 5 种规格的套管在制管后的力学性能可以满足 K55 钢级的要求。对于其他规格的套管,制管后必须采用热加工的手段才能生产出性能合格的 HFW 套管。

现场生产表明:与板卷相比,成型后管体屈服强度较板卷升高约 50~100 MPa,抗拉强度下降约

10~30 MPa,这样,理想的板卷屈服强度应该控制在 400 MPa 左右,而抗拉强度应该控制在 680 MPa 以上;屈强比 0.59。显而易见,如此低的屈强比对于普碳或低合金钢很难达到。

实践表明:由于小直径 HFW 套管加工硬化效应显著,致使热轧板卷制管后力学性能不能满足 K55 钢级的要求,然而相同壁厚,大直径套管的加工硬化效应小,因此,在实验室研究基础上,可采取两套技术方案分别应对。方案 1, $\Phi 339 \text{ mm}$ 以上规格,对现行钢种化学成分进行微调试验,以期制管后经在线焊缝热处理生产出合格的 K55 钢级套管;方案 2, $\Phi 339 \text{ mm}$ 及以下规格,通过制管后整管正火热处理达到 K55 钢级的性能要求。

对于第 1 套方案,成分设计思路是:C、Mn 两种固溶强化合金元素的最佳配合可以有效地降低材料的屈强比^[7],如生产 K55 钢级无缝钢管的 37Mn5 钢种,其屈强比可以达到 0.64;因此,在 37Mn5 基础上降碳,以满足低碳当量、低屈强比的需求,另一方面,铝镇静钢是传统的细晶粒钢,Al 作为合金元素对降低材料的屈强比不利,应降低 Al 含量。

对于第 2 套方案,采用通过对焊管进行全管正火热处理的办法来消除板带成型带来的加工硬化效应。因为焊管全管正火热处理不仅可以消除材料的加工硬化以及板卷本身性能的波动对力学性能的影响,同时也使焊缝处的力学性能和组织形貌和管体接近,整管力学性能稳定性好。成分设计思路如下:在碳锰钢基础上以 V 为主要强化元素,控制 P、S 等杂质,经 Ca 处理以净化钢液,制管后经全管正火热处理获得符合要求、碳当量适中且性能稳定的 K55 钢级套管。

两套方案制管后拉伸性能均满足 API Spec 5CT 标准要求(表 2), $\Phi 473.08 \text{ mm} \times 11.05 \text{ mm}$ K55 钢级套管产品如图 1 所示。

表 2 K55 钢级套管拉伸性能

规格	方案	$R_{0.05}/\text{MPa}$	R_m/MPa	屈强比	取样位置	热处理方式
$\Phi 473.08 \text{ mm} \times 11.05 \text{ mm}$	1	464~490	675~685	0.69~0.72	管体	焊缝正火
$\Phi 473.08 \text{ mm} \times 11.05 \text{ mm}$	1	470~486	720~730	0.65~0.67	焊缝	焊缝正火
$\Phi 244.48 \text{ mm} \times 8.94 \text{ mm}$	2	460~470	680~695	0.68	管体	全管正火
$\Phi 244.48 \text{ mm} \times 8.94 \text{ mm}$	2	440~455	675~685	0.65~0.66	焊缝	全管正火
API Spec 5CT		379~552	≥ 655			

3 宝钢 HFW 石油套管发展前景

据文献[8]介绍,石油和可燃性气体(如天然气、

页岩气、煤层气等)是人类目前所消耗的主要能源。最近 30 年来,世界化石能源使用量持续增长,主



图1 HFW $\Phi 473.08 \text{ mm} \times 11.05 \text{ mm}$ K55 钢级套管

要来源于石油、可燃性气体和煤炭。其他种类能源,例如水能、核能、生物能、风能和太阳能等,只占能源总量的很少比例,即使按照最乐观的发展速度,至少在2050年之前不可能取代化石能源而占据主导地位。

自1993年我国成为石油净进口国以来,我国原油消费量以年均5.77%的速度递增,已成为世界第二大原油消费国,国际能源署(IEA)和美国能源信息署(EIA)预测,到2030年,我国对油气的的需求基本在8亿t原油和2000亿 m^3 左右天然气。我国“十二五”规划油气当量为:中国石油天然气集团公司4亿t,其中海外开采占50%,国内重点开采松辽、鄂尔多斯、新疆、环渤海湾及川渝地区;中国石油化工集团公司规划开采当量1.1亿t;中国海洋石油总公司为1亿t。“十二五”期间,油井管年均需求量约320万t。

油井管是石油和天然气勘探开发所必须的重要物资和器材,在整个建井成本中平均占20%~30%。石油天然气工业勘探开发的过程就是大量使用和消耗油井管的过程。20世纪80年代以前,我国使用的油井管全部或主要依靠进口,直到1998年我国油井管的国产化率达到85%^[9]。目前我国油井管产能已达1000万t,产能严重过剩,其中具备炼钢+制管+管加工能力的企业产能约550万t,如天津钢管集团股份有限公司、宝钢股份、衡阳华菱钢管有限公司、攀钢集团成都钢钒有限公司、无锡西姆莱斯石油专用管制造有限公司等;具备制管+管加工能力的企业产能约130万t,如宝鸡石油钢管有限责任公司等;具备管加工能力的企业产能约320万t,

如各油田加工企业。

在我国油井管产能严重过剩的大背景下,宝钢HFW石油套管的发展应突出炼钢+制管+管加工及质量一贯制的优势,差异化发展,并在以下几个方面开展工作:

(1) 拓展H40钢级石油套管规格和产量,以满足低压、低渗油气区经济型石油套管的需求。

(2) 扩大M65、L80-1、N80-Q和P110钢级石油套管规格和产量,以满足油田降本增效的需求。

(3) 研发大直径厚壁K55钢级石油套管,以满足国外特定市场的需求。

(4) 研发高抗挤石油套管,如80-TT,以满足油田经济型高抗挤套管的需求。

(5) 研发耐蚀石油套管,如80S、90S和95S,以满足油田经济型耐蚀套管的需求。

4 参考文献

- [1] 史宏德,赖兴涛,谷中莹. J55 钢纵剖钢带高频焊套管的研制[J]. 焊管, 2013, 36(3): 27-30.
- [2] 史宏德,王宁,赖兴涛,等. 宝钢HFW610高频直缝焊管机组的现状与发展[J]. 焊管, 2010, 33(2): 24-28.
- [3] 史宏德,王宁,赖兴涛,等. 宝钢HFW610高频直缝焊管机组的技术特点[C]//中国金属学会轧钢学会钢管学术委员会五届五次年会论文集. 成都: 钢管杂志社, 2009.
- [4] 宋维锡. 金属学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1980: 405.
- [5] 田青超,董晓明,丁维军. 高频电阻焊K55钢级套管的研发[J]. 钢管, 2008, 37(4): 28-32.
- [6] 冯世功. ERW焊管成型力、轧制力矩及电机功率的计算[J]. 焊管, 1994, 17(5): 31-40.
- [7] 高惠临. 管线钢与管线钢管[M]. 北京: 中国石化出版社, 2012: 93-95.
- [8] 中国科学院油气资源领域战略研究组. 中国至2050年油气资源科技发展路线图[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 5-20.
- [9] 宋治,冯耀荣. 油井管与管柱技术及应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007: 1-2.

(收稿日期: 2013-08-05)

欢迎订阅《钢管》杂志 邮发代码: 62-195