

· 工艺材料进展 ·

高强度油井管用钢专利技术的现状及发展趋势

牟昊 陈妍 齐殿威 丁伟 吴美庆
(鞍钢股份公司技术中心, 鞍山 114009)

摘要 概述了近年来对于高强度油井管用钢专利技术的重点研发领域-耐高温($\leq 650\text{ }^{\circ}\text{C}$)、耐腐蚀(H_2S 、 CO_2 、 Cl^- 介质)、抗挤毁(屈服强度 380 ~ 1 241 MPa)等关键技术的研究,介绍了最新高强度油井管用钢的研究和发展特点,生产典型高强度油井管用钢的关键技术。当前油井管用钢的开发趋势为通过低 C、高合金和调质处理工艺生产具有耐高温、耐腐蚀、抗挤毁等复合特性的高强度焊管和无缝管。

关键词 高强度油井管用钢 调质处理 耐高温 耐腐蚀 抗挤毁 专利技术

Present Status and Development Tendency of Patented Technology for High Strength Oil Well Tubing Steels

Mu Hao, Chen Yan, Qi Dianwei, Ding Wei and Wu Meiqing
(Technology Center, Ansteel Co Ltd, Anshan 114009)

Abstract The major research and development field of patented technologies for high strength oil well tubing steels including the key technique of heat resistance ($\leq 650\text{ }^{\circ}\text{C}$), corrosion resistance (H_2S , CO_2 , Cl^- medium) and anti-collapse (yield strength 380 ~ 1 241 MPa) is summarized and the characteristics of research and development of latest high strength oil well tubing steels and the key technique for production of typical high strength oil well tubing steels are presented. The current trend of development of oil well tubing steels is production of the high strength welded pipe and seamless tube with compound characteristics of heat resistance, corrosion resistance and anti-collapse by low C, high alloy and quenching-tempering process.

Material Index High Strength Oil Well Tubing Steel, Quenching-Tempering Process, Heat Resistance, Corrosion Resistance, Anti-Collapse, Patented Technology

1 高强度油井管用钢专利公开的总体情况

2010年首次公开油井管用钢专利共56件,涉及稠油开采用耐高温油井管用钢、在 CO_2 和 H_2S 等

腐蚀环境中使用的耐腐蚀性优良油井管用钢,适用于深井作业的抗挤毁性优良油井管用钢以及油井管的生产方法,其重点研发领域见表1。

表1 最新高强度油井管用钢专利技术的研发领域

Table 1 Recent research and development field for patented technologies of high strength oil well tubing steels

公司	耐高温	耐腐蚀	抗挤毁
JFE		95 ~ 110 ksi (655 ~ 758 MPa) 级低温韧性 + 耐 CO_2 腐蚀 + 耐硫化物应力腐蚀开裂(SSC)无缝管 ^[1-7] 。	
住友金属		耐高温 CO_2 腐蚀 + 耐SSC无缝管 ^[8] ; 110 ksi (758 MPa) 级耐高温SSC无缝管 ^[9] ; 110 ~ 140 ksi (758 ~ 965 MPa) 级耐 CO_2 腐蚀 + 耐应力腐蚀开裂(SCC)无缝管 ^[10] ; 耐SCC + 热加工性无缝管 ^[11] ; 110 ~ 140 ksi 级耐腐蚀高合金无缝管 ^[12] 。	
V&M		125 ksi (862 MPa) 级耐SSC低合金无缝管 ^[13-14] 。	
宝钢	适合 300 ~ 400 $^{\circ}\text{C}$ 稠油开采耐热套管 ^[15] ; 耐高温 (200 ~ 400 $^{\circ}\text{C}$) + 抗挤毁性套管 ^[16] 。	55 ksi (379 MPa) 级耐 CO_2 腐蚀低合金无缝管 ^[17] ; 80 ksi (552 MPa) 级耐 CO_2 腐蚀无缝管 ^[18] ; 105 ksi (724 MPa) 级耐 H_2S 腐蚀钻杆 ^[19] ; 125 ksi (862 MPa) 级耐 H_2S 腐蚀无缝管 ^[20] ; 150 ksi (1 034 MPa) 级耐腐蚀抽油杆 ^[21] 。	65 ksi (448 MPa)、80 ~ 110 ksi (552 ~ 758 MPa)、125 ksi (862 MPa) 级 ERW 抗挤毁油井管 ^[22-24] 。
中石油			380 ~ 760 MPa 级高韧性 + 抗挤毁套管 ^[25] 。
天津钢管	100 ~ 130 ksi (690 ~ 896 MPa) 级稠油开采用套管 ^[26] 。		170 ~ 180 ksi (1 172 ~ 1 241 MPa) 高强度 + 冲击韧性套管 ^[27-28] 。 N80 级电阻焊(ERW)套管 ^[29] ; K55 级 ERW 套管 ^[30] 。
鞍钢			

在表 1 中, JFE 在 95 ksi (655 MPa) 级低温韧性优良和 110 ksi (758 MPa) 级耐 SSC 无缝管方面申请了 PCT (Patent Cooperation Treaty) 专利^[5-6], 住友金属则在耐 SSC、耐 CO₂ 腐蚀以及在高温环境下耐腐蚀性优良油井管用钢方面申请了 PCT 专利^[8-9]。

2 典型高强度油井管用钢专利的关键技术

2.1 耐高温油井管用钢

随着石油消耗量的不断增加以及石油资源日益枯竭, 开采稠油已成为国内外许多石油公司的主要产量来源。温度敏感性是稠油的一大特点, 人们利用该特点对稠油进行热采。热采稠油一般采用蒸汽吞吐法或火烧驱油法, 随着井下温度的不断变化, 套管将受复杂应力的作用, 这对于耐热套管也提出了更高、更苛刻的要求。

宝钢开发的蒸汽热采井用耐高温油井管的成分设计采用低合金成分体系, 通过控制 Cr、Mo、Mn 含

量, 热轧得到无缝管。采用奥氏体化处理-淬火-回火或淬火-回火-热定径-热矫直不同工艺, 改善其耐高温性、抗挤毁性和耐腐蚀性^[15-16]。

天津钢管公司开发的火烧驱油法开采稠油用油层段石油套管的组织以回火索氏体或马氏体为主, 确保其在 550 °C 环境下屈服强度 ≥ 550 MPa, 650 °C 环境下、10 万 h 的持久强度 ≥ 65 MPa。并使钢管在 150 °C、CO₂ 分压 1.5 MPa、流速 1.5 m/s 环境下, 平均腐蚀速率低于 0.5 mm/a^[26]。

华菱钢管公司开发的蒸汽吞吐法稠油开采套管采用中低碳 Cr-Mo 系列耐热钢种, 通过添加 B、Ti、Al 等表面活性元素强化晶界, 使套管的强度不随温度升高而过早下降, 确保套管在注采过程中屈服强度的下降幅度满足热采需求^[31]。耐高温油井管用钢专利的制造工艺及性能见表 2、化学成分见表 3。

2.2 耐腐蚀油井管用钢

表 2 高强度耐高温油井管用钢专利的关键生产技术

Table 2 Key patented production-technologies for high strength heat resistance oil well tubing steels

公司	工艺处理	组织	性能
宝钢	冶炼、浇铸和热轧制成无缝管, 820 ~ 920 °C 30 ~ 60 min 淬火, 580 ~ 720 °C 30 ~ 90 min 回火 ^[15] 。 经二次精炼、真空脱气、Ca 处理, 热轧成无缝管, 880 ~ 940 °C 30 ~ 90 min 淬火, 620 ~ 710 °C 30 ~ 90 min 回火, 最后 550 ~ 650 °C 热定径, 500 ~ 600 °C 热矫直 ^[16] 。	均匀细小索氏体	室温屈服强度 ≥ 650 MPa; 350 °C 屈服强度 ≥ 552 MPa。 钢管不圆度 $< 0.4\%$; 壁厚不均率 $< 12\%$; 残余应力 < 200 MPa; 20 ~ 400 °C 环境下均符合 API 80 ~ 110 钢级要求。
天津钢管	炼钢、模铸、锻造、退火制成实心管坯, 始锻 ≤ 1260 °C, 终锻 ≥ 800 °C, 冷却后管坯在环形加热炉加热至 1250 ~ 1290 °C, 钢管 1040 ~ 1080 °C 正火, 在 730 ~ 760 °C 回火, 550 ~ 600 °C 矫直, 探伤及螺纹加工 ^[26] 。	回火索氏体或马氏体	550 °C 屈服强度 ≥ 580 MPa, 650 °C 10 万 h 持久强度 ≥ 70 MPa; 伸长率 $\geq 13\%$; 夏比冲击功横向 ≥ 60 J, 纵向 ≥ 80 J; 硬度 (HRC) ≤ 26 , 晶粒度 ≤ 6.0 级。
华菱钢管	电弧炉冶炼、二次精炼、真空脱气、连铸、热轧成无缝管, (920 \pm 20) °C (40 \pm 5) min 淬火, (600 \pm 5) °C (64 \pm 5) min 回火 ^[31] 。	回火马氏体	常温抗拉强度 890 ~ 975 MPa, 夏比冲击功 ≥ 120 J; 350 °C 抗拉强度 800 ~ 930 MPa。

表 3 高强度耐高温油井管用钢材的化学成分/%

Table 3 Chemical composition of high strength heat resistance oil well tubing steel products / %

公司	C	Si	Mn	S	P	Al	Ti	Nb	Cu	Ni	Mo	Cr	Ca	其他
宝钢 ^[15-16]	0.26 0.28	0.23 0.27	0.64 1.50	0.013 0.0023	0.023 0.014	0.020 0.001	0.009	0.04			0.21 0.31	0.96 0.49	0.005	V 0.150
天津钢管 ^[26]	0.10	0.40	0.55	0.006	0.009	0.010			0.06	0.03	0.95	9.20		
华菱钢管 ^[31]	0.28	0.29	0.96	0.002	0.009	0.025	0.018		0.10	0.20	0.36	1.00		B 0.001 Sn 0.008 As 0.015

国内对于油井管用钢耐腐蚀性的研究主要集中在耐 SSC 和/或耐 CO₂ 腐蚀上, 而国外的耐腐蚀油井管用钢主要集中在耐 CO₂ + H₂S + Cl⁻ 腐蚀以及兼顾耐腐蚀性和抗挤毁性的油套管上。

JFE 申请了 7 件耐腐蚀性优良的油井管用钢专利, 其中 6 件为油井管产品专利, 其研发思路包括: (1) 采用低碳高 Cr (Cr $\geq 10.5\%$)、并添加适量 Ni、

Mo、Cu 等元素的成分, 通过调质处理得到以马氏体或回火马氏体为主相的耐 CO₂、H₂S、Cl⁻ 腐蚀的不锈钢无缝油井管^[1-5]; (2) 采用中碳低合金的成分, 通过调质处理获得耐 SSC 性优良的高强度无缝油井管^[6]; 另外 1 件焊接方法专利为通过加热焊接热影响区 (HAZ) 表层的环状区域, 控制焊接热循环峰值温度, 得到以马氏体为主相耐晶粒间应力腐蚀开

裂(Intergranular Stress Corrosion Cracks)油井管^[7]。

宝钢开发的耐腐蚀油井管用钢包括:(1)低合金成分,热轧无缝管不进行热处理,为浅井低成本耐CO₂腐蚀性优良的55 ksi(380 MPa)级油井管^[17];(2)中碳低合金成分,两相区正火处理,组织为铁素体+珠光体+索氏体的耐微量CO₂腐蚀的80 ksi(552 MPa)级经济型油井管^[18];(3)添加适量的Mn、Cr、Mo,调质成马氏体和回火索氏体为主的耐H₂S腐蚀优良高强度石油钻杆^[19];(4)添加≥0.3% Nb,淬火温度超过950℃,仍能获得高韧性的细晶粒结构。成品钢管的强度级别≥125 ksi(862 MPa),并且当H₂S分压在1.0 atm(即101.325 kPa)

以上时仍具有良好的耐腐蚀性^[20]。

住友金属的设计思路包括:(1)高合金成分, $Mn \times (N - 0.0045) \leq 0.001$ (质量分数,下同)或 $-8 \leq 30(C + N) + 0.5Mn + Ni + 0.5Cu + 8.2 - 1.1(Cr + Mo) \leq -4$,马氏体和铁素体组织,在150~200℃耐腐蚀性优良的油井管用钢^[8-9];(2)高Cr-Ni成分,冷轧过程中使断面收缩率满足 $Rd = \exp[(\ln(MYS) - \ln(14.5Cr + 48.3Mo + 20.7W + 6.9N))/0.195]$ (其中,MYS为加工后屈服强度),制得耐腐蚀性优良的高强度双相不锈钢油井管^[10];(3)高Cr-Ni合金,并使成分满足 $(N \times P)/REM \leq 0.10$ (REM为稀土元素),无缝管淬火处理后再进行冷拔,获得

表4 高强度耐腐蚀油井管用钢专利的关键生产技术

Table 4 Key patented production-technologies for high strength corrosion resistance oil well tubing steels

公司	工艺处理	组织	性能
JFE	将制成的无缝管淬火后加热到800℃以上,保温5 min,再冷却至室温 ^[1] 。	回火马氏体	屈服>570 MPa;≤100℃耐Cl ⁻ 浓度(10~120 000)×10 ⁻⁶ 和10~100 MPa CO ₂ 气体腐蚀。
	将制成的无缝管加热到Ac ₃ 以上温度,淬火到100℃以下,550℃以上30 min回火 ^[2] 。	回火马氏体	屈服95~110 ksi(655~758 MPa);-60℃夏比冲击功>180 J;耐CO ₂ 、Cl ⁻ 等腐蚀。
	无缝管920℃1 h淬火后,500~650℃30 min回火 ^[3] 。	马氏体和铁素体	≥170℃,CO ₂ 、Cl ⁻ 等环境,屈服强度>95 ksi(654 MPa);-40℃夏比冲击功>20 J。
	无缝管750~840℃淬火,≤650℃回火 ^[4] 。	以马氏体为主	屈服≥95 ksi(655 MPa);HRC<27;耐SCC(应力腐蚀开裂)性优良。
	无缝管加热至Ac ₃ 以上温度,并以大于空冷的冷却速率冷却至100℃以下,≥550℃回火 ^[5] 。	回火马氏体	屈服≥95 ksi(655 MPa);韧脆转变温度<-40℃;耐CO ₂ 、Cl ⁻ 等腐蚀性优良。
无缝管1 000~1 350℃,Ac ₃ ~1 050℃淬火,以大于空冷的冷却速率至室温,665~740℃回火 ^[6] 。	以回火马氏体为主	屈服110~125 ksi(758~861 MPa);耐SSC性优良。	
按成分要求制成焊管,将HAZ表层的环状焊接部分加热,使焊接热循环的峰值≥950℃ ^[7] 。	马氏体	焊后不热处理可耐晶粒间应力腐蚀开裂(IGSCC)的马氏体不锈钢管焊接方法。	
宝钢	经冶炼、连铸、热轧制成无缝管,将其空冷后不进行热处理 ^[17] 。	铁素体+珠光体+索氏体	屈服55 ksi(380 MPa);耐CO ₂ 腐蚀性优良。
	经炼钢、连铸、热轧制成无缝管,将其在820~870℃进行两相区正火 ^[18] 。	铁素体+珠光体+索氏体	屈服80 ksi(552 MPa);耐微量CO ₂ 腐蚀。
	电弧炉冶炼,LF+VD,经连铸热轧制成无缝管,850~950℃淬火,680~730℃回火 ^[19] 。	马氏体+回火索氏体	屈服105 ksi(725 MPa);耐H ₂ S腐蚀性优良。
	热轧成无缝管,950~1 050℃30 min淬火,650~Ac ₁ 120 min回火 ^[20] 。	回火索氏体	屈服130~140 ksi(896~965 MPa);伸长率≥20%;0℃横向夏比冲击功≥50 J;耐SSC性优良。
经转炉或电弧炉冶炼、LF精炼、浇铸、热轧制成无缝管,880℃水、油淬火,500℃回火 ^[21] 。		抗拉≥1 050 MPa;断面收缩率≥50%;伸长率≥20%;夏比冲击功≥70 J;耐蚀性优良。	
住友金属	无缝管淬火后在500~600℃回火二次硬化,随着残余γ相的生成,通过铜的析出强化作用提高钢管的强度和韧性 ^[8] 。	马氏体≥50%,10%~40%铁素体,残余奥氏体≤10%。	屈服>110 ksi(758 MPa);常温及200℃环境下耐SSC性优良,200℃耐CO ₂ 腐蚀性优良。
	板坯在1 000~1 250℃热轧成无缝管,980~1 250℃15 min淬火,500~650℃回火 ^[9] 。	马氏体为主,铁素体10%~40%。	屈服110~140 ksi(759~966 MPa);≥150℃环境耐腐蚀性优良,常温耐SSC性优良。
	无缝管1 050~1 120℃2 min热处理,然后冷拔,控制断面收缩率10%~80% ^[10] 。	铁素体+奥氏体	屈服110~140 ksi(758~965 MPa);耐腐蚀性优良。
	无缝管1 050~1 240℃1 h淬火,然后再进行冷拔加工 ^[11] 。	马氏体	屈服≥900 MPa;耐SCC性优良。
攀钢钒钛	经电弧炉炼钢、连铸、热轧制成无缝钢管,850~950℃淬火,600~720℃回火,空冷 ^[32] 。	回火马氏体	屈服≥570 MPa,抗拉≥720 MPa;伸长率≥32%;夏比冲击功≥180 J。

注:屈服-屈服强度;抗拉-抗拉强度。

耐 SCC 性优良的高强度油井管^[11]。

攀钢钒钛采用 3Cr 的成分设计,在淬火过程中高温段(350~850℃)采用较大的冷却速率;在易开裂的低温段(50~350℃)采用较慢的冷却速率,既

保证淬透性,又有效防止淬火开裂,再经回火处理成耐 CO₂ 腐蚀性优良的低成本油井管^[32]。耐腐蚀油井管用钢专利的制造工艺及性能见表 4、化学成分见表 5。

表 5 高强度耐腐蚀油井管用钢材的化学成分/%
Table 5 Chemical composition of high strength corrosion resistance oil well tubing steel products /%

公司	C	Si	Mn	S	P	Al	Ti	Nb	Cu	Ni	Mo	Cr	Ca	其他
JFE ^[1-7]	0.180	0.26	0.53	0.001 0	0.020	0.020			0.16	0.15		12.90	痕量	V 0.033 0
	0.010	0.15	1.21	0.000 9	0.016	0.022	0.009	0.040		2.00		10.90		V 0.030 0
	0.009	0.25	0.33	0.002 0	0.020	0.010			3.50	5.03	2.60	16.90	0.920 0	W 1.300 0 V 0.051 0
	0.008	0.21	0.65	0.001 0	0.014	0.020	0.079			6.10	2.10	12.50		V 0.009 0
	0.010	0.15	1.21	0.000 9	0.016	0.022		0.040	0.50	2.00		10.90		V 0.030 0
	0.250	0.27	0.60	0.000 7	0.010	0.028		0.050	0.10	0.05	0.80	0.30	0.002 0	V 0.030 0 B 0.002 1
宝钢 ^[7-21]	0.015	1.00	2.00		0.030	0.100	0.150	0.100	4.00	8.00	4.00	14.00	0.010 0	
	0.320	0.67	0.97			0.070						0.88		V 0.070 0
	0.290	0.16	1.15	0.005 0	0.007		0.050	0.030			1.50	0.98	0.015 0	V 0.150 0
	0.240	0.82	1.49			0.080			0.27	0.31		0.52		
	0.290	0.38	0.60	0.002 0	0.007	0.024	0.050	0.300			0.84	0.50		V 0.076 0
住友金属 ^[8-11]	0.190	0.20	0.38	0.015 0	0.015				0.10	0.15	0.15	1.80		
	0.008	0.16	0.27	0.000 7	0.009	0.035	0.009	0.064	2.40	3.90	2.40	17.20	0.002 0	
	0.020	0.24	0.10	0.000 9	0.017	0.045			2.48	5.03	2.55	16.96		
	0.017	0.31	0.49	0.000 6	0.025				0.50	6.56	3.07	24.81		W 2.080 0
攀钢钒钛 ^[32]	0.012	0.23	0.41	0.000 4	0.002	0.120		0.020	0.82	31.80	2.90	25.00	0.002 1	
	0.150	0.22	0.65	0.004 0	0.016	0.025	0.001				0.39	3.03		

2.3 抗挤毁油井管用钢

石油套管的抗挤毁性与屈服强度、残余应力、套管不圆度以及套管壁厚偏差等因素有关。

鞍钢公司采用低 C、S 含量设计,添加适量 Cr 和 Ti 取代贵金属 Mo 和 V,保证焊管的高韧性和良好的焊接性,在轧制卷取过程中,采用冷却速度为 9~20℃/s 的快速冷却,既满足工业化生产的要求,又满足客户对钢管韧性的需要,制得尺寸精度高、抗挤毁性优良的直缝电阻焊套管^[29-30]。

宝钢公司在成分上控制碳当量(Ceq)≤0.6,满足剪切对焊工序的要求,有利于实现多卷连续生产。采用 ERW 焊接方法,控制钢管不圆度<0.4%,保证了钢管的尺寸精度,通过调质处理制得在同等强度级别中抗挤毁性优良的油井管用钢^[22-24]。

天津钢管公司的设计思路包括:(1)采用较低的 C,并添加 Cr、Mo、Mn、Ni 等和微量的 V、Nb、Ti 等使钢管具有良好的强韧匹配性。成品钢管的组织以回火索氏体为主,在-40~-80℃低温环境下仍具有良好的韧性^[27];(2)采用较低的 C、Si,控制 P、S、五害元素的总和并不大于 0.02%,获得屈服强度 170~180 ksi(1 172~1 241 MPa)、组织以回火索氏

体为主的高强高韧套管^[28]。

中石油公司的设计思路为:使 Mn 和 Si 的质量比在(4~10):1 之间,对焊后钢管进行焊缝正火或整体正火,使残余应力小于屈服强度的 10%,并控制钢管的壁厚偏差≤7.5%*t*(*t*为壁厚),不圆度≤0.3%,抗挤强度比同规格的油井管高 15%~20%,显著提高了油井管的抗挤毁性,并具有良好的螺纹抗粘扣性^[25]。抗挤毁油井管用钢专利的制造工艺及性能见表 6、化学成分见表 7。

3 油井管用钢专利技术的发展趋势

(1)现有的稠油开采用耐热钢一般为 25Mn2、25CrMo4 等 C-Mn、Cr-Mn 钢,此类钢无法在高温高压条件下长时间服役,目前宝钢公司的研发趋势是在降低 C 含量的基础上复合加入少量的 Cr-W-V 等元素,并配合调质处理工艺。采取这种成分和制造工艺生产的耐热套管,一方面能改善钢的高温性能,有利于油田现场进行操作控制。另一方面也能显著提高钢的耐腐蚀性以及室温和高温下的屈服强度,其高温强度比常规产品高 30%,抗腐蚀性能提高 2 倍以上。

(2)当前国内外耐腐蚀油井管用钢主要分为 3

表6 高强度抗挤毁油井管用钢专利的关键生产技术

Table 6 Key patented production-technologies for high strength anti-collapse oil well tubing steels

公司	工艺处理	组织	性能
鞍钢	连铸板坯加热1 200 ~ 1 300 ℃, 连轧机第1阶段开轧(1 250 ± 30) ℃, 终轧 ≥ 1 020 ℃, 第2阶段开轧 ≤ 970 ℃, 终轧 800 ~ 860 ℃, 钢带以 15 ~ 20 ℃/s 速度冷却, 500 ~ 570 ℃ 卷取 ^[29] 。		屈服 552 ~ 785 MPa, 抗拉 ≥ 689 MPa。
	连铸板坯开轧 1 180 ~ 1 280 ℃, 终轧 760 ~ 820 ℃, 热轧成钢带, 以 9 ~ 14 ℃/s 冷却到 560 ~ 620 ℃ 卷取 ^[30] 。		屈服 390 ~ 540 MPa, 抗拉 ≥ 665 MPa; 屈服比 ≤ 0.75; 伸长率 ≥ 20%; 夏比冲击功 ≥ 27 J。
宝钢	连铸板坯开轧 1 200 ~ 1 250 ℃, 终轧 ≥ 850 ℃, 层流冷却到 ≤ 700 ℃ 卷取。ERW 焊接, 880 ~ 920 ℃ 淬火, 650 ~ 690 ℃ 回火 ^[22] 。		屈服 448 ~ 586 MPa, 抗拉 ≥ 586 MPa; 碳当量 Ceq 0.4 ~ 0.5; HRC ≤ 22。
	冶炼、浇铸成板坯, 开轧 1 200 ~ 1 300 ℃, 终轧 850 ~ 950 ℃, 热轧成钢带, 2 ~ 30 ℃/s 冷却到 550 ~ 700 ℃ 卷取, 880 ~ 940 ℃ 淬火, 580 ~ 700 ℃ 回火 ^[23] 。		屈服 80 ~ 110 ksi (552 ~ 758 MPa); 碳当量 Ceq ≤ 0.6; 外径不圆度 < 0.4。
	冶炼、浇铸成板坯, 开轧 1 200 ~ 1 300 ℃, 终轧 850 ~ 950 ℃, 层流冷却 650 ~ 700 ℃ 卷取。ERW 焊接, 900 ~ 950 ℃ 20 ~ 60 min 淬火, 550 ~ 600 ℃ 40 ~ 80 min 回火 ^[24] 。		屈服 862 ~ 1 034 MPa, 抗拉 ≥ 931 MPa; 0 ℃ 横向冲击功 ≥ 27 J; 碳当量 Ceq 0.43 ~ 0.55。
天津钢管	铸坯 1 200 ~ 1 350 ℃ 2 h, 穿孔、连轧、定径、冷却、调质处理制成无缝管 ^[27] 。	回火索氏体	屈服 1 034 ~ 1 172 MPa; 韧脆转变 -40 ~ -80 ℃; 横向夏比冲击功 50 ~ 80 J。
	铸坯 1 200 ~ 1 350 ℃ 2 h, 经穿孔、连轧、定径、冷却制成无缝管, Ac ₃ + 50 ℃ 淬火, 520 ~ 580 ℃ 回火 ^[28] 。	回火索氏体	屈服 170 ~ 180 ksi (1 172 ~ 1 241 MPa); 0 ℃ 横向夏比冲击功 70 ~ 90 J; 伸长率 ≥ 16%; HRC 40 ~ 45。
中石油	板坯热轧成钢带, 粗轧 1 000 ~ 1 100 ℃, 精轧 750 ~ 950 ℃, 冷却 15 ~ 30 ℃/s, 520 ~ 620 ℃ 卷取, 焊管 900 ~ 1 000 ℃ 正火, 450 ~ 550 ℃ 热定径及矫直 ^[25] 。		屈服 380 ~ 760 MPa, 抗拉 520 ~ 865 MPa; 伸长率 ≥ 20%; 室温夏比冲击功 ≥ 40 J。

注: 屈服- 屈服强度; 抗拉- 抗拉强度。

表7 高强度抗挤毁油井管用钢材的化学成分/%

Table 7 Chemical composition of high strength anti-collapse oil well tubing steel products / %

公司	C	Si	Mn	S	P	Al	Ti	Nb	Cu	Ni	Mo	Cr	Ca	V
鞍钢 ^[29-30]	0.18	0.20	1.49	0.007 6	0.013	0.024	0.009					0.25		
	0.16	0.23	1.60	0.006 1	0.009	0.021	0.020					0.28		
宝钢 ^[22-24]	0.22	0.30	1.40	0.004 0	0.012	0.030							0.003 0	
	0.28	0.30	0.45	0.002 0	0.008	0.030	0.010	0.03			0.38	0.50	0.005 0	0.13
	0.25	0.50	0.60	0.002 0	0.009		0.010	0.01			0.20			0.20
天津钢管 ^[27-28]	0.16	0.10	0.15	0.000 1	0.001	0.005	0.079	0.01		0.15	0.15	0.25		0.01
	0.18	0.20	0.45	0.000 9	0.002	0.010	0.020	0.01		0.30	0.65	0.95	0.001 5	0.01
中石油 ^[25]	0.27	0.21	1.59	0.006 0	0.009	0.050	0.040	0.06	0.18	0.25	0.28	0.19	0.003 0	0.05

大类: 第1类是低碳高合金油井管用钢, 典型的如 13Cr 马氏体不锈钢。一般利用调质处理的工艺, 获得的油井管用钢强度级别高且韧性和耐 H₂S、CO₂、Cl⁻ 等腐蚀性优异, 由于添加了较多的合金元素, 导致成本较高; 第2类是中碳 (C 0.25% ~ 0.60%) 低合金油井管用钢, 这类钢强度级别高, 具有优良的耐 SSC 性。此类钢中添加提高淬透性和回火稳定性元素, 例如 Mo、Mn、B 等, 并严格控制易于形成夹杂物和偏析的元素, 例如: P、S、O 等, 采用调质处理工艺, 并在 Ac₁ 以下较高温度回火, 来保证成品钢管具有良好的硬度均匀性和较低的残余应力; 第3类是中低碳低合金油井管用钢, 此类钢的特点是成本较低, 具有耐轻微 CO₂ 腐蚀性, 普遍适用

于开采寿命较短的贫矿低渗透油田, 较好的满足了油田对经济型耐 CO₂ 腐蚀油井管的需求。总的来讲, 未来耐腐蚀油井管用钢的研发仍会以耐腐蚀性、抗挤毁性优良的高强度及超高强度无缝管为主要方向。

(3) 目前钢铁公司对抗挤毁套管的研究主要集中在提高管材的屈服强度和改善管材的冲击韧性上。同样, 利用正火工艺降低管材的残余应力、热定径和热矫直工艺来降低不圆度, 而且壁厚不均度会使套管的抗挤毁性呈线性比例增大。而相对于无缝管而言, 焊管的最显著特点是壁厚尺寸精度高, 因此用焊管生产抗挤毁套管具有先天优越性, 研发具有这些复合特性的抗挤毁焊管将是今后的重要课题之一。

参考文献

- JFE. Cr-Containing Steel Pipe Having Excellent High Pressure Carbon Dioxide Corrosion Resistance; JP. JP2010111930. [DB/OL]. 2008-11-07 [2010-05-20]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>
- JFE. Seamless Pipe of Martensitic Stainless Steel for Oil Well Pipe and Process for Producing the Same; JP. JP2010168646. [DB/OL]. 2009-09-02 [2010-08-05]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>
- JFE. High-Strength Stainless Steel Pipe Having High Toughness and Excellent Corrosion Resistance for Oil Well; JP. JP2010209402. [DB/OL]. 2009-03-10 [2010-09-24]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>
- JFE. Method for Manufacturing Martensitic Stainless Steel Seamless Steel Tube for Oil Well Pipe; JP. JP2010242163. [DB/OL]. 2009-04-06 [2010-10-28]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>
- JFE. Seamless Pipe of Martensitic Stainless Steel for Oil Well Pipe and Process for Producing the Same; WIPO. WO2010026672. [DB/OL]. 2008-12-24 [2010-03-11]; http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20100311&CC=WO&NR=2010026672A1&KC=A1
- JFE. High-Strength Seamless Steel Tube for Use In Oil Wells, Which Has Excellent Resistance to Sulfide Stress Cracking and Production Method for Same; WIPO. WO2010150915. [DB/OL]. 2010-06-23 [2010-12-29]. http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20101229&CC=WO&NR=2010150915A1&KC=A1
- JFE. Method for Manufacturing Circumferential Weld Joint of Martensitic Stainless Steel Tube; JP. JP2010029941. [DB/OL]. 2009-08-24 [2010-02-12]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>
- Sumitomo Metal Industries Ltd. High Strength Stainless Steel Piping Having Outstanding Resistance to Sulphide Stress Cracking and Resistance to High Temperature Carbon Dioxide Corrosion; WIPO. WO2010050519. [DB/OL]. 2009-10-28 [2010-05-06]. http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20100506&CC=WO&NR=2010050519A1&KC=A1
- Sumitomo Metal Industries Ltd. Stainless Steel for Oil Well, Stainless Steel Pipe for Oil Well, and Process for Production of Stainless Steel for Oil Well; WIPO. WO2010134498. [DB/OL]. 2010-05-17 [2010-11-25]. http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20101125&CC=WO&NR=2010134498A1&KC=A1
- Sumitomo Metal Industries Ltd. The Manufacturing Method of a Duplex-Stainless-Steel Pipe | Tube; JP. JP04462454. [DB/OL]. 2009-11-02 [2010-05-12]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>
- Sumitomo Metal Industries Ltd. The Manufacturing Method of the High Strength Cr-Ni Alloy Seamless Pipe; JP. JP04553073. [DB/OL]. 2010-03-29 [2010-09-29]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>
- Sumitomo Metal Industries Ltd. The Manufacturing Method of A High-Alloy Pipe | Tube; JP. JP04462452. [DB/OL]. 2009-01-19 [2010-05-12]. <http://www19.ipdl.inpit.go.jp/PA1/cgi-bin/PA1DETAIL>
- Vallourec Mannesmann Oil & Gas. Low Alloy Steel With A High Yield Strength and High Sulphide Stress Cracking Resistance; FR. FR2942808. [DB/OL]. 2009-03-03 [2010-09-10]. http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20100910&CC=FR&NR=2942808A1&KC=A1
- Vallourec Mannesmann Oil & Gas. Low Alloy Steel With A High Yield Strength and High Sulphide Stress Cracking Resistance; WIPO. WO2010066584. [DB/OL]. 2009-11-25 [2010-06-17]. http://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPODOC&II=0&ND=3&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20100617&CC=WO&NR=2010066584A1&KC=A1
- 宝钢. 一种耐热套管用钢及其制造方法. CN. 101748330 [DB/OL]. 2008-12-17 [2010-06-23]. <http://search.cnipr.com/search.do?method=detailSearch>
- 宝钢. 一种石油套管及其制造方法. CN. 101845939 [DB/OL]. 2009-03-25 [2010-09-29]. <http://search.cnipr.com/search.do?method=detailSearch>
- 宝钢. 抗二氧化碳腐蚀低合金钢. CN. 101928893 [DB/OL]. 2009-06-23 [2010-12-29]. <http://search.cnipr.com/search.do?method=detailSearch>
- 宝钢. 一种抗二氧化碳腐蚀用低合金钢及其制造方法. CN. 101928888 [DB/OL]. 2009-06-23 [2010-12-29]. <http://search.cnipr.com/search.do?method=detailSearch>
- 宝钢. 一种抗硫化物腐蚀用钢及其制造方法. CN. 101928889 [DB/OL]. 2009-06-23 [2010-12-29]. <http://search.cnipr.com/search.do?method=detailSearch>
- 宝钢. 一种超高强度抗硫化氢腐蚀油井管及其生产方法. CN. 101724785 [DB/OL]. 2008-10-28 [2010-06-09]. <http://search.cnipr.com/search.do?method=detailSearch>
- 宝钢. 一种高强度特种抽油杆钢. CN. 101736201 [DB/OL]. 2009-12-25 [2010-06-16]. <http://search.cnipr.com/search.do?method=detailSearch>
- 宝钢. 一种石油套管用钢、电阻焊石油套管及其制造方法. CN. 101921952 [DB/OL]. 2009-06-16 [2010-12-22]. <http://search.cnipr.com/search.do?method=detailSearch>
- 宝钢. 一种石油套管用钢、电阻焊石油套管及其制造方法. CN. 101845586 [DB/OL]. 2009-03-25 [2010-09-29]. <http://search.cnipr.com/search.do?method=detailSearch>
- 宝钢. 一种石油套管用钢、高频电阻焊石油套管及其制造方法. CN. 101892422 [DB/OL]. 2009-05-19 [2010-11-24]. <http://search.cnipr.com/search.do?method=detailSearch>
- 中石油. 直缝电阻焊石油套管用钢及套管制造方法. CN. 101798654 [DB/OL]. 2010-04-09 [2010-08-11]. <http://search.cnipr.com/search.do?method=detailSearch>
- 天津钢管. 火烧驱油法开采稠油用油层段石油套管及其生产方法. CN. 101655002 [DB/OL]. 2009-09-16 [2010-02-24]. <http://search.cnipr.com/search.do?method=detailSearch>
- 天津钢管. 耐-40~-80℃低温的高强度高韧性石油套管. CN. 101629476 [DB/OL]. 2009-08-05 [2010-01-20]. <http://search.cnipr.com/search.do?method=detailSearch>
- 天津钢管. 屈服强度170~180ksi钢级的高强度高韧性石油套管及其制造方法. CN. 101892443 [DB/OL]. 2010-07-09 [2010-11-24]. <http://search.cnipr.com/search.do?method=detailSearch>
- 鞍钢. 一种高强度直缝焊管用钢及其制造方法. CN. 101906586 [DB/OL]. 2009-06-08 [2010-12-08]. <http://search.cnipr.com/search.do?method=detailSearch>
- 鞍钢. 一种低屈强比直缝电阻焊管用钢及其制造方法. CN. 101818308 [DB/OL]. 2009-02-27 [2010-09-01]. <http://search.cnipr.com/search.do?method=detailSearch>
- 衡阳华菱钢管. 稠油热采井用套管及生产方法. CN. 101871080 [DB/OL]. 2010-05-26 [2010-10-27]. <http://search.cnipr.com/search.do?method=detailSearch>
- 攀钢钒钛. 3Cr无缝钢管及其制造方法. CN. 101899612 [DB/OL]. 2010-07-20 [2010-12-01]. <http://search.cnipr.com/search.do?method=detailSearch>

牟 昊(1987-),男,助理工程师,2010年大连理工大学毕业,专利战略与分析。

收稿日期:2012-03-30