

油井管

制造技术

YOUJINGGUAN ZHIZAO JISHU

张 毅 高连新 穆增利 ■ 编著



石油工业出版社

油井管制造技术

张 毅 高连新 穆增利 编著



石油工业出版社

内 容 提 要

本书详细介绍了油井管制造工艺技术, 主要内容包括油井管的材料选择与冶炼、油井管的轧管制造技术、热处理工艺、管端加厚与缩口技术、接头设计、螺纹加工、检验、表面处理技术、耐蚀合金油井管的制造技术等。

本书可供油井管制造技术人员、油田油井管使用技术人员阅读参考, 也可以作为高等院校石油工程、机械工程、材料工程等专业的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

油井管制造技术/张毅, 高连新, 穆增利编著.

北京: 石油工业出版社, 2016. 7

ISBN 978-7-5183-1325-9

I. 油…

II. ①张… ②高… ③穆…

III. 油管-生产工艺

IV. TE931

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 120918 号

出版发行: 石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网址: www.petropub.com

编辑部: (010) 64523583 图书营销中心: (010) 64523633

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京中石油彩色印刷有限责任公司

2016 年 7 月第 1 版 2016 年 7 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 23.25

字数: 590 千字

定价: 96.00 元

(如出现印装质量问题, 我社图书营销中心负责调换)

版权所有, 翻印必究

序

油井管是油气勘探开发不可缺少的重要器材，而油井管制造在中国是个年轻的产业，20世纪80年代以前，国内油井管市场几乎都被国外产品所占据。进入90年代，随着我国石油工业的迅猛发展，油井管需求迅速扩大，我国石油装备界的有识之士，以振兴民族石油装备为己任，抢抓机遇，创新发展，在较短的时间内，迅速地建起了一批较高水平的油井管生产线，实现了油井管制造从无到有的快速发展和从量到质的大幅提升，中国一跃成为世界油井管制造第一大国。

《油井管制造技术》这本书既是作者几十年油井管制造经验的积累，也是多年来油井管研究成果的展示，是我国油井管制造引进、消化、创新历程的真实纪录。本书编录了油井管用钢设计及冶炼，油井管轧制及热处理，油井管螺纹设计、加工及检验等油井管制造流程中的工艺技术、过程控制 and 操作方法。本书主要内容来自于宝钢和达力普公司等国内主要油井管制造企业的成功经验和科研成果，既有科学的理论基础，又具有很强的实用性，是油井管研发机构、制造企业、高等院校和油井管使用单位技术人员难得的学习和参考书籍。

本书编者是河北省石油专用管工程技术研究中心（达力普石油专用管有限公司）专家，具有深厚的理论功底、丰富的阅历和实践经验，在业内有较高的知名度。本书的出版发行，是他们和工程研究中心技术人员奉献给广大读者的一份厚礼。同时，也将为我国油井管制造业应对市场挑战，行业转型升级，实现石油装备制造与中国制造2025无缝对接发挥积极作用。

达力普石油专用管有限公司董事长



2016年5月

前 言

石油专用管包括油井管和油气输送管，油井管以油管、套管、钻杆、钻铤及其附件为主，除了少数特殊用途的产品之外，绝大多数用钢管制造。按钢管的制造方式分为无缝钢管和焊缝钢管。在整个钢管制造业中属于用量大而客户集中、品种较多、技术含量高且市场稳定、附加值相对较高的一类产品，与石油和天然气工业密切相关。在石油、天然气、页岩气、煤层气、可燃冰、地热、储气库等能源的勘探、开发、运输、储备活动中，石油管是必不可少的专用管材。

20 世纪 80 年代及其之前，我国使用的石油专用管 90% 以上依赖于进口，此后的 30 年间，随着世界原油价格的高位攀升，以及工业现代化对能源的高度依赖，促使人们在面对深井、超深井、高压油气井、高腐蚀性油气井、浅海油气勘探以及深海能源开发的同时，不断深化材料科学与工程、现代冶金技术、计算机数控加工技术等，使得油井管制造从工艺装备到生产技术水平都有了长足的发展。

油井管的制造包括冶炼、轧管、深加工、检验与合理选用等诸多环节，在冶金生产过程中，大多数油井管用钢普遍遵循低合金钢纯净钢冶炼技术，轧管采取控制当量缺陷的轧制工艺。由于油井管服役是由数百根钢管串联使用，形成管柱式的压力容器，即每一根油井管都可以视为一个高压容器组件，因此在产品的设计、深加工和检验过程中，必然要求 100% 合格可靠的质量理念，特别是针对高压气井使用的特殊接头油井管，更是要追求“几何完整性与密封完整性”的目标。

我国从事油井管生产制造并取得 API 会标使用权的企业超过 250 家（包括制造厂和加工厂），设备资产总投资超过 600 亿元人民币，从业人员超过 10 万人，年生产能力达到 850 万吨，是国内市场总需求量的 1 倍，全世界油井管总用量的 1/2，产能严重过剩。但是由于种种原因，绝大多数企业只能生产低钢级、低质量水平（PSL-1）的低端产品，一些高钢级、特殊用途、特殊螺纹、特殊规格以及高质量水平（PSL-3 和 PSL-2）的油井管产品生产不出来。为

此，作者根据多年的从业经历，编写出《油井管制造技术》一书供大家参考，书中的多数制管设备图片来自太原通泽重工的产品实物。

本书共九章，主要围绕产品生产的工艺技术展开，装备技术和生产在线的控制技术与操作不多赘述。本书可作为油井管制造企业的专业技术用书，也可作为油井管设备制造企业的工艺参考书。

本书部分内容来源于河北省石油专用管工程技术研究中心研究成果，在编写过程中得到了多方面的大力支持和热情帮助，在此表示衷心的感谢。由于编者水平有限，书中错误在所难免，恳请广大读者批评指正。

作 者

2016 年 5 月

目 录

第一章 油井管用钢	(1)
第一节 按用途划分产品的钢级	(1)
第二节 油井管用钢的材料选择	(4)
第三节 纯净钢冶炼	(10)
第四节 管坯连铸技术应用	(15)
第五节 油井管用钢的材料牌号	(17)
参考文献	(21)
第二章 油井管钢管制造技术	(22)
第一节 油井管规格及制造工艺要求	(22)
第二节 轧管工艺要求	(26)
第三节 孔型设计要点	(36)
第四节 变形工具对钢管质量产生的影响	(42)
第五节 冷拔技术在油井管制造中的应用	(49)
第六节 HF-ERW 焊管技术	(50)
第七节 工具接头、转换短节和接箍的成型加工	(56)
第八节 钻杆接头摩擦对焊	(57)
参考文献	(61)
第三章 油井管热处理工艺技术	(62)
第一节 API 标准对油井管的热处理工艺要求	(62)
第二节 气体加热炉整管热处理	(63)
第三节 淬火技术与装置	(64)
第四节 感应热处理技术	(65)
第五节 油井管常规热处理工艺	(69)
第六节 热处理生产线其他配套技术	(72)
第七节 N80 钢级在线常化热处理技术	(74)
第八节 钻杆工具接头热处理	(78)
参考文献	(80)
第四章 管端加厚与缩口技术	(82)
第一节 钻杆加厚技术	(82)

第二节	油管加厚技术	(87)
第三节	特殊螺纹产品加厚技术	(88)
第四节	管端定径与缩口技术	(89)
参考文献		(90)
第五章	油井管螺纹接头设计	(91)
第一节	接头的基本设计特点	(92)
第二节	油套管特殊螺纹设计	(101)
第三节	改进型 API 接头设计	(120)
第四节	钻杆工具接头设计	(123)
第五节	WSP-HK 特殊螺纹接头有限元分析案例	(129)
参考文献		(150)
第六章	螺纹加工	(152)
第一节	API 螺纹加工的工艺控制	(152)
第二节	特殊螺纹加工控制	(162)
第三节	钻杆工具接头的螺纹加工	(167)
参考文献		(168)
第七章	油井管检验	(169)
第一节	油井管的检验项目与评价	(169)
第二节	建立质量控制点进行检验项目的具体实施	(176)
第三节	螺 纹 检 验	(178)
第四节	油井管无损探伤	(210)
第五节	油井管理化检验	(233)
第六节	油套管整体性能试验	(252)
第七节	钻杆实体性能试验	(266)
参考文献		(269)
第八章	表面处理技术	(271)
第一节	油井管外表面涂漆技术	(271)
第二节	油管表面渗 (镀) 技术	(273)
第三节	工具接头和接箍表面处理	(283)
第四节	钻杆、油井管内涂层技术	(291)
第五节	钢管内外防护/防腐涂料技术	(294)
第六节	钢管内衬 (复合材料) 技术	(296)
第七节	各种表面处理技术对比分析	(300)
参考文献		(302)

第九章 耐蚀合金油井管的制造 (303)

第一节 不锈钢/耐蚀合金油井管种类与成分..... (303)

第二节 耐蚀合金冶炼技术控制 (304)

第三节 耐蚀合金制管工艺控制 (307)

第四节 耐蚀合金油井管的螺纹加工技术 (313)

参考文献 (316)

附录 油井管生产厂的建厂设计案例 (317)

第一章 油井管用钢

油井管作为用量大、市场面相对稳定和品种繁多的一类钢管产品，其生产制造与现代冶金技术的发展密切相关。由于油井管的服役环境主要是在井下，无论是钻井过程、完井固井过程、压裂酸化作业过程，还是采油采气过程，必然要受到地质条件和井下复杂工况的影响。另外，在服役过程中，入井油井管要承受各种载荷及环境介质的考验。油井管的服役条件一是服役工作环境，二是井下地质工况，三是工程实施中的操作因素。服役工作环境包括：载荷性质（静载荷、冲击载荷、交变载荷、局部压入载荷、持续磨损载荷）、加载次序（载荷谱、瞬时超载）、应力状态（拉伸、压缩、内压、外压、弯曲、扭转、剪切及其复合）。地质工况包括：工作温度、环境介质、地层应力变化、位移变化、地质条件变化等。施工操作因素包括：油井管下井操作、施工作业操作、处理事故操作以及运输、存放等。除了载荷因素外，油井管在井下还会遇到酸性介质腐蚀（如 H_2S 腐蚀、 CO_2 腐蚀）、地层水腐蚀、 Cl^- 腐蚀、氧腐蚀、细菌（微生物）腐蚀等，另外温度对腐蚀也会产生影响。由于油井管是一次下井长期使用的石油专用管材，其服役环境和受力状态往往是上述多重因素的组合。正因为如此，油井管用钢在生产制造中就显得尤为重要。

第一节 按用途划分产品的钢级

油井管服役条件苛刻，对产品质量要求高，就生产制造而言，首先就是钢种选择和相应的冶炼工艺技术。油井管用钢主要有以下两种分类方式：一种是按 API 标准规定的钢级分类，例如油管 and 套管有 H40, J55, K55, M65, N80, L80, C90, T95, R95, P110, C110 和 Q125 等；钻杆有 E75, X95, G105 和 S135 等。这其中适应于酸性环境的油套管钢级有 M65 和 L80 等，适用于 CO_2 腐蚀环境的有 L80-9Cr 和 L80-13Cr 等，适用于 H_2S 腐蚀环境的有 C90, T95 和 C110 等。P110 和 Q125 属于深井、超深井用高钢级油井管，其他则都属于常规产品。至于各种特殊服役环境，还可以选择非 API 产品。钻杆也一样，G105 和 S135 属于高钢级钻杆，E75 和 X95 属于低钢级钻杆，而且 S135 钢级不宜在酸性环境下使用。至于在 H_2S 腐蚀环境下使用的高钢级钻杆，以及超深井钻井所用钻杆，必须是非 API 的抗硫系列或超高强度系列产品，例如 WSP-95DS, WSP-105DS, WSP-120DS 或 WSP-140DP, WSP-150DP 等。

油井管的生产制造及质量控制主要遵循美国石油学会 API 标准，涉及的相关标准有 21 项之多，见表 1-1。但是 API 标准对油井管用钢的制造方法不做明确规定，只是强调选用细晶粒钢，即钢种应“进行晶粒细化处理，钢中含有一种或多种晶粒细化元素，如一定量的铝、铌、钒或钛等，使钢的奥氏体晶粒细化”。

另一种分类方式是针对油井管服役条件中的深井、超深井、高压气井、低温环境以及各种腐蚀条件而开发的不同材质、不同钢级、不同用途的油井管产品，又称非 API 产品。表 1-2 列出国内外主要油井管生产企业的非 API 油井管种类。显然两种划分方式都是围绕着产品用途按钢级进行划分，没有固定材料牌号，也没有制定冶炼工艺，只不过第二种方

式按用途划分的更直观、更具体。

表 1-1 API 有关油井管的相关标准

序号	标准编号	标准名称	版本
1	API Spec 5CT/ISO 11960	套管和油管规范	2006
2	API RP 5C1	套管和油管的维护与使用推荐做法	2006
3	API Bull 5C2	套管、油管和钻杆的使用性能公报	1999
4	API TR 5C3	套管、油管和管线管计算公式和套管、油管使用性能表技术报告	2008
5	API RP 5C5/ISO 13679	套管和油管连接试验程序推荐做法	2003
6	API RP 5C6	钢管焊接接头推荐做法	2006
7	API RP 5C7	油气井用挠性油管推荐做法	2007
8	API RP 5A3/ISO 13678	套管、油管和管线管用螺纹脂只推荐做法	2003
9	API RP 5A5/ISO 15463	新套管、油管和平端钻杆现场检验推荐做法	2005
10	API Spec 5B	套管、油管和管线管螺纹的加工、测量和检验规范	2008
11	API RP 5B1	套管、油管和管线管螺纹的加工、测量和检验推荐做法（包括 2004 年 9 月补充件）	1999
12	API Spec 5D	钻杆规范	2002
13	API RP 5SI	购方代表在供方处的监督和/或检验推荐做法	2006
14	API Std 5T1	缺欠术语	2003
15	API RP 5UE	钢管缺欠的超声评价推荐做法	2005
16	API 5TR SR22	增强抗泄漏长圆螺纹套管 SR22 补充要求技术报告	2002
17	API Spec 7	旋转钻柱构件规范	2002
18	API Spec 7-1/ISO 10424-1	旋转钻柱构件规范-1	2006
19	API Spec 7-2/ISO 10424-2	旋转台阶式连接螺纹加工及测量规范	2005
20	API RP 7G	钻柱设计和操作极限推荐做法	1998
21	ANSI/API Spec 5CRA	耐蚀合金无缝管套管、油管及接箍规范	2010

表 1-2 非 API 钢级油井管种类及生产厂家

生产厂 ^①	V&M	住友	Tenaris	JFE	天津钢管公司	西姆莱斯	宝钢
用于深井的超高强度油井管	VM-140, VM-150, VM-155	SM-140G, SM-150G, SM-155G	TN135DW, TN140DW, TN150DW	JFE-125V, JFE-140V	TP-140, TP-150	WSP-140, WSP-150	BG-140, BG-150
用于低温环境的低温高韧性油井管	VM55LT~VM125LT	SM95L~SM110L, SM125L	TN55LT, TN80LT, TN110LT, TN125LT	JFE80L, JFE95L, JFE110L, JFE125L	—	—	BG80L, BG110L, BG125L

续表

生产厂 ^①	V&M	住友	Tenaris	JFE	天津钢管公司	西姆莱斯	宝钢
高抗挤套管	VM-80HC, VM-95HC, VM-110HC, VM-125HC	SM-80T, SM95T, SM110T, SM110TT, SM12TT	TN80HC, TN95HC, TN110HC, TN125HC, TN140HC	JFE-80T, JFE-95T, JFE-110T	TP-80T, TP-95T, TP-110T, TP-125T, TP-125TT, TP-140TT	WSP-80T, WSP-95T, WSP-110T, WSP-125T, WSP-140T	BG-80T, BG-95T, BG-110T, BG-125T, BG-140T
抗 H ₂ S 应力 腐蚀油套管	VM-80S~ VM-110S, VM-80SS~ VM-110SS	SM-80S~ SM-95S, SM-C100, SM-C110, SM-80SS~ SM-110SS	TN80SS, TN90SS, TN100SS, TN110SS, TN125SS	JFE-80SS, JFE-95SS, JFE-110SS	TP-80S~ TP-125S, TP-80SS~ TP-110SS	WSP-80S~ WSP-125S, WSP-80SS~ WSP-110SS	BG-80S~ BG-110S, BG-80SS~ BG-110SS
抗挤+抗 H ₂ S 应力腐蚀油 套管	VM-90HCS, VM-95HCS, VM-80HCSS~ VM-110HCSS	SM-95TS	TN80HS, TN90HS, TN95HS, TN110HS	JFE-80TS, JFE-95TS	TP-80TS~ TP-125TS, TP-80TSS~ TP-110TSS	WSP-80TS~ WSP-125TS, WSP-80TSS~ WSP-110TSS	BG-80TS~ BG-125TS, BG-80TSS~ BG-110TSS
抗 CO ₂ 腐蚀 油套管	VM80 13Cr, VM95 13Cr, VM8013ET	SM9Cr-80~95 SM13CrS- 80~110 SM13CrM- 80~110	TN13Cr, TN13CrM, TN13CrS	JFE13Cr80, JFE-HP1- 13Cr110, JFE-HP2- 13Cr110	TP13Cr95, TP13Cr110	WSP13Cr95, WSP13Cr110	BG13Cr95, BG13Cr110
抗 CO ₂ +低抗 H ₂ S 腐蚀油 套管	VM95 13CrS, VM110 13CrSS	SM22Cr- 65~140 SM25Cr- 75~140 SM25CrW- 80~140	—	JFE-UHP- 15Cr-125	TP95 13CrS, TP11013CrS	WSP9513CrS, WSP11013CrS	BG9513CrS, BG11013CrS
抗 CO ₂ +抗 H ₂ S+抗 Cl ⁻ 腐 蚀油套管	VM22 110, VM22 125, VM22 140, VM25 110, VM25 125, VM25 140, VMG3	SM2035-110~ SM2035-125, SM2535-110~ SM2535-130, SM2242-110~ SM2242-125, SM2550-110~ SM2550-140, SM2050-110~ SM2050-140, SM2060-110~ SM2060-155, SMC276-110~ SMC276-150	—	—	—	—	—

续表

生产厂 ^①	V&M	住友	Tenaris	JFE	天津钢管公司	西姆斯	宝钢
抗硫钻杆	VM-95DPS, VM-105DPS, VM-95DPSS, VM95DPSS	—	—	—	—	WSP-95DS, WSP-105DS, WSP-120DS	BG-90DS, BG-105DS, BG-120DS
超 高 强 度 钻杆	VM-140DP, VM-150DP, VM-165DP	—	—	—	—	WSP-140DP, WSP-150DP	BG-140DS
高抗扭钻杆	VM EIS, VM Express, VM CDS	—	—	—	—	WSP-DS1, WSP-DS2, WSP-DS3	BG-DS

① V&M—瓦卢瑞克—曼内斯曼公司；住友—原名日本住友金属，现改为新日铁住金；Tenaris—特纳集团；JFE—日本 JFE 公司；天津钢管公司—天津钢管集团股份有限公司；西姆斯—西姆斯石油专用管制造有限公司；宝钢—宝钢股份有限公司。

需要说明的是，API 标准虽然没有规定油井管用钢的材料牌号，但是给出了不同钢级油井管用钢的化学成分上限，对于酸性环境用钢还给出了主要合金元素的界限值，见表 1-3。生产厂可根据本企业自身的设备生产能力（包括热处理）选择钢种甚至是自炼钢。

从表 1-3 中的数据可以看出，API 标准规定的钢种成分，对于普通油井管仅限定 P 和 S 含量，其他元素及钢种选择由生产厂根据产品性能而定。对于酸性环境使用的油井管，除了限定 P 和 S 元素含量外，同时限定 C，Mn，Ni 和 Si 等元素上限含量，并给出 Cr 和 Mo 的含量范围，实际上这已经在左右钢种的合金化方向。

表 1-3 API 对油井管的化学成分要求

钢级	组分含量（%）（质量分数）								
	C	Mn	Mo	Cr	Ni	Cu	P	S	Si
H, J, K, N							≤0.030	≤0.030	
M65							≤0.030	≤0.030	
L80	≤0.43	≤1.90			0.25	≤0.35	≤0.030	≤0.030	≤0.45
C90	≤0.35	≤1.20	0.25~0.85	≤1.50	0.99		≤0.020	≤0.010	
C95	≤0.45	≤1.90					≤0.030	≤0.030	≤0.45
T95	≤0.35	≤1.20	0.25~0.85	0.40~1.50	0.99		≤0.020	≤0.010	
P110							≤0.030	≤0.030	
Q125	≤0.35	≤1.35	≤0.85	≤1.50	0.99		≤0.020	≤0.010	
L80-9Cr	0.15	0.30~0.60	0.90~1.10	8.00~10.0	0.50	≤0.25	≤0.020	≤0.010	≤1.00
L80-13Cr	0.15~0.22	0.25~1.00		12.0~14.0	0.50	≤0.25	≤0.020	≤0.010	≤1.00
E, G, S 钻杆							≤0.030	≤0.030	

第二节 油井管用钢的材料选择

根据 API 标准，油井管用钢按钢级（强度水平）划分，低钢级可以采用热轧态交货，

其他钢级可通过调整热处理工艺, 实施正火、正火+回火、淬火后不同温度回火的生产工艺来实现。这样油井管用钢的钢种选择及合金化设计, 完全可以通过实验或生产经验来调整确定。

一、合金元素在油井管用钢中的作用

我们知道, 普通低合金钢有 5 种常规元素, 分别为 C, Si, Mn, P 和 S, 除此之外其他合金元素的选用和添加量控制, 主要依据各元素在钢中的作用而定。对于不需要热处理的低钢级油井管, 热轧态交货, 选择 C—Mn 系低合金钢比较适宜。不仅成本低廉, 而且不同制管工艺、不同成型机组, 工艺稳定性尚好。针对不同轧管工艺带来的终轧后冷却速度变化, 可通过调整 C 含量来保证钢管的强度水平。如果对热轧态钢管产品的强度和韧性还需要进一步提高, 可考虑在 C—Mn 钢的基础上适当添加少量的微合金化元素, 如 V, Nb, Ti, Al 和 B 等, 通过细化晶粒和控制冷却速度来达到理想的性能要求, 当然也可以通过调整 C/Mn 比值来实现, 即降 C 增 Mn, Mn 与 C 比值大于 3。至于需要热处理生产的油井管, 合金元素的选用与添加量必须遵循以下原则: (1) 保证淬透性; (2) 控制回火脆性; (3) 提高综合机械性能; (4) 降低生产成本。在此需要就各元素在钢中的作用具体分析如下:

1. C 的影响

在珠光体+铁素体钢中, 碳以渗碳体形式存在, 提高钢中珠光体含量, 从而提高强度降低韧性, 同时降低钢的硫化氢应力腐蚀开裂 (SSCC) 性能。在调质热处理钢中, 低碳 (板条、位错) 马氏体的回火组织对强韧性有益, 对抗硫化氢应力腐蚀开裂性能也有益。高碳孪晶马氏体及回火组织对韧性有害, 同样对抗应力腐蚀开裂性能也有害。虽然通过高温回火使马氏体组织充分转变, 但随着合金碳化物析出的不断增多以及基体组织中固溶的 C 元素原子增加, 材料的强度增加、韧性下降, 硫化氢应力腐蚀开裂的性能也下降。另外碳又是强淬透性元素, 在保证淬透能力和淬硬性方面对综合机械性能是有益的。但是当要求提高抗 CO₂ 腐蚀和抗 Cl⁻ 腐蚀性能时, 应限制钢中的碳含量。在普通热处理钢中, 碳含量可控制在 0.25%~0.30% 范围内, 下贝氏体 (等温热处理) 钢中, 碳含量可调整到 0.35%~0.45%, 实现高强度钢的高韧性, 同时保持一定的抗硫化氢应力腐蚀开裂性能。

2. Si 的影响

Si 为有效脱氧元素, 出于脱氧的目的, Si≥0.05% 即可。Si 同时具有抗回火软化和改善耐蚀性的作用, Si≥0.5% 会促进析出作为软化相的铁素体, 使加工性能和材质韧性恶化, 材料的抗应力腐蚀开裂性能下降, 故钢中的 Si 含量不宜过高。

3. Mn 的影响

Mn 易与钢中 S 亲合, 形成 MnS 夹杂, 对强度、韧性和抗硫化物应力腐蚀开裂性能不利。另外 Mn 含量太高, 还会促进有害元素 P, S, Sn 和 Sb 等一起向晶界处偏析, 偏析在晶界处的 P, S, Sn 和 Sb 等与 H 发生交互作用, 使晶界键合力大幅度下降, 容易引起沿晶开裂, 钢的韧性和抗应力腐蚀开裂性能下降。C—Mn 系低合金钢, 采取降 C 增 Mn, 严格控制 Mn/C 比值及 S 含量的做法, $Mn/C \geq 3$, $S \leq 0.005\%$, 可以改善综合机械性能, 并按照公式 $Mn (\%) = 0.5 + 12S (\%) + 0.0086/C (\%)$ 计算控制。在调质热处理钢中 Mn 扩大淬透性, 并使相变温度降低 (Ar1/Ar3 点), 易形成奥氏体向马氏体的转变, 提高综合机械性能。就普通 C—Mn 低合金钢而言, Mn 含量控制在 1.20%~1.40% 范围内较为理想, Mn≥1.65% 会加大低锰钢的 Mn 偏析。

4. Cr 的影响

Cr 是扩大淬透性元素，也是碳化物形成元素， Cr_7C_3 是经济型抗 CO_2 油井管钢中的主要碳化物， Cr_{23}C_6 是马氏体不锈钢中的主要碳化物。在低合金淬火高温回火的调质钢中，Cr 对于减慢 $\text{CO}_2\text{—H}_2\text{S—Cl}^-$ 环境中的腐蚀速度极为有利，可以改善钢的耐腐蚀性能，保证综合机械性能，并使材料的抗硫化氢应力腐蚀开裂性能提高。Cr 与 Mo 的有效配合，提高钢的淬透性，在淬火+高温回火状态，可保证钢种在较高的强度下具有良好的综合机械性能，同时提高抗应力腐蚀开裂性能。 $\text{Cr}+\text{Mo}\geq 1.5\%$ 可有效提高淬透性，但 $\text{Cr}+\text{Mo}\geq 3.0\%$ 会促进生成粗大碳化物 M_{23}C_6 ，使普通低合金钢种淬火后的残余奥氏体相对稳定，降低材质的抗应力腐蚀开裂性能，因此必须在热处理工艺上作调整。另外普通钢种刻意添加不超过 0.25% 的 Cr，对机械性能有利。

5. Mo 的影响

Mo 是最有效的抗 H_2S 应力腐蚀元素，可以和 S 一起形成弥散的析出物，使固溶 S 降低。Mo 与 Cr 相似，也是扩大淬透性元素，在连续冷却过程中 Mo 还推迟奥氏体向贝氏体的转变，提高材质的抗硫化氢应力腐蚀开裂性能。Mo 与 C 有较强的亲和力，是碳化物形成元素，减少固溶的 C 含量，提高材质抗应力腐蚀性能。在淬火高温回火的调质钢中，Mo 与 C 形成的合金碳化物析出，起到二次硬化作用，保证基体 α 相中碳（间隙相化合物）充分析出，特别是 $\text{Mo}_2\text{C}/\text{MoC}$ 金属间隙相碳化物硬度高（ $\text{HV}=1480$ ），不仅高于一般渗碳体 Fe_3C （ M_3C $\text{HV}=950\sim 1050$ ）的硬度，而且高于 M_6C 型碳化物的硬度（ $\text{HV}=1100$ ），保证在 610°C 以上温度回火具有较高的强度和韧性（ $\text{HRC}\leq 29$ ），提高材质的抗硫化氢应力腐蚀开裂性能。弥散的 Mo_2C 是 H 的强陷阱，从而使扩散富集的 H 大大降低。Mo 与 V 促进生成微细碳化物 MC，可提高回火稳定性，从而提高回火温度，为此 $\text{Mo}\geq 0.5\%$ ，优选含量 0.7% 以上，V 含量可控制在 0.045% 左右。Cr—Mo 的有效配合，在淬火+高温回火状态，可保证钢种在较高的强度下具有良好的综合机械性能，材质的抗硫化氢应力腐蚀性能也高。

6. Ni 的影响

在调质钢中 Ni 扩大淬透性，使金属材料相变点 Ac 点降低，高温回火易成分偏析，形成残余奥氏体向马氏体转变，降低材质的抗硫化氢应力腐蚀开裂性能。含 Ni 钢特别是 Cr—Ni—Mo 钢调质热处理，淬火采用水冷却易形成残余奥氏体向马氏体转变，降低材质的抗应力腐蚀性能，并引发淬火裂纹和变形倾向。淬火若采用油冷却，连续冷却会形成混合组织，同样降低抗应力腐蚀性能，综合机械性能也降低。 $\text{Ni}\leq 0.25\%$ 时对抗硫化氢应力腐蚀性能有利，Ni 在提高综合机械性能和抗氧腐蚀、点蚀方面还是有益的，故常规钢中可以添加不超过 0.25% 的 Ni。

7. Nb, V, Ti, Al 和 B 等微量元素的影响

Nb, V, Ti, Al 和 B 均属于微合金化元素，而且 Nb, V, Ti 和 B 又属强碳化物形成元素，它们与碳/氮形成的金属间隙相化和物质点硬度高（如 NbC $\text{HV}=2050$ ，VC $\text{HV}=2010$ ，TiC $\text{HV}=2850$ ），并通过提高淬透性，细化晶粒，使钢的抗应力腐蚀性能提高。微合金化元素的固溶—析出界限是溶度积，铁中的 Nb, V 和 Ti 的碳化物溶度积由下列各式计算（T 为温度）： $\lg [\% \text{Nb}] [\% \text{C}+12/14 \text{N}\%] = 2.26-6770/T$ ； $\lg [\% \text{V}] [\% \text{C}] = 6.72-9500/T$ ； $\lg [\% \text{V}] [\% \text{N}] = 3.63-8700/T$ ； $\lg [\% \text{Ti}] [\% \text{C}] = 5.33-10475/T$ ； $\lg [\% \text{Ti}] [\% \text{N}] = 3.82-15020/T$ 。V 在奥氏体中的固溶量大于 Nb 和 Ti，所以 V 的碳化物析出量大，析出强化效果也明显。VC 在奥氏体中的固溶量随加热温度的升高而增加，在加热温度达到 1100°C

以上时, VC 基本上全部固溶, 在 VC 析出时可获得很大的析出强化效果。在加热温度小于 900℃ 时, VC 基本上不固溶, 而且粗大的 VC 不起析出强化的作用。由于 VC 的上述固溶特点, 使之成为生产非调质钢油井管析出强化和强度差别化的适用微合金元素。VN 的固溶量小于 VC, 不能用于获得大的析出强化效果和实现强度差别化。添加 Nb 和 Ti 等形成碳氮化物, 主要起细化晶粒作用, 且高温稳定性好于 V 的微合金化元素。在调质态 Cr—Mo 钢中, Nb/V 微合金化, 提高钢的抗硫化氢应力腐蚀开裂性能。V 与 Mo 促进生成微细碳化物 MC, 可提高钢的抗回火软化能力, 为此钢中 V 含量可控制在 0.05%~0.25% (油井管取下限、大截面结构钢可考虑取上限), 再提高含量效果饱和。在 Mn—Ti—B 系调质钢中, Ti=0.020%~0.040%, B=0.0010%~0.0020%, 可明显提高钢的淬透性、细化晶粒和抗回火软化能力, 通过添加少量的 Cr 元素 (Cr=0.20%~0.25%), 在低碳钢范围内, 具有良好的综合机械性能。

除了控轧卷板生产高频电阻焊接 (HF-ERW) 油井管之外, 在常规的连铸钢坯热轧无缝钢管生产油井管用钢中, 多种微合金化元素不宜同时添加。例如 Al 作为炼钢过程的脱氧剂, 含量在 0.005%~0.05% 即可, 不需要刻意再添加。在高强度钢中, B 元素具有促进生成晶界粗大碳化物 $M_{23}C_6$ 的作用, 降低钢的抗应力腐蚀开裂性能。Ti 和 B 元素抗硫化氢应力腐蚀开裂作用在大截面石油机械用钢中通过扩大淬透性和细化晶粒而起的作用更明显, 因此常规钢种的微合金化多以 Nb 和 V 元素为主, 个别情况也有考虑加 B 和 Ti 元素。其中 B 含量多控制在 0.001%~0.002%, 最高不宜超过 0.004%。Ti 含量为 0.02%~0.06%, 而且 Ti/N 比值尽量低。

8. P 和 S 的影响

S 和 P 是钢中的有害元素, 增加钢的开裂敏感性, 降低材料抗应力腐蚀、腐蚀疲劳和硫化物腐蚀性能。P 易在晶界处偏析, 加剧回火脆性、晶间脆化和沿晶开裂, S 在钢中以 MnS 和 FeS 夹杂物的形态存在, 偏析聚集, 易造成钢的热脆。诱发应力腐蚀开裂敏感性, 是裂纹萌生和扩展的路径, 明显降低钢的硫化物应力腐蚀性能。S 与 P 一样, 也会在晶界处偏析, 降低钢的韧性, 恶化钢的 Z 向性能, 对氢致裂纹影响大, 同样降低钢的抗应力腐蚀开裂性能。就普通油井管用钢而言, $P \leq 0.015\%$, $S \leq 0.010\%$ 即可, 但对于酸性环境下使用的油井管, 应做到 $P \leq 0.010\%$, $S \leq 0.008\%$, 对于含 H_2S 环境或 H_2S 分压较高的环境, 必须使用抗硫油井管, 其钢中的 $P \leq 0.010\%$, $S \leq 0.003\%$ 。

二、油井管用钢的材料设计与选择

油井管用钢的材料设计与选择, 不仅是围绕着 C, Si, Mn, P 和 S 等 5 种常规元素确定元素含量, 还要根据不同合金元素在钢中的作用, 针对油井管分类所要求的产品性能, 选择其他元素以及各元素的含量范围。就油井管用钢而言, 有以下几种分选:

1. C—Mn 系低合金钢

采用降 C 增 Mn, 严格控制 Mn 与 C 比值及 S 含量的技术路线, 并做到按下式计算:

$$Mn (\%) = 0.5 + 12S (\%) + 0.0086/C (\%)$$

其中 $S \leq 0.005\%$, $P \leq 0.010\%$, $Mn/C \geq 3$, 在热轧态油井管钢中, 可以满足常规机械性能。在保证淬透性的前提下, 还可以调质热处理生产高强度油井管, 并具有良好的综合机械性能。

当然, 除了 C—Mn 系低合金钢外, 其他类似钢种也可以考虑, 例如 C—Cr 系的 20Cr~40Cr 钢等, 只是生产成本和热轧状态的工艺稳定性略有差异。

2. Mn—V 系低合金钢

取 $C=0.25\% \sim 0.40\%$, $Si=0.15\% \sim 0.35\%$, $Mn=0.8\% \sim 1.60\%$, $V=0.020\% \sim 0.080\%$ (个别情况 V 含量可接近 0.1%) 生产非调质钢, 通过调整 C 含量来控制珠光体含量, 并通过快速冷却来控制碳化物析出, 可保证具有良好的强韧性。若用于调质钢还需要控制淬火变形及开裂倾向 (探伤 L2), 与 $C-Mn$ 钢相比, 加 V 可进一步提高钢的淬透性及抗回火软化能力, 但淬火开裂倾向也增加, 故可考虑在较低温度下 (两相区) 淬火以及在更高温度下回火。

3. Cr—Mo 系合金钢

取 $C=0.25\% \sim 0.30\%$ (低碳位错马氏体), 钢中 $Cr \approx 0.25\%$ 就有效, $Cr \geq 2.5\%$ 易形成残余奥氏体向马氏体的转变, 材料的抗硫化氢应力腐蚀开裂性能下降。另外合金碳化物 Cr_7C_3 的存在, 使机加工变得相对困难, 需要热处理解决。 $Mo \leq 0.15\%$ 效果不明显, 随着钢中 Mo 含量提高, 材料的抗 S 性能、热处理淬透性、抗回火软化性能等均有所提高。故 $Cr-Mo$ 系合金钢适用于抗 S 钢油井管、超高强度油井管、热采井用油井管、高抗挤毁油井管和经济型抗 CO_2 腐蚀油井管等多种产品的使用。 $Cr-Mo$ 钢调质热处理制作 110SS/120S 等高钢级抗硫油井管时的热 Mo 含量是关键, 其最高含量达 0.75% 甚至更高。若采用 $Cr-Mo$ 钢调质热处理生产经济型抗 CO_2 +抗 S 的油井管, 钢中 Cr 含量可从 1% 提高到 3% , 甚至 5% , 并采用纯净钢冶炼, 以达到既抗 S 又抗 CO_2 腐蚀的目的。

4. Cr—Ni—Mo 系或 Cr—Mn—Mo 系合金钢

钢中 $Ni \approx 0.25\%$ 即有效, 但是随着 Ni 含量的提高, 对油井管的硫化氢应力腐蚀开裂性能不利。 $Mn \geq 0.65\%$ 时对材质的抗硫化物腐蚀性能也不利。 Ni 和 Mn 均提高钢的淬透性和常规机械性能, 故 $Cr-Ni-Mo$ 系或 $Cr-Mn-Mo$ 系钢做调质热处理。水淬火易产生淬火裂纹, 而且变形开裂倾向大; 油淬火生产安全性比较差, 而且易产生未淬透等非马氏体转变产物, 降低钢的抗应力腐蚀开裂性能。但是 $Cr-Ni-Mo$ 系或 $Cr-Mn-Mo$ 系合金钢的淬透性高, 适合于厚壁管或工具接头的生产。

近年来人们在低碳 $Cr-Mn-Mo$ 钢的基础上又做了进一步的改进, 将 Mn 含量上限提高到 $1.5\% \sim 1.6\%$, Cr 含量降至 $0.3\% \sim 0.45\%$, Mo 含量控制在 $0.4\% \sim 0.8\%$ 的范围内可调, 同时添加 V 至 $0.045\% \sim 0.055\%$, 形成 $Cr-Mn-Mo-V$ 系合金钢。这样, 提高 Mo 含量虽然增加原材料成本, 但是 Mo 元素在钢中的众多有效作用 (扩大淬透性、使淬火 C 曲线的鼻温右移降低淬火冷却速度; 高温回火形成合金碳化物二次析出强化; 弥散的 Mo_2C 又是 H 的强陷阱, 从而使扩散富集的 H 大大降低; Mo 与 V 促进生成微细碳化物 MC , 可提高回火稳定性从而提高回火温度等) 得以充分发挥, 使之用于生产高端油井管, 产品的安全使用寿命和工艺稳定性大幅度提高, 并实现产品机械性能、工艺性能和使用性能全面提升的效果。现已成为工程师们在面对各类油井管生产与使用中, 应对和解决技术难题的首选。

5. Mn—Ti—B 系低碳合金钢

钢中 $C=0.20\% \sim 0.30\%$, 在 $C-Mn$ 钢的基础上, 同样走降 C 增 Mn 、严格控制 Mn/C 比值及 S 含量的技术路线, 在此基础上同时添加 Ti 和 B 等元素, 其中 B 含量多控制在 $0.001\% \sim 0.002\%$, 最高不宜超过 0.004% 。 Ti 含量在 $0.02 \sim 0.04\%$, 最高不宜超过 0.06% , 而且 Ti/N 比值尽量低。为了提高油井管调质热处理后的综合机械性能和工艺性能, 钢中还可以有意添加 Cr ($\leq 0.25\%$)。

总之, 低碳 $C-Mn$ 系低合金钢热轧或正火状态, 适合于生产 J55 和 K55 钢级的油井