

◀国外石油机械▶

国外连续管材料技术及其新进展

陈立人

(宝鸡石油机械有限责任公司)

摘要 综述了近些年连续管制造技术的最新研究成就及其应用情况。指出随着材料技术的发展, 钢制连续管已突破原有材料和性能极限, 发展形成较完整的碳钢、微合金高强钢、超细晶粒钢系列连续管。同时, 一批高抗蚀性双相不锈钢、奥氏体不锈钢、钛合金管等的出现, 使特殊环境连续管应用成为可能; 而作为现代材料技术与连续管制造技术相结合的产物, 复合材料连续管在石油工程中正发挥越来越大的作用。认为大规格、超长的连续管以及高耐蚀性、高强管材将是未来连续管及其制造材料发展的方向。

关键词 连续管 (CT) 钛合金 不锈钢 复合材料连续管 (CCT)

展做详细述评。

引 言

近些年来, 随着材料技术和制管技术的不断发展, 连续管 (CT) 制造质量不断提高, 其在石油工程中的应用越来越广泛。目前, CT 市场主要由国外少数几家公司垄断, 美国优质油管公司 (Quality Tubing Inc, 简称 QTI) 和精密管技术公司 (Precision Tube Technology, 简称 PTT) 产品占市场的 60%。

一般认为, CT 制造至少涉及以下方面关键技术: ①CT 材料; ②制管技术; ③CT 失效及受力分析; ④CT 管柱设计; ⑤CT 质量检测与控制; ⑥CT 修复与防腐。

长期以来, CT 制造业致力于提高管的可靠性和柔韧性, 扩大产品系列, 管径呈增大趋势。20 世纪 80 年代中期推出 $\phi 34.3$ mm (1.35 英寸) 管, 很快开发出更大直径的 38.1 ~ 44.5 mm (1.5 ~ 1.75 英寸) 管, 90 年代以后有了 $\phi 50.8$ ~ 73.0 mm (2.0 ~ 2 $\frac{7}{8}$ 英寸) 的规格; 近年进一步发展形成 $\phi 88.9$ mm (3.5 英寸) 压裂管和 $\phi 114.3$ mm (4.5 英寸) 连轧大口径流体输送管。目前, 更大规格 $\phi 114.3$ ~ 168.3 mm (4 $\frac{1}{2}$ ~ 6 $\frac{5}{8}$ 英寸) 连续管已经出现, 大大超出了原有规格的限制。材料强度方面, 在 700 MPa 级的基础上, 相继发展了 800、900、1 000 甚至 1 100 MPa 和 1 200 MPa 超高强度 CT。

下面笔者将主要就国外 CT 材料技术及其新进

碳素钢连续管

随着材料技术的发展, 连续管由传统 800 MPa 以下普通碳素钢逐步发展为 1 000 MPa 以上级微合金高强钢、超细晶粒钢、不锈钢、钛合金和复合材料等, 已形成 $\phi 11.4$ ~ 114.3 mm (0.45 ~ 4.5 英寸) 管径、600 ~ 1 200 MPa 连续管材系列。

1. 连续管钢冶金

提高连续管钢的性能和承载能力一直是材料学研究的热门课题, 许多新技术不断突破连续管的强度极限。不过这可能产生两方面的问题: 一方面, 高强度材料有助于提高连续管的抗拉、扭转、爆裂和压溃能力, 扩大其抗拉伸、耐高压、复合循环疲劳的适应性; 另一方面, 强度提高的同时, 会导致塑、韧性损失, 增大环境裂纹的敏感性。随着连续管应用的扩大, 除了材料强度以外, 人们更加关注影响其性能的其它方面, 包括塑韧性、低周疲劳寿命、硬度、显微组织以及焊接性能等。近年来, 高强度连续管研究有了许多新进展, 更为安全、可靠的 900 MPa 级连续管已实现商品化, 新的 1 000 MPa 以上级连续管也已推出。

(1) 化学成分特点 研究发现, 即便钢中加入少量微合金化元素, 对其性能也会产生异乎寻常的影响。目前高强度连续管趋向加入 1 种或几种 Ni、Ti、V 等碳化物或氮化物形成元素, 可以在轧

制过程有效控制损害钢塑韧性的沉淀相的析出,并且有极好的弥散强化作用。

(2) 金相组织 随着钢级的提高,冲击韧度和其它一些指标如 FATT (裂纹扩展转变温度) 降低。而改变钢冶金和热加工工艺,材料金相组织会发生显著变化。按金相组织形态分类,这类管材钢的显微组织大致分为以下几种:

①铁素体-珠光体钢。基本成分为 C、Mn,有时加入少量 Nb、V。通常化学元素质量分数为: 0.10% ~ 0.25% C, 1.30% ~ 1.70% Mn。最终热处理制度采用热轧或正火。500 MPa 及以下钢级均采用此工艺。

②少珠光体钢。这种钢的珠光体含量通常控制在 15% 以下,从化学成分上分有 Mn-Nb 钢、Mn-V 钢、Mn-V-N 钢几种。含碳质量分数一般控制在 0.1% 以下,采用控轧成型,又称为“微合金控轧钢”。500 ~ 700 MPa 管多采用这种钢。

③针状铁素体钢。这种钢主要化学成分为 C、Mn、Nb、Mo,采用控轧工艺。相对于前两者包辛格效应小,偏析减少,多用在 700 MPa 钢级管。据报导,国外少量 800 MPa 试制时也采用这种钢。缺点是由于加 Mo,成本偏高。

表 1 ASTM A-607 钢化学元素质量分数

C	Mn	P	S	Si	Cr	Cu	Ni	Cb or V	Al
≤0.10	≤1.0	≤0.015	≤0.010	≤0.15	≤0.08	≤0.20	≤0.08	≥0.03	≤0.3

为满足强度的要求, QTI 公司在 QT-800CT 的基础上,开发出更高强度的 QT-900[®] CT。由于疲劳性能改进,苛刻环境下管的椭圆变形减轻,因此这种 CT 尤其适合高压钻井和高载荷应力的打捞作业。这种管采用改进的 ASTM A-606 No. 4 系 C-Mn 钢,耐蚀性是传统碳钢的 4 倍。低碳 (0.10% ~ 0.16%)、低 P、S 和 Cr 等微合金化,完全满足 API RP 5C7 “油气井用挠性油管作业规范”对 Grade CT-90 管的要求。

随着材料强度的提高,CT 酸性 (H₂S) 环境的适应性和硫化氢应力腐蚀裂纹敏感性 (SSC) 是用户普遍关心的问题。为了验证 QT-900 管的 SSC 抗力,对 QT-900 和 QT-800 这 2 种不同强度管按标准试验方法做了 SSC 对比试验。研究结果表明,QT-900 的硫化氢应力腐蚀裂纹抗力与 QT-800 相当,不同应力状态均未发现裂纹破坏。当然,钢 CT 会因冷作硬化变得对裂纹敏感,这是井下作业管循环弯曲、校直经常发生的情况。目前除了控制作业环境,预防和避免材料早期脆变以外,

④超低碳贝氏体钢。这种钢主要化学成分为 Mn、Nb、Mo、B、Ti。采用控轧、控冷工艺,通常 C 的质量分数小于 0.03%,是最新一代产品。这种钢不仅强度高,而且冲击韧度和可焊性好, FATT 值低。

从发展角度来看,将来 700 ~ 800 MPa 管很可能多采用这种钢。

⑤调质钢。多用于 800 MPa 及以上级井下作业高强管。

2. 新开发的耐腐蚀 CT 管钢

据介绍, Varco 公司生产的 HO-70CT 属经济型连续管,可以满足包括注入泵、柱塞举升以及高强悬挂器和虹吸管线等特殊永久装置所需的强度要求。HO-70 管采用与 QTI 公司 QT-700[®]、QT-800[®] 和 QT-1000TM 管相同的质量控制系统生产。

特殊设计的 ASTM A-607 改型钢钢带,经斜坡焊、连续管高频感应电阻焊、连续去应力和 100% 涡流探伤,使性能和质量得到充分保证。试验表明,HO-70 连续管超过相应强度 API 井下作业管的要求。

表 1 是 HO-70 管用 ASTM A-607 钢化学元素质量分数。

最基本方法是在管内外表面涂敷抑制剂,限制环境条件的暴露时间,或控制管材与腐蚀环境直接和长时间接触。

3. 高强和超高强度 CT 钢

近年来,用于钻修井 CT 需求持续增长,目前涵盖 $\phi 11.4 \sim 114.3$ mm 不同规格, 600 ~ 1 200 MPa 不同钢级。800 MPa 以下管材料由基本碳钢逐步发展为微合金高强钢、超细晶粒钢、不锈钢、钛合金和复合材料等。

QT-1000 管是一种新开发的高强度 CT,其用钢经过净化处理、微合金化、控制轧制和调质处理,具有理想的综合力学性能。研究表明,淬火后高温回火使 QT-1000 管疲劳寿命提高。试验管 (直径 31.8 mm、壁厚 2.8 mm) 在 1.2 m 弯曲半径、345 MPa 承压条件下的平均疲劳工作寿命为 535 周次,屈服强度高于 689 MPa,抗拉强度超过 758 MPa,明显优于 QT-800[®] 管。

表 2、3 列出了目前世界上通用的 CT 钢化学元素质量分数、力学性能及主要用途。

表2 不同钢级 CT 化学元素质量分数

钢级	C	Mn	P≤	S≤	Si	Cr≤	Cu≤	Ni≤	Mo≤	Cb/V≥	Al
70	0.1~0.15	0.6~0.9	0.03	0.005	0.3~0.5	0.45~0.7	0.4	0.25	/	/	/
80	0.1~0.15	0.6~0.9	0.03	0.005	0.3~0.5	0.45~0.7	0.4	0.25			
90	0.1~0.15	0.6~0.9	0.025	0.005	0.25~0.4	0.55~0.7	0.2~0.4	0.14~0.3	0.21		≤0.04
100	≤0.15	≤1.65			≤0.4					0.01	Nb0.05
110	0.1~0.15	≤1.00	0.02	0.005	≤0.4	0.5~0.7	≤0.4	≤0.3			

表3 不同钢级 CT 的力学性能及主要用途

钢级	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	延伸率 δ	硬度/HRC	用 途
52	>520			22	流体输送管
55	>550	>650			井下作业管、控制管缆
60	>600	>700		22	油井悬挂
70	>700	>800	>30%	22	井下作业管、酸性环境、完井、钻井、控制管缆
80	>800	>900	>28%	22	井下作业管、酸性环境、完井、钻井、控制管缆
90	>900	>980	25/85 000E	22	井下作业管、酸性环境、钻井、高压裂、老井加深
100	>1 000	>1 100	80 000E	22	井下作业管、钻井、高压裂、老井加深、井下悬挂
110	>1 100	>1 180	>22%	22~26	井下作业管、钻井、高压裂、老井加深、井下悬挂

注: E 为最小延伸率, 其计算公式为 $E = 62\,500 (A_w)^{0.2} / (L_u)^{0.9}$, 式中 A_w 为金属管截面积, L_u 为规定的最小抗拉强度。

~137.9 MPa 的要求。

高抗蚀合金 CT

碳钢和低合金高强钢 CT 一般能满足多数油田作业要求, 但某些腐蚀环境要求使用特殊性能管。近些年来, 国外致力于新材料研究, 开发出多种特殊性能合金 CT。其中双相不锈钢、13% 铬钢、钛合金、铜铍合金和高镍合金 CT, 可以应对不同腐蚀环境要求。

1. 不锈钢 CT

QT-16Cr (CRA) CT 是国外新开发的一种抗腐蚀合金连续管, 适合长期与湿 CO_2 直接接触的环境, 有超常的抗蚀性和耐磨性, 即便与已知的 45 HRC 低合金钢 CT 相比也毫不逊色, 磨损量几乎低一半, 而且比同级别的碳钢 CT 循环疲劳寿命高。该产品自 2003 年推出以来, 至少已有 30 条连续管线在用, 最大安装深度超过 5 486 m。

修井作业用碳钢 CT 进行循环注氮、注液、酸化处理和增注, 存在难以克服的腐蚀和疲劳问题。双相不锈钢 CT 更适合进行这些作业。井下作业证明, 其代表 SANICRO 28 合金管完全胜任修井起下工具和完井作业要求。为了应对长期在腐蚀性流体或海水中浸渍的挑战, 国外已开发出 ASTM TP316L、400/825 合金以及 SAF 2507 等高抗蚀合金管钢, 可以满足 $\phi 9.5 \sim 19.1$ mm、工作压力 34.5

WEBCO 是一家专门生产特种合金管的公司, 近年陆续开发出多种高品质双相不锈钢、镍合金和激光焊接不锈钢连续管。INCONEL (Ni-Cr-Mo-Cb 因康镍合金) 已形成系列, 包括 Alloy 625 (USN 06625)、825 (USN 08825)、400 (USN 44000) 等。AL-2003 和 NITRONIC 19D 是比较典型的低合金双相不锈钢, 316L (UNS-31603) 和 304 (UNS-30403) CT 已批量生产。SAF 2507 (UNS-S32750) 备受推崇, 作为一种高性价比超低碳双相不锈钢, 其主要化学元素质量分数为: 0.02% C、25% Cr、7% Ni、4% Mo 以及 0.27% N 等。试验表明, 这种钢的抗点蚀性极强、微裂纹率低, 具有抗 HCl 均匀腐蚀能力、良好的导热性和低热膨胀系数。同时, 其低温冲击和高温拉伸强度极好, 冷脆转变温度低于 -80°C 。目前, 外径为 31.8 mm, 壁厚 2.8~7.1 mm, 长度 152~15 200 m 的 SAF 2507CT 已成功用作海底控制阀管、化学注入管、承压导管、海底控制管缆等。

为满足抗腐蚀性要求, 国外新研制出一种较经济的 QT-16Cr80 奥氏体不锈钢 CT。其典型的化学元素质量分数为: 0.02% C、16% Cr、8.5% Mn、0.17% N 和 2.5% Ni。试验研究结果证明, QT-16Cr80CT 耐蚀性高, 没有大气腐蚀、储存腐蚀和晶间腐蚀, 同时其低周疲劳性能和耐磨性高, 管柱

摩阻小,各项性能均优于 Cr13 型不锈钢。

2. 钛合金 CT

钛合金是一种十分理想的 CT 管材。早在 20 世纪 80 年代,国外就采用 TIG 钨极电弧惰性气体保护焊制造出首批钛 CT。目前民用工业用钛合金主要是 2 种: Ti6Al4V (6% Al, 4% V, 90% Ti) 和 Ti3Al2.5V (3% Al, 2.5% V, 94.5% Ti), 公认 Ti3Al2.5V 是理想的专用高强度 CT 管材。目前已有 $\phi 12.7 \sim 76.2$ mm 外径和 3 mm 以下不同壁厚多种规格钛合金 CT, 主要用在特殊环境的修井、出油管、控制管缆、速度管、油层连续套管以及水平钻井。表 4 列出了钛合金 CT 主要技术参数。

表 4 钛合金 CT 主要技术参数^[1]

牌 号	外径/ mm	壁厚/ mm	挤毁强 度/kN	胀裂强 度/MPa	压溃强 度/MPa
Grade 9	38.1	1.8	100.6	41.7	29.2
Grade 9 + 钎	38.1	1.8	129.3	34.6	20.9

复合材料 CT 及其工程应用

复合材料连续管 (CCT) 是现代材料科技与连续管制造技术的完美结合。与金属管不同,聚合物和高性能纤维构成的复合材料 CCT 具有各向异性的特点,依靠足够的强度和耐磨性,纤维可增强的压溃、胀裂抗力和抗压、耐弯曲等特性,使其成为特殊环境金属管的最佳替代品。

通常 CCT 由内层、中间层和表层几部分构成。内层用热塑性管,基材可以使用 PE100 (聚乙烯)、Chem PEX、Rilsan (耐纶 11 型聚酰胺) 或 PVDF (聚偏氟乙烯); 中间层是热固性树脂,并用碳纤维、玻璃纤维和氨基树脂增强; 表层损伤容限层是热固性或热塑性材料外壳。按用途分, CCT 可用作井下作业管,主要用于钻井、增注、完井、重新完井、水平钻井、打捞等,也可专用作为衬管、注入管、地面管线管以及油田永久管线和控制缆管等。

$\phi 165$ mm 滚筒缠绕 CCT 的承压和弯曲疲劳组合试验表明, 69 MPa 压力条件下 CCT 的循环疲劳寿命为 8 154 周次,比 483 MPa HSLA 钢管至少高一个数量级。同样的 CCT 组合拉伸和压缩试验在 MTS 试验机上进行, 1.07 m { ± 45 } 定向芳香尼纤维增强试验管轴向拉伸、压缩分别加载至 40.3 kN 和 7.7 kN, 纤维增强虽仅占整个截面的 7%, 仍表现出良好的拉伸和压缩线性。研究结果证实, 与钢 CT 比较, 高品质 CCT 更轻、更耐疲劳

和抗腐蚀,甚至比 6.9 MPa 级钢管承压和屈服/质量比高,较之钢和钛连续管对 H₂S、CO₂ 环境适应能力更强^[2]。

20 世纪 90 年代末, Conoco 公司率先研制出一种耐高压、长距离、无腐蚀 CCT, 取代原有近海注水管线。与 AMAT 合作开发的数百英尺长小口径高性能 CCT, 缠卷在 2.7 m 滚筒上已用于挪威 Sandefjord 油田注水和注化学剂。

为进一步提高 CCT 的可靠性, 国外新开发出承载能力 26.7 kN (轴向拉伸) 和 8.9 kN (轴向压缩) CCT。CCT 具有良好的疲劳性能和非凡的抗蚀性, 可自润滑, 耐磨性、柔韧性好, 使用更经济、安全。由于复合管更轻, 同样尺寸的滚筒允许缠卷长度可成倍增加。超常的耐蚀性使 CCT 即便在 H₂S 和 CO₂ 液体中长期浸渍, 也不受影响。

表 5 列出了不同结构 CCT 的基本物理性能。

表 5 不同材质 CCT 的力学性能

材料性能	E-玻璃纤 维/环氧	S-2 玻 璃纤/环氧	碳纤维/ 环 氧	尼 龙/ 环 氧
纵向模量, Msi	2.38	2.77	3.12	1.09
横向模量, Msi	2.38	2.77	3.12	1.09
剪切模量, Msi	1.88	2.35	5.44	2.84
泊松比 (纵-横向)	0.49	0.54	0.73	0.82
纵向热膨胀系 数, 微应变/°F	6.95	7.37	0.92	0.77

Fiberspar、NAT Compipes 和 Hydril 是目前 3 个最重要 CCT 制造商。Fiberspar 的产品主要有 3 类: 管线管、修井管 (通常指连续油管) 和油田固定装置管, 最大工作压力 17.2 MPa, 有 $\phi 50.8 \sim 88.9$ mm 各种规格。首批 CCT 于 1999 年投放市场, 累计生产约 10 668 m, 主要用于铺设天然气举升管线、油气修复管、乳状液输送管以及地面临时铺设管线等。目前正在制造一条大直径 (114.3 mm)、超长 (5 182 m) CCT。按标准设计的管线管工作压力 20.7 MPa, 工作温度 -48.3 ~ 129.4 °C。

NAT Compipes 是挪威主要的 CCT 供应商, 已生产出内径 76.2 mm、整条长 15 000 m 世界最长的复合材料管。管子采用交联结构的聚乙烯作为内衬管, 表面缠绕环氧树脂和玻璃纤维复合层, 可承受 38 MPa 额定工作压力, 设计寿命为连续输送甲醇 20 a, 是世界上第一条海底复合连续管线。Hydril 生产的 CCT 已成系列, 为进一步提高管的抗蚀性, 特别在管内套入壳牌化学公司生产的 Carilon 系列酯族聚酮聚合物衬管, 价格在 13 Cr 和

(下转第 137 页)

泵输送, 催化剂在 1 种溶液输送过程中被计量加入。2 台泵以相同的流量 (约为 1.81 kg/min) 泵送 2 种盐溶液。按照设计要求, 2 种盐溶液流体在 Y 形管汇处混合, 由钻杆送到采油树帽的释放工具, 并通过释放工具排放到海里。热反应的效果作用在采油树帽上近 100 m 处, 从而防止在表面管线和钻杆柱的上部发生不必要的热损失。

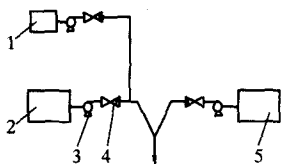


图 3 泵送作业的成套管汇

1—催化剂罐; 2—C 溶液罐; 3—泵; 4—止回阀; 5—N 溶液罐

泵工作期间, 在地面能随时通过海底的远程控制装置 (ROV) 来监测 TCRT 的温度。采油树旁边的“锁紧/开启”指示器引线的位置也由 ROV 来检测。在泵送 SGN 溶液 30 min 后, 下部释放工具的温度达到 180°C 甚至更高。在泵送到 80% 的 SGN 溶液时, 这些晶体的水合物逐渐分解, 采油树帽被卸开。

结 束 语

水下采油树帽的“锁紧/开启”螺钉不能被释放, 是由于通过采油树端部法兰的 O 形垫环处泄漏的天然气与自由水结合生成固体水合物造成的。笔者认为如果采用 SPO 压实法兰连接技术^[4], 有

效地防止天然气的泄漏, 就不会发生固体水合物堵塞采油树帽锁紧螺钉的活动腔室, 同时可以节省大量的经费和时间。

在采油树体周围由 SGN 反应而产生的反应热能分解固体水合物, 并可以使采油树帽从采油树上释放出来。解决天然气水合物在水下采油树帽内的活动腔室的堵塞问题, 实际上也是破坏天然气水合物的存在条件, 即提高水下水合物所处环境的温度, 使其分解而得以解决。

参 考 文 献

- 1 Don Hannegan, Richard J, David M, et al. MPD - Uniquely Applicable to Methane Hydrate Drilling. SPE/IADC 91560 - MS, 2004
- 2 张志杰, 于兴河, 郑秀娟等. 天然气水合物的开采技术及其应用. 天然气工业, 2005, 25 (4): 128 ~ 130
- 3 Marques L C C, Pedroso C A, Neumann L F. A New Technique to Solve Gas Hydrate Problems in Subsea Christmas Trees. SPE 77572, 2004
- 4 辜志宏, 刘 峰, 张 斌等. SPO 压实法兰管连接技术. 石油机械, 2004, 32 (12): 60 ~ 61

作者简介: 辜志宏, 高级工程师, 生于 1966 年, 1989 年毕业于西南石油学院矿机专业, 现从事石油机械产品的检测和试验方法研究等工作。地址: (434000) 湖北省荆州市。电话: (0716) 8120270。E-mail: gzhong@sina.com。

收稿日期: 2006 - 04 - 10

(本文编辑 刘 峰)

(上接第 130 页)

22Cr 管之间, 复合管具备 Hastelloy G-3 或 Inconel 825 合金的高性能。

总之, 由于 CCT 具有良好的力学性能 (强度、柔韧性) 和抗蚀性, 而且其性能易于通过材料 (基材和增强纤维) 和制造方法调整, 相信随着油井注水和注 CO_2 耐腐蚀管需求的增加, CCT 的应用领域将进一步扩大。

参 考 文 献

- 1 Klink D R. Development of titanium CT extends the scope of CT applications. 3rd Annual International Management Con-

ference on CT Technology and Applications. 1995, 2

- 2 Head P, Turner D, Hanson T. Enabling capabilities and potential applications of composite CT. 2000 SPE/ICOTA Coiled Tubing Roundtable. Houston, Texas, 2000, 4

作者简介: 陈立人, 高级工程师, 生于 1948 年, 1982 年毕业于西安交通大学金属材料专业, 长期从事石油机械材料研究、失效分析与科技管理工作。地址: (721001) 陕西省宝鸡市。电话: (0917) 6896065。E-mail: clr@bomco.cn。

收稿日期: 2006 - 06 - 01

(本文编辑 谢守平)