ICS 75.200;23.040.01
E 16;J 15

中华人民共和国国家标准

GB/T 37701—2019

石油天然气工业用内覆或衬里耐腐蚀合金复合钢管

Corrosion resistant alloy clad or lined steel pipe for petroleum and natural gas industries

2019-06-04 发布　　2020-01-01 实施

国家市场监督管理总局
中国国家标准化管理委员会　发布

目　　次

前言 …… Ⅲ
1　范围 …… 1
2　规范性引用文件 …… 1
3　术语和定义、符号和缩略语 …… 3
3.1　术语和定义 …… 3
3.2　符号和代号 …… 4
3.3　缩略语 …… 4
4　购方须知 …… 5
4.1　基本信息 …… 5
4.2　补充信息 …… 5
5　制造 …… 6
5.1　原材料 …… 6
5.2　制造工艺 …… 8
5.3　热处理 …… 8
5.4　冷定径与冷扩径 …… 8
5.5　焊接 …… 9
5.6　管端切斜与坡口 …… 9
5.7　表面处理 …… 9
5.8　制造工艺评定 …… 10
6　理化性能 …… 10
6.1　基层的化学成分 …… 10
6.2　CRA 层的化学成分 …… 10
6.3　拉伸性能 …… 10
6.4　断裂韧性 …… 10
6.5　导向弯曲性能 …… 11
6.6　抗压扁性能 …… 11
6.7　截面硬度 …… 11
6.8　焊缝宏观与微观金相组织 …… 12
6.9　内覆复合钢管的剪切结合强度 …… 12
6.10　衬里复合钢管的紧密度 …… 12
6.11　衬里复合钢管的抗高温塌陷性能 …… 12
6.12　CRA 层的耐晶间腐蚀性能 …… 12
6.13　基层的耐腐蚀性能 …… 13
6.14　CRA 层的耐腐蚀性能 …… 13
6.15　管端剩磁强度 …… 13
6.16　静水压试验强度 …… 13

6.17 表面状况、缺欠和缺陷 …… 13
6.18 尺寸、质量及其偏差 …… 14
7 试验方法 …… 15
7.1 化学成分分析 …… 15
7.2 拉伸试验 …… 15
7.3 断裂韧性试验 …… 15
7.4 导向弯曲试验 …… 16
7.5 压扁试验 …… 17
7.6 截面硬度试验 …… 17
7.7 焊缝宏观与微观金相检验 …… 18
7.8 内覆复合钢管的剪切结合强度试验 …… 18
7.9 衬里复合钢管的紧密度试验 …… 18
7.10 衬里复合钢管的高温塌陷试验 …… 18
7.11 晶间腐蚀试验 …… 19
7.12 基层的腐蚀试验 …… 19
7.13 CRA 层的耐腐蚀性能评价 …… 19
7.14 管端剩磁强度检验 …… 19
7.15 静水压试验 …… 19
7.16 外观检查 …… 19
7.17 尺寸检测与称重 …… 20
7.18 无损检测 …… 20
8 检验规则 …… 22
8.1 检验项目 …… 22
8.2 取样方式 …… 23
8.3 检验频次 …… 23
8.4 复验 …… 23
9 标志 …… 23
9.1 标志方法 …… 23
9.2 标志位置 …… 23
9.3 标志内容 …… 23
10 包装、储存和防护 …… 24
11 文件 …… 24
附录 A（规范性附录） 制造工艺评定 …… 26
附录 B（规范性附录） 衬里复合钢管紧密度试验方法 …… 30
附录 C（资料性附录） 基层材料腐蚀试验方法 …… 31
附录 D（规范性附录） CRA 层材料的腐蚀试验方法 …… 33
附录 E（规范性附录） 缺欠和缺陷的处理 …… 36
参考文献 …… 37

前　言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由全国石油天然气标准化技术委员会(SAC/TC 355)提出并归口。

本标准起草单位:中国石油集团石油管工程技术研究院、中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司、浙江天管久立特材有限公司、中国石油工程建设有限公司西南分公司、中国石油阿姆河天然气勘探开发(北京)有限公司、西安向阳航天材料股份有限公司、中国石化石油工程设计有限公司、郑州万达重工股份有限公司、上海海隆复合钢管制造有限公司、沧州隆泰迪管道科技有限公司、宝鸡石油钢管有限责任公司、中海油研究总院有限责任公司。

本标准主要起草人:魏斌、李发根、夏正文、李为卫、赵新伟、方伟、戚东涛、李亚军、姜放、刘有超、吴泽、袁希海、刘建彬、王春建、王晓峰、徐艳迪、曹静、刘云、邱锋、廖青云、吴立斌。

石油天然气工业用内覆或衬里耐腐蚀合金复合钢管

1 范围

本标准规定了石油天然气工业管道输送系统用内覆或衬里耐腐蚀合金复合钢管的购方须知、制造、理化性能、试验方法、检验规则、标志、包装、储存和防护及文件要求。

本标准适用于石油天然气工业领域输送含有腐蚀性介质的石油、天然气和水等流体用耐腐蚀合金复合钢管。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 228.1 金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法

GB/T 228.2 金属材料 拉伸试验 第2部分：高温试验方法

GB/T 229 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法

GB/T 2653 焊接接头弯曲试验方法

GB/T 4334—2008 金属和合金的腐蚀 不锈钢晶间腐蚀试验方法

GB/T 4340.1 金属材料 维氏硬度试验 第1部分：试验方法

GB/T 6394-2017 金属平均晶粒度测定方法

GB/T 6396 复合钢板力学及工艺性能试验方法

GB/T 8923.1-2011 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第1部分：未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级

GB/T 9445 无损检测 人员资格鉴定与认证

GB/T 13298 金属显微组织检验方法

GB/T 15970.2 金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第2部分：弯梁试样的制备和应用

GB/T 18590 金属和合金的腐蚀 点蚀评定方法

GB 50251 输气管道工程设计规范

GB 50253 输油管道工程设计规范

NB/T 47002.1—2009 压力容器用爆炸焊接复合板 第1部分：不锈钢-钢复合板

NB/T 47002.2—2009 压力容器用爆炸焊接复合板 第2部分：镍-钢复合板

NB/T 47013.3 承压设备无损检测 第3部分：超声检测

NB/T 47013.4 承压设备无损检测 第4部分：磁粉检测

NB/T 47013.5—2015 承压设备无损检测 第5部分：渗透检测

NB/T 47013.7 承压设备无损检测 第7部分：目视检测

NB/T 47014 承压设备焊接工艺评定

NB/T 47015 压力容器焊接规程

SY/T 4109 石油天然气钢质管道无损检测

SY/T 6423.1 石油天然气工业 钢管无损检测方法 第1部分：焊接钢管焊缝缺欠的射线检测

SY/T 6423.2 石油天然气工业 钢管无损检测方法 第2部分:焊接钢管焊缝纵向和/或横向缺欠的自动超声检测

SY/T 6423.4—2013 石油天然气工业 钢管无损检测方法 第4部分:无缝和焊接钢管分层缺欠的自动超声检测

SY/T 6423.5 石油天然气工业 钢管无损检测方法 第5部分:焊接钢管焊缝缺欠的数字射线检测

SY/T 6476 管线钢管落锤撕裂试验方法

SY/T 6601 耐腐蚀合金管线管

YB/T 4282—2012 压力容器用热轧不锈钢复合钢板

TSG Z6002 特种设备焊接操作人员考核细则

ISO 10893-2:2011 钢管无损检测 第2部分:无缝和焊接(埋弧焊除外)钢管缺欠的自动涡流检测(Non-destructive testing of steel tubes—Part 2: Automated eddy current testing of seamless and welded (except submerged arc-welded) steel tubes for the detection of imperfections)

ISO 10893-10:2011 钢管无损检测 第10部分:无缝和焊管(埋弧焊除外)钢管纵向和/或横向缺欠的全周自动超声检测[Non-destructive testing of steel tubes—Part 10: Automated full peripheral ultrasonic testing of seamless and welded (except submerged arc-welded) steel tubes for the detection of longitudinal and/or transverse imperfections]

ISO 15156-1 石油天然气工业 油气开采中用于含 H_2S 环境下的材料 第1部分:抗裂材料选择的一般原则(Petroleum and natural gas industries—Materials for use in H_2S-containing environments in oil and gas production—Part 1: General principles for selection of cracking-resistant materials)

ISO 15156-2 石油天然气工业 油气开采中用于含 H_2S 环境下的材料 第2部分:抗裂碳钢和低合金钢以及铸铁的使用(Petroleum and natural gas industries—Materials for use in H_2S-containing environments in oil and gas production—Part 2: Cracking-resistant carbon and low-alloy steels, and the use of cast irons)

ISO 15156-3:2015 石油天然气工业 油气开采中用于含 H_2S 环境下的材料 第3部分:抗开裂耐腐蚀合金和其他合金[Petroleum and natural gas industries—Materials for use in H_2S-containing environments in oil and gas production—Part 3: Cracking-resistant CRAs (corrosion-resistant alloys) and other alloys]

API Spec 5L:2018 管线钢管规范(Specification for line pipe)

API Spec 5LD 内覆或衬里耐腐蚀合金复合钢管规范(Specification for CRA clad or lined steel pipe)

ASTM A263—2012 铬不锈钢复合钢板标准规范(Standard specification for stainless chromium steel-clad plate)

ASTM A264—2012 铬镍不锈钢复合钢板标准规范(Standard specification for stainless chromium-nickel steel-clad plate)

ASTM A265—2012 镍与镍基合金复合钢板标准规范(Standard specification for nickel and nickel-base alloy-clad steel plate)

ASTM G28—2002 锻制高镍铬轴承合金晶间腐蚀敏感性检测的标准试验方法(Standard test methods for detecting susceptibility to intergranular corrosion in wrought, nickel-rich, chromium-bearing alloys)

3 术语和定义、符号和缩略语

3.1 术语和定义

API Spec 5L:2018 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

购方 purchaser

负责复合钢管产品订货要求且为所购产品付款的业主、或其代理人、检查人员以及其他被授权的代表。

3.1.2

制造商 manufacturer

负责生产复合钢管且对产品做标志的工厂或公司。

3.1.3

冶金复合 metallurgical bonding

通过热轧、爆炸、堆焊、热挤压等复合工艺,使 CRA 与碳钢或低合金钢的接触界面形成原子间相互扩散而形成的结合。

3.1.4

基层 backing layer

复合板或复合钢管的承受力学载荷部分。

注:基层由碳钢或低合金钢材料制成。

3.1.5

基管 backing pipe

用于制造复合钢管基层的碳钢管或低合金钢管。

3.1.6

覆层 clad layer

结合在基层表面且与基层形成冶金复合的不锈钢、铁镍基合金或镍基合金或其他 CRA 材料部分。

3.1.7

衬里层 lined layer

衬附于基层表面且与基层之间未形成原子扩散的不锈钢、铁镍基合金或镍基合金或其他 CRA 材料部分。

3.1.8

耐腐蚀合金层 corrosion resistant alloy layer

由不锈钢、铁镍基合金或镍基合金或其他 CRA 材料制成的衬里层和覆层的统称。

注:耐腐蚀合金层简称 CRA 层。

3.1.9

内覆复合钢管 clad steel pipe

CRA 层以冶金复合方式结合在基层内表面所制造成的双金属层钢管。

3.1.10

衬里复合钢管 lined steel pipe

CRA 层衬附于基层内表面且接触界面间未形成原子扩散而形成的双金属层钢管。

3.1.11

耐腐蚀合金复合钢管 corrosion resistant alloy steel pipe

按照基层承受力学载荷、CRA 层材料防腐蚀的原则制成的双金属层钢管。

注:耐腐蚀合金复合钢管简称 CRA 复合钢管或复合钢管。

3.1.12

焊接内覆复合钢管　welding clad steel pipe

采用复合板卷制焊接工艺或以焊接钢管为基层采用堆焊工艺制造的内覆复合钢管。

3.1.13

无缝内覆复合钢管　seamless clad steel pipe

基层为无缝钢管的内覆复合钢管。

3.1.14

未结合　unbound

复合板或复合钢管的覆层与基层之间的未黏接。

3.1.15

剪切结合强度　shear bond strength

使覆层与基层之间发生分离的单位接触面积所需要的切向应力。

3.1.16

封焊　sealing weld

封闭复合钢管的管端衬里层与基层之间环状间隙的焊缝。

3.1.17

酸性环境　sour environment

H_2S 分压大于或等于 0.3 kPa 并能够引起如 ISO 15156-2 所规定的碳钢或低合金钢材料发生 SSC 和 HIC 失效形式的含石油、天然气和水等介质的单相或多相流体环境。

3.1.18

紧密度　tightness

使基层与衬里层发生滑移的单位接触面积所需要的最大应力。

3.2　符号和代号

下列符号和代号适用于本文件。

D　——复合钢管的规定外径，单位为毫米(mm)；

d　——复合钢管的端部内径，单位为毫米(mm)；

R_m　——抗拉强度，单位为兆帕(MPa)；

$R_{t0.5}$——总伸长率 0.5%的屈服强度，单位为兆帕(MPa)；

t　——CRA 层的公称壁厚，单位为毫米(mm)；

t_b　——基层的公称壁厚，单位为毫米(mm)。

3.3　缩略语

下列缩略语适用于本文件。

AUT：自动超声检测(automatic ultrasonic testing)

COWL：组合直缝焊接(combination longitudinal welding)

CLR：裂纹长度率(crack length ratio)

CRA：耐腐蚀合金(corrosion resistant alloy)

CSR：裂纹敏感率(crack sensitivity ratio)

CTR：裂纹厚度率(crack thickness ratio)

CVN：夏比 V 型缺口(Charpy V-notch)

DWT：落锤撕裂试验(drop-weight tear)

HAZ：热影响区(heat-affected zone)

HFW：高频电阻焊(high-frequency electric welding)

HIC：氢致开裂(hydrogen induced cracking)

MPQT：制造工艺评定试验(manufacturing procedure qualification test)

MPS：制造工艺规范(manufacturing procedure specification)

MT：磁粉检测(magnetic particle testing)

NDT：无损检测(nondestructive testing)

PREN：耐点蚀当量数(pitting resistance equivalent number)

注：根据材质类型，PREN 可采用($w_{Cr}+3.3w_{Mo}+16w_N$)计算，或采用[$w_{Cr}+3.3(w_{Mo}+0.5w_W)+16w_N$]计算，其中，$w_{Cr}$、$w_{Mo}$、$w_W$、$w_N$ 分别代表 CRA 中元素 Cr、Mo、W 和 N 用百分率表示的质量分数。

PT：渗透检测(penetrant testing)

PSL：产品规范水平(product specification level)

RT：射线检测(radiographic testing)

SCC：应力腐蚀开裂(stress corrosion cracking)

SSC：硫化物应力开裂(sulfide stress cracking)

SAWL：直缝埋弧焊接(submerged arc longitudinal welding)

SMYS：规定最小屈服强度(specified minimum yield strength)

UT：超声检测(ultrasonic testing)

4 购方须知

4.1 基本信息

基本信息是购方要求制造商执行本标准的条件下，应由购方在订单中提供的信息，包括但不限于以下信息：

a) 数量；

b) 复合钢管的材质和钢级(包括基层和 CRA 层)；

c) 制造要求；

d) 复合钢管的尺寸，至少应包括：

1) 规定外径 D；

2) 端部内径 d；

3) 基层的公称壁厚 t_b；

4) CRA 层的公称壁厚 t；

5) 长度和长度类型(定尺或非定尺)；

e) 其他要求(管端加工、特殊长度或其他)。

4.2 补充信息

可能情况下，应由购方提供以下补充信息，包括但不限于：

a) 管线运行条件(包括输送流体组成、温度和压力等)；

b) 设计温度；

c) 特殊的尺寸要求；

d) 补充的检验和试验要求；

e) 管线设计标准或设计系数；

f) 热处理；

g) 基层的高温力学性能要求；

h) 静水压试验要求；
i) 耐腐蚀性能要求(包括基层和 CRA 层)；
j) 表面要求；
k) 涂敷或喷涂要求；
l) 标志要求(如果与本标准不同)；
m) 包装和装运说明；
n) 第三方检验机构；
o) 检验文件；
p) 检验文件的格式和附加内容要求；
q) 其他特殊要求。

5 制造

5.1 原材料

5.1.1 复合板

5.1.1.1 用于制造内覆复合钢管的不锈钢-钢复合板应符合 NB/T 47002.1—2009 或 YB/T 4282—2012 或 ASTM A263—2012 或 ASTM A264—2012，铁镍基合金-钢或镍基合金-钢复合板应符合 NB/T 47002.2—2009 或 ASTM A265—2012。若 NB/T 47002.1—2009、NB/T 47002.2—2009、YB/T 4282—2012、ASTM A263—2012、ASTM A264—2012、ASTM A265—2012 有不一致之处，应由购方与制造商协商确定所采用的标准。

5.1.1.2 用于制造内覆复合钢管的复合板宜采用爆炸复合法、轧制复合法或经购方与制造商协商确定的其他冶金复合制造工艺。

5.1.1.3 在热处理并经校平后应按照 NB/T 47013.3 对复合板逐张进行 100%UT，检测基层和覆层界面结合状态，不锈钢-钢复合板检测结果应符合 NB/T 47002.1—2009 中 B1 级要求或 YB/T 4282—2012 中 R1 级要求或 ASTM A263—2012、ASTM A264—2012 中 1 级要求，铁镍基合金-钢或镍基合金-钢复合板检测结果应符合 NB/T 47002.2—2009 中 B1 级要求或 ASTM A265—2012 中 1 级要求。也可采用 AUT 对复合板结合状态进行检测和采用 100%PT 对覆层表面裂纹进行检测。

5.1.1.4 除非另有协议，应对复合板结合状态未达到 5.1.1.3 要求的未结合区覆层进行补焊，但复合板覆层拼接焊缝及其两侧 50 mm 范围内不准许补焊，复合板边缘 100 mm 范围内不准许补焊。补焊应按照评定合格的焊接工艺进行，补焊部位的耐腐蚀性能不应低于覆层母材。补焊区域应进行 UT 和 PT，UT 结果应符合 5.1.1.3 要求，PT 结果应符合 NB/T 47013.5—2015 中Ⅰ级要求。同一部位只允许补焊一次。

5.1.1.5 复合板的基层不应存在拼接焊缝，单张复合板的覆层拼接焊缝不应超过一条，且覆层拼接工艺应按照评定合格的工艺进行，覆层拼接焊缝的力学性能和耐腐蚀性能不应低于覆层母材，且不得影响基层与覆层之间界面结合质量等级。

5.1.1.6 复合板应依据 GB/T 6396 进行剪切结合强度试验，剪切结合强度不应低于 210 MPa。

5.1.1.7 若复合钢管输送流体属于酸性环境，应由购方与制造商协商确定复合板的基层材料是否需要满足 ISO 15156-1 和 ISO 15156-2 相关要求。

5.1.2 基管

5.1.2.1 基管应为符合 API Spec 5L:2018 中 PSL2 要求的无缝钢管或只有一条纵向直焊缝的 HFW 钢

管、SAWL 钢管或 COWL 钢管。如果协商，基管可选择 API Spec 5L:2018 以外其他牌号的碳钢和低合金钢材料并满足相应标准要求。基管不应有对接环焊缝。

5.1.2.2 基管为焊管时，内焊缝余高不应超过 0.5 mm，外焊缝余高不应超过 3.5 mm，且与临近母材平滑过渡。除咬边处外，内外焊缝不应低于临近母材表面。

5.1.2.3 基管应为全镇静钢，母材平均晶粒度不应低于 7 级，晶粒度按照 GB/T 6394—2017 测定。

5.1.2.4 除非另有协议，基管的 NDT 应符合 API Spec 5L:2018 中附录 E 要求。

5.1.2.5 若复合钢管输送流体属于酸性环境，应由购方与制造商协商确定基管是否需要满足 API Spec 5L:2018 中附录 H 和附录 K、ISO 15156-1 和 ISO 15156-2 相关要求。

5.1.3 CRA 管

5.1.3.1 用于制造衬里复合钢管的 CRA 管宜选用 API Spec 5LD 规定的材料制造，经购方与制造商协商，可选择其他牌号的 CRA 材料并满足相应标准要求。

5.1.3.2 CRA 管应为符合 SY/T 6601 规定的轧制无缝管或 CRA 板(卷)经填充金属焊接的焊管。除非另有协议，CRA 焊管只允许有一条纵向直焊缝，不应有对接环焊缝，任何冷拔工艺不得用于 CRA 管的制造。焊接材料宜采用比母材更高级别合金材料。

5.1.3.3 CRA 管的公称壁厚不应小于 2.5 mm，其偏差应在 $^{+1.0}_{0}$ mm 范围内。

5.1.3.4 CRA 管的纵向焊缝表面应平滑，外焊缝余高不应超过 0.5 mm，内焊缝余高不应超过 1.0 mm，不准许存在咬边。

5.1.3.5 CRA 管应为固溶状态。

5.1.3.6 CRA 管的晶间腐蚀试验、NDT、工艺质量、外观检查和缺陷修补应符合 SY/T 6601，其他检验可由制造商与购方协商确定。

5.1.4 原材料复验

5.1.4.1 制造复合钢管的所有原材料应有质量合格证明书，其检验项目应符合本标准的规定或订货技术要求。

5.1.4.2 制造商应对原材料进厂后按本标准相应要求进行复验。对具有同一质量保证体系，复合板、基管或 CRA 管与复合钢管为同一制造商生产，相应原材料可不再做入厂复验。

5.1.4.3 复合板的复验应满足以下要求：

a) 应逐张进行外观、工艺质量、几何尺寸和覆层结合状态 100%UT；

b) 按同基层熔炼批、同覆层熔炼批、同基层钢级、同规格、同制造工艺和同热处理工艺为一检验批，每批不多于 50 张抽检 1 张进行复验，复检项目应包括但不限于：基层和覆层的化学成分、基层拉伸性能、基层断裂韧性和剪切结合强度。

5.1.4.4 基管和 CRA 管的复验应满足以下要求：

a) 逐根进行外观、工艺质量和几何尺寸检验；

b) 按同熔炼批、同钢级、同规格、同制造工艺和同热处理工艺为一检验批进行抽检复验，外径小于 500 mm 时每批不多于 100 根抽检 1 根，外径不小于 500 mm 时每批不多于 50 根抽检 1 根，复检项目应包括但不限于：化学成分、母材和焊缝的拉伸性能、焊缝 100%RT 和 100%UT。

5.1.4.5 复合板、基管和 CRA 管表面不应有铜、铝、锡、铅、锌等低熔点金属污染，CRA 层表面不应有铁离子污染，如果产生，应采用有效的方法进行清除。

5.1.4.6 用于制造复合钢管的其他原材料的复验由购方与制造商协商确定。

5.2 制造工艺

5.2.1 内覆复合钢管

宜采用以下制造工艺：

a) 采用复合钢板经卷制成型，采用熔化金属填充焊进行焊接；

b) 在基管内表面堆焊 CRA 层；

c) 经购方与制造商协商，可采用热轧、热挤压、爆炸、热等静压、粉末冶金或其他冶金复合工艺。

5.2.2 衬里复合钢管

5.2.2.1 宜采用以下制造工艺：

a) 将 CRA 管嵌套入基管组装成复合管坯，将复合管坯装入限位模具中，采用液压使 CRA 管与基管之间形成紧密贴合；

b) 经购方与制造商协商，可将 CRA 管嵌套入基管组装成复合管坯，采用爆燃、旋压或其他方式对 CRA 管扩径或对基管缩径或其组合使 CRA 管与基管之间形成紧密贴合。

5.2.2.2 基管与 CRA 管组装成复合管坯后，宜采用感应加热方式对基层与 CRA 管之间的环形空间进行干燥处理，复合管坯的表面温度不应低于 120 ℃。

5.2.2.3 若基管与 CRA 管均为焊管，组装成复合管坯时，纵向焊缝之间的夹角应控制在 45°～90°之间。

5.2.2.4 基管与 CRA 管装配前，基管内表面应进行抛丸处理并达到 GB/T 8923.1—2011 规定的 Sa2.5 级，CRA 管应进行整体酸洗钝化处理，经酸洗钝化处理后，CRA 管内表面应避免与碳钢直接接触而被污染，如果发生污染，应重新进行酸洗钝化处理。

5.3 热处理

5.3.1 对采用堆焊工艺制造的复合钢管，在保证内覆层堆焊工艺不影响基层各项性能的前提下，堆焊后的复合钢管可不再进行热处理。

5.3.2 对于衬里复合钢管，在组装成复合管坯之前，可分别对 CRA 管和基管进行热处理，除非另有协议，CRA 管应以固溶状态交付。

5.3.3 对于除 5.3.1 以外内覆复合钢管，应根据材质和加工过程，由购方和制造商协商确定不进行热处理或选择合适的热处理工艺。

5.3.4 热处理炉应采用自动控制热处理系统，热处理炉应至少每年鉴定一次，热电偶应每半年鉴定一次。热处理炉温差应控制在±15 ℃以内。经购方和制造商协商，也可选用电磁感应等其他热处理方式。

5.4 冷定径与冷扩径

5.4.1 由复合板制造的焊接内覆复合钢管应进行全长冷扩径或冷定径，扩径率或定径率应控制在 0.8%～1.5%之间，冷扩径或冷定径不得造成内覆层的表面损伤和耐腐蚀性能下降。

5.4.2 用于制造衬里复合钢管的基管的定径率不应超过 1.5%，除非对冷定径后的基管整体进行正火、淬火＋回火或消应力热处理。

5.4.3 对于经过冷定径或冷扩径而未进行热处理或消除应力的基管，还需要考虑衬里复合过程或内覆复合后需要进行的冷定径或冷扩径，除非另有协议，基管在各制造环节中的总形变率不应超过 2.0%。

5.4.4 衬里复合钢管制造过程中的 CRA 管总形变率不应超过 10%，宜控制在 5%以内。

5.4.5 定径率和扩径率应按照 API Spec 5L:2018 中 8.9.3 规定计算。

5.5 焊接

5.5.1 一般规定

复合钢管的所有纵向焊缝、堆焊、封焊和修补焊接应由考核合格的焊工按照评定合格的焊接工艺完成，焊接工艺规程应满足 NB/T 47015 要求，焊接工艺评定应按照 NB/T 47014 进行，焊工考试应按 TSG Z6002 进行。

5.5.2 焊接内覆复合钢管的纵向焊缝

对于由复合板制造的焊接内覆复合钢管，纵向焊缝应为填充金属焊缝，宜采用钨极惰性气体保护焊、熔化极气体保护焊或等离子焊接方式进行，不应采用手工电弧焊和药芯焊丝电弧焊进行；纵向焊缝应为双面对接焊缝，CRA 层的焊缝应从复合钢管内部进行堆焊，堆焊层的壁厚不应小于内覆层，并与内覆层的耐腐蚀性能相当或更高；定位焊接应在基层进行，焊接工艺不应污染 CRA 层。

5.5.3 管端堆焊

5.5.3.1 衬里复合钢管宜对管端进行堆焊处理，堆焊长度不应小于基层公称壁厚的 2 倍，且不小于 30 mm，堆焊材料宜采用 PREN 不低于衬里层材料的不锈钢、铁镍基合金或镍基合金，堆焊工艺应根据评定合格的焊接工艺进行。

5.5.3.2 堆焊宜采用冷/热丝钨极惰性气体保护焊或其他热输入量较少的焊接方法，不准许采用手工堆焊、冷金属过渡堆焊和药芯焊丝堆焊。应采用多层堆焊，前后相邻堆焊层间的搭接长度不应小于每层堆焊层宽度的 30%，且焊道的不平度和相邻焊道之间的凹下量不应大于 0.5 mm。

5.5.3.3 宜对管端堆焊层进行机械加工以满足尺寸与公差要求。机械加工完成后，若 D 小于 219.1 mm，堆焊层厚度不应小于 2.5 mm；若 D 大于或等于 219.1 mm，堆焊层厚度不应小于 3 mm。

5.5.3.4 堆焊层与衬里层结合处应为圆滑过渡，堆焊层与衬里层搭接长度不应小于 3 mm，过渡台阶应小于 0.4 mm。

5.6 管端切斜与坡口

5.6.1 管端切斜

管端切斜不应大于 1.6 mm。

5.6.2 坡口

5.6.2.1 复合钢管的焊端坡口应采用机加工方式加工，坡口形式应按照 GB 50251 或 GB 50253 和焊接工艺评定结果确定。

5.6.2.2 若内覆层为高镍含量的 CRA，焊端坡口可适当提高斜度。对于 t_b 小于 5 mm 的复合钢管，焊端坡口可加工成略有斜边或直边型。

5.7 表面处理

5.7.1 复合钢管最终检验前应对内覆层表面进行酸洗钝化和干燥处理。对管端堆焊层的机加工应在酸洗钝化前进行。

5.7.2 酸洗钝化处理后应使用蓝点法(使用铁氰化钾溶液)对 CRA 层内表面进行表面检测，以证实钝化膜无缺陷和无铁离子污染，蓝点法可依据 GB/T 25150 进行。

5.8 制造工艺评定

正式生产前，应对不同材质和不同规格的试制复合钢管按照附录 A 进行制造工艺评定，并编制用于正式生产的 MPS 文件。

6 理化性能

6.1 基层的化学成分

6.1.1 对于 t_b 小于或等于 25 mm 的复合钢管，基层的化学成分应符合 API Spec 5L:2018 对 PSL2 钢管要求。API Spec 5L:2018 表 5 中 PSL2 的化学成分可适用于 t_b 大于 25 mm 的复合钢管，否则，基层化学成分应协商确定。

6.1.2 经购方与制造商协商，基层也可选择 API Spec 5L:2018 中 PSL2 钢管以外其他牌号的碳钢和低合金钢材料并满足相应标准要求。

6.1.3 若复合钢管输送流体属于酸性环境，应由购方与制造商协商确定基层化学成分是否需要满足 API Spec 5L:2018 中附录 H。

6.1.4 对于采用复合板制造的焊接内覆复合钢管，基层焊缝金属也应进行化学分析，验收指标由购方与制造商协商确定。

6.2 CRA 层的化学成分

6.2.1 CRA 层应优先选用 API Spec 5LD 规定的奥氏体不锈钢、双相不锈钢、铁镍基合金或镍基合金，且母材的化学成分应符合 API Spec 5LD，填充金属焊缝的化学成分宜符合 API Spec 5LD。经购方与制造商协商，CRA 层也可选择其他牌号的 CRA 材料并满足相应标准要求。

6.2.2 产品分析结果应符合购方对 CRA 层的 PREN 要求。

6.2.3 堆焊层的化学分析元素 Cr、Ni、Mo 的测量值不应低于填充金属成分的 90%，且元素 Fe 在堆焊层中的稀释率不应超过 5%。

6.3 拉伸性能

6.3.1 基层材料的拉伸性能应满足 API Spec 5L:2018 要求。经购方和制造商协商，也可对 CRA 层或复合板的力学性能提出要求。

6.3.2 如果复合钢管的设计温度超过 100 ℃，应对基层材料进行高温拉伸试验，合格性判据由购方和制造商协商确定。

6.3.3 若基层选用除 API Spec 5L:2018 中 PSL2 以外的其他碳钢或低合金钢，应由购方与制造商协商确定拉伸性能验收指标。

6.4 断裂韧性

6.4.1 基层母材、焊缝和 HAZ 的标准全尺寸 CVN 冲击试验结果应满足 API Spec 5L:2018 中 9.8.1、9.8.2 和 9.8.3 的要求，试验温度应为 0 ℃或由购方与制造商协商确定的最低设计温度。对于输送天然气的复合钢管，可提出满足管道止裂需要的比本标准更高的冲击韧性指标。

6.4.2 若采用较小尺寸的 10 mm×7.5 mm 或 10 mm×5.0 mm 试样，其 CVN 冲击吸收能要求值应分别为对应方向标准全尺寸试样规定值的 0.75 和 0.5。

6.4.3 对于 D 大于或等于 508 mm 的焊接复合钢管，应对基层材料进行 DWT 试验。试验温度为 0 ℃

时，每组(2 件试样)试验的平均剪切面积不应低于 85%，如果协商，可在较低的温度下进行试验。若 t_b 大于 25.4 mm，DWT 试验的验收要求应协商确定。

6.4.4 若基层选用除 API Spec 5L:2018 PSL2 以外的其他碳钢或低合金钢，应由购方与制造商协商确定断裂韧性验收指标。

6.5 导向弯曲性能

对于基层带有填充金属焊缝的焊接内覆复合钢管和基层为 SAWL 管或 COWL 管的衬里复合钢管应进行导向弯曲试验。导向弯曲试验结果应满足以下要求：

a) 试样不应完全断裂；

b) 焊缝处不应出现长度大于 3.2 mm 与深度无关的裂纹；

c) 在 HAZ、熔合线和母材处，不应出现任何长度大于 3.2 mm 的裂纹或深度大于 12.5%t_b 的裂纹；

d) 试验期间，起源于试样边缘长度不大于 6.4 mm 的裂纹，可不成为拒收的依据，但由于夹渣或缺陷引起的边缘开裂，该试样视为不合格，应重新取样进行试验。

6.6 抗压扁性能

6.6.1 所有类型的内覆复合钢管、以无缝管或 HFW 钢管为基层的衬里复合钢管应进行压扁试验。

6.6.2 压扁试验结果应满足以下要求：

a) 在两板间距离小于 H 之前，基层、CRA 层的内表面、外表面和试样边缘不应出现裂纹和开裂，内覆层不应发生剥离；

H 按式(1)计算。

$$H=\frac{1.09(t+t_b)}{0.09+(t+t_b)/D} \qquad \cdots\cdots(1)$$

式中：

H——压扁试验中两板间临界距离，单位为毫米(mm)，修约到最接近的 0.1 mm。

b) 对于内覆复合钢管，应继续压扁直至试样断裂或内覆层内壁贴合，内覆层不应发生剥离。

6.7 截面硬度

除非另有协议，内覆复合钢管的横截面和衬里复合钢管的端部堆焊段的横截面维氏硬度值应符合表 1 的规定。

表 1 硬度检测要求

取样位置	材料类型	硬度要求(单个值)
基层母材和焊缝	碳钢或低合金钢	L360/X52 及其以下钢级不超过 240 HV_{10}，L390/X56 及其以上钢级不超过 250 HV_{10}，另有协商除外
内覆层母材和焊缝	奥氏体不锈钢	不超过 300 HV_{10}
	铁镍基合金或镍基合金，如 UNS N08825 和 UNS N06625	不超过 345 HV_{10}
	Cr22 型双相不锈钢，如 UNS S31803	母材不超过 300 HV_{10}，焊缝和 HAZ 不超过 334 HV_{10}
	Cr25 型双相不锈钢，如 UNS S31804 和 UNS S32740	母材不超过 300 HV_{10}，焊缝和 HAZ 不超过 378 HV_{10}

6.8 焊缝宏观与微观金相组织

6.8.1 应对焊接内覆复合钢管的焊缝和堆焊层(包括衬里复合管的管端堆焊层)进行截面宏观检查,焊缝区域不应存在裂纹、气孔、夹碴、未焊透等缺陷,内、外焊道应充分熔合,焊缝的几何尺寸和工艺缺陷应符合表2要求。

表2 焊缝尺寸和金相组织合格性要求

检 验 项 目	合格性要求
焊缝几何尺寸及缺陷	
焊缝熔合情况 *	充分熔合
基层的焊缝咬边	≤0.4 mm
内覆层的焊缝咬边	不准许
基层纵向焊缝错边	≤1.0 mm
内覆层纵向焊缝错边	≤0.5 mm
CRA焊缝的连续性 *	100%连续
裂纹 *	不准许
焊偏	≤0.15t_b,且≤3.0 mm
交互熔深 *	≤2 mm
外焊缝余高	≤3.5 mm
内覆层焊缝余高	≤1.0 mm
内覆层及其焊缝的金相组织	
奥氏体不锈钢的铁素体含量(仅适用于焊缝和堆焊层) *	5%～13%
双相不锈钢中的铁素体含量 *	35%～65%
有害相(包括:金属间相、晶间连续沉淀相、σ相) *	不准许
注:只有标注 * 的适用于堆焊层。	

6.8.2 内覆复合钢管的纵向焊缝和内覆层以及衬里复合钢管的管端堆焊层应进行金相组织检验,结果应符合表2要求,基层母材平均晶粒度不应低于7级。

6.9 内覆复合钢管的剪切结合强度

6.9.1 内覆复合钢管的剪切结合强度不应低于200 MPa。采用堆焊工艺制造的内覆复合钢管,可不进行剪切强度试验。

6.9.2 经购方和制造商协商,可用6.6和7.5规定的压扁试验替代内覆复合钢管的剪切强度试验。

6.10 衬里复合钢管的紧密度

6.10.1 若采用附录B规定的方法,除非另有协议,紧密度不应低于0.2 MPa。

6.10.2 若采用API Spec 5LD规定的残余应力法,紧密度的合格性指标由购方与制造商协商确定。

6.11 衬里复合钢管的抗高温塌陷性能

衬里复合钢管经高温塌陷试验后衬里层应无鼓包、波痕、弯曲和裂纹。

6.12 CRA层的耐晶间腐蚀性能

CRA层若属于不锈钢、铁镍基合金或镍基合金,除非另有协议,晶间腐蚀试验应选择表3所列其中

任一方法，试验结果应满足所选用方法的对应要求。对于其他 CRA 材料或采用其他试验方法，验收要求应由购方与制造商协商确定。

表 3　CRA 层的耐晶间腐蚀性能要求

标准	方法	合格性要求
GB/T 4334—2008	方法 B：硫酸-硫酸铁腐蚀试验法	腐蚀速率宜不大于 1.0 mm/a 或由购方与制造商协商确定
GB/T 4334—2008	方法 E：硫酸-硫酸铜腐蚀试验法	试样经腐蚀后进行弯曲，在不低于 10 倍放大倍数下检查不应存在晶间腐蚀裂纹；若试样不能进行弯曲或弯曲裂纹难以评定时，可采用金相法评定，金相法评定的合格性指标宜由购方与制造商协商确定
ASTM G28—2002	方法 A：硫酸-硫酸铁腐蚀试验法	腐蚀速率宜不大于 1.0 mm/a 或由购方与制造商协商确定；也可采用金相法评定，金相法评定的合格性指标宜由购方与制造商协商确定

6.13　基层的耐腐蚀性能

若复合钢管输送流体属于酸性环境，应由购方与制造商协商确定是否需要在制造工艺评定和正式生产批次检验中对基层材料进行 HIC 试验和 SSC 试验。若进行 HIC 试验和 SSC 试验，附录 C 给出了建议的试验结果。

6.14　CRA 层的耐腐蚀性能

在制造工艺评定和正式生产批次检验中，针对服役条件的 CRA 层材料的耐腐蚀性能评价结果应符合附录 D。

6.15　管端剩磁强度

成品复合钢管的管端剩磁强度不应超过 15 Gs。

6.16　静水压试验强度

6.16.1　除 6.16.2 所述情形外，复合钢管在完成所有制造工序之后和 NDT 之前应进行静水压试验。复合钢管应能承受基层材料 95%SMYS 的环向应力，且管体和焊缝应无渗漏和明显变形。

6.16.2　对于衬里复合钢管，如果制造商能证明其制造工艺能使复合钢管全长承受比理论计算更高的静水压试验压力，经购方同意后可不进行静水压试验。

6.17　表面状况、缺欠和缺陷

6.17.1　基层

6.17.1.1　基层的表面状况、缺欠和缺陷核查以及处置应符合 API Spec 5L：2018 中 9.10 的要求。

6.17.1.2　对于由复合板制造的焊接内覆复合钢管，除摔坑外，由于制造操作造成复合钢管实际轮廓相对于正常圆柱轮廓的几何尺寸偏离（如扁平块或噘嘴等），其极端点与复合钢管的正常轮廓延伸部分之间的间距超过 3.2 mm 的应判为缺陷，应按照附录 E 的 E.4 处理。

6.17.2　CRA 层

6.17.2.1　CRA 层表面存在的焊缝咬边、坑点、划痕或其他未影响到 CRA 层最小壁厚的表面缺陷，应按

E.2 进行修磨处理。平滑、孤立的圆底痕可以不修磨。不准许采用锤击或补焊修补母材部位的缺陷。

6.17.2.2 CRA 层母材表面存在的任何裂纹、电弧烧伤、过热、硬点、缩孔、夹杂以及影响到 CRA 层最小壁厚的凹坑和凿痕均应判为缺陷，不准许修磨或焊接修补，应按 E.4 处理。

6.17.2.3 对于衬里复合钢管的衬里层实际轮廓相对于正常圆柱轮廓的几何尺寸偏离(如鼓包或塌陷)，其极端点与正常轮廓延伸部分之间的间距超过 3.2 mm 应判为缺陷，不准许采用锤击方式修复，除非采用经购方与制造商协商一致的修复方式，否则，应按 E.4 处理。

6.17.3 焊缝余高

所有复合钢管的焊缝余高应满足以下要求：

a) 基层外焊缝余高不应超过 3.5 mm，超出部分应修磨至规定范围；

b) CRA 层焊缝余高不应超过 1.0 mm，超出部分应修磨至规定范围；

c) 除咬边外，内、外焊缝不应低于邻近母材表面，且应与邻近母材表面平滑过渡。

6.18 尺寸、质量及其偏差

6.18.1 直径

6.18.1.1 复合钢管的外径应符合 API Spec 5L:2018 中表 9 要求。经购方和制造商协商，可选用 API Spec 5L:2018 中表 9 所列外径的中间尺寸。

6.18.1.2 复合钢管的直径应符合表 4 中规定的偏差范围要求，管端直径公差应适用于内径。经购方和制造商协商，复合钢管可按内径进行交付。

表 4 复合钢管的直径和椭圆度偏差

单位为毫米

D	直径偏差				椭圆度偏差[a]		
	外径		内径(管端[b])		外径	内径(管端[b])	内表面局部椭圆度
	无缝钢管	焊接钢管	无缝钢管	焊接钢管			
≤60.3	+0.4 −0.8		±0.3		包括在直径偏差中	包括在直径偏差中	≤0.5%D，但最大不超过 1.5
>60.3～≤219.1	±0.75%D，但最大为±1.25	−0.25%D 至 +0.75% D，但最大为±1.25	±0.5		≤1.0%D	≤0.5% d，但最大不超过 0.6	
>219.1～≤610	±0.75%D	−0.25%D 至 +0.75% D，但最大不超过±3.2	±0.5%d，但最大为±1.0		≤1.5%D，但最大不超过 5.0	≤0.75%d，但最大不超过 1.5	
>610～≤1 422	±1%D	±0.5%D，但最大不超过±4.0	±1.5		D/t≤75 时，≤1.5%D，但最大不超过 10.0；D/t>75 时协商	D/t≤75 时，≤0.75%D，但最大不超过 5.0；D/t>75 时协商	
>1 422	购方与制造商协商确定						

[a] 椭圆度=100%×(最大直径−最小直径)。

[b] 管端：对于内覆复合钢管，指距离管端 100 mm 长度范围内的部分；对于衬里复合钢管，若管端经堆焊，指堆焊部分(不包括与衬里层的过渡区域)，若管端为封焊，指距离管端 100 mm 长度范围内的部分。

6.18.2 椭圆度

复合钢管的椭圆度应符合表4中规定的偏差范围要求。外径椭圆度应由同一横截面上测得的最大外径和最小外径的差值确定，管端部分的内径椭圆度由同一横截面上测得的最大内径和最小内径的差值确定。

6.18.3 壁厚

基层的公称壁厚及其偏差应满足API Spec 5L:2018中表9和表11要求。除非另有协议，复合钢管的CRA层公称壁厚不应小于2.5 mm，其偏差应在$^{+1.0}_{0}$ mm范围内。

6.18.4 长度

复合钢管宜按定尺长度交货，定尺长度范围宜为3 000 mm～12 500 mm，按定尺长度交货的复合钢管的长度偏差应在$^{+100}_{0}$ mm范围内。经购方与制造商协商，复合钢管可按非定尺长度交货，按非定尺长度交货的复合钢管的长度宜符合API Spec 5L:2018中表12要求。

6.18.5 直度

复合钢管全长相对于直线的总偏离不应大于全长的0.1%，每个管端1 000 mm长度范围内相对于直线的局部偏离不应大于4.0 mm。

6.18.6 质量

平端复合钢管的单位长度理论质量应按API Spec 5LD确定。

7 试验方法

7.1 化学成分分析

7.1.1 除非另有协议，由制造商选择，用于产品分析的试样可取自成品复合钢管、复合板、基管或CRA管。对于焊接管，母材取样位置应与焊缝至少相隔90°，焊缝金属应取自焊缝中心部位。

7.1.2 堆焊层的化学分析试样应取自堆焊层中间，应距表面1.0 mm以下，且距离熔合线1.0 mm以上，需分析的元素应包括但不限于C、Mn、P、S、Cr、Ni、Mo和Fe。

7.1.3 化学成分分析宜按照ASTM A751或ASTM E353执行。

7.2 拉伸试验

7.2.1 拉伸试验用试样应符合API Spec 5L:2018中10.2.3.2的规定，试样数量、方向和取样位置应符合表5，可取圆棒试样或代表基层全壁厚的矩形试样，试样上的CRA层应清除，焊缝应磨平，局部缺陷应去除。

7.2.2 基层母材的拉伸试验应测定R_m、$R_{t0.5}$和断裂伸长率，焊缝拉伸试验应测定R_m。常温拉伸试验应按照GB/T 228.1进行。拉伸试验报告应注明试样的类型、规格以及取样位置。

7.2.3 高温拉伸试验应依据GB/T 228.2进行。

7.3 断裂韧性试验

7.3.1 CVN冲击试样应取自成品复合钢管的基层，试样数量、方向和取样位置应符合表5要求，试样上的CRA层应清除，取样应符合API Spec 5L:2018中10.2.3.3的规定。

7.3.2 对于衬里复合钢管，若制造过程不会导致基管断裂韧性的降低，经协商，CVN 冲击试样可在复合前的基管上截取。

7.3.3 CVN 冲击试样的加工应符合 GB/T 229 的规定，试样应未压平，且应优先选用标准全尺寸试样，其次采用较小尺寸的 10 mm×7.5 mm 或 10 mm×5.0 mm 的横向试样。

7.3.4 CVN 冲击试验应依据 GB/T 229 进行，试验报告应注明试样的类型、规格以及取样位置。

7.3.5 DWT 试验方法和试样应按照 SY/T 6476 要求进行，试样数量、方向和取样位置应符合表 5 要求，试样上的 CRA 层应清除。

表 5 拉伸与断裂韧性试验取样数量、方向和位置

基层类型	取样位置	试验类型	取样数量、方向和位置[a,b]		
			规定外径 D mm		
			<219.1	$219.1\leqslant D<508$	$\geqslant 508$
无缝，非冷扩径	管体	拉伸	1L[c]	1L[d]	1L[d]
		CVN	3T	3T	3T
无缝，冷扩径	管体	拉伸	1L[c]	1T	1T
		CVN	3T	3T	3T
HFW	管体	拉伸	1L90[c]	1T180	1T180
		CVN	3T90	3T90	3T90
		DWT	—	—	2T90
	焊缝	拉伸	—	1W	1W
		CVN	3W	3W	3W
SAWL 或 COWL	管体	拉伸	1L90[c]	1T180	1T180
		CVN	3T90	3T90	3T90
		DWT	—	—	2T90
	焊缝	拉伸	—	1W	1W
		CVN	3W 和 3HAZ	3W 和 3HAZ	3W 和 3HAZ

[a] L、T、W 和 HAZ 均表示试样方向，L 表示纵向（试样的长度方向与管轴向平行）试样，T 表示横向试样（试样长度方向与管轴向垂直），W 表示焊缝处于试样中心的横向试样，HAZ 表示热影响区处于试样中心的横向试样。

[b] L、T、W 和 HAZ 前面的数字表示取样数量，后面的数字表示取样位置，90 和 180 分别表示在圆周方向距离焊缝 90°和 180°的位置取样。

[c] 制造商可选择使用全截面纵向试样。

[d] 如果协商，可使用横向试样。

7.4 导向弯曲试验

7.4.1 每组试样包括两件，分别为一件面弯和一件背弯试样，从内覆复合钢管上截取的试样应保留 CRA 层，从衬里复合钢管上截取的试样应去除衬里层。经购方与制造商协商，衬里复合钢管的导向弯曲试样可在复合前的基管上截取。

7.4.2 试样应按照 GB/T 2653 制备，若内覆复合钢管总壁厚（$t+t_b$）或衬里复合钢管的基层壁厚 t_b 不超过 19 mm，应经冷压平制作成全壁厚平板试样；若内覆复合钢管总壁厚 $t+t_b$ 大于 19 mm 时，可从基

层的外表面加工成厚度 18 mm 的矩形横截面试样；若衬里复合钢管的基层壁厚 t_b 大于 19 mm 时，应从完全受拉面的反面加工成厚度 18 mm 的矩形横截面试样。试样上不应有补焊焊缝，焊缝两面余高应磨除。

7.4.3 导向弯曲试验应按照 GB/T 2653 或 API Spec 5L:2018 中 10.2.4.6 进行。弯模直径应按照基层的钢级和 API Spec 5L:2018 中 10.2.4.6 要求确定，弯模直径不应超过 $6t_b$。面弯、背弯试样在弯模内弯曲约 180°，焊缝应位于试样中部。

7.5 压扁试验

7.5.1 压扁试样应包括两件，应在单根复合钢管的两端各截取一件长度不小于 63.5 mm 管段作为压扁试验用试样。

7.5.2 将试样放置在两平行板之间，对于基层带有纵向焊缝的复合钢管，其中一件试样焊缝置于 6 点或 12 点位置，另一件试样的焊缝置于 3 点或 9 点位置，按以下步骤进行压扁试验：

a) 第一步，延性试验，对于所有试样，应压扁至两板间距离不小于按照 6.6.2a)确定的 H 后进行外观检查，检查试样的内表面、外表面和边缘是否出现裂纹、断裂或内覆层剥离；

b) 第二步，坚固性试验，对于内覆复合钢管，应在第一步延性试验基础上，继续压扁至试样断裂或内壁贴合，检查内覆层是否发生剥离。

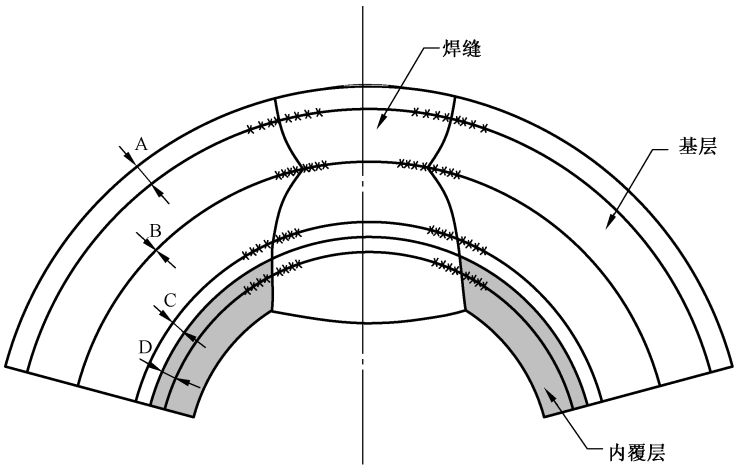
7.6 截面硬度试验

7.6.1 内覆复合钢管的硬度试验压痕位置应符合以下要求：

a) 对于焊接内覆复合钢管，应分别在焊缝、距离纵向焊缝 90°和 180°处管体各取 1 件横向试样，焊缝试样的压痕位置见图 1a)，其余两件管体试样的压痕位置见图 1b)；

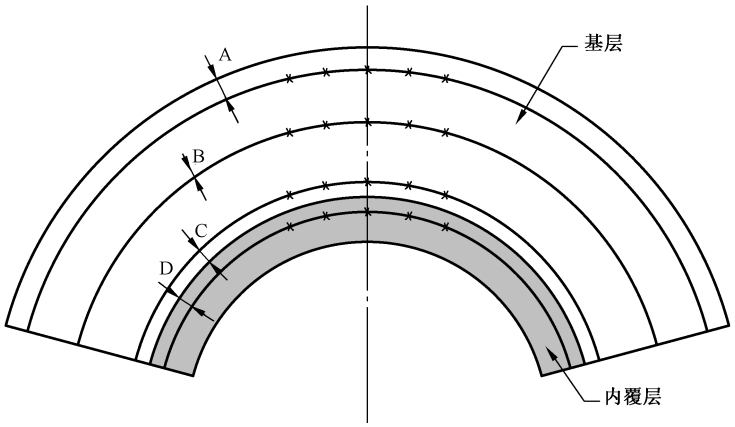
b) 对于无缝内覆复合钢管，应沿圆周方向每间隔 120°取 3 个横向试样，硬度测量位置见图 1b)；

c) 若 t_b 小于 4.0 mm，基层部分仅需检验基层中间壁厚硬度；若 t_b 等于或大于 4.0 mm 且小于 6.0 mm，基层部分仅需检验靠近基层内表面和外表面的硬度。



a) 焊缝试样

图 1 内覆复合钢管截面硬度试验压痕位置



b) 管体试样

说明：

A ——1.5 mm，偏差范围应为 $^{+0.5}_{0}$ mm；

B ——基层中间壁厚处；

C ——1.0 mm，偏差范围应为 $^{0}_{-0.5}$ mm；

D ——1.0 mm，偏差范围应为 $^{0}_{-0.5}$ mm。

图 1（续）

7.6.2 衬里复合钢管的管端堆焊部分硬度试验压痕位置宜按照 7.6.1 要求进行。

7.6.3 除非另有协议，管体未受到热影响的母材硬度压痕间距应为 1.0 mm，HAZ 和焊缝的硬度压痕间距应为 0.75 mm，距熔合线最近的高温热影响区硬度点离熔合线的距离不应超过 0.5 mm，无缝管的硬度压痕间距应为 1.0 mm。

7.6.4 应依据 GB/T 4340.1 使用维氏测试法进行截面硬度检测。

7.7 焊缝宏观与微观金相检验

7.7.1 对于内覆复合钢管和衬里复合钢管的管端堆焊部分，金相检验部位与截面硬度检测部位一致，金相试样横截面应包括焊缝两侧的熔合线、HAZ 及母材。应抛光至 1 μm，酸蚀后应使用光学显微镜（至少放大 10 倍）进行焊缝宏观检查。

7.7.2 微观金相组织检验应按照 GB/T 13298 进行，不锈钢焊缝和内覆层的铁素体含量测定宜依据 GB/T 13305 进行。

7.7.3 基层晶粒度应按照 GB/T 6394—2017 进行测定。

7.8 内覆复合钢管的剪切结合强度试验

应依据 GB/T 6396 进行剪切结合强度试验，宜在远离焊缝部位取 3 件纵向试样进行试验。

7.9 衬里复合钢管的紧密度试验

除非另有协议，若 D 小于或等于 273.1 mm，紧密度试验应依据附录 B 采用推出法进行；若 D 大于 273.1 mm，紧密度试验应采用 API Spec 5LD 中规定的残余应力法进行。

7.10 衬里复合钢管的高温塌陷试验

7.10.1 塌陷试验用试样的管端应与产品的交货形式一致，宜为堆焊或封焊方式，取两件试样进行试验，试样长度宜不小于 6 m。

7.10.2 应将复合钢管加热到不低于 240 ℃，至少保温 15 min。冷却至室温后应采用内窥镜、高清摄像机或其他计算机成像技术对复合钢管内表面进行检查，检查是否存在鼓包、波痕或弯曲和裂纹。

7.11 晶间腐蚀试验

7.11.1 每组试样应包括 3 件平行试样。对于带有纵向焊缝的 CRA 层，母材试样应沿圆周方向在距离焊缝 90°、180°和 270°三个位置分别取 1 件纵向试样作为一组；按 GB/T 4334—2008 方法 E 开展试验的焊缝试样应取 3 件横向试样作为一组，按 GB/T 4334—2008 方法 B、ASTM G28-2002 方法 A 开展试验的焊缝试样应取 3 件纵向试样作为一组，且焊缝应位于试样中心，试样母材边缘至熔合线距离不应小于 10 mm。对于无纵向焊缝的 CRA 层或堆焊层(若能取样)，应沿圆周方向各 120°三个位置分别取 1 件纵向试样作为一组。

7.11.2 试样尺寸宜符合 GB/T 4334—2008 或 ASTM G28—2002。

7.11.3 试样应将碳钢或低合金钢材料完全去除，取自衬里层的试样内外表面不应进行加工，试样表面若有氧化皮或划痕，可采用酸洗或无铁磨料研磨方式去除。

7.11.4 除非另有协议，不锈钢、铁镍基合金或镍基合金材料的晶间腐蚀试验应选择表 3 所列其中任一方法。

7.12 基层的腐蚀试验

基层材料的 HIC 试验和 SSC 试验方法参见附录 C。

7.13 CRA 层的耐腐蚀性能评价

CRA 层材料的腐蚀试验应依据附录 D 进行。

7.14 管端剩磁强度检验

出厂前，应逐根检测成品复合钢管的管端剩磁强度，若管端剩磁强度大于 15 Gs，应对管端进行消磁处理。

7.15 静水压试验

7.15.1 静水压试验应采用氯离子含量低于 50 mg/L 的洁净水在室温下进行，在试验压力下，稳压时间不应少于 10 s。水压试验压力按式(2)计算，试验压力不应超过最低试验压力的 5%。由制造商选择，可采用比规定要求更高的试验压力。

$$P = \frac{1.9\sigma_{SMYS} \cdot t_b}{D} \qquad \cdots\cdots(2)$$

式中：

P ——静水压试验压力，单位为兆帕(MPa)，修约到最接近的 0.1 MPa；

σ_{SMYS} ——基层的 SMYS，单位为兆帕(MPa)。

7.15.2 静水压试验机应配备能记录试验压力和压力保持时间的记录仪，并将静水压记录与生产记录一起保留，压力测量装置的校准证书应在有效期内。

7.15.3 静水压试验完成后，应对复合钢管进行干燥处理，并使用管帽对管端封堵以保持复合钢管的内表面干燥。

7.16 外观检查

7.16.1 复合钢管的外观检查应在所有制造工序和静水压试验完成后进行。检查前，复合钢管内、外表面应清洁，不应有污垢、油脂、油漆、氧化皮等外来物。

7.16.2 除 7.16.3 允许外，所有复合钢管的内表面、外表面、管端堆焊层、封焊环焊缝应在光照强度不低于 500 lx 条件下按照 NB/T 47013.7 进行外观检查，应对 CRA 层纵向焊缝进行全长外观检查。对于不便于直接目视检查的位置应采用带有高清摄像机的内爬行器、内窥镜或其他计算机成像技术进行检测。

7.16.3 外观检查可用已证实具有检测表面缺陷能力的其他方法代替。

7.16.4 对于复合板制焊接内覆复合钢管，应在管端焊缝处，用模板测量扁平块和噘嘴相对于复合钢管正常圆柱轮廓的最大偏离，模板应垂直于复合钢管轴向，且长度为 0.25D 或 200 mm 的最小值。

7.16.5 外观检查应由符合以下要求的人员进行：

a) 经过检测和评定表面缺欠的培训；

b) 具有符合 NB/T 47013.7 或相当标准要求的视觉敏锐度。

7.17 尺寸检测与称重

7.17.1 应采用卷尺、环规、卡规或光学测量仪器对所有复合钢管的外径进行检测，应使用环规、卡规或光学测量仪器对所有复合钢管距离端头 100 mm 长度范围的内径进行检测，内表面局部椭圆度应使用覆盖弧长不小于 200 mm 的内径量规测量。

7.17.2 复合钢管上任意位置的壁厚均应符合 6.18.3，复合钢管的壁厚检验应满足以下要求：

a) 在正式生产阶段，应检查所有复合钢管的基层和 CRA 层壁厚。内覆复合钢管的总壁厚和衬里复合钢管的基层壁厚宜依据 ASTM E797 采用手动 UT 按网格法或采用 AUT 扫查测量，检测面积不应少于每根复合钢管外表面的 25%；衬里层壁厚宜依据 ASTM E797 采用手动 UT 测量；端部堆焊层和内覆层壁厚宜依据 ASTM B499 采用电磁法测量；

b) 在制造工艺评定和正式生产批次抽检中，应采用金相法对内覆复合钢管或衬里复合钢管的堆焊部分的基层壁厚和内覆层壁厚进行检测，应采用卡尺测量衬里复合钢管的基层壁厚和衬里层壁厚。

7.17.3 应检查所有复合钢管的长度，用于测量长度的测量装置，其精度不应低于 10 mm。

7.17.4 应检查所有复合钢管的全长直度偏差和端部直度偏差，检测方法宜按照 API Spec 5L:2018 中 9.11.3.4 规定。

7.17.5 由制造商选择对复合钢管逐根称重或以方便的批次称重。

7.17.6 制造商应采用适当的方法验证复合钢管对 5.6 规定的管端尺寸的符合性。

7.18 无损检测

7.18.1 一般规定

7.18.1.1 NDT 应在复合钢管所有制造工序和静水压试验(若需要)完成后进行。

7.18.1.2 NDT 人员应按 GB/T 9445 或其他等效标准进行评定，检测人员如未从事该项无损检测工作超过 12 个月，其资质应重新评定。NDT 的显示结果应由Ⅱ、Ⅲ级人员评定。

7.18.2 表面检测

7.18.2.1 对于基层带有纵向焊缝的复合钢管，应对基层的纵向焊缝外表面按照 NB/T 47013.4 要求进行 100%MT 或按照 NB/T 47013.5—2015 要求进行 100%PT，验收等级均为Ⅰ级。

7.18.2.2 若 CRA 层带有纵向焊缝，应对 CRA 层的管端 100 mm 范围内的纵向焊缝内表面按 NB/T 47013.5—2015 要求进行 100%PT，验收等级为Ⅰ级。

7.18.2.3 表面检测发现的缺陷应按照 E.2 进行修磨处理。

7.18.3 管体和焊缝

7.18.3.1 内覆复合钢管

7.18.3.1.1 应使用能定位缺陷位置的 AUT 依据 SY/T 6423.4—2013 要求对内覆复合钢管进行 100%检

查，检测基层的分层缺陷和内覆层的未结合缺陷，扫描间隔不应大于 25 mm。焊缝两侧 50 mm 宽的范围内不应存在任何分层、未结合和裂纹缺陷。其他位置的分层缺陷验收等级不应低于 SY/T 6423.4—2013 规定的 U2 级，内覆层的未结合的验收等级不应低于 5.1.1 规定的相应复合板的要求。

7.18.3.1.2 纵向焊缝应按照 SY/T 6423.1 要求进行 100%RT 和按照 SY/T 6423.2 要求进行 AUT。若采用数字射线对焊缝进行检测，应按照 SY/T 6423.5 进行。

7.18.3.1.3 应使用能定位缺陷位置的 AUT 依据 ISO 10893-10:2011 对无缝内覆复合钢管进行全管体纵向缺陷检验，验收等级不应低于 U2/C 级要求。

7.18.3.1.4 如果购方与制造商有协议，可采用 ISO 10893-10:2011 对无缝内覆复合钢管的横向缺欠进行 UT，验收等级不应低于 U2/C 级要求。

7.18.3.1.5 对于 AUT 设备无法检验的管端区域，应使用手动或半自动 UT，手动扫查速度应小于 150 mm/s，其检测灵敏度和检验参数应与 AUT 相同。

7.18.3.1.6 如果购方与制造商有协议，可采用 ISO 10893-2:2011 规定的涡流方法，对内覆复合钢管的全管体进行检验，验收等级为 E2。

7.18.3.1.7 距管端 100 mm 以内和焊缝两侧 50 mm 宽的范围内的未结合缺陷应按照 E.4 处理；其他位置的未结合缺陷应按 E.3 进行焊接修补，否则，应按 E.4 处理。

7.18.3.1.8 对于采用 UT、AUT、RT 或数字射线检测发现的焊缝缺陷应按 E.3 进行焊接修补，否则，应按 E.4 处理。

7.18.3.1.9 应按 E.4 处理管体的分层、裂纹、横向和纵向缺陷。

7.18.3.2 衬里复合钢管

7.18.3.2.1 复合之前，基管和 CRA 管均应分别进行 NDT。除非另有协议，NDT 应分别满足 API Spec 5L:2018 中附录 E 和 SY/T 6601 的要求。

7.18.3.2.2 对于衬里复合钢管，若基层为焊管，应对焊缝按照 SY/T 6423.1 要求进行 100%RT 和按照 SY/T 6423.2 要求进行 100%UT，UT 验收等级应满足 U2 或 U2H。若采用数字射线检测，应依据 SY/T 6423.5 进行。

7.18.3.2.3 对于采用 UT、AUT、RT 或数字射线检测发现的基层焊缝缺陷应按 E.3 进行焊接修补，否则，应按 E.4 处理。

7.18.4 管端

7.18.4.1 内覆复合钢管

7.18.4.1.1 对每根内覆复合钢管距离管端 100 mm 范围内，应按照 SY/T 6423.4-2013 采用 UT 检查分层，沿圆周方向尺寸大于 6.4 mm 且面积大于 100 mm^2 的分层应判为缺陷，应按 E.4 处理。

7.18.4.1.2 对每根内覆复合钢管的管端面或坡口面应进行 100%PT 以检查分层，PT 应按 SY/T 4109 进行。圆周方向尺寸大于 6.4 mm 的分层应判为缺陷，应按 E.4 处理。

7.18.4.2 衬里复合钢管

7.18.4.2.1 若管端进行了堆焊，应对所有管端堆焊层进行 100%PT 和 100%UT，PT 按照 SY/T 4109 进行，UT 按照 SY/T 6423.4—2013 进行，检测结果应无裂纹、分层及其他缺陷。堆焊层若需要机械加工，所有检验应在机械加工后进行，UT 范围不包括堆焊层与衬里层之间的过渡区域。

7.18.4.2.2 应根据 SY/T 6423.1 要求对管端堆焊层与衬里层结合处的环形焊缝进行 100%RT，验收指标应由购方与制造商协商确定。

7.18.4.2.3 若对管端进行了封焊，应对所有封焊环焊缝进行 100%PT 和 100%RT，经购方与制造商协商一致，可使用 AUT 代替 RT。封焊焊缝所有检验的验收标准应由购方与制造商协商确定。

7.18.4.2.4 对每根复合钢管的管端面或坡口面应进行 100%PT 以检查分层，PT 应按 SY/T 4109 进

行。圆周方向尺寸大于 6.4 mm 的分层缺欠应判为缺陷，应按 E.4 处理。

8 检验规则

8.1 检验项目

8.1.1 试验与检验应在复合钢管制造下线 24 h 后进行。除非在试验方法中另有规定，试样应在室温环境下进行状态调节。

8.1.2 复合钢管应进行制造工艺评定和批次检验，检验项目见表 6。

表 6 复合钢管的检验项目

类型	检验项目	检验频次	试验方法	技术要求
化学成分	基层	O 和 T	7.1	6.1
	CRA 层	O 和 T	7.1	6.2
物理试验	拉伸性能	O 和 T	7.2	6.3
	断裂韧性	O 和 T	7.3	6.4
	导向弯曲试验	O 和 T	7.4	6.5
	压扁试验	O 和 T	7.5	6.6
	截面硬度	O 和 T	7.6	6.7
	金相检验	O 和 T	7.7	6.8
	内覆复合钢管的剪切结合强度试验	O 和 T	7.8	6.9
	衬里复合钢管的紧密度试验	O 和 T	7.9	6.10
	衬里复合钢管的高温塌陷试验	O 和 T	7.10	6.11
腐蚀试验	晶间腐蚀试验	O 和 T	7.11	6.12
	基层的腐蚀试验	协商	7.12	6.13
	CRA 层的耐腐蚀性能评价	O 和 T	7.13	6.14
管端剩磁	—	P	7.14	6.15
静水压试验	—	P	7.15	6.16
外观检查	表面质量、缺欠与缺陷	P	7.16	6.17
尺寸、质量及其偏差	直径	P	7.17.1	6.18.1
	椭圆度	P	7.17.1	6.18.2
	壁厚	P	7.17.2	6.18.3
	长度	P	7.17.3	6.18.4
	直度	P	7.17.4	6.18.5
	质量	[a]	7.17.5	6.18.6
	管端	P	7.17.6	5.5.3、5.6
无损检测	表面检测	P	7.18.2	7.18.2
	管体和焊缝	P	7.18.3	7.18.3
	管端	P	7.18.4	7.18.4

O——正式生产阶段，进行批次检验时，按照 8.3.2 要求抽取 1 根复合钢管。

P——制造工艺评定阶段和正式生产阶段，对每根复合钢管要求。

T——制造工艺评定阶段，按照 8.3.1 要求抽取 1 根复合钢管。

[a] 由制造商选择逐根称重或以方便的批次进行。

8.2 取样方式

8.2.1 拉伸和断裂韧性试验用试样数量、方向和取样位置应按照表5进行，其他试验与检验用试样应按照7.1、7.4～7.18要求进行。

8.2.2 宜采取冷切割或等离子切割方式取样，若采用火焰切割方式取样，应采用机加工方式去除火焰切割造成的热影响区。

8.2.3 对于表6规定的物理试验，若发现试样有加工缺陷或与相应试验无关的材料缺欠，无论是在试验前还是在试验后发现，均可将该试样作废，并从同一根复合钢管上重新取样。

8.3 检验频次

8.3.1 在制造工艺评定阶段，不同钢级、不同熔炼炉批次(包括基层和CRA层)、不同规定外径、不同制造工艺、不同热处理工艺、不同公称壁厚(包括基层和CRA层)的试制复合钢管应各抽取不少于两根进行MPQT。

8.3.2 正式生产阶段，除非另有协议，同钢级、同一熔炼炉批次(包括基层和CRA层)、同规定外径、同制造工艺、同热处理工艺、同公称壁厚(包括基层和CRA层)的复合钢管，D 小于508 mm时不多于100根作为一检验批，D 大于或等于508 mm时不多于50根作为一检验批，每批应抽取不少于1根进行试验或检验。

8.4 复验

8.4.1 在正式生产的批次检验中，若不合格项为化学成分、物理试验或腐蚀试验，由购方选择，可在同一复合钢管上两倍取样复验不合格项，或在同批次复合钢管中重新两倍抽样并分别取样复验不合格项，或对该批复合钢管重新进行一次热处理并按本标准重新进行所有物理试验和腐蚀试验。若上述复验合格，则除先前检验不合格的那根复合钢管外，则判该批其他复合钢管相应检验项目合格，否则该批复合钢管应判为不合格。

8.4.2 重新热处理仅允许进行一次。但在复验中，仅因抗拉强度或屈服强度为不合格项，允许经购方同意后该批复合钢管降低压力等级予以使用。

9 标志

9.1 标志方法

由制造商选择，宜采用字模压印或模板漆印在复合钢管表面制作标志，字体与颜色应易于辨认，标志应清楚和耐久。不应采用冷、热字冲模锤印标志。

9.2 标志位置

若复合钢管外径 D 大于48.3 mm，应从距离管端100 mm处开始，在复合钢管两端外表面做标志，标志不得喷刷或印在焊缝处。若复合钢管外径 D 小于或等于48.3 mm，宜在复合钢管捆的标签上或捆绑带上牢固清楚地制作标志。

9.3 标志内容

复合钢管的标志应包括以下内容：

a) 制造商的名称或标志；

b) 本标准编号；

c) 规定外径 D，基层公称壁厚 t_b 和 CRA 层的公称壁厚 t，单位为毫米(mm)；

d) 单位长度理论质量，单位为千克每米(kg/m)；

e) 基层钢级，基层钢级由字母 L 和表示基层强度水平的数字组成，数字部分为以兆帕(MPa)为单位的向上圆整的基层的 SMYS；可在数字后加注后缀字母表示基层的热处理状态，热处理状态的字母表示方法应按照 API Spec 5L：2018 中表 3 进行；

f) CRA 层材料类型，采用下列符号：

CRA 层的材料类型	UNS 编号

g) 基层与 CRA 层的制造工艺，采用下列符号：

——内覆复合钢管：

无缝	S
焊接	E

——衬里复合钢管：

无缝	SL
焊接	EL

h) 静水压试验压力(若试验)，单位为兆帕(MPa)；

i) 可追溯管号，可追溯管号号编制规则宜由购方与制造商协商确定。如复合钢管的壁厚过小无法压印，可经购方与制造商协商采用其他标识方法。

示例：

由制造商 ABCO 制造的衬里复合钢管：基层为 L485M 钢级的无缝钢管，规定外径为 355.6 mm，公称壁厚为 9.5 mm；衬里层为焊管，材料为 UNS S31603，衬里层公称壁厚 2.5 mm，复合钢管理论质量 81.08 kg/m。静水压试验压力为 20.7 MPa，管号为 N123。其模板漆印标识如下：

ABCO GB/T 37701 355.6 9.5/2.5

81.08 L485M SL/ S31603 EL 20.7 MPa N123

10 包装、储存和防护

10.1 装运前，复合钢管内、外表面应保持清洁与干燥，可采用免清除防锈材料防止坡口或管端产生锈蚀，应采用管端保护器或其他保护装置对管端进行有效保护，避免搬运和运输过程中对成型坡口和复合钢管内部造成机械损伤和污染。

10.2 应确保复合钢管在包装、搬运、运输和储存过程中免受机械损伤和环境侵蚀，确保管内、外表面免受铜、铝、锡、铅、锌等低熔点金属污染，应避免铁离子污染 CRA 层表面，如果产生，应采用有效的方法进行清除。

10.3 复合钢管包装、搬运、运输和储存应符合公路、铁路或海路运输的要求。

11 文件

11.1 按规定应进行的所有试验和检验，均应在交货前完成，并向购方提供完整的检测文件。

11.2 按本标准生产的复合钢管，每批均应有产品质量合格证明书，质量合格证明书至少应包括：

a) 制造商名称与制造日期；

b) 产品名称、规格、本标准编号；

c) 原材料检验报告；

d) 产品外观尺寸检测报告；

e) 产品化学成分检测报告；

f) 产品物理试验报告；
g) CRA 层材料耐腐蚀性能评价报告；
h) 产品 NDT 报告；
i) 热处理(若有)报告；
j) 静水压试验(若有)报告；
k) 修补焊接记录；
l) 由购方指定的其他文件。

附 录 A
（规范性附录）
制造工艺评定

A.1 一般要求

A.1.1 有以下情况之一时，应进行制造工艺评定：

a） 新产品鉴定；

b） 原材料、结构、工艺有明显改变可能影响产品性能时；

c） 连续一年以上停产后恢复生产时。

A.1.2 制造工艺评定包括以下两部分：

a） 制造工艺规范（MPS）；

b） 制造工艺评定试验（MPQT）。

A.2 制造工艺规范（MPS）

A.2.1 MPS 制定程序

MPS 制定程序包括：

a） 制定初步 MPS；

b） 按照初步 MPS 试制复合钢管；

c） 按照第 6 章、第 7 章和第 8 章要求进行试验和检验；

d） 根据试制报告，完善初步 MPS，并按照 A.3.2 要求进行评审，形成正式 MPS；

e） 将 MPS 报购方认可。

A.2.2 MPS 内容要求

A.2.2.1 一般规定

由复合板制造的内覆复合钢管的 MPS 应符合 A.2.2.2，堆焊方法制造的内覆复合钢管的 MPS 应符合 A.2.2.3，衬里复合钢管的 MPS 应符合 A.2.2.4。其他工艺制造的复合钢管的 MPS 由购方与制造商协商确定。

A.2.2.2 由复合板制造的焊接内覆复合钢管

MPS 内容包括：

a） 原材料：

1） 复合板的制造商名称；

2） 复合板基层与覆层材质类型及钢级；

3） 复合板制造工艺；

4） 复合板规格尺寸；

5） 复合板基层与覆层的化学成分；

6） 复合板基层力学性能；

7） 复合板热处理及供货状态；

8） 复合板的 NDT 检测报告；

9） 复合板工艺质量、外观检查和缺陷修补及报告；
10） 复合板以及焊接材料的产品质量证明书；
11） 入厂复验要求；
12） 焊接材料类型以及质量要求。

b） 制造工艺：
1） 制造机具检查和评定；
2） 卷制成型方式、工艺参数及偏差；
3） 纵向直缝焊接工艺；
4） 坡口(若有)规格尺寸及加工方式；
5） 冷扩径或冷定径。

c） 成型后若进行热处理，则应包含：
1） 热处理方式；
2） 热处理工艺参数；
3） 温度控制仪器及校准。

d） 几何尺寸及圆度校正工艺。

e） 外观检查和缺陷修补及报告。

f） 以下两项的试验和检验要求：
1)评定试制复合钢管；
2)正式生产复合钢管。

g） 购方补充要求(如管端加工、表面涂层、标志等)。

A.2.2.3 堆焊型内覆复合钢管

MPS 内容包括：

a） 原材料：
1） 基管制造商名称；
2） 基管的材质类型及钢级；
3） 基管的制造工艺；
4） 基管的规格尺寸；
5） 基管的化学成分；
6） 基管的力学性能；
7） 基管的热处理及供货状态；
8） 基管的 NDT 检测报告；
9） 基管的工艺质量、外观检查和缺陷修补及报告；
10） 基管的产品质量证明书；
11） 基管的入厂复验要求；
12） 焊接材料类型以及质量要求。

b） 制造工艺：
1） 制造机具检查和评定；
2） 堆焊工艺与工艺参数及偏差；
3） 管端机加工要求；
4） 坡口(若有)规格尺寸及加工方式。

c） 堆焊后若进行热处理，则应包含：
1） 热处理方式；

2） 热处理工艺参数；

3） 温度控制仪器及校准。

d） 几何尺寸及圆度校正工艺。

e） 外观检查和缺陷修补及报告。

f） 以下两项的试验和检验要求：

1） 评定试制复合钢管；

2） 正式生产复合钢管。

g） 购方补充要求（如管端加工、表面涂层、标志等）。

A.2.2.4 衬里复合钢管

衬里复合钢管的 MPS 内容包括：

a） 原材料：

1） 基管与 CRA 管的制造商名称；

2） 基管与 CRA 管的材质与钢级；

3） 基管与 CRA 管的制造工艺；

4） 基管与 CRA 管的规格尺寸；

5） 基管与 CRA 管的化学成分；

6） 基管的力学性能；

7） 基管与 CRA 管的热处理及供货状态；

8） 基管与 CRA 管的 NDT 检测报告；

9） 基管与 CRA 管的工艺质量、外观检查和缺陷修补及报告；

10） 基管与 CRA 管的产品质量证明书；

11） 基管与 CRA 管的入厂复验要求；

12） 焊接材料类型以及质量要求。

b） 复合工艺：

1） 装配前的基管与 CRA 管表面清理方法及要求；

2） 制造机具检查和评定；

3） 复合方式、工艺参数及偏差；

4） 管端堆焊（若有）工艺及机械加工；

5） 管端封焊（若有）工艺；

6） 坡口（若有）规格尺寸及加工方式。

c） 复合后若进行热处理，则应包含：

1） 热处理方式；

2） 热处理工艺参数；

3） 温度控制仪器以及校准。

d） 几何尺寸及圆度校正工艺。

e） 外观检查和缺陷修补及报告。

f） 以下两项的试验和检验要求：

1） 评定试制复合钢管；

2） 正式生产复合钢管。

g） 购方补充要求（如管端加工、表面涂层、标志等）。

A.3 制造工艺评定试验(MPQT)

A.3.1 MPQT 应按以下规定进行:

a) 试制复合钢管应是与正式生产复合钢管具有同熔炼炉批次的原材料以及制造商、同规定外径、同钢级、同制造工艺、同热处理工艺和同公称壁厚(包括基层和内覆层);

b) 试制复合钢管数量不应少于 5 根,应保证有足够长度以提供试样;

c) 试制复合钢管的试验和检验包括:几何尺寸、化学成分、物理试验、腐蚀试验、NDT 和静水压试验等,具体试验和检验项目见表 6,结果应满足本标准的要求。

A.3.2 制造商应组织由高级工程师、高级技师或更高职称的人员组成不少于 5 人的评审组,根据试制管的试验与检测结果对 MPS 进行评定,并向购方提供评定报告。

A.3.3 制造商在正式生产复合钢管过程中应遵守经购方书面认可后的 MPS,制造商对 MPS 的任何修改,都应取得购方的书面认可。

附 录 B
（规范性附录）
衬里复合钢管紧密度试验方法

B.1 取样

B.1.1 从待检的衬里复合钢管中任抽取 1 根，用机加工方法截取 3 段长度为 200 mm～300 mm 的管段。

B.1.2 如图 B.1 所示，用机加工方法在试样一端去除长度为 H_0（H_0=20 mm±5 mm）的基层，基层和衬里层结合部分实测长度为 H_t。

B.1.3 一组试样应包括 3 件平行样，试样表面应清洁干净，管端应平整且与管轴线垂直。

B.2 试验方法

B.2.1 准备材料试验机、底座和压板，底座应根据复合管内径和外径规格加工，压板的长度和宽度不应小于 1.5D，底座和压板应具有足够刚度。

B.2.2 按图 B.1 所示，将底座和压板分别放置于试样底部和顶端，再放置于材料试验机压缩夹具内，给压板施以压力，测试基层与衬里层分离时的最大应力 F。

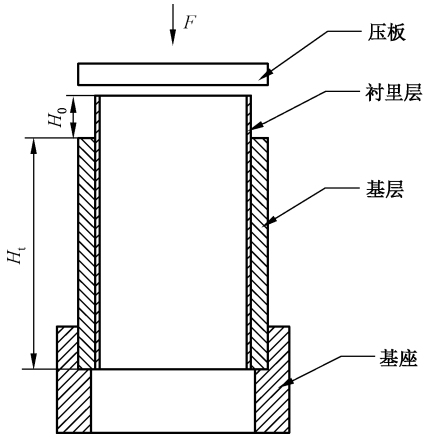


图 B.1 紧密度试验用试样图

B.2.3 应保证试样位于夹具的中心位置，试样轴线与夹具压缩轴线一致。

B.2.4 材料试验机在压缩过程中应保持同一速率，压缩速率不应超过 3 mm/min。

B.2.5 记录试样在压缩过程中衬里层与基层发生位移时的最大应力 F。

B.2.6 基层与衬里层之间的紧密度 P_t 按照式(B.1)计算：

$$P_t=\frac{F}{\pi H_t D_i} \qquad \cdots\cdots(B.1)$$

式中：

P_t ——紧密度，单位为兆帕(MPa)；

F ——由试验机测得衬里层与基层钢管之间发生滑移时的最大压缩力，单位为牛顿(N)；

D_i ——衬里层的外径或基层内径，单位为毫米(mm)；

H_t ——基层与衬里层结合部分的实测长度，单位为毫米(mm)。

附 录 C
（资料性附录）
基层材料腐蚀试验方法

C.1 一般要求

基层母材和基层焊缝的腐蚀试验包括 HIC 试验和 SSC 试验。

C.2 取样

C.2.1 按照 8.3 规定的组批方式，从每批成品复合钢管中抽取 1 根加工 HIC 和 SSC 试验用试样，应采取冷切割或等离子切割方式取样，试样上的 CRA 层应清除干净。

C.2.2 HIC 试验用试样应按照 NACE TM 0284:2011 要求制取。

C.2.3 SSC 试验用试样应满足以下要求：

a) 若基层为焊管，母材试样应沿圆周方向在距离焊缝 90°、180°和 270°位置分别取 1 件纵向试样，焊缝试样应取 3 件横向试样，且焊缝应位于试样中心；

b) 若基层为无缝管，应沿圆周方向各 120°位置分别取 1 件纵向试样；

c) 每 3 件试样作为一组，试样尺寸与加工应符合 NACE TM 0177 或 GB/T 15970.2 要求。

C.3 HIC 试验

C.3.1 HIC 试验宜在 NACE TM 0284:2011 所列 A 溶液中进行，HIC 试验应按照 NACE TM 0284 进行。每件试样的 CSR、CLR 和 CTR 平均值应符合下列验收指标：

a) CSR 小于或等于 2%；

b) CLR 小于或等于 15%；

c) CTR 小于或等于 5%。

C.3.2 经购方与制造商协商，HIC 试验可在模拟服役介质环境或 NACE TM 0284 所列 B 溶液中进行，并协商确定验收指标。

C.3.3 试验结果应报告每件试样的三个截面的 CSR、CLR 和 CTR 以及每件试样的 CSR、CLR 和 CTR 平均值，并应提供相应裂纹照片。

C.4 SSC 试验

C.4.1 SSC 试验宜在 NACE TM 0177 所列 A 溶液中进行，SSC 试验方法和验收指标见表 C.1。由购方选择，可选择表 C.1 中所列两种方法中的一种对基层材料进行 SSC 试验。

C.4.2 对于焊接试样，通常用母材的屈服强度来确定试验应力。当焊缝区的屈服强度低于母材的屈服强度时，应采用焊缝区的屈服强度来确定试验应力。

C.4.3 若购买方同意并有证明文件，可选择较低的加载应力、其他 SSC 试验方法、其他试验环境（包括适合模拟服役条件的 H_2S 分压以及模拟溶液）和相应的验收指标。如果采用除表 C.1 以外的其他试验方法和条件，应将试验方法与条件随结果一起报告。

表 C.1　基层材料 SSC 试验方法

方法		单轴拉伸法	四点弯曲法
依据标准		NACE TM 0177	GB/T 15970.2
试验应力[a]	标准尺寸试样	80%SMYS	80%SMYS
	小尺寸试样	72%SMYS	—
溶液		NACE TM0177 中规定的 A 溶液	
温度		24 ℃±3 ℃	
时间		720 h	
合格判据		试样不开裂且 10 倍放大倍数下未见裂纹，标距段如果有裂纹应采用金相显微镜观察以确定裂纹是否属于 SSC 断裂	

[a] 征得购方同意并应有证明文件，可选择较低的加载应力。当选择试验方法和试验加载应力时，应考虑材料实际受力状态的方向性。

附 录 D
（规范性附录）
CRA层材料的腐蚀试验方法

D.1 一般要求

CRA层材料腐蚀试验应包括SSC/SCC试验、失重腐蚀和点腐蚀试验。

D.2 SSC/SCC试验

D.2.1 一般要求

根据复合钢管预期输送流体工况环境，由购方选择，可采取以下三种途径中的一种评价CRA层的耐SSC/SCC性能：

a) 如果CRA层满足ISO 15156-3:2015中附录A要求，可不进行SSC/SCC试验评价，可由ISO 15156-3:2015中附录A给出的CRA材料不发生SSC/SCC的冶金状态、H_2S分压、温度、氯离子浓度和元素硫的环境限制条件直接确定材料的耐SSC/SCC性能。

b) 如果CRA层有基于满意的现场使用经验的评定，可不进行SSC/SCC试验评价。该评定应遵循ISO 15156-3:2015的规定，现场使用经验评定应满足如下要求：

1) CRA材料的描述应包括但不限于如下信息：化学成分、制造方法、产品形式、强度、硬度、冷加工、热处理状态和微观组织；复合钢管的CRA层应与提供的现场经验所使用材料信息相一致；

2) 已获得经验的使用环境描述应包括但不限于如下要求：总压、CO_2分压，H_2S分压、pH值、溶解的氯化物或其他卤化物浓度、元素硫或其他氧化物浓度、温度、电偶效应、应力状态、材料与介质接触时间，以及由于环境控制措施失效造成的材质接触环境条件；

3) 设备现场连续成功运行不应少于2年，且应包括现场使用之后由第三方对设备全面检查结果；

4) 复合钢管预期使用环境苛刻程度不能超过现场经验所提供的环境条件；

5) 现场满意的应用经验可由设备使用方或复合钢管制造商提供，但应获得购方和管线设计方认可，CRA材料现场使用经验应有完整的文件记录。

c) 如果无法满足D.2.1a)和D.2.1b)要求，应依据D.2.2～D.2.6规定的方法进行SSC/SCC试验。

D.2.2 试验方法

D.2.2.1 依据GB/T 15970.2采用四点弯曲法对CRA材料进行SSC/SCC试验。试样加载应力为材料的100%$R_{t0.5}$。若征得购买方同意并有证明文件，可选择较低的加载应力。

D.2.2.2 对于焊接试样，通常用母材的屈服强度来确定试验应力。

D.2.3 试验环境

D.2.3.1 SSC/SCC试验宜在复合钢管输送流体模拟环境中进行。当复合钢管的输送流体环境不够明确时，经购方和制造商协商，可选用ISO 15156-3:2015表E.1中所列出的试验环境或其他试验条件。

D.2.3.2 SSC/SCC试验应采用高压釜实现高温高压输送流体环境的模拟，方法宜依据ASTM G111

进行。

D.2.3.3 在确定试验条件时，应考虑在管道系统运行失常或停工等期间可能发生的情况，应考虑 CRA 层可能接触到的低 pH 值的冷凝水或用于生产井增产的酸液的情况。在有增产酸液情况下，应考虑返排期间出现的环境条件。

D.2.3.4 试验条件应控制和记录下列因素：

——总压；

——H_2S 分压；

——CO_2 分压；

——温度；

——试验溶液的 pH 值；

——试验溶液的组成；

——单质硫(S^0)；

——不同金属的电耦合(应记录面积比和耦合合金类型)。

D.2.3.5 在所有情形下，试验环境中 H_2S 分压、CO_2 分压、氯化物和单质 S^0 浓度至少应与预期使用的环境一样苛刻，必要时可采用多个不同试验环境。

D.2.3.6 高压釜中溶液体积和试样接触溶液的表面积的比不应低于 30 mL/cm^2。

D.2.4 试验周期

试验的最短周期至少应为 720 h，试验期间不应中断试验。选择较短的试验周期，应征得购买方同意并应有证明文件。

D.2.5 试样

D.2.5.1 应按照 8.3 规定的组批方式，从每批成品复合钢管中抽取不少于 1 根加工 SSC/SCC 试验用试样。

D.2.5.2 试样应由 CRA 层上截取，SSC/SCC 试验用试样应满足以下要求：

a) 若 CRA 层带有纵向焊缝，母材试样应沿圆周方向在距离焊缝 90°、180°和 270°位置分别取 1 件纵向试样，焊缝试样应取 3 件横向试样，且焊缝应位于试样中心；

b) 若 CRA 层为无缝管或堆焊层，应沿圆周方向各 120°位置分别取 1 件纵向试样；

c) 衬里复合管应从衬里层和端部堆焊层(若有)各取一组试样；

d) 每 3 件试样作为一组，试样尺寸与加工应符合 GB/T 15970.2 要求；

e) 应采取冷切割或等离子切割方式取样，试样上的碳钢或低合金钢应清除干净。

D.2.6 合格性验收

D.2.6.1 经 SSC/SCC 试验后，目测试样标距段没有断裂或放大 10 倍未发现裂纹为通过该项检验。标距段如果有裂纹应采用金相显微镜观察以确定裂纹是否属于环境敏感断裂。

D.2.6.2 每组试样中全部试样通过检验则判该组试样通过 SSC/SCC 检验，若试样表面有金属损失的任何腐蚀迹象(包括点蚀或缝隙腐蚀)，应被报告。

D.3 失重腐蚀和点腐蚀试验

D.3.1 试验方法

D.3.1.1 失重腐蚀和点腐蚀试验宜采用高温高压挂片法进行，试验方法宜依据 ASTM G111 进行。经购方与制造商协商，也可在进行 SSC/SCC 试验时，检测 SSC/SCC 试样前后质量变化以及表面腐蚀形

貌取得失重腐蚀和点腐蚀结果。

D.3.1.2 单个试样的平均腐蚀速率是由单位面积的金属质量损失和试验时间决定，计算方法见式(D.1)：

$$\nu_{corr}=\frac{365\ 000\cdot\Delta W}{\rho\cdot T_{corr}\cdot S} \qquad \cdots\cdots(D.1)$$

式中：

ν_{corr} ——平均腐蚀速率，单位为毫米每年(mm/a)；

ΔW ——腐蚀试样的质量损失，单位为克(g)；

ρ ——试样材料的密度，单位为克每立方厘米(g/cm^3)；

T_{corr} ——腐蚀试验时间，单位为天(d)；

S ——腐蚀试样面积，单位为平方毫米(mm^2)。

D.3.1.3 计算一组试样中3件平行试样的算术平均值作为材料平均失重腐蚀速率，并应报告3件平行试样腐蚀速率的单个值。

D.3.1.4 试验后应对试样表面进行放大(放大5～10倍)观察，若有点腐蚀坑存在，应依据GB/T 18590对点腐蚀坑的大小、分布密度及分布均匀性、深度(平均深度和最大深度)进行检测并报告。

D.3.2 试验环境

依据D.2.3进行。

D.3.3 试验周期

失重腐蚀和点腐蚀在高压釜中的试验周期至少应为720 h，试验期间不应中断试验。选择较短的试验周期，应征得购方同意并应有证明文件。

D.3.4 试样

应按照8.3规定的组批方式，从每批成品复合钢管中抽取不少于1根加工试样，试样应由CRA层上截取，失重腐蚀和点腐蚀试验用试样应符合以下要求：

a) 若CRA层带有纵向焊缝，母材试样应沿圆周方向在距离焊缝90°、180°和270°位置分别取1件纵向试样，焊缝试样应取3件纵向试样，且焊缝应位于试样中心；

b) 若CRA层为无缝管或堆焊层，应沿圆周方向各120°位置分别取1件纵向试样；

c) 衬里复合管取样位置应包括衬里层和端部堆焊层(若可取样)；

d) 每3件试样作为一组，试样尺寸(长×宽)宜为40 mm～50 mm(长)×10 mm～15 mm(宽)，厚度宜为2 mm～3 mm或衬里层实际厚度，试样一端可有一个直径5 mm～6 mm通孔用于悬挂；

e) 应采取冷切割或等离子切割方式取样，试样上的碳钢或低合金钢应清除干净，试验前试样表面宜用湿砂纸打磨至粗糙度Ra0.2以下；

f) 试验后试样的清洗宜依据ASTM G1进行。

D.3.5 合格性验收

除非购方与制造商另有协议，每组试样平均失重腐蚀速率和单个值均不应大于0.025 mm/a。点腐蚀合格性判据由购方与制造商协商确定。

附 录 E
（规范性附录）
缺欠和缺陷的处理

E.1 表面缺欠处理

未被判为缺陷的缺欠可不经修补，或按 E.2 采用修磨方法处理。

E.2 可修磨表面缺陷的处理

E.2.1 修磨应圆滑过渡，修磨后的焊缝表面不应低于母材表面。

E.2.2 修磨后的部位应进行目视检查和 PT，以确认缺陷已经完全消除，且应按照 7.17.2 要求对修磨后的部位测厚，最小剩余壁厚应满足 6.18.3 要求，否则，按 E.4 处理。外径和椭圆度的负偏差不适用于修磨区域。

E.2.3 CRA 层的修磨应采用专用的砂轮片，以防止 CRA 被污染。

E.3 缺陷修补焊接

E.3.1 不应对基层母材和 CRA 层母材任何部分进行焊接修补。

E.3.2 不应对距管端 100 mm 以内和焊缝两侧 50 mm 宽的范围内的未结合缺陷进行焊接修补。

E.3.3 应对基层填充金属焊缝的非裂纹缺陷进行焊接修补，补焊前应彻底清除缺陷，修补后的基层焊缝应进行 UT 和 RT，并满足 7.18.3 要求。

E.3.4 除非另有协议，距管端 100 mm 以内的 CRA 层纵向焊缝不应进行焊接修补。单根复合钢管的 CRA 层纵向焊缝的焊接修补点不应多于 3 处，单个修补点长度不应小于 50 mm，修补焊缝相邻间距不应小于 100 mm，且修补焊缝总长度不应大于复合钢管焊缝总长度的 5%。修补后的衬里层焊缝应进行 PT 且应符合 NB/T 47013.5—2015 中Ⅰ级要求。修补后的内覆层焊缝应进行 UT 或 RT，并满足 7.18.3 要求。

E.3.5 除 E.3.2 所述情形外，若经购方许可，制造商可对未达到 7.18.3.1.1 要求的内覆复合钢管的未结合缺陷进行焊接修补，修补前应采用修磨方法将未结合缺陷彻底清除，并进行 PT 以确认缺陷已清除，补焊后的部位应进行 UT 和 PT，UT 结果应符合 7.18.3.1 要求，PT 结果应符合 NB/T 47013.5—2015 中Ⅰ级要求。

E.3.6 CRA 层焊接修补部位的总面积不应大于单根复合钢管 CRA 层总面积的 1%，经焊接修补后的 CRA 层的耐腐蚀性能不应低于母材。

E.3.7 修补焊接的焊工、焊接工艺规程及评定应符合 5.5.1 要求，并应作出补焊记录，补焊记录应附在产品质量证明书中。

E.3.8 所有缺陷同一位置只允许进行一次焊接修补，焊接修补后应按照 7.15 要求进行静水压试验。

E.3.9 经修补焊接后，仍无法满足本标准要求的复合钢管，应按 E.4 处理。

E.4 不可修整缺陷复合钢管的处理

带有不可修整缺陷的复合钢管应按如下一种方法处置：

a) 若长度可满足要求，应切除存在缺陷的管段；

b) 拒收整根复合钢管。

参 考 文 献

[1] GB/T 13305 不锈钢中α-相面积含量金相测定法

[2] GB/T 25150 工业设备化学清洗中奥氏体不锈钢钝化膜质量的测试方法 蓝点法

[3] ASTM A751 Standard test methods, practices, and terminology for chemical analysis of steel products

[4] ASTM B499 Test method for measurement of coating thicknesses by the magnetic method: nonmagnetic coatings on magnetic basis metals

[5] ASTM E353 Standard test methods for chemical analysis of stainless, heat-resisting, maraging, and other similar chromium-nickel-iron alloys

[6] ASTM E797 Standard practice for measuring thickness by manual ultrasonic pulse-echo contact method

[7] ASTM G1 Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens

[8] ASTM G111 Standard guide for corrosion tests in high temperature or high pressure environment, or both

[9] NACE TM 0177 Laboratory testing of metals for resistance to sulfide stress cracking and stress corrosion cracking in H_2S environments

[10] NACE TM 0284 Standard test method—evaluation of pipeline and pressure vessel steels for resistance to hydrogen-induced cracking