

# 高频焊管水压失效分析与质量控制

常海锋<sup>1,2</sup>, 王 晰<sup>2</sup>, 赵 坤<sup>3</sup>, 陈佳遥<sup>2</sup>, 常永乐<sup>3</sup>

(1. 西安石油大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 宝鸡住金石油钢管有限公司, 陕西 宝鸡 721008; 3. 宝鸡石油钢管有限责任公司, 陕西 宝鸡 721008)

**摘要:** 介绍了 HFW 焊管水压失效处理流程, 并结合实际生产情况提出具体的应对措施。分析认为: HFW 焊管静水压试验失效涉及焊缝和原料两方面质量因素; 若出现水压失效, 首先借助断口形貌、金相组织、电镜分析及机械性能试验确定失效源头, 再由失效原因及分布情况来决定复检范围, 最终保证 HFW 焊管质量。

**关键词:** HFW 焊管; 焊缝; 水压试验; 失效分析; 复检

**中图分类号:** TG335.75 **文献标志码:** B **文章编号:** 1001-2311(2015)03-0036-04

## Analysis of Hydrostatic Test Failure of High-frequency Welded Pipe and Relevant Quality Controls

CHANG Haifeng<sup>1,2</sup>, WANG Xi<sup>2</sup>, ZHAO Kun<sup>3</sup>, CHEN Jiayao<sup>2</sup>, CHANG Yongle<sup>3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;  
2. Baoji-SMI Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, China;  
3. Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, China)

**Abstract:** Described in the paper are the processing flow of hydrostatic test failure of the HFW pipe, and specific countermeasures as proposed based on actual operation circumstances. Relevant analysis leads to the conclusion as follows. The said failure involves two quality elements, i.e., weld and material. In case of the failure, the failure origin has to be firstly identified by means of fracture morphology and metallographic structure analyses, electron microscopic analysis and mechanical tests, and then based on the failure causes and failure distribution, the re-test scope is determined in a bid to ensure final quality of the HFW pipe.

**Key words:** HFW pipe; weld; hydrostatic test; failure analysis; re-test

直缝高频电阻焊(HFW)管是一种利用高频电流的集肤效应和临近效应, 将管坯边缘迅速加热到焊接温度后, 通过挤压辊挤压使钢带焊接在一起的制管方法<sup>[1-2]</sup>。由于 HFW 焊管外形美观, 生产效率高, 制造成本低、尺寸精度高等优点, 已广泛应用于油气输送管线工程<sup>[3-5]</sup>。

静水压试验是 HFW 焊管制造过程中较全面的质量检测手段, 通过打压测试, 可以在不破坏试样的情况下测试每根钢管母材、焊缝的强度与韧性指

标是否满足管线项目设计规范。本文通过对水压失效爆口进行断口形貌、金相组织、电镜扫描分析, 总结出一套水压失效后的分析方法, 以查找失效原因, 并提出有效地整批钢管生产质量控制对策。

### 1 水压失效处理流程

油气输送用 HFW 焊管行业标准要求每根钢管应进行静水压试验, 试验过程中整个焊缝或管体无泄漏, 试验后无形状的变化和管壁鼓起。静水压试验压力  $P$  由公式(1)确定, 稳压时间为5~15 s<sup>[6-8]</sup>。

$$P=2\delta t/D \quad (1)$$

式中  $\delta$  —— 环向应力, 其数值等于钢管规定最小屈服强度  $SMYS$  的百分数, 取 85%~

常海锋(1983-), 男, 在读工程硕士, 工程师, 主要从事 HFW 焊管质量管理工作, 主要研究方向是 HFW 焊管的无损检测与生产技术管理。

95%(按内控标准), MPa;

$t$  —— 壁厚, mm;

$D$  —— 钢管外径, mm。

在 HFW 焊管制造过程中, 出现水压失效的表现形式主要分为压爆和泄漏两类。HFW 焊管水压失效处理流程如图 1 所示。

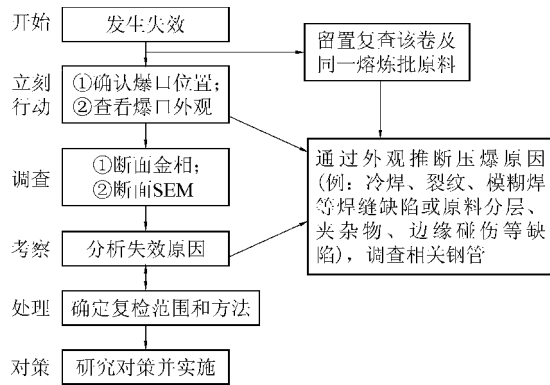


图 1 HFW 焊管水压失效处理流程

## 2 案例分析

### 2.1 爆口断面形貌

某成品管线管规格为  $\Phi 323.9 \text{ mm} \times 7.1 \text{ mm}$ , 钢级为 L360M, 静水压失效后, 从最大断口处(起裂点)的金相形貌可以判断爆口发生在焊缝边缘的母材上, 开裂长度 940 mm, 开裂最大宽度 62 mm, 距钢管一端 2 050 mm。爆破管所属熔炼批共有 4 卷原料, 水压试验后焊缝全长超声波探伤判降级共计 35 根钢管。爆口形貌如图 2~3 所示, 从断口情况来看, 断裂前发生显著的塑性变形, 断面为斜断口, 呈纤维状撕裂, 壁厚有减薄, 色泽灰暗, 断口边缘有剪切唇, 壁厚中部存在疑似分层缺陷, 属于管线钢韧性断裂。

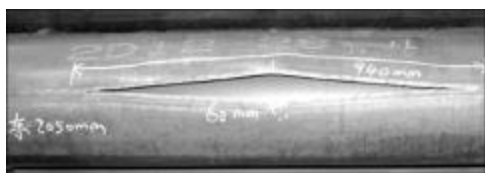


图 2 爆口宏观形貌

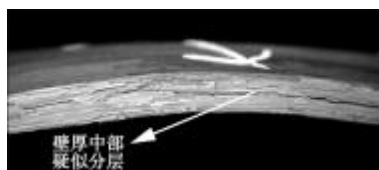


图 3 最大断口形貌

### 2.2 金相分析

采用 Nikon EPIPHOT200 光学显微镜进行组织观察, 沿着横向观察(与轧向垂直)金相组织。观察结果为: 最大爆口处母材的金相组织为铁素体+珠光体, 为正常组织, 如图 4 所示; 热影响区组织也为铁素体+珠光体, 但晶粒略粗大, 局部存在脱碳现象, 为正常组织。最大爆口壁厚中部存在大量密集分布的夹杂物, 夹杂物分布与形貌如图 5 所示。根据 GB/T 10561—2005《钢中非金属夹杂物含量的测定 标准评级图显微检验法》标准<sup>[9]</sup>进行夹杂物评定, 结果为 B 类, 即夹杂物主要为氧化物夹杂。由于金相试样是垂直于轧制方向取样, 理论上是不易观察到夹杂物, 尤其是带状夹杂物, 因此初步判断横向观察到的带状杂质为夹渣。从起裂口金相宏观照片看, 焊缝外表面延伸至壁厚中部断裂, 焊缝流线、组织晶粒均无异样。起裂口与爆破延伸线上的金相都能看到平行分布的夹杂物, 部分部位聚集分布。同时, 探伤检测金相试样均存在大量密集分布的 B 类夹杂物, 其最高达到 3.0 级。

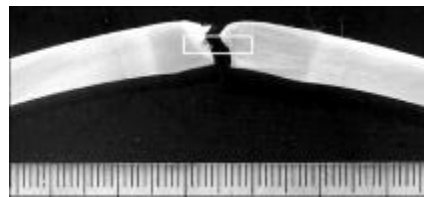


图 4 最大爆口处金相形貌

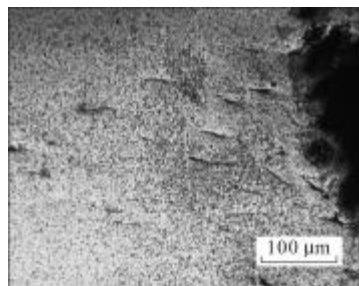
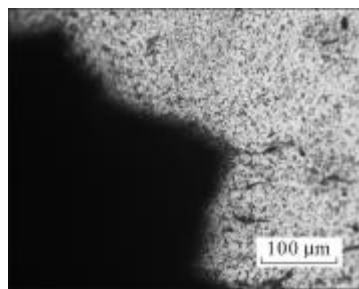


图 5 最大爆口处壁厚中部微观形貌

取爆口处试样做化学分析, 结果见表 1。起裂口试样各项化学元素均在正常范围内, 满足管线标

准要求, 无异常元素波动; 金相组织为铁素体+珠光体, 为 L360M 材质 HFW 焊管的正常组织。

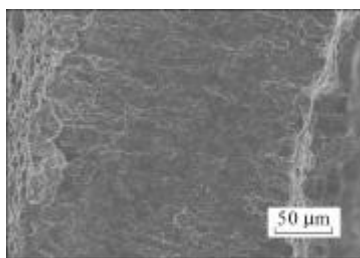
表 1 爆口处材料的化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Nb	Ti	V	%
0.08	0.15	0.97	0.014	0.004	0.01	0.04	0.05	0.01	0.01	0.003	

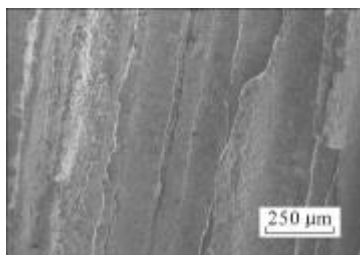
高频焊接时, 通过测量金属流线升角大小以及熔合线宽度, 能够很好地判断焊接过程热输入、挤压力和焊接速度等参数控制的稳定性, 从而达到分析焊缝质量的目的<sup>[10]</sup>。测量熔合线两侧壁厚 1/4 处金属流线升角分别为 57°、64°、66°、67°, 说明熔合线两侧金属流线对称性良好, 且符合国内焊管行业提出的 50°~70°控制范围<sup>[11]</sup>。壁厚中部熔合线宽度、内壁侧熔合线宽度、外壁侧熔合线宽度分别为 62.2, 78.3, 83.5 μm, 满足熔合线宽度控制范围。合理的金属流线升角和熔合线宽度控制, 说明焊接过程工艺参数稳定, 焊接质量良好。

### 2.3 断口电镜扫描

对断口宏观显示为疑似分层(图 3)区域放大后观察发现: 中部断面平坦, 边部存在韧窝; 有条状分布的夹杂物, 微观上存在韧窝和河流花样, 形似准解理裂纹<sup>[12-13]</sup>, 如图 6 所示。对断口处存在的夹杂物进行能谱分析, 如图 7 所示, 其主要成分为 Ca、Al、Mg、Na 等元素, 说明杂质相既有来源于保护渣卷入的夹渣, 又含有炼钢过程中产生的 Ca、Al 等氧化物夹杂。



(a)



(b)

图 6 断口形貌局部放大

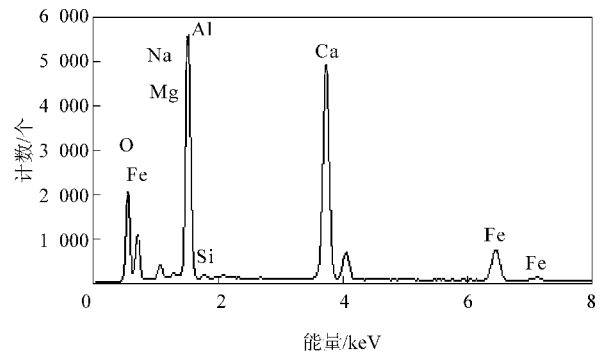


图 7 夹杂物能谱分析结果

## 3 分析结果及对策

### 3.1 分析结果

根据以上分析, 水压爆破 HFW 焊管焊缝附近母材存在大量夹杂物, 在爆口处有一较大条带状夹杂物, 导致钢管在水压试验时爆破。母材夹杂物、缺陷层状分布是导致钢管水压试验时爆破的主要原因。所取分析试样表明原料组织中存在超标的 B 类夹杂物, 且存在夹渣。形成的原因是: 钢在冶炼过程中, 脱氧反应会产生氧化物等产物, 若在钢液凝固前未浮出, 则将留在钢中; 连铸过程中保护渣也可能卷入铸坯中; 经轧制后, 这些非金属夹杂(渣)物颗粒沿轧制方向延长, 呈条状或颗粒状分布于轧制后的钢板中, 由于夹杂物熔点较高, 属脆性夹杂<sup>[14]</sup>。因此, 在 HFW 焊管水压试验中, 大量密集分布、呈条带状的夹杂(渣)附近是试样中残余应力聚集位置, 易成为裂纹源, 裂纹扩展容易造成爆管开裂。

### 3.2 对策

(1) 将该熔炼批卷板制成的成品钢管全部留置复查。

(2) 对留置复查的钢管采取更严格的水压试验, 水压压力值计算采用(95%~98%)SMYS, 但前提是钢管管径与周长不得超差。

(3) 加强水压试验前在线超声波的检验监控力度, 出现探伤报警时应做好标记, 然后集中下线复

查。同时,水压试验后离线超声波探伤时,在基准探伤灵敏度基础上提高 3 dB,采用手动低速探伤,扩大焊缝区域母材的扫查范围,保证钢管焊缝周围分层、夹杂物能够有效检出。

(4) 对于钢管水压试验的盲区部分,钢管管端分层检测采用超声波纵波直探头探伤。探头采用盲区小、大声束交区(深度 10 mm)的联合双晶片直探头,晶片尺寸 8 mm×12 mm,频率为 5 MHz,探头隔声层垂直于探头移动方向的扫查方式来保证分层缺陷不漏检。

#### 4 结 语

HFW 焊管静水压试验失效涉及到焊缝和原料两方面质量因素,一旦出现水压失效,首先要有针对性地查找原因,借助断口形貌、金相、电镜分析及机械性能试验(拉伸、硬度、夏比冲击)对存在失效可能性的方面要逐一找到证据消除,最终定性失效源头。其次,由失效原因及分布情况来决定复检范围。若是冷焊、模糊焊等焊接原因造成,可确定焊管一次开机范围内的钢管复查;若是原料分层、夹杂物、带钢边缘不良等母材缺陷造成,可针对具体卷板熔炼批和上料卷数确定复查范围;若失效原因严重地涉及到整卷或整熔炼批钢管,可考虑整批降级。最终,通过有效的检验机制,保证投入油气输送管网中的 HFw 钢管安全运行。

#### 5 参 考 文 献

[1] 李景学. HFw 焊管焊接质量的影响因素分析及应对措施

施[J]. 焊管, 2011, 34(2): 54-57, 62.

- [2] 介升旗. 高频焊管常见焊接缺陷分析[J]. 焊管, 2003, 26(4): 47-51.
- [3] 王旭. 油气输送管线钢管制造与装备技术的现状与展望[J]. 钢管, 2012, 41(1): 7-13.
- [4] 胡松林. 中直径管线管用 HFw 焊管的开发及进展[J]. 钢管, 2013, 42(5): 9-13.
- [5] 史宏德, 田青超, 丁维军, 等. 宝钢 HFw 石油套管的研发现状和前景[J]. 钢管, 2013, 42(6): 5-8.
- [6] GB/T 9711—2011 石油天然气工业管线输送系统用钢管[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [7] CDP-S-NGP-PL-006-2011-2 天然气管道工程钢管通用技术条件[S]. 2011.
- [8] American Petroleum Institute. API Spec 5L: 2012 Specification for line pipe[S]. 45th. Washington, D.C: API Publishing, 2012.
- [9] GB/T 10561—2005 钢中非金属夹杂物含量的测定 标准评级图显微检验法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [10] 毕洪运, 陆明和. HFw 直缝焊管焊缝形态与金相检验评价[J]. 宝钢技术, 2006(3): 23-26.
- [11] 黄有阳. 高频焊管金属流线的形成形态与分析[J]. 钢管, 2000, 29(6): 31-36.
- [12] 中国机械工程学会无损检测分会. 超声波检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [13] 高惠临. 管线钢与管线钢管[M]. 北京: 中国石化出版社, 2012.
- [14] 张莉萍, 葛建国, 赵爱军. 浅谈钢中夹杂物的控制对钢质量的影响[J]. 包钢科技, 2002, 28(4): 85-88.

(收稿日期: 2015-01-23; 修定日期: 2015-04-27)

#### ● 信 息

### 天津钢管集团股份有限公司超超临界电站用 P92 无缝钢管首次实现国内供货

2015 年 5 月, 天津钢管集团股份有限公司超超临界机组用  $\Phi 406.4 \text{ mm} \times 42 \text{ mm}$  规格 P92 无缝钢管成功实现国内首次供货, 进一步拓宽了该公司电站行业用无缝钢管的品种范围。

P92 钢是目前高温性能最为优异的铁素体耐热钢钢种之一, 具有优异的高温组织稳定性和持久强度, 在 600 ℃ 的高温持久强度比 P91 钢约高 30%。P92 无缝钢管广泛应用于超超临界火力发电机组主蒸汽管道、再热器管道及集箱等高温构件。使用 P92 无缝钢管可以降低管道壁厚和结构质量, 提高火力发电机组的灵活性和效率。

该 P92 无缝钢管的几何尺寸、表面质量和各项性能指标均满足 ASME SA 335/SA 335M—2010《高温用无缝铁素体合金钢公称管》和用户技术协议要求, 已发往用户现场。

(天津钢管集团股份有限公司 周晓锋)