

含有咬边的 1Cr5Mo 输送管道焊接接头失效分析

梁晓曦¹ 刘 婕² 孙宝财¹ 李 沧¹

(1. 甘肃省特种设备检验检测研究院, 甘肃 兰州 730000)

(2. 中国石油天然气股份有限公司玉门油田分公司炼油化工总厂, 甘肃 酒泉 735000)

摘要: 某管道焊接接头处发生泄漏, 该管道材质为 1Cr5Mo, 对失效处进行了宏观检查、能谱分析、金相分析、断口微观分析。结果表明: 焊接接头存在内咬边, 应力集中, 此处组织为马氏体与贝氏体的混合组织, 管线输送介质为氢气 + 油气, 含有微量硫化物, 硫化物是导致管线发生应力腐蚀开裂的主要原因。

关键词: 内咬边 Inner undercut; 硫化物应力腐蚀 Sulfide stress corrosion; 应力集中 Stress concentration

某炼油厂重整加氢反应器入口管线某焊缝处出现介质泄漏, 该管线运行压力为 4.2MPa, 运行温度为 296℃, 介质为氢气与汽油油气, 管子材质为 1Cr5Mo, 已投用 22 年。该管线泄漏后, 对失效部位进行割除, 通过宏观检查、能谱分析、金相分析、断口微观分析等方式进行管子焊口失效分析。

1 宏观检查



图 1 失效位置图

图 1 中标注位置为管线泄漏部位, 泄漏位置位于管子异径三通的异径支线焊缝处, 裂缝长度为 30mm。



图 2 切割下来的失效部位



图 3 失效处内表面

图 2 为泄漏处的焊缝沿环向切割的取样, 图 2 中的 4# 部位为裂缝处; 3# 部位为裂缝的尾端。

图 3 为失效处 (4# 位置) 内表面宏观照片, 可以看出, 泄漏裂缝的起始位置为焊缝内表面, 泄漏处明显有焊接缺欠——咬边。



图 4 图 2 中 3# 位置 (裂缝尾端) 宏观照片



图 5 图 2 中 4# 位置 (裂缝处) 宏观照片

图 4, 图 5 为图 2 中 3# 和 4# 位置截取的样品横截面宏观照片, 可以看出, 裂缝贯穿于整个焊缝厚度, 且截止于咬边终点处。通过宏观检查分析: 焊接接头的咬边造成几何形状突变, 在工作压力的作用下, 容易造成应力集中, 成为了失效危险点。

2 能谱分析

样品内壁有腐蚀后的腐蚀产物, 通过对腐蚀产物的能谱分析, 分析结果见图 6, 其中 on 个 C 原子数百分比最高, 依次为 Fe、S、O, 管线输送介质为氢气和汽油油气, 在管子内壁形成碳化物和硫化物的沉积, 其中硫化物是造成应力腐蚀的腐蚀介质。

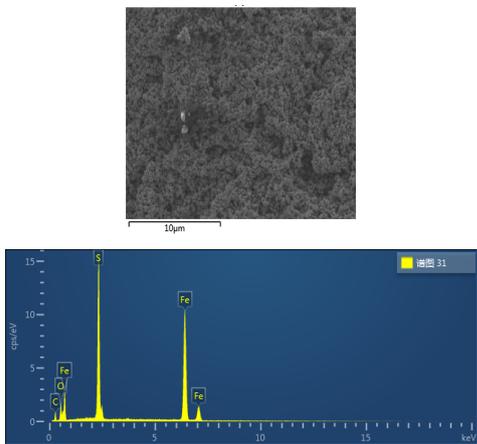


图6 样品内壁腐蚀产物能谱分析

3 金相分析

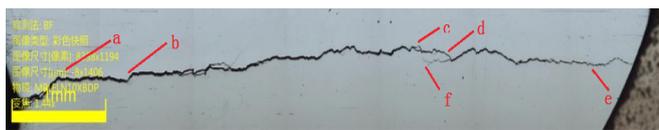


图7 图2中3#位置裂纹全貌图

图7为图4中3#试样的焊缝横截面裂纹图，从图中可以看出，裂纹贯穿于整个焊缝厚度方向，从裂纹的大小及扩展的方向上可以看出，裂纹不仅从焊缝厚度方向由内向外扩展，而且还有从裂纹源处沿焊缝环向扩展，形成一个贯穿焊缝厚度方向并沿焊缝环向开裂有一定长度的断面。

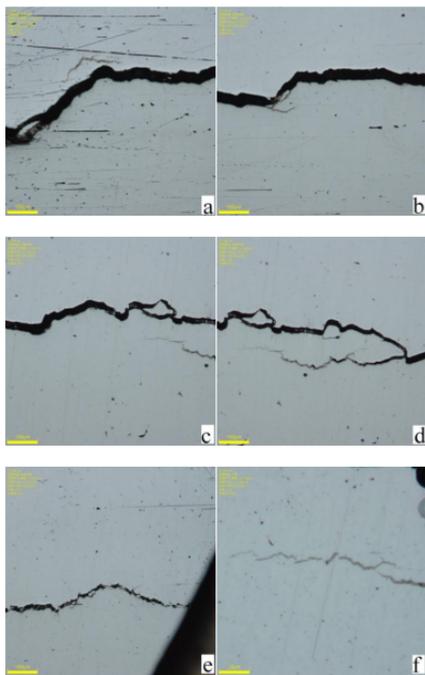


图8 图7中a、b、c、d、e、f处裂纹放大金相图

图8中的各图分别为图8中对应位置标注的放大图，a图为截面上裂纹最宽处，裂纹上端有一条沿焊

缝环向的裂纹；b图左边除了主裂纹改变方向继续扩展外，还产生了许多细小的二次裂纹；c图右边的裂纹出现分支，从左向右看有一个分支，扩展了一段后又与主裂纹汇合；d图中间有一条很细小的二次裂纹，与主裂纹共同形成了树枝状裂纹，是应力腐蚀开裂的典型特征之一；在d图中，主裂纹方向改变处出现了一支树枝状分支，f图为分支末端放大图，可以看出裂纹尖端不尖锐，并且有大量的二次裂纹；e图可以看出在管子外表面有大量的二次裂纹产生。

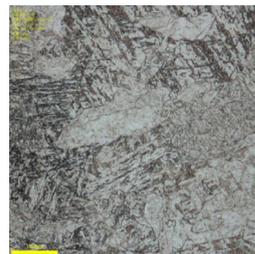


图9 图2中2#位置横截面金相组织图

图9为无裂纹2#位置横截面金相组织图，焊接接头组织形貌复杂，有多种组织组成，分别为板条状马氏体、针状的下贝氏体、粒状的贝氏体、铁素体。



图10 图2中3#位置裂纹金相全貌图

图10为图2中3#位置裂纹的金相全貌图，图11为3#位置不同部位的金相放大图，可以看出，4张放大图的金相组织均为马氏体+下贝氏体+粒状贝氏体+铁素体，晶粒大小接近，并与图9相比，裂纹处试样和完好处试样金相组织相同，晶粒大小接近，说明此处裂纹与焊缝金相组织没有关系。

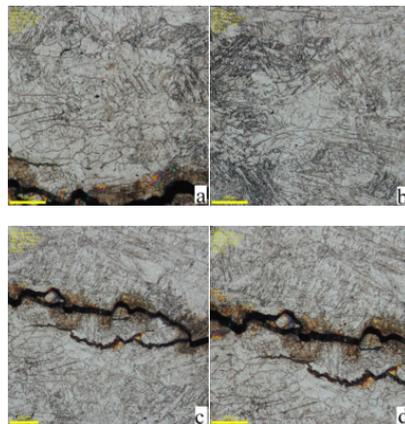


图11 3#位置不同部位金相放大图

图11中的d图是c图裂纹尖端分支的放大金相图，裂纹的扩展沿着晶界，为沿晶开裂。

4 断口微观分析



图 12 图 2 中 4# 位置裂缝断口宏观形貌图

将图 2 中 4# 位置裂缝处剥离后的断口形貌如图 12 所示，可看出，由焊缝内壁处起裂，向四周呈“放射状”扩展，图中 1、2、3 位置分别是焊缝内壁三个起裂源，此处是焊缝焊接缺欠咬边的位置，咬边处几何形状不连续，在工作应力的作用下，造成咬边处应力集中，首先发生开裂，形成了起裂源。

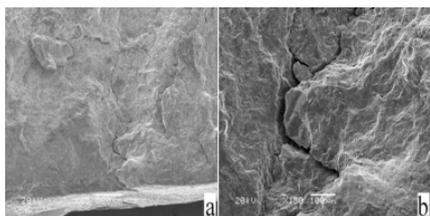


图 13 裂纹源处扫描电镜图

图 13 为图 12 裂纹源 1 位置的扫描电镜图，a 图所示裂纹源较平坦，有很多二次裂纹，将二次裂纹放大后，见 b 图，发现二次裂纹上还有许多分支，且二次裂纹旁边的断口呈河流花样状，为脆性开裂。

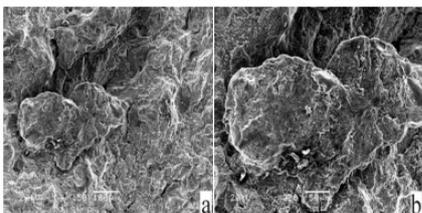


图 14 裂纹扩展区扫描电镜图

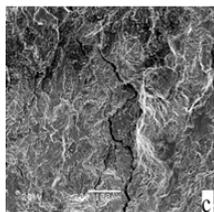
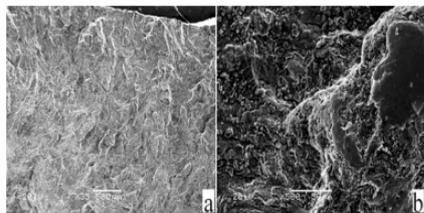


图 15 终断区扫描电镜形貌图

图 14 为裂纹扩展区扫描电镜形貌图，a 图中有扇

形花样出现，将其放大得到 b 图，可见是脆性断口中的解理断口；起裂源和扩展区均有大量的二次裂纹出现。

图 15 为图 13 最上面区域终断区扫描电镜形貌图，a 图所示，终断区呈山脊花样，也是解理断口特征，将脊背处放大后如图 b，上面有许多未清洗干净的腐蚀产物。将终断区放大会发现有大量的二次裂纹，且二次裂纹上有大量的分支，呈树枝状，此为应力腐蚀的特征。

断口微观分析：宏观断口呈放射条纹，由三个起裂源向四周扩展，断口为脆性断口形貌；微观断口上起裂源处断口为河流花样，扩展区呈扇形花样，终断区呈山脊花样，均为脆性断口中的解理断口特征。在三个断口区域中都有大量的树枝状二次裂纹，且断口上覆盖有腐蚀产物，由此可判断该焊接接头的失效为应力腐蚀开裂。

5 结果与分析

通过对失效试件进行宏观检查、能谱分析、金相分析、断口微观分析，得出造成该焊接接头开裂的原因如下：该焊接接头焊接时出现焊接缺欠——内咬边，咬边的不连续性容易形成应力集中，为开裂提供了起裂源。通过金相分析，发现断口处的金相组织与完好处的金相组织接近，说明开裂与焊接接头的金相组织没有关系；再进行微观断口分析后，观察断口处扫描电镜形貌图发现，起裂源、扩展区、终断区均为脆性断裂特征，且三个区域均有大量树枝状二次裂纹，且断口上覆盖有腐蚀产物，由此可判断该开裂属于应力腐蚀开裂。该管线的运行介质为氢气 + 汽油油气，通过工作参数分析，并根据“纳尔逊 (Nelson) 曲线”，运行温度 296℃ 并未达到该钢材的高温氢腐蚀的温度，故而排除高温氢腐蚀可能性；而汽油油气中除了含有 C、H、O 组份外，还有大量的硫化物和水；同时，在对断口处腐蚀产物进行能谱分析后，发现含硫量较高，由此可判断该管线焊接接头的失效模式为硫化物应力腐蚀开裂。

参考文献：

[1] 中国腐蚀与防护学会主编. 应力作用下的金属腐蚀 [D]. 北京: 化学工业出版社, 1990.

作者简介：

梁晓曦 (1989-)，男，陕西富县人，昆明理工大学材料学硕士，工程师，就职于甘肃省特种设备检验检测研究院，研究方向：化工材料。