

燃气聚乙烯管道电熔接头泄漏失效分析及缺陷评级

李 玮

上海市特种设备监督检验技术研究院有限公司 上海 200062

摘 要：聚乙烯管道电熔接头现场施工，要求焊工根据焊接作业指导书，按照管件和管材的设计参数进行焊接。然而，现场焊接时焊工往往由于技能和责任心问题导致焊缝失效。本文从电熔接头泄漏事故出发，通过宏观检验得出，现场施工强行组对使得两管材不同轴，造成管材端面垂直度偏差过大。通过对电熔接头进行数字射线检测和相控阵超声波检测，得出焊接时焊工为了赶工期，使得输入热量过高，导致电阻丝过焊偏移而形成孔洞。

关键词：电熔；失效；泄漏；数字射线；相控阵

引言

聚乙烯（PE）管因其优良的柔韧性、重量轻、便于运输和安装、经济高效的综合优势成为现代城市燃气管网的首选管材管。PE管采用两种连接方法：一种是电熔焊接；另一种是热熔焊接^[1]。现场施工过程前，需根据管件和管材的设计参数进行焊接工艺评定，形成焊接作业指导书方可施工。

然而，现场焊接时，往往存在管材未能被插入至电熔管件的限位处，造成管材与管件不同轴^[2]。在焊接通电阶段，焊接操作工出于赶工期常输入过高的电压导致过焊。

1 泄漏试样基本情况

上海某燃气公司埋地中压PE管道自2015年12月1日投入使用，至2025年12月泄漏，已服役10年。燃气管道定期检验时，采用泵吸式气体检测仪发现绿化带附近燃气泄漏，现场采样值为12600ppm。燃气公司迅速组织人员抢修，开挖显示该管道埋深为0.8米，泄漏点位于电熔接头处，材料为PE80 SDR11，规格为dn1600×14.6mm。经资料审查发现电熔管件采用半自动焊机施焊，设计压力0.4MPa，运行压力0.25MPa。

2 宏观检验

2.1 端面垂直度检验

依据TSG D2002-2006《燃气用聚乙烯管道焊接技术规则》：管材的端面应垂直于轴线，其误差小于5mm。实测该焊缝处一根管材的端面与轴线垂直方向的最大误差为5.8mm，检验结果不符合要求。

2.2 同轴度检验

根据CJJ63-2018《聚乙烯燃气管道工程技术标准》：管件相连的两管材要采用专用夹具固定以保证在同一轴线上。实测该焊缝处两管材同轴度偏差达3.0mm，检验结果不符合要求。

2.3 不圆度检验

依据GB 15558.1-2015《燃气用埋地聚乙烯（PE）管道系统》：公称外径160mm的PE管直管段最大不圆度为3.2mm。实测该焊缝处的两管材，其中一根直径最大值为16.3mm，最小值为16.4mm，不圆度为1.0mm，满足要求；另一根直径最大值为16.5mm，最小值为16.0mm，不圆度为5.0mm，检验结果不符合要求。

2.4 观察孔溢出检验

依据TSG D2002-2006《燃气用聚乙烯管道焊接技术规则》：电熔焊接观察孔只能有少量聚乙烯溢出且顶部不得呈流淌装。实测该焊缝处聚乙烯溢出未呈流淌状，检验结果符合要求。

通过宏观检验可以得出，该管件存在两方面问题：

（1）管材不圆度超出设计规范要求：可能的原因是管材质量不过关或是服役期间应力导致管材变形；（2）施工不规范：现场施工强行组对使得两管材不同轴，造成管材端面垂直度偏差过大。

3 缺陷无损检测

为了更好地“透视”焊缝内部缺陷，本文采用数字射线和相控阵超声波检测对存在电熔接头进行无损检测。数字射线检测能快速成像，对电阻丝偏移结果的直观度较高。

本文所采用的数字射线检测标准为：NB/T 47013.11-2015《承压设备无损检测 第11部分：X射线数字成像检测》，检测图谱如图1所示。

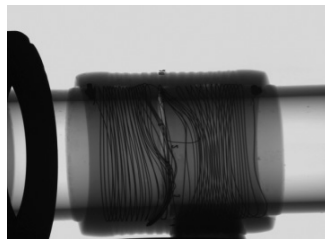


图1 数字射线检测图谱

数字射线图谱显示该焊缝处电阻丝因受到挤压而发生水平和垂直错位，局部电阻丝相互重叠在一起，不符合要求^[2]。

本文所采用的相控阵超声波检测标准为：DB31/T 1058-2017《燃气用聚乙烯（PE）管道焊接接头相控阵超声检测》，检测图谱如图2所示。

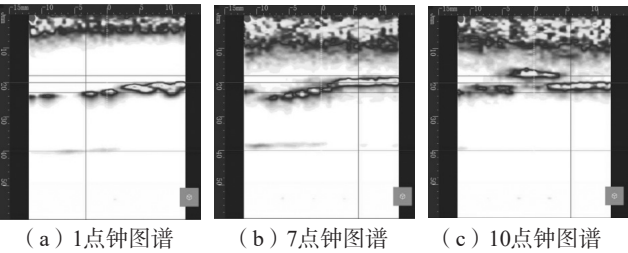


图2 相控阵超声波检测图谱

相控阵超声波图谱显示，该处焊缝在在1点钟、7点钟和10点钟方向均存在多处电阻丝重合在一起，电阻丝垂直拖尾现象消失^[3]，并且10点钟方向中间位置一根电阻丝正下方出现另外一根电阻丝，说明这些电阻丝附近存在孔洞，不符合要求。

缺陷评级：根据GB/T 43922-2024《在役聚乙烯燃气管道检验与评价》，管道定期检验的安全状况等级分为1级、2级、3级和4级，共4个级别，1级最优，4级最差，管道安全状况等级根据项目等级最低者进行评定。从上面分析可以看出，电熔接头主要缺陷是过焊导致的电阻丝错位和孔洞。

4 电阻丝错位评级

4.1 电熔接头的电阻丝错位以错位电阻丝距离正常电阻丝的水平 and 垂直偏移量来表征，如图3所示。图中用Ⅰ和Ⅱ表示正常电阻丝，Ⅲ和Ⅳ表示错位电阻丝。电阻丝Ⅲ的水平错位值为 d_1 和垂直错位值为 d_2 ，电阻丝Ⅳ的水平错位值为 d_3 和垂直错位值为 d_4 。

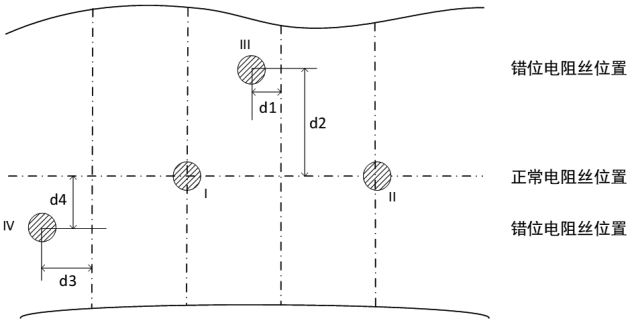


图3 电熔接头轴向剖面图

在电熔接头所有电阻丝错位值中取最大错位值，定义为水平错位和垂直错位中的最大值，如式1所示。

$$d = \max (d_1, d_2, d_3, d_4)$$
 (1)

根据GB/T 43922-2024《在役聚乙烯燃气管道检验与评价》：电阻丝存在结构畸变，电阻丝错位两大于电阻丝间距但不大于1.5倍电阻丝间距的，定义为2级；错位量大于1.5倍电阻丝间距的，定义为4级。

根据相控阵超声波检测图谱，将电阻丝错位量进行总结，如表1所示。

表1 1~12点钟电阻丝错位量

钟点数	水平最大错位量 (mm)	垂直最大错位量 (mm)
1点钟	7.0	4.2
2点钟	4.5	3.5
3点钟	5.1	4.9
4点钟	3.5	5.4
5点钟	3.8	3.0
6点钟	3.0	5.7
7点钟	7.1	4.9
8点钟	5.8	4.0
9点钟	13.2	3.9
10点钟	12.3	5.5
11点钟	12.0	3.8
12点钟	6.1	4.1

根据电熔管件质量证明书，正常的两根电阻丝水平间距为3.4mm。由表1可知，该电熔接头的水平最大错位值为13.2mm，垂直最大错位值为5.7mm，水平和垂直最大错位值均超过正常的两根电阻丝间距，定义为4级。

4.2 孔洞评级

为了能直观看清电熔接头的孔洞缺陷，本文将该接头做了轴向切割，所形成的剖面图，从图4可以看出，大面积孔洞缺陷在熔合面轴向方向上的长度 X 为22.5mm，标称的熔合面有效长度 L 为45mm， $X/L = 50\% \geq 10\%$ 。根据GB/T 43922-2024：组合孔洞缺陷累计尺寸 $X/L \geq 15\%$ ，定为4级。因此，该处缺陷评级为4级。根据上述分析，该缺陷安全状况综合评定等级为4级，不合格。



图4 拉伸试验样条

5 拉伸剥离试验

为了定量验证电熔接头熔接强度，本文依据GB 15558.2-2015《燃气用埋地聚乙烯（PE）管道系统》所示

的判定准则进行了拉伸剥离试验。拉伸剥离试验过程依据GB/T 19808-2005《塑料管材和管件 公称外径大于等于90mm的聚乙烯电熔组件的拉伸剥离试验》。将电熔接头制成宽度为25mm，长度为300mm的4块试样，通过拉伸试验机以恒定的速度对试件施加拉力，并在持续的拉力作用下最终将试件拉断，拉伸后的样条如图4所示。

试验结束后测量脆性破裂最大长度和焊口长度，根据公示（2）计算脆性剥离百分比：

$$C_c = \frac{d_2}{y} * 100\%..... \quad (2)$$

式中： d_2 为脆性破裂最大长度， y 为焊口长度， C_c 为脆性剥离百分比。

标准GB 15558.2-2015中规定只要有一块试块脆性剥离百分比超标（> 33.3%），则试验未通过，则该段焊缝不合格。由表2可知，2#、3#、4#样条均为100%脆性断裂，5#样条因手柄被拉断，试验未能顺利进行下去，故该电熔接头焊接不合格^[4]。

表2 拉伸剥离试验结果

试样编号	最大拉力 (kN)	拉伸强度 (MPa)	d_2 (mm)	y (mm)	C_c (%)
2	3.1885	7.0855	34.9	34.9	100
3	1.6576	3.6835	39.4	39.4	100
4	4.5149	10.0331	37.3	37.3	100
5	3.2278	7.1728	/	/	/

6 失效分析及整改建议

6.1 失效分析

6.1.1 通过切割下来的管道发现，承插的两根管材不同轴。其中一根管道承受外界应力，现场组焊人员强力组对，导致一根管材端面垂直度出现偏差。

6.1.2 焊接时操作工人操作使得输入热量过高，电阻丝因过焊发生孔洞而出现大面积孔洞。

6.2 整改建议

根据GB 50028-2006《城镇燃气设计规范（2020年版）》该泄漏处为四级地区。由于该处泄漏所在的区域内交通频繁，住宅密集，地铁所带来的人流量大，管道沿线环境比较复杂，为降低和化解风险，建议如下：

6.2.1 对该处管道加强巡检。

6.2.2 新建管道应严格落实焊接工艺评定和焊接操作规程，并及时将现场焊接参数上传，以便监控现场施焊情况。

参考文献

[1]江峰,于磊,刘亮.城镇聚乙烯燃气管道全面检验常见问题及处理[J].特种设备安全技术, 2022, (4) 5: 1674-1390.

[2]赵番. 数字射线在燃气聚乙烯管道电熔接头泄漏分析中的应用[J]. 化工装备技术. 2024, 45 (4) : 14-19.

[3]施建峰. 聚乙烯燃气管道超声相控阵检测工程应用案例[J]. 压力容器. 2020, 37 (12) : 54-62.

[4]周军, 赵番, 李玮. 燃气聚乙烯管道电熔接头泄漏事故失效机理分析[J]. 中国特种设备安全. 2024, (40) 8: 72-75.