

# 不锈钢管件胀裂的失效分析——EPMA 对超轻元素 N 的测试

EPMA-027

**摘要：**双相不锈钢兼具奥氏体和铁素体两相的优良特性，既能具有很好的耐腐蚀能力，又能保持良好的综合力学性能，是一类广为使用的不锈钢材料。某采用双相不锈钢的换热器管件在制作工艺中出现了胀裂裂纹，使用岛津 EPMA 分析总结出了这一失效的原因，即局部的强奥氏体形成化元素 N 的富集导致此处出现了异常的组织分布。原本两相组织含量相近的位置，由于 N 的富集，在此处形成了粗大的奥氏体单相区，其塑性和强度均比正常组织差，在加工过程中导致微裂纹萌生，最终发生胀裂现象。

**关键词：**超轻元素 氮 双相不锈钢 失效分析 EPMA

奥氏体 - 铁素体双相不锈钢，其组织由铁素体 + 奥氏体构成，这类钢提高了 Cr 的含量，或添加了其他铁素体形成元素，兼有奥氏体不锈钢与铁素体不锈钢的双重特征。具有抗点蚀、抗晶间腐蚀、抗应力腐蚀以及较好的强度、韧性和焊接性能，而且节约了 Ni，可降低成本，应用范围十分广泛。采用综合性能优越的铁素体 - 奥氏体双相不锈钢材料制作的管件在石油、

天然气、造纸、造船、化工等使用环境对材料要求一定的耐高压和抗强腐蚀等苛刻条件下运行的设备上使用较为普遍。

某采用双相不锈钢制作的换热器管件，在用胀管工艺实现管束和管板的连接时发生换热管管壁胀裂现象。为了查明出现胀裂的原因，使用岛津 EPMA 对此失效件进行了失效分析。

## ■ 实验部分

### 1.1 仪器

岛津电子探针 EPMA-1720 电子探针显微分析仪

### 1.2 分析条件

加速电压：15 kV

束流：定量测试 20nA、面分析 100nA

束斑直径：定量测试 1 $\mu$ m、面分析 MIN

测试时间：定量测试 10s、面分析 30ms/point



## ■ 样品处理

裂纹附件取样，使用树脂硬化冷镶嵌，机械磨制和抛光处理。

## ■ 结果讨论

正常组织由铁素体和奥氏体组成，铁素体分布在奥氏体基体上成条状分布，在背散射图像下，白色的为奥氏体，灰色的为铁素体，两相的比例接近 1:1。当双相钢中两项的比例接近 1:1 时，材料具有较好的力学性能和耐腐蚀性能。

双相不锈钢组织中奥氏体的存在能够降低高铬铁素体的脆性和晶粒长大倾向，提高了焊接性和韧性，铁素体则可提高不锈钢的屈服强度，抗晶间腐蚀和应力腐蚀能力，即双相组织具有高强度、高韧性的同时，还保持有高的抗应力开裂、抗点蚀、抗缝隙腐蚀的能力，尤其是在氯化物和硫化物中具有高的抗应力腐蚀开裂的能力，因此双相不锈钢可有效地解决长期以来困扰奥氏体不锈钢因局部腐蚀所致的失效问题。

使用岛津 EPMA 对胀裂区域附件的位置进行微区解析。观察结果显示，裂纹附近处为粗大奥氏体，铁素体

含量较低，而正常组织为含量约 1:1 的双相组织。选取距离裂纹不同距离的 5 个位置测试，测试位置示意图见图 1，定量分析结果见表 1。ZAF 修正模型基于电子束与基体交互作用区域范围内均质的基础上建立起来的，由于第一个测试点靠近裂纹区域，其基体致密度相对较差，会影响到 ZAF 修正的结果，所以第一点的测试总量只有 96.43%。定量测试结果表明，随着所选区域远离裂纹，N 元素含量逐渐递减，在距离裂纹 250 $\mu$ m 后的组织区域趋于基体成分含量，其他元素含量较为均匀。针对裂纹附近处的 N 元素的面分布图能够更直观地反映出这一趋势特征，面分布图见图 2 和图 3。

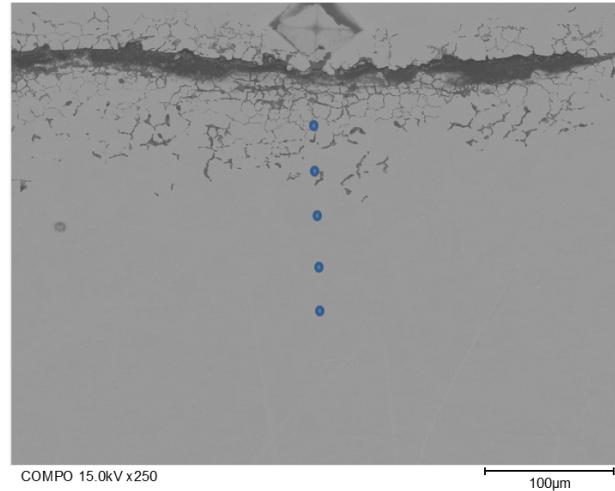


图 1 定量测试位置示意图

表 1 从裂纹附近到基体定量测试结果 (Wt%)

Data	N Ka	Si Ka	V Ka	P Ka	Cr Ka	Mo La	Mn Ka	Ni Ka	Fe Ka	Total
1	0.53	0.43	0.07	0.01	22.44	3.08	1.32	4.76	63.80	96.43
2	0.46	0.45	0.08	0.03	22.23	2.94	1.41	5.44	66.98	100.02
3	0.45	0.43	0.08	0.02	22.98	3.04	1.35	5.13	65.93	99.40
4	0.27	0.48	0.05	0.02	22.49	2.84	1.44	5.41	66.50	99.50
5	0.26	0.42	0.08	0.03	22.91	2.85	1.38	5.16	67.26	100.36

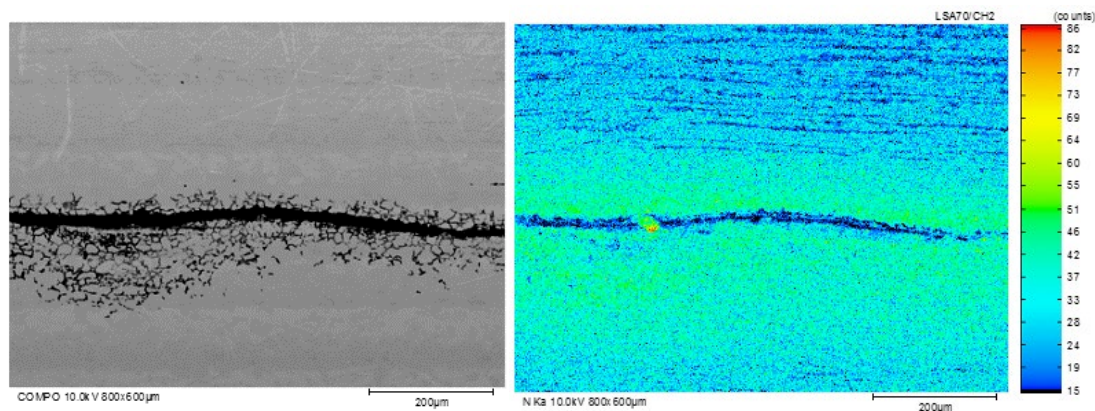


图 2 裂纹附近元素 N 的分布图

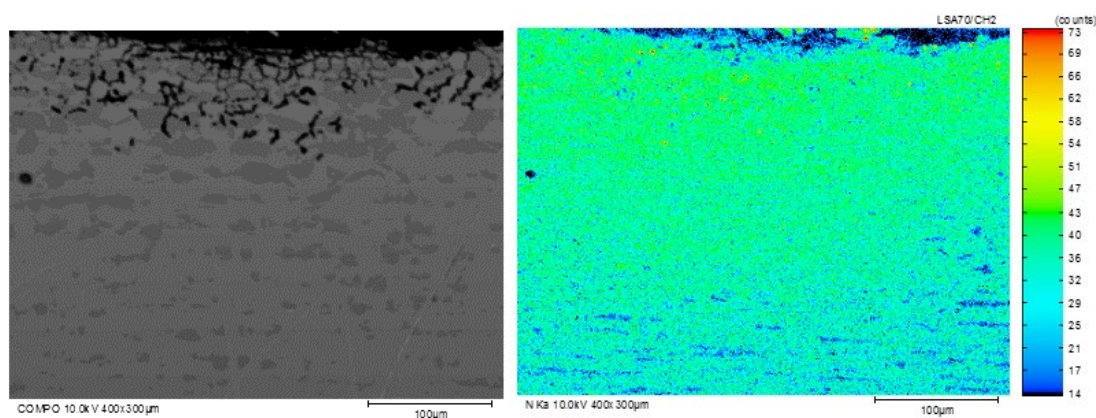


图 3 裂纹一侧元素 N 的分布图

元素 N 是双相不锈钢中的有益元素，双相不锈钢的强度和耐蚀性能因为 N 元素的合金化作用而表现的更为显著。在双相不锈钢中 N 是强奥氏体化形成元素，随着 N 含量的增加，铁素体含量逐渐减小，奥氏体逐渐增加，且晶粒尺寸增大。由于此不锈钢换热管局部的 N 的富集，导致此处出现了异常的组织分布，即晶粒尺寸粗大的奥氏体单相区在此处形成，粗大奥氏体的塑性和强度均较正常双相钢差，使得在不锈钢管在加工过程中容易萌生微裂纹，最终扩展出现胀管的现象。

## ■ 结论

使用岛津 EPMA 对出现裂纹的双相不锈钢管件进行了微区的定量测试，结果表明在裂纹附近位置中发现了局部的超轻元素 N 的富集，在裂纹附近的元素面分析也印证了这一点。这种元素 N 的富集导致此处出现异常的单相粗大奥氏体组织，此种异常组织的力学性能均较正常组织为差，是加工过程中出现裂纹的根本原因。