

# 热力管网波纹管开裂原因分析

李凤阳<sup>1</sup>, 张亚明<sup>2</sup>, 夏邦杰<sup>2</sup>, 董爱华<sup>2</sup>, 史洪微<sup>2</sup>

1. 沈阳工程学院, 沈阳 110136; 2. 中国科学院金属研究所, 沈阳 110016

**摘要:**对某热力管网使用5年后开裂破损的316 L不锈钢波纹管进行了宏观形貌、金相组织、断口形貌及腐蚀产物的分析同时分析了波纹管开裂的原因. 结果表明, 波纹管开裂属应力腐蚀; 造成应力腐蚀的介质是波纹管所处环境中(井室水中)的氯化物; 应力来自波纹管的工作应力和加工应力. 并提出了相应的防范措施.

**关键词:**热力管网; 316 L 不锈钢; 波纹管; 应力腐蚀开裂

**中图分类号:** TG172.9    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1002-6495(2007)04-0304-03

## FAILURE ANALYSIS OF BELLOWS USED IN HEATING PIPELINE

LI Feng-yang<sup>1</sup>, ZHANG Ya-ming<sup>2</sup>, XIA Bang-jie<sup>2</sup>, DONG Ai-hua<sup>2</sup>, SHI Hong-wei<sup>2</sup>

1. Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136;

2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016

**Abstract:** The failure analysis of 316 L stainless steel bellows that being used in a heating pipeline for 5 years has been conducted by using optical microscope and scanning electron microscope (SEM). The results showed that the cracking of the bellows was caused by stress corrosion cracking. The cracking was induced by the chlorides in water. The working stress may play a dominant role and the residual stress due to cold working were also responsible for the cracking. Finally several prevention measures was proposed.

**Keywords:** heating pipeline; 316 L stainless steel; bellows; stress corrosion cracking

某热力公司在供热管网上使用的不锈钢波纹管使用约5年(2000.9~2005.9)后,发生多处开裂和泄漏. 开裂的不锈钢波纹管(规格为DN300)由3层1 mm厚的316 L不锈钢板经冷挤压而成. 波纹管内的介质为软化水、除盐水,其硬度0.1 mmlo/L~0.5 mmlo/L, Cl<sup>-</sup>含量50 mg/L~80 mg/L;供水温度90℃~110℃;压力为1.4 MPa~1.5 MPa. 该热力公司地处沿海,波纹管放置在地下的井室内,处于地下水的全浸或半浸状态;波纹管外部的温度即井室内地下水的温度可达到80℃~90℃;地下水中的Cl<sup>-</sup>含量120 mg/L~150 mg/L. 本文对其进行了宏观形貌、金相组织检验,并用扫描电镜对其断口形貌进行观察和对断口上的腐蚀元素进行分析,找出了该波纹管开裂原因并提出了相应的防范措施.

## 1 检测与分析

### 1.1 宏观分析

开裂的波纹管样品表面宏观形貌如图1所示. 波纹管上的裂纹主要是沿环向扩展,并有分支裂纹沿轴向展开;开裂的轻重程度是在波纹管的最外层最严重,中间层次之也已开

裂,并与外层裂纹有相应的对应关系,内层还未发现肉眼可见的裂纹;波纹管的各层间的表面上有黑色、棕色和黄色的腐蚀斑.

宏观检查确认,波纹管的腐蚀开裂是从其外部首先开始的,外层腐蚀开裂后,中间层又被腐蚀开裂,之后是内层开裂,最终导致波纹管的失效.

### 1.2 金相分析

从开裂的不锈钢波纹管上,截取带有裂纹的薄片作为金相样品,用环氧树脂镶嵌后打磨抛光,然后用10%草酸水溶液电解腐蚀,在显微镜下进行观察和照像. 图2、3是波纹管外层的金相组织,可以看到裂纹产生于波纹管外层表面处,向内扩展;裂纹呈树枝状,有大量分叉并为穿晶型.

### 1.3 扫描电镜分析

将开裂的波纹管从其裂纹处掰开,在扫描电镜下观察其断口. 波纹管的断口特征呈扇形花样、泥状花样等,见图4、5. 扇形花样由许多解理分阶所组成,是应力腐蚀断裂中较为常见的形貌特征;而泥状花样多出现在没有清除或没有清除干净表面腐蚀产物的断口上,是表面腐蚀产物的不规则开裂所致<sup>[1]</sup>. 这都是Cr-Ni奥氏体不锈钢应力腐蚀断口的典型特征. 为确定造成波纹管产生裂纹的腐蚀性元素,对其断口表面进行元素成分能谱分析. 结果表明:在断口表面的凹坑区域有很高的Cl及Ca、Mg等元素存在,见图6、7. 其中Cl的含量高达12300 mg/L,见表1.

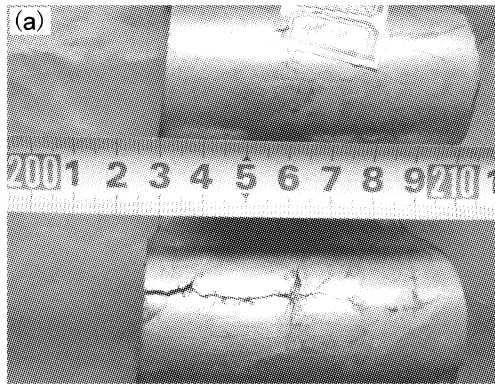
收稿日期:2006-11-27 初稿;2007-02-01 修改稿

作者简介:李凤阳(1956-),男,学士,副教授,从事理化教学.

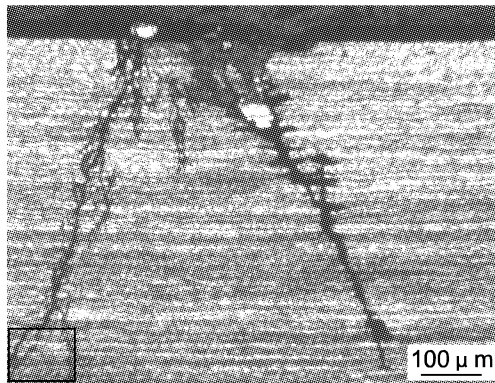
Tel:024-31975583 E-mail:SYZCY35@sohu.com

**Table 1 EDAX analysis result of fracture surface**

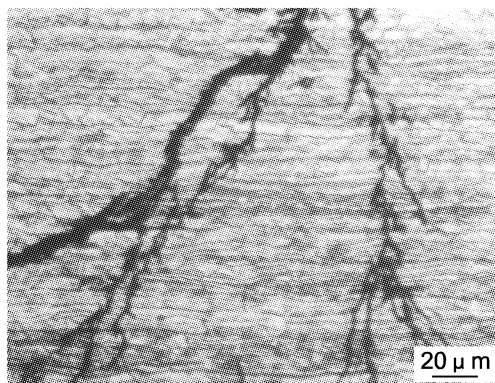
元素	Cl	Ca	Mg
实测含量, mass%	1.23	2.81	0.98
计算含量, mg/L	12300	28100	9800



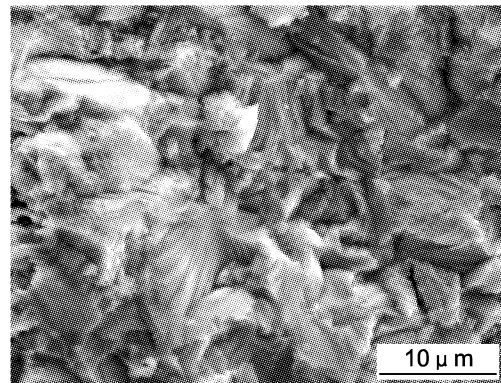
**Fig. 1** Macrograph of failed bellows



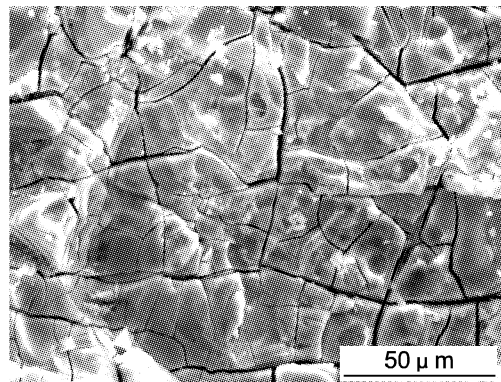
**Fig. 2** Crack of failed bellows



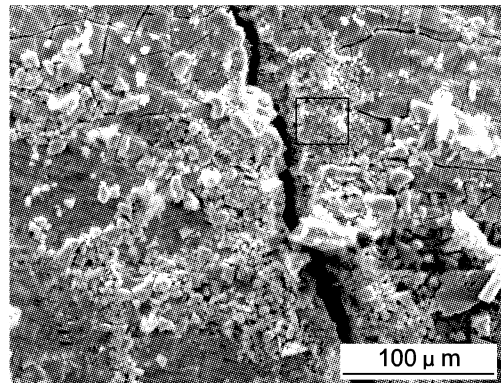
**Fig. 3** Crack of failed bellows (Magnify of Fig. 2)



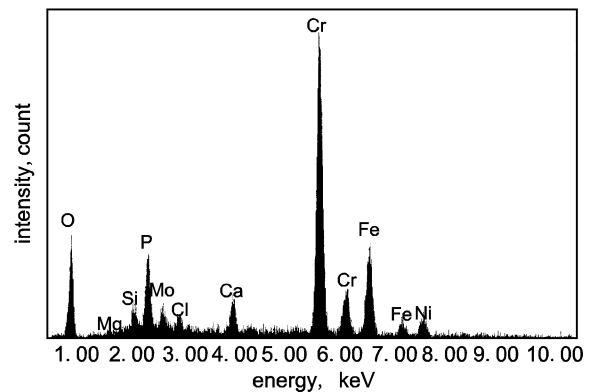
**Fig. 4** Morphology of the fracture surfaces (a fan-like pattern)



**Fig. 5** Morphology of the fracture surfaces (a mud-like pattern)



**Fig. 6** Morphology of the fracture surfaces



**Fig. 7** EDAX pattern at the crack tip

## 2 分析与讨论

通过对开裂波纹管的宏观裂纹、金相、断口形貌及腐蚀产物的分析,确认:波纹管开裂是从其外部开始,向内扩展继而使中间层破裂,最后是内层破裂而导致波纹管失效.波纹管的裂纹呈树枝状分叉,属于典型的 Cr-Ni 奥氏体不锈钢穿晶应力腐蚀开裂;在其断口上有腐蚀产物,Cl<sup>-</sup> 含量很高;断口呈扇形、泥状准解理脆断特征,是高温氯化物引起的典型应力腐蚀断口.

众所周知,金属材料产生应力腐蚀的条件主要有三,即特定成分组织的金属、特定的环境和足够大的拉应力.文献[2,3,4]中对 Cr-Ni 奥氏体不锈钢波纹管的应力腐蚀进行了详细地分析.

波纹管受到的拉应力来自工作应力、装配应力和制造加工后的残余应力.拉应力是产生应力腐蚀的一个重要条件,拉应力越大腐蚀越严重.

介质浓度的影响也很重要,一般认为 Cl<sup>-</sup> 含量越高,越易发生应力腐蚀;有氧的条件下,即使有很少的氯,就可以发生应力腐蚀.该波纹管是安装在井室里,井室里又常常有积水,积水中成分复杂,包括有地下水、自来水、污水、雨雪水等,这些水中一般含 Cl<sup>-</sup> 为 50 mg/L ~ 80 mg/L.而有关实验证明 Cl<sup>-</sup> 含量高于 25 mg/L 时,就可以发生应力腐蚀<sup>[3]</sup>.井室内湿热交替,易水份蒸发、盐份浓缩;具有良好的供氧条件提供了波纹管发生应力腐蚀的环境因素.

易发生应力腐蚀的温度范围是 70℃ ~ 250℃,一般在 50℃ 以下、300℃ 以上很少发生 Cl<sup>-</sup> 的应力腐蚀<sup>[5]</sup>.波纹管所处的井室温度(80℃ ~ 90℃)也正是易发生应力腐蚀的温度.

构成波纹管的材料是 316 L 不锈钢,属于 Cr-Ni 奥氏体不锈钢,虽然有一定的抗点蚀性能,并不具备抗应力腐蚀的能力,也属于对 Cl<sup>-</sup> 应力腐蚀敏感的材质.

## 3 结论

1. 波纹管破裂是从其外部开始,向内扩展;属于 Cr-Ni 奥氏体不锈钢应力腐蚀开裂.

2. 导致波纹管发生应力腐蚀的介质是环境中的氯化物;拉应力是来自于波纹管自身的加工残余应力、工作应力和装配应力.

3. 在 Cl<sup>-</sup> 含量较高的地区(如沿海和油田),316 L 奥氏体不锈钢波纹管的使用寿命也是有限的.

## 4 改进建议

1. 不锈钢波纹管应使用在相对干燥的环境下,保持干燥、清洁,避免积水,避免滴漏等不正常工作状态.防止水分的反复蒸发和凝聚.

2. 采用表面处理的方法,防止波纹管外壁与外部环境介质接触.如采用非晶态合金 Ni-P 镀层,可以显著提高不锈钢抗应力腐蚀性能;采用环氧涂层,可有效地隔离腐蚀介质,达到防止腐蚀的目的.

3. 选用抗应力腐蚀的双相不锈钢材料,如 00Cr24Ni6Mo2N 等.

### 参考文献:

- [1] 陆世英,王欣增,李丕钟,等著. 不锈钢应力腐蚀事故分析与耐应力腐蚀不锈钢[M]. 北京:原子能出版社,1985. 32.
- [2] 王玉,丰艳春,钱江,等. 波纹管换热器的失效形式及防止措施[J]. 化工机械,2000,27(3):168.
- [3] 汤棱.  $\Omega$  型波纹管补偿器腐蚀破裂分析与防护措施初探,区域供热[J]. 2000,(2):14.
- [4] 宋洪建,费建忠,李祖贻. 奥氏体不锈钢波纹管膨胀节的腐蚀与防护[J]. 石油化工设备技术,1998,19(2):51.
- [5] 胡彬. 不锈钢波纹管换热器的腐蚀与防护[J]. 江汉石油职工大学学报,2004,17(4):45.