

# 热风炉出风管失效分析

蔡晓文, 陈兴元

(攀钢集团研究院有限公司 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 成都 610300)

**摘要:** 某不锈钢制成的热风炉出风管膨胀接头过早失效。主要现象表现为热风炉出风管膨胀接头于失效处壁厚减薄, 并伴随破裂、穿孔等现象。经取样观察, 膨胀接头在减薄处存在裂纹, 局部坍塌凹陷。通过扫描电子显微镜(SEM)对裂纹处断口形貌进行观察, 发现断口处穿晶和沿晶裂纹并存。利用传统金相检验及化学分析等方法多角度分析了缺陷样品的形貌及成分。结果显示, 工件的环境温度和蠕变增加了晶粒粗化和形成楔形空穴的趋势。腐蚀、蠕变、晶界析出物析出之后基体的贫铬引起了出风管的管壁变薄、开裂并最终导致热风管过载失效。

**关键词:** 沿晶裂纹; 膨胀接头; 蠕变应变; 脆性断裂; 高温氧化

**中图分类号:** TF578 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2019)11-1121-04

## Failure Analysis of Drain Tube for Hot-Blast Stove

CAI Xiaowen, CHEN Xingyuan

(State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610300, China)

**Abstract:** Stainless steel drain tube from a hot-blast stove for the preheating air was premature failure. The main phenomenon was that the wall thickness of the expansion joint of the hot-air stove's air outlet tube was reduced at the failure point, with cracking and punching. It was observed that certain areas occurred through-way cracking in the thinned tube while others showed significant collapsing. A fracture taken from cracking areas was analyzed by SEM and was found to have a mixture of intergranular and transgranular cracking. Metallographic examination and chemical analysis of two specimens, also from the failed region, revealed the presence of large grain with widened grain boundary and wedge-type cavities at grain-boundary triple points, which were caused by operating temperature exceed those intended for this steel and may be promoted by grain-boundary precipitates. Failure of the tube was attributed to creep-type rupture at high-temperature conditions resulting from prolonged overheating and to thinning of the way by high-temperature corrosion and oxidation to the point at which the hot-air pressure in the tube and eventually lead to overload failure of the hot air pipe.

**Key words:** intergranular crack; expansion joint; creep strain; brittle fracture; high temperature oxidation

## 1 前言

作为热风炉出风管的不锈钢, 一般含有大量 Cr 和 Ni, 不锈钢基体不仅可形成稳定的  $\gamma$  相, 而且具有较好的抗蠕变性, 在高温下能持续作业, 具有很好的抗氧化性、耐腐蚀性和耐高温性, 适用于排气管道、热处理炉、热交换机等要求耐热性的高温接触部件<sup>[1,2]</sup>。然而, 热风炉的出风管因工作环境较为恶劣, 长时间运行之后同样会受高温氧化、开裂等问题的限制。

## 2 理化检验

某不锈钢制成的热风炉出风管膨胀接头, 于 700 ~

1000 °C 温度范围内使用约 1 年, 其接头处管壁减薄 80%~90%, 并在严重减薄处发生脆断。为确定膨胀接头过早脆断的原因, 结合宏观形貌检验、扫描电子显微镜(SEM)观察、传统金相检验等手段对失效样品进行了分析。并不锈钢的成分、组织和性能以及实际应用需要的角度进行了讨论。

### 2.1 宏观形貌检验与分析

经现场调研得知, 膨胀接头工作时, 表面常有发红现象, 失效管接头已呈深黑色, 说明经历了严重高温氧化。正对热风炉出热风部位的膨胀接头管壁厚度减薄, 并于此处发生开裂或断裂。图 1 是失效部位的照片, 图 1a 中标识了试样 A、B、C 的取样位置及取样编号, 随后检验的试样沿标记线切割。严重减薄区域有明显的塌陷, 塌陷处内壁照片如图 1b, 切割位置如图中标记。可以看出没有颈缩, 说明应力并不大。

收稿日期: 2019-08-27

第一作者: 蔡晓文, 女, 1982 年生, 工程师, Email:  
2325739091@qq.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.201808043

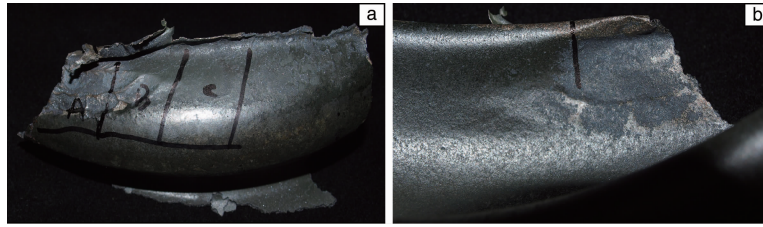


图 1 失效部位的表面形貌(a)和内壁形貌(b)照片

Fig. 1 Representative topography of the outer (a) and the inner (b) surfaces of a failed tube during operation

在失效管样的塌陷区和非塌陷区，沿裂纹将管子撕开，得到人工断口，经体式显微镜观察，发现塌陷区和非塌陷区具有不同的断口形貌，如图 2a~2c。塌陷区断口纹理较细，说明材料还具有一定的韧性，有较长的时

间发生塑性变形而塌陷；而非塌陷区显示“冰糖”状断口形貌，说明材料已经脆化。塌陷区和非塌陷区的管壁厚度均有不同程度的减薄。

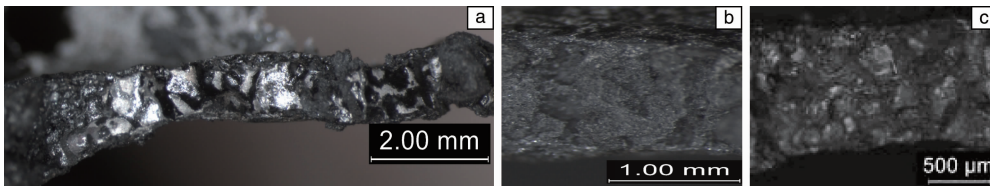


图 2 失效管人工断口形貌照片(a)，塌陷区(b)和非塌陷区(c)人工断口形貌照片

Fig. 2 Images of the close-up views of the fracture surfaces (a), fractures at collapsed area (b) and uncollapsed area (c)

## 2.2 SEM 断口观察与分析

在图 1a 中所标 A 处内壁位置再截取 3 个试样，分别标号为 D、H、E，D、H 试样为塌陷区样品，E 试样为非塌陷区样品，断面的 SEM 照片如图 3。从图 3a 可以看出，位于塌陷区的 D 断口显示出韧窝，说明 D 断口属于撕裂型断口，证明塌陷区材料具有一定的韧性。同时，D 断口呈阶梯状，说明试样受到气流冲蚀，逐层剥落。从图 3b

非塌陷区的 E 断口 SEM 照片可以看出，断口微观形貌为“冰糖”状，同时显示沿晶裂纹。上述特征表明此处试样显示晶界分离和逐渐浸蚀，材料已经蠕变脆化<sup>[3,4]</sup>，晶间结合力基本丧失，几乎没有强度，一碰就开裂。用 H 试样来观察管内壁，可知管内壁受到气流冲蚀而凹凸不平，如图 3c。该区域的局部放大 SEM 照片如图 3d，可见部分氧化层脱落凹陷，金属基体裸露，而氧化层没有脱落的部

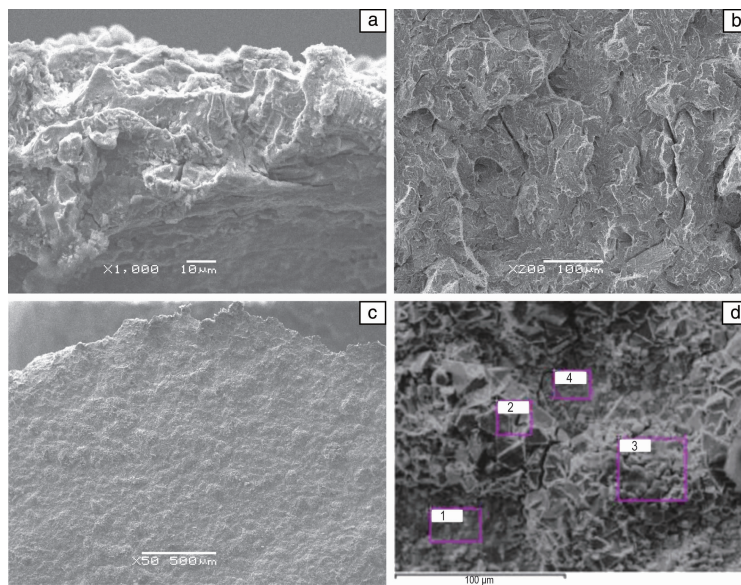


图 3 D 断口二次裂纹和韧窝(a)，E 断口的“冰糖状”形貌(b)，塌陷区试样 H 的管内壁的形貌(c)，图 3c 的局部放大 SEM 照片(d)

Fig. 3 SEM images of typical surfaces fracture in D, showing secondary cracks and dimples of ductile fracture (a); surface of fracture of E area in which the fracture appears to be a “Rock candy” (b); the inner surfaces of the collapsed area H (c); detail from fig. 3c (d)

分凸起。能谱(EDS)结果显示,管内壁基体中的 Mn 和 Ni 仅余少量, Cr 也只存在一部分,具体的 EDS 分析如表 1 所示。热风管基体材料原始化学成分见表 2。

表 1 管内壁塌陷区的能谱分析结果

Tab. 1 EDS result of the inner surfaces of collapsed areas of the tube ( $\omega/\%$ )

Position	Element			
	O	Cr	Mn	Fe
1	0	56.00	0	44.00
2	31.41	14.68	0	53.91
3	25.96	18.20	0	55.84
4	0	35.13	11.42	53.45

表 2 失效管样品化学成分测定值和 0Cr25Ni20 不锈钢的国标规定值

Tab. 2 Chemical compositions of failed tube compared with standard 0Cr25Ni20 stainless steel ( $\omega/\%$ )

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
National standard	0.090	1.50	2.10	0.045	0.035	24.00~26.00	19.00~22.00	—	—
Measured value	0.058	0.45	1.11	0.020	<0.005	23.85	18.84	0.080	0.073

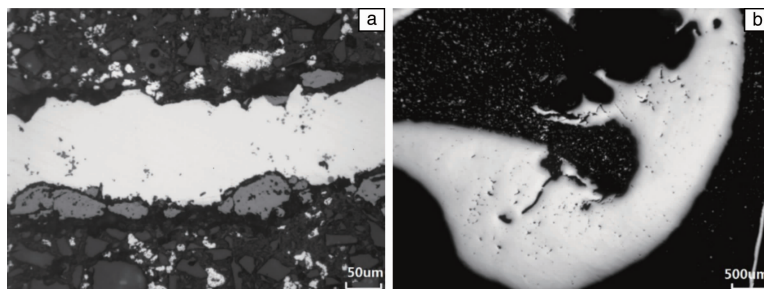


图 4 塌陷区 D 晶间氧化和蠕变孔洞(a), 非塌陷区 E 内壁的蠕变孔洞(b)的光学显微镜照片

Fig. 4 Images of the polished sections about collapsed (a) and uncollapsed (b)

将抛光 E 试样用一定配比的 HCl + FeCl<sub>3</sub> 水溶液进行腐蚀,观察到样品基体组织为奥氏体,但已发生了严重的晶间腐蚀,其奥氏体晶粒度级别为 1.5 级,说明该部位已严重过热,如图 5 所示。区域内未发现拉长的晶粒,说明最终断裂发生在停炉的温度状态。在抛光态的表面及次表面能看到晶间腐蚀,这可能与晶界析出的碳化物有关。

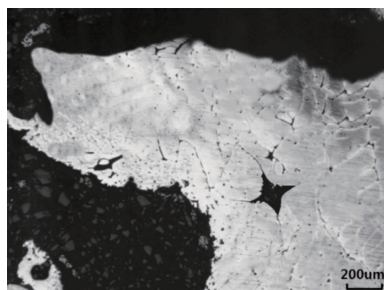


图 5 试样 E 的腐蚀态光学显微镜照片

Fig. 5 Image of the etched sections of the failed tube of E area

## 2.3 金相分析

在塌陷区 D 和非塌陷区 E 垂直于断口制备金相试样,观察塌陷区和非塌陷区的侧壁上存在的氧化质点和蠕变孔洞。使用光学显微镜观察塌陷区与非塌陷区垂直截面抛光面,均发现楔形或 W 形三叉点空穴,如图 4a 和 4b,说明材料已经发生晶间蠕变损伤<sup>[5-10]</sup>。图 4a 所示位置为管样塌陷区的近外表面区域,显示晶间氧化现象<sup>[11]</sup>。塌陷区的蠕变损伤程度较非塌陷区轻,很少发生 W 形裂纹连接,所以断口显示韧性断裂。图 4b 显示非塌陷区三叉点空穴已经宽化并有相互连接的现象,所以在断口显示脆性的“冰糖”状形貌。

## 2.4 化学分析

用直读光谱测定试样的化学成分,并与 GB/T 20878-2007《不锈钢及耐热钢牌号及化学成分》进行对比,发现其化学成分与 0Cr25Ni20 不锈钢的化学成分相似,且符合标准值。由表 2 可知,送检试样的化学成分基本满足国标规定值。

## 3 结 论

(1) 0Cr25Ni20 奥氏体不锈钢制热风炉出口管膨胀接头的过早失效,主要原因是过量蠕变应变导致晶界三叉点开裂扩展的结果。外貌不相同的塌陷区和非塌陷区,在显微特征上仅显示严重程度不同的晶界三叉点开裂,却使材料行为发生了由延性向脆性的转变。

(2) 工作温度是影响出口管蠕变失效的重要因素。在超过 0Cr25Ni20 钢许可的高温(<980 ℃)下使用时,会造成晶粒粗化、过度氧化和热腐蚀,这些现象加速了管壁氧化、脱落并最终减薄管壁。管壁减薄到支撑厚度不

足时,已脆化的材料在很小的管内热风压力作用下会引起剩余管壁过载,结果在蠕变损伤较轻的区域发生连续的塑性变形而塌陷,而在晶间腐蚀严重的蠕变损伤区发生脆性开裂。

(3)0Cr25Ni20 不锈钢不适合在 1100 °C 高温条件下使用,因为其 C 含量高于固溶度,过剩的 C 与 Cr 结合会沿晶界析出  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  型碳化物,造成晶界贫 Cr,加速晶界氧化腐蚀,使晶粒分离,从而在无蠕变的条件下也会产生脆性开裂。在晶界高温氧化的同时,出口管自由表面也被氧化,使金属损失,也会造成管壁减薄。

(4)为满足在 1100 °C 温度条件下安全使用,必须选择抗蠕变又抗高温氧化、腐蚀的材料。

#### 参考文献 References

- [1] 能源部西安热工研究所. 热工技术手册·电厂金属(6)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989: 169.  
Ministry of Energy, Xi'an Thermal Power Research Institute. Thermal Technology Manual; Power Plant Metal(6)[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1989: 169.
- [2] 蔡晓文, 吴安术, 陈义, 等. 热加工工艺[J], 2013, 24(42): 110-114.  
CAI X W, WU A S, CHEN Y, *et al.* Hot Working Technology[J], 2013, 24(42): 110-114.
- [3] AROGN A S, IM J, SAFOGLU R. Metallurgical & Materials Transactions A[J], 1975, 6(2): 825-837.
- [4] ASHBY M F, GANDHI C, TAPLIN D M R. Acta Metallurgica[J], 1979, 27(38): 699-729.
- [5] BALUFFI R W, SEIGLE L L. Acta Metallurgica[J], 1965, 13(8): 170-177.
- [6] PERRY A J. Journal of Materials Science[J], 1974, 9(5): 1016-1339.
- [7] MILLER D A, PILKINGTON R. Metallurgical and Materials Transactions A[J], 1978, 9: 489-494.
- [8] LAW C C, BLACKBURN M T. Metallurgical and Materials Transactions A[J], 1980, 11(3): 495-507.
- [9] YOO M H, TRINKANS H. Metallurgical and Materials Transactions A[J], 1983, 14(4): 547-561.
- [10] WATANABE T. Metallurgical and Materials Transactions A[J], 1983, 14(4): 531-545.
- [11] LOLAMGELO V J, HEISER F A. Analysis of Metallurgical Failures [M]. Newyork: Wiley Interscience Pulicatian, 1987: 180.

(本文为“第 4 届 Gleeble 热模拟技术交流会”征稿, 编辑 张雨明)