

文章编号:1673-9981(2011)04-0287-04

# 三种炉管材质在长期高温下的组织损伤研究\*

祝立群,叶卫东,万家瑰

东北石油大学,黑龙江大庆 163318

**摘要:**为了分析炉管在长期高温下的损伤情况,选取20钢、304不锈钢和353MA耐热钢三种常用的炉管材料,分别在它们各自的实际使用条件下运行一段时间后取样,利用扫描电子显微镜分析新旧材料的金相组织.研究表明,三种炉管在各自的工况下,经长期高温作用后,均发生了一定程度的组织变化.在20钢炉管的微观组织中,珠光体组织产生球化现象,发生轻度损伤;在304不锈钢炉管的微观组织中的奥氏体晶界处有碳化物析出,发生中度损伤;在353MA耐热钢炉管的微观组织中,在奥氏体基础上沿晶界分布着大量的 $\sigma$ 相与碳化物,发生严重损伤.

**关键词:**炉管;高温;组织;损伤

**中图分类号:** TQ054.4

**文献标识码:** A

加热炉和裂解炉是石油和化工企业的重要设备,炉管是这些设备的关键部件.炉管的管壁处于管内腐蚀性介质、管内外氧化或硫化以及高温的工作环境下,还要承受内压、自重、温差及开停车所引起的疲劳、热冲击等复杂的载荷作用,容易发生高温组织损伤、弯曲变形、超温蠕变爆裂、热疲劳、应力腐蚀开裂、腐蚀穿孔、冲刷磨损等失效事故<sup>[1-5]</sup>.在这些炉管失效事故中,高温是炉管损伤的主要原因.在长期高温作用下,加热炉和裂解炉的炉管材质会逐渐产生组织损伤,从而造成炉管材质脆化和承载能力下降,直至失效.本文以三种最常用的炉管材料:碳钢、不锈钢和耐热钢为例,分析其在长期高温作用下的组织损伤机理,为高温炉管的事故分析以及寿命评估提供参考依据.

## 1 各炉管的工况

### 1.1 碳钢炉管

某油田1993年设计建造的一台立式圆筒加热炉,炉管材质为20钢,炉管外径219 mm,壁厚12 mm.加热炉的主要工作参数:加热介质为原油,炉温不高于600℃,介质出炉温度200℃,炉管设计压力3 MPa.截止到2008年,该加热炉累计运行接近

10万小时.

### 1.2 不锈钢炉管

某炼油企业1995年设计建造的一台火焰加热炉,炉管材质为304不锈钢,炉管外径159 mm,壁厚14 mm.加热炉的主要工作参数:加热介质为汽油+液萘,炉温不高于500℃,介质出炉温度300℃,炉管设计压力15 MPa.截止到2008年,该加热炉累计运行接近2万小时.

### 1.3 耐热钢炉管

某石化企业1994年设计建造的一台高温裂解炉,炉管材质为进口353MA(25Cr-35Ni)耐热钢,炉管外径57 mm,壁厚6 mm.加热炉的主要工作参数:加热介质为裂解气,炉温不高于1100℃,介质出炉温度850℃,炉管设计压力0.385 MPa.截止到2009年,该加热炉累计运行接近1.5万小时.

## 2 分析实验方法

用线切割机分别从三种旧炉管的管体上加工出3组块状试样.将每个试样进行预磨、精磨、抛光和浸蚀,制备成金相试样.20钢金相试样采用5%硝酸酒精进行腐蚀,304不锈钢和353MA耐热钢金相试

收稿日期:2011-05-25

\* 基金项目:黑龙江省教育厅科学技术研究资助项目(11551001)

作者简介:祝立群(1971-),女,黑龙江大庆人,副教授.

样采用王水进行腐蚀.按照国标《金属显微组织检验方法》(GB/T13298-1991)和国标《钢的显微组织评定方法》(GB/T13299-1991),利用扫描电子显微镜进行金相组织分析.为了对比分析原始组织与经高温损伤后的组织差异,在未使用过的三种新炉管上,以相同的取样和制样方法制备出对比分析试样.

### 3 结果与讨论

#### 3.1 碳钢炉管的微观组织

20 钢炉管的金相组织如图 1 所示.由图 1 可以看出,20 钢炉管的微观组织均为铁素体+珠光体.

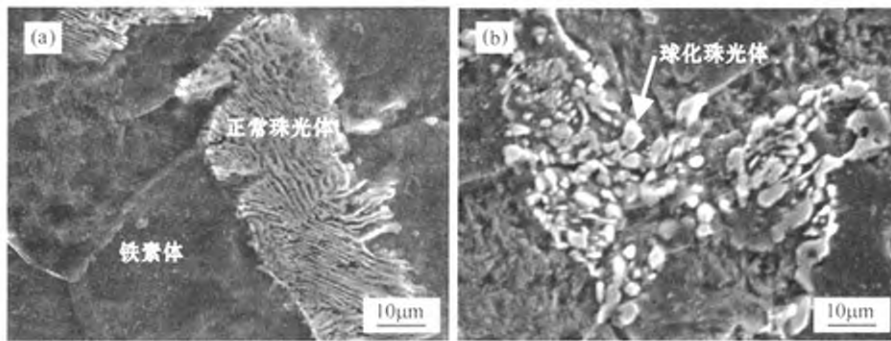


图 1 20 钢炉管的金相组织

(a) 新炉管; (b) 旧炉管

Fig. 1 Microstructure of 20 steel furnace pipe

(a) new furnace pipe; (b) old furnace pipe

在 20 钢旧炉管的微观组织中未发现明显的石墨化现象,这是由于该炉管承受的工作温度较低,石墨化的扩散过程较慢.另外,由于该炉管承受的内压较小,管体应力水平较低,所以在长期的高温作用下,炉管未发生明显的蠕变,微观组织中未发现蠕变孔洞.对 20 钢旧炉管的微观组织分析表明,该 20 钢旧炉管组织只是发生了中度球化,未出现石墨化和蠕变孔洞,因而虽然其机械强度略有下降,但还未出现严重的材质损伤,在加强监控的条件下可以继续使用.

#### 3.2 不锈钢炉管的微观组织

不锈钢炉管的金相组织如图 2 所示.由图 2 可以看出,304 不锈钢新炉管的微观组织为 304 固溶处理状态下的奥氏体组织.由图 2(b)可以看出,经过长期的高温作用,在 304 不锈钢旧炉管的微观组织中,在奥氏体晶界处有一定量的碳化物析出.除晶界上聚集了较多的碳化物外,由于晶粒内合金元素向碳化物相过渡以及碳的加速扩散,晶内也出现

了少量碳化物颗粒析出和聚集.由图 1(a)可见,在 20 钢新炉管的微观组织中,珠光体呈清晰的片层状结构,而在旧炉管的微观组织中,珠光体组织发生了球化现象,片层状结构消失,有些渗碳体已完全变成了颗粒状(见图 1(b)).这是由于片状  $Fe_3C$  的自由能比球状  $Fe_3C$  的高,在长期高温作用下,原子扩散作用加强,使片状渗碳体逐渐转变成球状渗碳体.由于该 20 钢旧炉管组织中的碳化物呈颗粒状球化,只是珠光体的形态还略有保留,根据《火电厂用 20 号钢珠光体球化评级标准》(DL/T674-1999)评定,20 钢旧炉管中的珠光体属中度球化,球化级别接近 3 级.

了少量碳化物颗粒析出和聚集.

相关研究表明<sup>[6-7]</sup>,在奥氏体晶界处析出的碳化物主要为  $M_6C$  和  $M_{23}C_6$  型碳化物,并且碳化物容易聚集长大,长大速度较快.这些对不锈钢强度具有严重恶化作用的碳化物呈条状或链状沿奥氏体晶界分布,削弱了晶间结合力,降低了晶界强度,促使晶界裂纹的形成,显著降低了钢的热强性,容易造成炉管脆性断裂.对该 304 不锈钢旧炉管而言,应加强监控,定期对其进行材质分析,避免材质严重损伤时发生爆管事故.

#### 3.3 耐热钢炉管的微观组织

耐热钢炉管的微观组织如图 3 所示.由图 3(a)可以看出,353MA 耐热钢新炉管的微观组织为奥氏体,在晶界和晶内分布着少量的颗粒状碳化物,属于过饱和奥氏体与碳化物(主要为  $M_7C_3$ )的共晶体,由于 353MA 耐热钢炉管是采用离心铸造的,而铸造过程是一种非平衡凝固,所形成的碳化物  $M_7C_3$  有向  $M_{23}C_6$  转变的趋势.由图 3(b)可以看

出,经过长期高温作用后,353MA 耐热钢旧炉管的微观组织为在奥氏体基础上沿晶界分布着大量的

长条状和块状  $\sigma$  相与颗粒状碳化物(主要为  $M_{23}C_6$ ) 的共晶相。

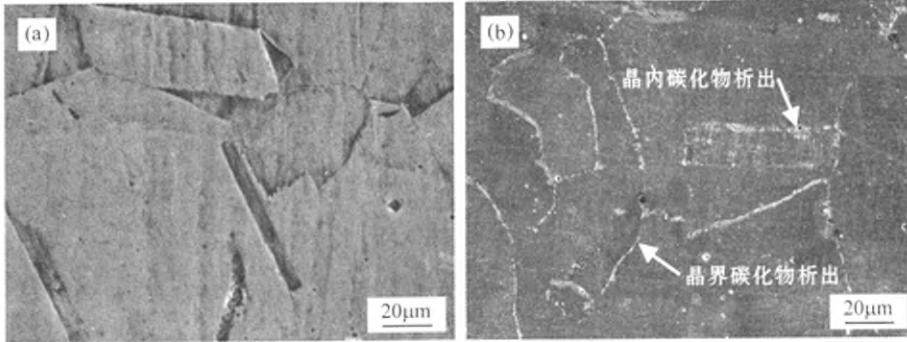


图2 不锈钢炉管的金相组织  
(a) 新炉管; (b) 旧炉管

Fig.2 Microstructure of stainless steel furnace pipe  
(a) new furnace pipe; (b) old furnace pipe

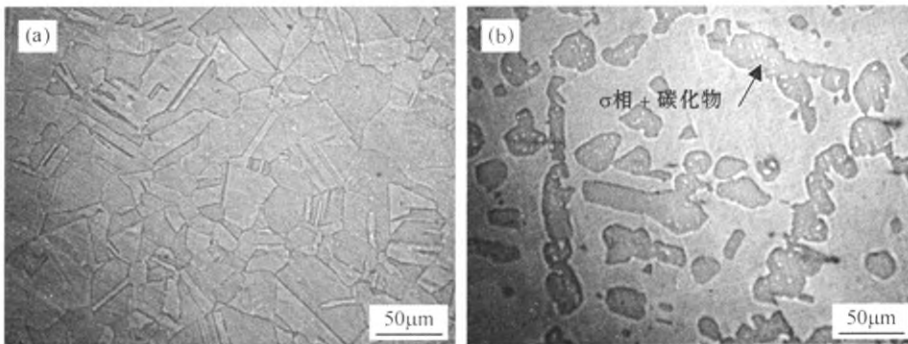


图3 耐热钢炉管的正常组织(新炉管)和异常组织(旧炉管)  
(a) 正常组织; (b) 异常组织

Fig.3 Normal microstructure of new heat resistant steel furnace pipe and abnormal microstructure of old heat resistant steel furnace pipe

(a) normal microstructure; (b) abnormal microstructure

$\sigma$  相为 Ni-Cr 耐热钢长期受高温作用影响而析出的金属间化合物,属脆性相,形成  $\sigma$  相的温度范围一般在  $600\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,这正是裂解炉炉管的工作温度区间。鉴于 353MA 耐热钢旧炉管的微观组织中已经存在大量的  $\sigma$  相与碳化物,其会显著增大耐热钢的脆性,造成炉管承载能力下降,极易发生脆性断裂。因此,该炉管组织属于严重高温损伤,应立即更换全部炉管,以免发生炉管爆裂事故。

## 4 结论

(1)在不超过  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,压力  $3\text{ MPa}$  的加热炉中,

经过长期(近 10 万小时)的高温作用后,20 钢旧炉管的微观组织中的珠光体发生了球化现象,由《火电厂用 20 号钢珠光体球化评级标准》(DL/T674-1999)评定,属中度球化,球化级别接近 3 级。该 20 钢旧炉管组织未出现石墨化和蠕变孔洞,其机械强度虽略有下降,但材质未造成严重损伤。

(2)在炉温不超过  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,炉管压力  $15\text{ MPa}$ ,介质为汽油+液萘的火焰加热炉中,经过长期(近 2 万小时)的高温作用后,在 304 不锈钢旧炉管的微观组织中的奥氏体晶界处有呈条状或链状的碳化物析出,这些沿奥氏体晶界分布的碳化物,会显著降低钢的热强性,容易造成炉管脆性断裂。

(3)在加热介质为裂解气,炉温不超过 1100 °C,炉管压力 0.385 MPa 的高温裂解炉中,经过长期(近 1.5 万小时)的高温作用后,在 353MA 耐热钢旧炉管的微观组织中,在奥氏体基础上沿晶界分布着长条状和块状  $\sigma$  相与颗粒状碳化物的共晶相,增大了耐热钢的脆性,使炉管的承载能力下降,极易发生脆性断裂。

#### 参考文献:

- [1] 赵祖林,王—宁. 20 钢炉管爆裂检测分析[J]. 机械制造与研究, 2008, 37(6): 53-54.
- [2] 刘文智,刘丽双,贡学钢,等. 裂解炉炉管焊缝泄漏失效分析[J]. 材料研究与应用, 2009, 3(4): 284-286.
- [3] 王江源,张树萍,王杜娟. 裂解炉炉管开裂失效分析[J]. 石油化工设备技术, 2007, 28(3): 54-57.
- [4] 施伟力. 火焰加热炉炉管泄漏原因分析[J]. 腐蚀与防护, 2008, 29(4): 220-222.
- [5] 郝丽丽,侯淑娥. HP40 裂解炉管组织及裂纹产生原因分析[J]. 失效分析与预防, 2007, 2(4): 45-49.
- [6] ERNEMAN J, SCHWIND M, LIN P. Precipitation reactions caused by nitrogen uptake during service at high temperatures of niobium stabilized austenitic stainless steel [J]. Acta Mater. 2004, 52(14): 4337-4350.
- [7] HONG H U, RHO B S, NAM S W. Correlation of the  $M_{23}C_6$  precipitation morphology with grain boundary characteristics in austenitic stainless steels [J]. Mater Sci and Eng: A, 2002, 318(2): 285-292.

## Research on material damage of three kinds of furnace pipe under high temperature

ZHU Liqun, YE Weidong, WAN Jiagui

Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China

**Abstract:** In order to analyze material damage of furnace pipe under high temperature, differences in microstructure of new furnace pipe and old furnace pipe were tested by SEM. The old furnace pipe had been used for a long time under different temperature. The materials of furnace pipe were 20 steel, 304 stainless steel and 353MA heat resistant steel. The results of the analysis showed that microstructure evolution occurred to both new furnace pipe and old furnace pipe. Minor damage happened with pearlite spheroidization in the microstructure of 20 steel. Moderate damage occurred with carbide eduction on austenitic grain boundaries in the microstructure of 304 stainless steel. And serious damage with large  $\sigma$  phase and carbide eduction along austenitic grain boundaries appeared in the microstructure of 353MA heat resistant steel.

**Key words:** furnace pipe; high temperature; microstructure; damage