

## 奥氏体耐热钢 HP40 离心铸造辐射管的失效分析

张晓丽<sup>1</sup> 骆合力<sup>2</sup> 李尚平<sup>2</sup> 刘培英<sup>1</sup> 周铁涛<sup>1</sup>

(1 北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100083; 2 钢铁研究总院, 北京 100081)

**摘要** HP40 钢( % : 0.35 ~ 0.45C, 24 ~ 27Cr, 34 ~ 37Ni, ≤ 0.5Mo) 辐射管在 ≤ 980 °C 服役 2 年 9 个月后开裂失效。分析结果表明, 服役过程  $\sigma$ -相的析出导致材料脆化是辐射管开裂的主要原因, 开裂区服役温度高于未开裂区, 开裂区析出  $\sigma$ -相粗大、数量增多、塑性显著降低, 致使该区开裂失效。

**关键词** HP40 耐热钢 离心铸造辐射管 开裂失效  $\sigma$ -相

## An Analysis on Failure of Centrifugal Casting Radiant Tubes of Austenite Heat Resistant Steel HP40

Zhang Xiaoli<sup>1</sup>, Luo Heli<sup>2</sup>, Li Shangping<sup>2</sup>, Liu Peiying<sup>1</sup> and Zhou Tietao<sup>1</sup>

(1 School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083;  
2 Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

**Abstract** The radiant tubes of HP40 steel (0.35 ~ 0.45C, 24 ~ 27Cr, 34 ~ 37Ni, ≤ 0.5Mo) cracked and failed after served for 2 years and nine months at ≤ 980 °C. The analysis results showed that the  $\sigma$  phase precipitation which led to brittleness of materials was main cause for cracking of radiant tubes, the served temperature at cracking region was higher than that at non-cracking region, in cracking region the precipitated  $\sigma$  phase was coarse, the amount of  $\sigma$  phase increased, and the plasticity and toughness of this region obviously decreased led to cracking and failure.

**Material Index** Heat Resistant Steel HP40, Centrifugal Casting Radiant Tubes, Cracking and Failure,  $\sigma$  Phase

钢厂炉子辐射管部分所用材料为 HP40 钢<sup>[1]</sup>, 其设计服役寿命是 3 年, 但使用到 2 年 9 个月时在离炉子烧嘴较近区域发生开裂现象, 造成停产。本文针对服役过程中发生开裂的 HP40 辐射管进行分析。

### 1 实验方法

实验所用材料为钢厂服役过程中部分区域发生开裂的 HP40 辐射管, 在离点火器较近区域开裂(图 1)。辐射管部分区域发生开裂, 而在某些区域则完好无损。分别在同一根辐射管开裂区与未开裂区取 1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>试样进行组织观察和性能测试。所取开裂区

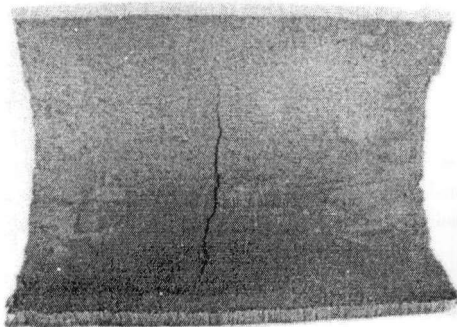


图 1 离心铸造辐射管开裂区形貌, ×1

Fig. 1 Morphology of cracking region of centrifugal casting radiant tube, ×1

1<sup>#</sup>试样接近于点火器, 其服役温度高于远离点火器的未开裂区 2<sup>#</sup>试样。

组织观察分别采用两种腐蚀剂: 5 g 高锰酸钾或 5 g 铁氢化钾 + 5 g 苛性钠 + 50 ml 水, 分别显示碳化物和  $\sigma$ -相。

### 2 实验结果与分析

开裂区与未开裂区的化学成分基本一致, 但 Ni 含量比标准低 2% 左右(表 1)。

从表 1 中可以看出, 开裂区 1<sup>#</sup>试样的拉伸强度下降不太明显, 但塑性明显减小; 未开裂区 2<sup>#</sup>试样的拉伸强度下降明显, 但塑性相对于开裂区 1<sup>#</sup>试样降低幅度较小。

从图 2 中可以看出, 两种试样中的骨架状共晶碳化物在晶界上全部转化为网链状, 在晶内则为块状, 并且奥氏体中析出大量弥散的颗粒状二次碳化物。但比较而言, 未开裂区 2<sup>#</sup>试样中的碳化物数量要多于开裂区 1<sup>#</sup>试样, 且尺寸更大。

能谱分析结果表明, 试样中的化合物含有的主要元素是 Fe 和 Cr, 而  $\sigma$  相的典型成分可近似表示为 FeCr。这说明了腐蚀剂可以把碳化物溶解显示出  $\sigma$  相。从图 3 中看出, 两种试样都析出了  $\sigma$  相,

表 1 原始铸管服役后开裂区与未开裂区的化学成分和力学性能

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of original casting tube, served cracking region and non-cracking region

项目	化学成分/%								力学性能		
	C	S	Si	Mn	P	Cr	Ni	Mo	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\delta_5$ /%
原始铸管	0.35~0.45	≤0.03	≤2.0	≤1.25	≤0.03	24~27	34~37	≤0.5	500~700	≥250	≥8.0
1# 开裂区	0.36	0.012	1.12	0.99	0.010	25.12	33.12	0.82	580~600	365~380	4.0
2# 未开裂区	0.37	0.013	0.10	1.04	0.009	25.24	33.02	0.82	465~490	255~270	5.0~6.5

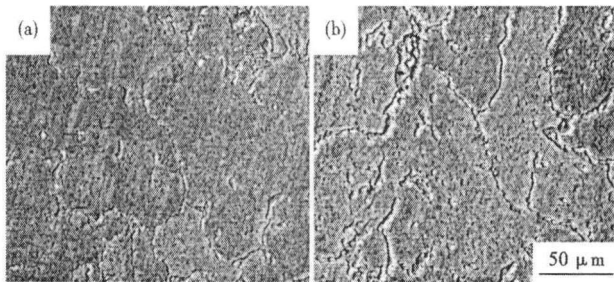
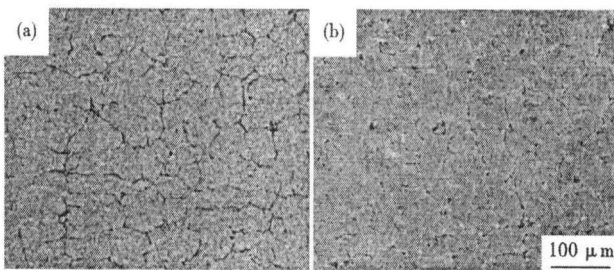


图 2 辐射管碳化物分布:(a) 开裂区 1# 试样;(b) 未开裂区 2# 试样

Fig. 2 Distribution of carbide in radiant tube: (a) cracking region, No1 sample; (b) non-cracking region, No2 sample

图 3 服役后辐射管中析出  $\sigma$  相形貌, SEM:(a) 开裂区 1# 试样;(b) 未开裂区 2# 试样Fig. 3 Morphology of precipitated  $\sigma$  phase in radiant tube after served: (a) cracking region, No1 sample; (b) non-cracking region, No2 sample

而且  $\sigma$  相大多沿晶界分布, 开裂区 1# 试样中的  $\sigma$  相比未开裂区 2# 试样中的  $\sigma$  相数量更多、尺寸更粗大。

HP40 离心铸管平衡的室温组织应为 A +  $M_{23}C_6$ 。但是, 离心铸造是一种非平衡凝固过程, 所以, 室温组织为过饱和的奥氏体(A)与骨架状共晶碳化物(主要为  $M_7C_3$ )<sup>[2]</sup>。炉管经长期高温运行本身就是一种时效过程, 铸态的非平衡组织向平衡组织转化, 包括  $M_7C_3$  向  $M_{23}C_6$  的转化, 奥氏体中析出二次碳化物和  $\sigma$  相<sup>[3]</sup>等。

与未开裂区 2# 试样相比, 开裂区 1# 试样中的碳化物细小弥散分布, 起到弥散强化作用, 故强度比较高。

对比分析两种试样的显微组织可知, 较之未开裂区 2# 试样, 开裂区 1# 试样中的  $\sigma$  相数量多且粗

大、碳化物数量少且细小, 分析认为, 这种组织上的差异是由两个区域不同的服役环境造成的, 也是造成两个区域不同服役寿命的主要原因。开裂区 1# 试样接近于点火器, 其服役温度高于远离点火器的未开裂区 2# 试样, 在长期服役过程中, 两种试样都会在其奥氏体基体中析出  $\sigma$  相, 而且在一定温度范围内, 温度越高, 析出速率越快, 在相同的服役时间内, 离点火器较近的辐射管由于服役温度较高而析出更多  $\sigma$  相且尺寸更大, 对材料的塑韧性损害更大, 导致该区的辐射管变脆, 在热应力和所承受载荷的作用下, 辐射管很容易开裂。而远离点火器的辐射管未开裂区 2# 试样服役温度较低,  $\sigma$  相析出的数量相对较少一些, 因而其塑性较高。强度方面, 由于未开裂 2# 试样的一次碳化物粗化程度较大, 材料强度下降幅度都较之开裂 1# 试样大。鉴于两种试样不同服役表现, 可以认为, 导致辐射管开裂的主要原因是材料析出大量  $\sigma$  相而脆化引起。

### 3 结论

辐射管服役后析出  $\sigma$  相而使材料脆化是其开裂的主要原因。两种区域的辐射管都析出了  $\sigma$  相, 但因服役温度不同而使得析出数量不同, 最终导致其塑性和韧性也不同, 发生开裂的辐射管其室温拉伸的伸长率仅为 4%。相对而言, 强度对辐射管开裂的影响要小一些, 未开裂的辐射管中因一次碳化物粗化而使得材料强度明显降低, 但因保持了相对较高的塑性而未开裂。

### 参考文献

- 温建萍, 康志强, 顾大群. HP40 奥氏体耐热钢炉管长期高温时效的安全性分析. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(5): 616
- 关家钺. 裂解炉管渗碳损伤的研究. 石化技术, 1997, 4(4): 23
- Schwind M, Kallqvist J, Nilsson J.  $\sigma$ -phase Precipitation in Stabilized Austenitic Stainless Steels. Acta Mater, 2000, 48(10): 2473

张晓丽(1983-), 女, 硕士, 从事非晶合金的熔炼工艺研究。

收稿日期: 2007-10-17