

## 300MW、600MW锅炉用12Cr2MoWVTiB 钢管运行可靠性试验研究

曹文浩 犹 公 赵世英 姜通海 罗洪新

**摘 要** 对批量生产的首钢和住友的12Cr2MoWVTiB钢管,进行了高温持久性能和抗氧化性能等试验。同时,测定了某电厂600MW锅炉再热器12Cr2MoWVTiB钢管段的实际壁温。实验结果表明,12Cr2MoWVTiB钢管的性能完全满足标准和设计要求。再热器12Cr2MoWVTiB钢管屡次爆管。原因是炉温偏差,造成钢管壁温增高,钢管过热超温运行而引起的。

**关键词** 12Cr2MoWVTiB钢管 爆管 运行可靠性

### Researches & Tests of the Rediability on the300MW & 600MW Boilers' Steel-tubes of 12Cr2MoWVTiB Operating

Chao Wenhao, You Gong, Zhao Shiying, et al.

**Abstract** For the 12Cr2MoWVTiB tubes & pipes of the mass production made by the Capital Steel & Iron Complex and Sumitomo of Japan, we did the tests of their lasting high-temperature and oxidationproof performance. At the same time, we measured the actual temperature of the wall on the tube section, reheater-12Cr2MoWVTiB. The tests' results show the performance of the 12Cr2MoWVTiB tubing is fully conformed to the requirements of the standard and the design. The tube failures on 12Cr2MoWVTiB tubing of reheater are caused by the boiler temperature deviation, which results in the increasing of wall temperature of the turbing, so the tubing being in operation under over heating causes the tube failure.

**Keywords** 12Cr<sub>2</sub>MoWVTiB tubing, tube failure, operation reliability

## 0 引 言

近几年来,由美国CE公司引进的300MW、600MW锅炉的末级再热器和后屏再热器的12Cr2MoWVTiB(102钢)钢,在运行中屡次发生爆管事故,直接影响着锅炉的正常运行。为此怀疑12Cr2MoWVTiB钢管的性能,钢管性能的运行可靠性成了关注的焦点。引起锅炉爆管的原因是多方面的,有设计、运行、材料等因素,本试验从材料角度,对12Cr2MoWVTiB钢管运行可靠性进行了一系列试验研究。

试验利用首钢生产的 57 × 9mm钢管和日本住友生产的 51 × 7mm钢管,进行了高温持久性能和抗氧化性能,再热器的管壁温度测量等试验。

### 1 试验用钢管

#### 1.1 化学成分

试验用钢管的化学成分如表1。

#### 1.2 力学性能

试验用钢管的力学性能如表2。

表1 钢管的化学成分

来源	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Ti	B	S	P
首钢	0.08	0.64	0.59	1.96	0.55	0.39	0.41	0.12	0.0019	0.006	0.013
住友	0.10	0.64	0.52	1.95	0.53	0.34	0.34	0.12	0.0017	0.004	0.015
GB5310-1995 标准	0.08 ~ 0.15	0.45 ~ 0.75	0.45 ~ 0.65	1.60 ~ 2.10	0.50 ~ 0.65	0.28 ~ 0.42	0.30 ~ 0.55	0.08 ~ 0.18	0.002 ~ 0.008	0.030	0.030

表2 供应状态下的钢管性能

类别	$s_s$ /MPa	$b$ /MPa	$\delta_5$ /%	压扁
首钢	542	618	24	完好
	551	625	23	
	528	606	23	
	522	603	23	
住友	578	672	22	完好
	576	673	22	
	589	691	21	
	586	679	22	
GB5310	345	540 ~ 735	18	完好

### 1.3 组织状态

试验用钢管的组织为回火贝低体见图1，图2，日本生产的钢管组织比首钢钢管组织粗大。



图1 首钢钢管组织



图2 日本住友钢管组织

## 2 610 的抗氧化性能试验

为了进一步考察日常大生产中12Cr2MoWVTiB钢管的抗氧化能力，对首钢特钢公司和日本住友供应的钢管，做了610 长达5832h的抗氧化试验。

### 2.1 试验用标准和试验条件

试验标准：GB/T13303-91《钢的抗氧化性能测定方法》

试验设备：高温马福炉、试验温度与规定温度绝对值小于5 ，仪表测量精度±0.5 。

试样称重天平精度0.0001g

试验试样尺寸：30mm×15mm×2.8mm

### 2.2 试验结果

在610 下试验5832h的氧化增重如表3、图3。

表3 610 不同时间氧化增重g

产地	试样号	试验时间/h				
		268	816	1608	3048	5832
首钢	001		0.0497	0.1059	0.1857	0.2652
	002		0.0442	0.0717	0.1662	0.2433
	003	0.274	0.0463	-	-	-
	004	0.0253	0.0550	0.1133	0.1848	0.2657
	005		0.0392	0.0837	0.1873	0.2687
	006		0.0427	0.0784	0.1519	-
	007		0.0467	0.0828	0.1863	0.2635
住友	008		0.0728	0.1574	0.2537	0.3697
	009	0.0266	0.0698	-	-	-
	010	0.0234	0.0650	0.1653	0.2640	0.3721
	011		0.0968	0.1721	0.2650	0.3773
	012		0.0917	0.1701	0.2522	0.3572
	013		0.0799	0.1559	0.2448	0.3591
	014		0.0994	0.1807	0.2694	0.3756

(a)

(b)

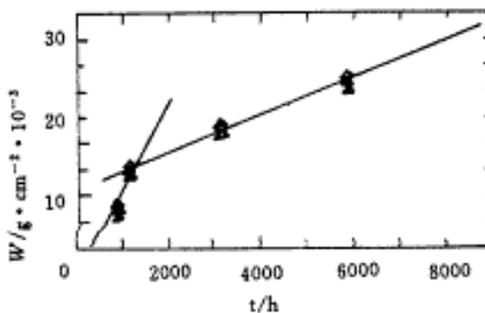
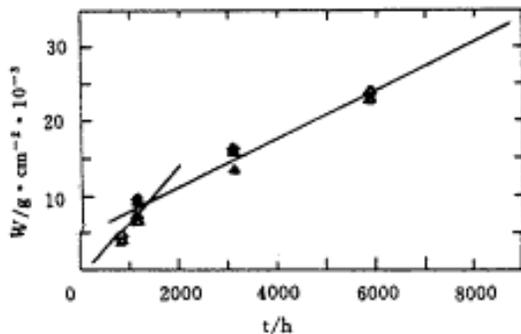


图3 610 经5832h的氧化增重曲线

a.首钢钢管氧化增重曲线

b.日本住友钢管氧化增重曲线

### 2.3 氧化膜成分和结构分析

在610 下经5832h抗氧化试验以后，在金属表面形成了0.1~0.2mm的氧化膜，氧化膜呈破裂状态，大部分与基体分离，而且在分离处再次被氧化，在试样表面形成了两层以上的多层膜结构。

利用X射线能谱仪，分析了经816和5832h氧化的氧化膜成分，同时还分析了在电厂运行10万h的钢管的氧化膜成分，见表4。

由表4看出，国产的12Cr2MoWVTiB钢管随氧化时间的增加，氧化膜外层的Cr元素含量呈降低趋势，Mn元素含量随之增加，W、Mo、V、Ti元素含量的变化，没有明显的规律。日本住友供应的12Cr2MoWVTiB钢管氧化膜中几乎没有Cr元素，当试验到5832h后，氧化膜外层已经测量不到Cr、V、Ti元素了。氧化膜内层与外层相比，各元素的含量也存在着较大的差别，除了Mn元素含量膜外层较高外，其余元素的含量，内层均高于外层，特别是Cr元素表现尤为明显。可以认为，氧化膜内层以Fe和Cr形成的氧化物为主，外层则以Fe和Mn形成的氧化物为主。

表4 氧化膜的成分%

试验时间/h	来源	氧化膜测定部位	Cr	V	Ti	Mn	Fe	W	Mo
816	首钢	氧化膜	3.23	0.70	0.19	0.25	91.0	3.38	1.48
	日本	氧化膜		0.24		1.33	98.2		
5832	首钢	氧化膜内层	0.53	0.15	0.19	0.78	96.9	1.08	0.34
		钢表面	7.83	1.64	0.29	1.59	79.5	6.63	2.47
	日本	氧化膜	4.07	0.82	0.53	1.30	97.7	0.48	0.57
		膜外层				2.01	97.0	0.63	0.40
运行十年	国产	膜内层	6.02	1.33	0.72	0.77	81.3	6.05	3.77
		膜外层				2.21	94.9	2.06	0.79

由X射线衍射仪分析表明，钢管的氧化时间较短时，氧化物组成主要是Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。随着氧化时间延长，氧化膜中Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>量逐渐增多，Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>相对含量逐渐减少，氧化膜由Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>组成。氧化时间再延长，氧化膜中已不存Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，而Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>的数量继续增多，并出现FeO，此时，氧化膜由FeO+Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>组成。

#### 2.4 年氧化深度

根据12Cr2MoWVTiB钢管氧化膜成分和结构，取5832h的氧化膜组成和结构，确认氧化膜为：Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、TiO、MnO、WO、MoO、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等氧化物。将表3中不同时间的氧化增重换算成单位面积增重如表5，并计算出1a(8760h)氧化单位面积增重如表6。将表6，转化为年氧化单位面积失重如表7，再将年氧化单位面积失重值代入下列公式(1)计算出年氧化深度R。

表5 610 下单位面积氧化增重

试样	单位面积增重/10 <sup>-3</sup> g·cm <sup>-2</sup>				
	264 h	816 h	1608 h	3048 h	5832 h
001		4.39	9.36	16.42	23.44
002		4.21	6.83	15.83	23.17
003	2.43	4.12	-	-	-
004	2.23	4.84	9.97	16.28	23.34
005		3.48	7.44	16.66	23.89
006		3.78	6.94	13.44	-
007		4.15	7.35	16.54	23.39
008		6.41	13.87	22.35	32.58

009		6.14	-	-	-
010		5.72	14.55	23.23	32.74
011		8.50	15.12	23.28	33.14
012		8.08	13.00	22.23	31.49
013		6.99	13.64	21.42	31.41
014		8.71	15.84	23.62	32.93

表6 年(8760h)氧化的单位面积增重

来源	氧化时间/h	单位面积增重/ $10^{-3}g\cdot cm^{-1}$
住友	8760	42.6714
首钢		33.3869

表7 年氧化单位面积失重

来源	年氧化单位面积增重 $/10^{-3}g\cdot cm^{-2}$	年氧化单位面积失重 $/10^{-3}g\cdot cm^{-2}$
首钢	33.3869	88.2910
日本	42.6714	113.007

$$R = \frac{W_s}{\rho}$$

(1)

式中： $W_s$ ——年氧化单位面积失重， $10^{-3}g/cm^2$ ；  
——金属密度， $g/cm^3(7.84)$ 。

结果： $R_{SG} = 88.2910 / 7.84 = 0.11mm/a$ ；

$R_{zy} = 113.007 / 7.84 = 0.14mm/a$ 。

### 3 600 持久强度试验

#### 3.1 持久试验与结果

对国内首钢和日本住友生产的钢管、分别做了600 的持久强度试验。试验采用板状带肩的小试样，在 -2试验机上进行，试验结果如表8和图4。

从试验结果看出，12Cr2MoWVTiB钢管在600 的持久强度值比较高，首钢钢管  $10^5$ 为129MPa，日本住友的钢管  $10^5$ 为156MPa。

表8 600 持久强度性能试验结果

项目	日本住友			国内首钢		
应力 [ ] /MPa	190	180.7	170	160.1	155	140
断裂时间/h	123.5	648.5	7080	114.5	276	7560
延伸率/%	9.2	11	7.4	12.0	17.5	8.4
$10^5$ /MPa	$10^5 = 156MPa$			$10^5 = 129MPa$		
GB5310—95推荐	$10^5 = 82MPa$					
GB9222—88	$10^5 = 89MPa$					

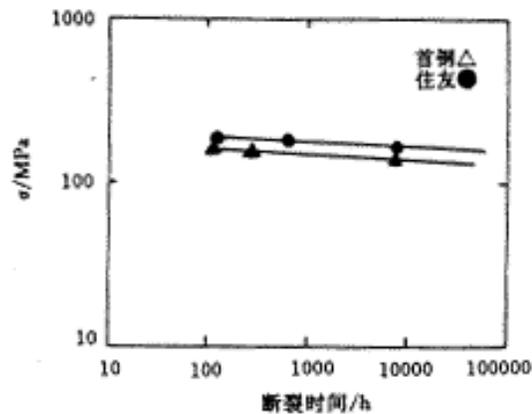


图4 600 的持久强度曲线

### 3.2 持久试样的组织观察

试验前试样组织为回火贝氏体见图1和图2，用CM12透射电镜观察其组织为贝氏体+MC+ $M_{23}C_6$ ，MC碳化物分布在组织晶内， $M_{23}C_6$ 大部分沿晶界分布。国内首钢的12Cr2MoWVTiB钢管，铁素体内的位错排列成条状或构成亚晶界， $M_{23}C_6$ 颗粒较大。而住友生产的12Cr2MoWVTiB钢管铁素体内的位错基本上均为胞状结构，位错密度高于首钢钢管，在铁素体内，明显地观察到弥散细小的MC碳化物，而且， $M_{23}C_6$ 颗粒较小。

对持久试验断裂后的试样进行了组织观察，用光学显微镜观察，试验前后的试样组织没有明显的变化，组织相对比较稳定。用扫描电镜(TEM)对断口进行观察，断口均属于韧窝断口，穿晶断裂，见图5，6。

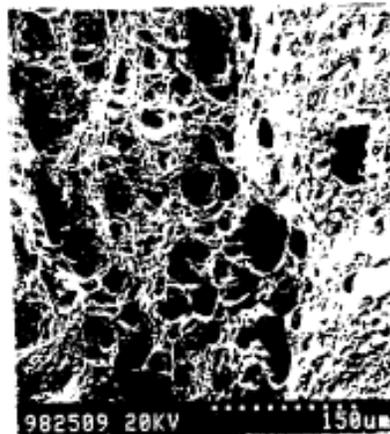


图5 首钢钢管的断口形貌

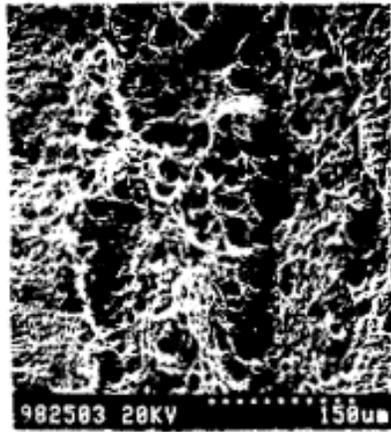


图6 日本住友钢管断口形貌

## 4 600MW锅炉再热器管段壁温测量试验

### 4.1 测点位置的选择

选择测温位置的原则：选在壁温最高的管屏易爆管的外圈12Cr2MoWVTiB管段上。末级再热器共72屏，选在右侧第55屏外圈向火面和背火面的12Cr2MoWVTiB钢管段上。后屏再热器共48屏，测点选在右侧第44屏外圈向火面和背火面的12Cr2MoWVTiB钢管段上，见图7。

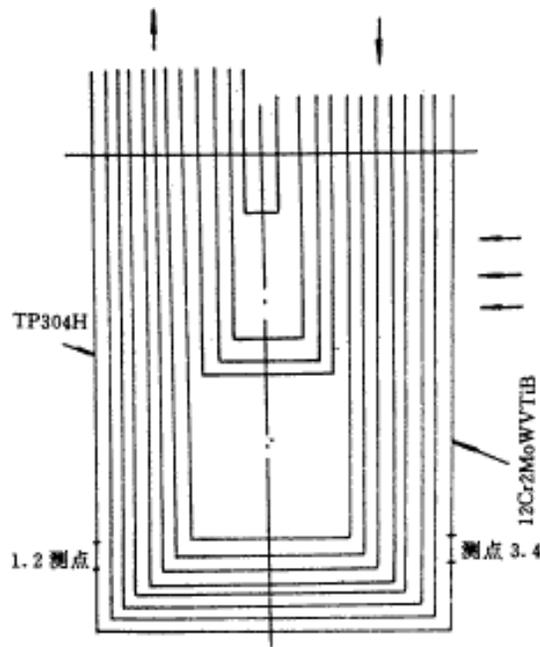


图7 测点安装位置示图

### 4.2 测量方式

采用铠装热电偶插入法，同时在末级再热器的背火面采用了等温线接触敷设法作对比试验。

等温线接触敷设法是将 2.5mm的穿上瓷管的镍铬—镍硅热电偶直接焊在钢管上，然后再将热电偶沿管壁的等温线敷设12.5mm距离，固定后引出炉外进行测温。

铠装热电偶插入法是用与被测钢管相同直径的不锈钢钢管加工成高84mm，宽28mm的焊块，并在焊块内壁中央铣一条宽4.5mm、深4.5mm的槽，见图8。再将焊块开口向上焊在侧点位置，把4mm的镍基高温铠装热电偶从开口处插入至焊块底部与管壁接触部位。开口处用氧化铝粉混水玻璃胶封好，固定后引出炉外。

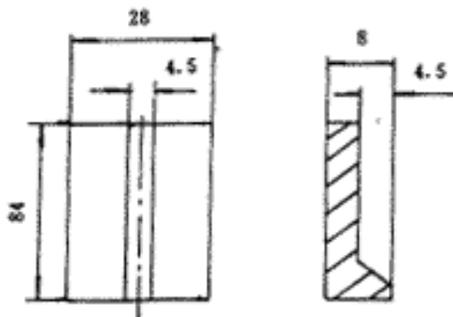


图8 焊块示意图

选用小型自动电子电位差计，型号：XWD1—300六点打印方式，周期地打点记录各点温度，仪表示值的基本误差不超过测量范围的±5%，记录误差不超过±1%。

### 4.3 测温结果

对再热器壁温测量，历时累计两个月之久，测得的管壁温度范围见表9。

表9 600MW再热器的管壁温度

后屏再热器		末级再热器		
向火面	背火面	向火面	背火面	
630 ~ 700	610 ~ 630	610 ~ 630	铠装	540 ~ 560
			等温	540 ~ 560

从表9看出，末级再热器背火面的两种测量方法，即等温线接触敷设法与铠装热电偶插入法，测得的温度基本上是一致的，实测壁温除了末级再热器背火面低于600，其它部位均超过设计允许温度610。

## 5 结果分析

12Cr2MoWVTiB钢管是我国自行设计研制的新钢种，采用少量多元复合强化理论，W—Mo复合固溶强化，V-Ti复合弥散强化和B的微量晶界强化，使钢的热强性能大幅度提高，使之可以用于610 温度下。

在GB5310—95标准中，推荐600 的持久强度值<sub>10<sup>5</sup></sub>为82MPa，我国在引进CE公司300MW、600MW锅炉时，推荐12Cr2MoWVTiB钢管600 的许用应力为53.9MPa，换算成持久强度值为86MPa，GB9222—88《水管锅炉受压元件强度计算》标准，推荐600 的持久强度值<sub>10<sup>5</sup></sub>为89MPa。这次试验结果600 的持久强度值，首钢钢管<sub>10<sup>5</sup></sub>为129MPa，住友钢管<sub>10<sup>5</sup></sub>为156MPa，都满足了上述标准要求。日本住友生产的钢管，由于化学成分配比比首钢合理，正火温度比首钢的高，所以，其持久强度值比首钢的高。这说明了，适当提高正火温度，可提高其持久强度。

锅炉的过热器和再热器部件，在高温烟气的环境中工作，要受到烟气的强烈氧化腐蚀，所以，对锅炉受热面管来说，要求工作温度下年氧化腐蚀深度R < 0.1mm/a。试验结果，在610 下氧化腐蚀深度，首钢钢管R=0.11mm/a，住友钢管R=0.14mm/a，比锅炉钢管对抗氧化性能R < 0.1mm/a要求稍大些。但与近期出版的“锅炉受压元件用钢性能手册”提供的抗氧化性能年氧化深度R=0.1144mm/a是相近的。这反映了批量生产的12Cr2MoWVTiB钢管，抗氧化性能都没有达到研制时的抗氧化性能。从抗氧化性能考虑，钢管的使用温度应限制在610 以下。

从CE公司引进的600MW锅炉，采用四角切园燃烧方式，使炉膛左右烟气温度偏差较大。同时，由于水平烟道入口烟气流充满度不好，末级再热器下部空间易形成烟气走廊，后屏再热器的纵向间距较小，而弯头处管子间距增大等因素，使再热器右侧底部吸热增加，管壁温度增高。从本次测定证实了这点，管壁的实际温度比设

计温度高，比钢本身允许的使用温度高。由于过热超温运行，高温强度迅速下降，使钢管的强度不足，导致爆管。

## 6 结论

试验证明，首钢和日本住友生产的12Cr2MoWVTiB钢管，在600 的持久强度值都比较高，完全满足了GB9222和GB5310标准要求，而610 的抗氧化性比要求稍差些，但可以满足锅炉设计要求。在设计允许的温度下运行，其性能是完全可靠的，不会发生爆管。

由于炉子烟气温度偏差，使炉内右侧温度偏高，远远超过钢管本身允许的使用温度，钢管在过热超温下运行，使钢管的高温强度迅速下降，导致钢管爆破。

由于炉温波动偏差的存在，在热负荷大的区段，为了锅炉的安全运行，可以适当提高使用钢管的等级。

\*机械工业技术发展科研基金项目

作者简介：曹文浩，男，1963年毕业于东南大学，研究员级高级工程师，主要从事锅炉与压力容器用材料的开发和研究工作。

作者单位：曹文浩 犹 公 赵世英(哈尔滨锅炉有限责任公司),姜通海(大连春海热电有限公司),罗洪新(哈尔滨第三发电厂)

## 参考文献

- [1] 刘荣藻.低合金热强钢的强化机理.北京：冶金工业出版社，1981
- [2] 普里丹秉夫 MB，兰斯卡雅 K A.锅炉制造用钢.北京：中国工业出版社，1963
- [3] 北京钢铁研究总院.102钢的合金化问题及显微组织.新金属材料，1978(4)
- [4] 瞿金坤.金属高温腐蚀.北京航空航天大学出版社，1994
- [5] 刘丛涛，黄业胜.HG2008/186-M锅炉热偏差问题探讨.中国电力，1996(3)
- [6] 王英姝，等.12Cr3MoWVTiB(M—A)相的相变机制及其精细结构的透射电镜研究.金属学报，1979，15(4)
- [7] 吴非文.火电发电厂高温金属运行.北京：水利电力出版社，1979

收稿日期：1999—02—24