

# 废热锅炉安全阀弹簧断裂失效分析

刘钧泉, 周小敏

(华南理工大学机械与汽车工程学院腐蚀与表面工程研究所, 广东 广州 510640)

**摘要:**某废热锅炉安全阀弹簧在使用过程中发生断裂, 通过对宏观的形貌观察、材料成分分析、金相检验、硬度测定以及扫描电镜观察, 可判断本起失效的断裂类型属脆性沿晶断裂, 弹簧内部的晶界弱化以及组织上的微孔洞和微裂纹缺陷是引起失效的主要原因。

**关键词:**安全阀弹簧; 沿晶断裂; 晶界弱化

**中图分类号:**TE974<sup>+</sup>.3 **文献标识码:**B **文章编号:**1006-8805(2008)04-0038-03

近年来, 有若干弹簧失效的案例, 失效原因主要有材料的化学成分不合格、腐蚀性介质的作用、制造工艺不当以及材料强度不够等。除此以外, 在工程中还有因材料组织不均、晶界弱化、微孔洞、微裂纹和材料表面缺陷等因素而导致的弹簧失效。

某废热锅炉安全阀上的弹簧在使用十几年后发生断裂, 该弹簧作为安全阀的配件整件进口, 呈圆柱螺旋状, 共有 8 圈, 工作时受压。主要技术参数:

开启压力 11.20 MPa;

回座压力 10.2 MPa;

公称压力 2 500 lb;

进口公称通径 4 in;

出口公称通径 6 in;

工作温度为 314℃。

失效前, 安全阀曾开启一次, 开启时的压力为 11.2 MPa。

## 1 分析程序

### 1.1 宏观形貌观察

弹簧外观乌黑, 没有浮锈, 见图 1。断口在离固定端约一圈的部位的簧丝直径无明显形变, 断口呈弯面, 黑褐色, 锈层较坚实, 与簧丝截面约成 30°~45°角, 形貌见图 2。在图 2 箭头 1 所指的部位有剪切唇, 但区域很小, 沿周向的长度约为 20 mm, 宽度不足 0.5 mm。在图 2 箭头 2 所指的局部呈锥状, 表明在断口的另一配合面上可观察到剪切唇, 从锥状延伸的范围估计出另一配合面上剪切唇与箭头 1 部位的大小相仿。在断口的大部

分区域, 观察到“人”字形条纹, “人”字形条纹指向箭头 3 的部位, 显示此处有可能是裂纹的起源。此部位接近于簧丝的外侧(参见图 1 中的箭头 3 的部位)。断口的这些特征表明本起失效基本属于脆性断裂<sup>[1]</sup>。

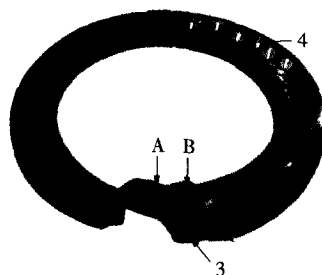


图 1 弹簧圈形貌

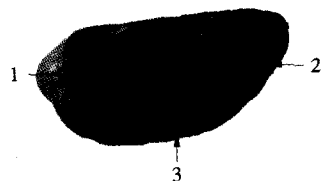


图 2 弹簧断口形貌

### 2.2 材料成分分析

取弹簧圈样品进行化学成分分析, 其结果见表 1。

收稿日期: 2008-05-08。

**作者简介:**刘钧泉(1947—), 男, 广东中山人, 1982 年毕业于华南理工大学腐蚀与防护工程专业, 获学士学位, 现任职于华南理工大学机械与汽车工程学院, 高级工程师, 研究方向: 腐蚀防护与表面工程、安全工程。

表 1 弹簧圈化学成分

%

| 钢号      | 元素        |           |           |           |       |       |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|
|         | C         | Cr        | Mn        | V         | P     | S     |
| 弹簧圈     | 0.52      | 1.20      | 1.08      | 0.11      | 0.008 | 0.013 |
| 50CrVA  | 0.46~0.54 | 0.80~1.10 | 0.50~0.80 | 0.10~0.20 | 0.030 | 0.030 |
| 55CrMnA | 0.52~0.60 | 0.65~0.95 | 0.65~0.95 |           | 0.030 | 0.030 |

分析结果表明,弹簧圈的成分接近国内的 50CrVA 和 55CrMnA 两种钢,但 Cr、Mn 含量高于这两种钢。Cr 元素能提高钢的强度和硬度, Cr、Mn 相互作用,可使钢有很高的淬透性,但 Cr、Mn 均能引起回火脆性。V 的加入,可以使晶粒细化,提高钢的韧性。一般认为 P、S 是钢中的有害元素,其含量应加以控制。

### 1.3 组织和金相检验

在对材料成分检查取样时,发现图 1 中箭头 4 的部位有孔洞缺陷,更清晰的形貌见图 3 中箭头 4。分别对图 1 中的 A 试样和 B 试样进行检查。A 试样用酒精溶液揩擦后,在图 2 中箭头 3 部位圆柱面的二次电子像中观察到疑似裂纹,见图 4 中箭头 5 部位。

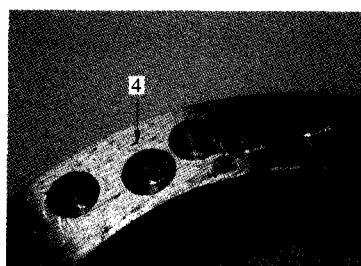


图 3 取样部位见孔洞缺陷



图 4 试样 A 圆柱面疑似裂纹

对 B 试样抛光后进行检查,多个视场观察到孔洞缺陷,图 5 是试样 B 边缘(靠近试样 A 箭头 3 部位)孔洞形貌,在这附近还发现一条微小裂纹,见图 6。

对腐蚀后的 B 试样进行金相检验。图 7 是用酒精(100 mL)与硝酸(3 mL)混合的浸蚀液(处理时间为 10s)作浸蚀处理的金相形貌图,图 8 是

用苦味酸(10 g)与二甲苯(100 mL)及酒精(10 mL)混合的浸蚀液(处理时间 90 s)作浸蚀处理的金相形貌图。

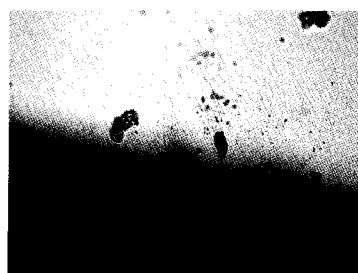


图 5 B 试样边缘孔洞

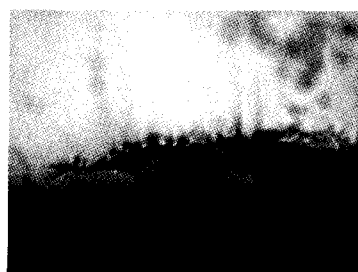


图 6 B 试样边缘微裂纹

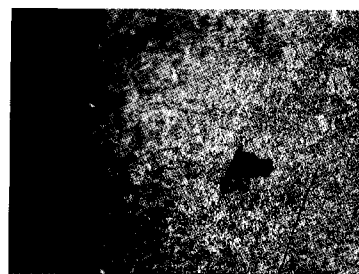


图 7 酒精硝酸浸蚀的金相

图 7 中没有观察到表层脱碳,除一孔洞外也没有观察到其他缺陷,金相形貌与文献[2]提供的 50CrVA 钢淬火-回火状态的显微组织相似。酒精硝酸浸蚀液不能显示材料的晶界形貌,而苦味酸二甲苯酒精浸蚀处理则主要用于检验晶界是否有弱化。

检验结果表明,在试样 B 的若干视场,发现有晶界弱化形貌,图 8 是其中的一个视场。造成晶界弱化的原因是回火工艺不当,使材料容易产生沿晶开裂破坏。

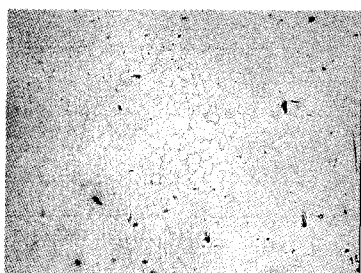


图 8 苦味酸二甲苯酒精浸蚀的金相

#### 1.4 材料硬度测定

在试样 B 上测定 6 个点的硬度,其数值均落在 50CrVA 弹簧钢经淬火-回火处理的推荐硬度(HRC45~50)内,平均值为 HRC49,因此,本起案例中弹簧的硬度符合标准。

#### 1.5 断口分析

##### (1) 清除腐蚀物前的断口

断口大部分表面观察到腐蚀物,宏观上观察到“人”字形条纹部位的断口的二次电子像见图 9。断口上有块状结构物,在断口的某一部位进行能谱检测,除检测出材料本身所含的成分外,Ca 和 P 的含量较高,这可能是锅炉水体影响的结果,除此以外,没有发现可能引起严重腐蚀的物质。

##### (2) 清除腐蚀物后的断口

对断口清理后的二次电子像见图 10。图 10 上观察到清晰的冰糖块状结构,表明断口是沿晶开裂破坏。多个视场观察到二次裂纹(见箭头 6),进一步证实簧丝发生脆性破坏。

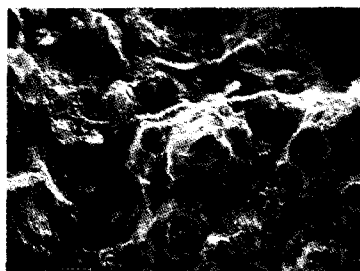


图 9 清除腐蚀物前的断口

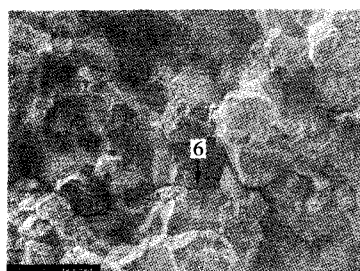


图 10 清除腐蚀物后的断口

#### 1.6 应力分析

弹簧圈的最大应力点在横截面的内侧<sup>[3]</sup>,而弹簧圈断裂的源点为横截面的外侧,弹簧圈不是从应力最大点处开始断裂的,这一现象不支持弹簧的断裂是因为其工作应力大于材料的许用应力引起的。

#### 2 分析和结论

(1) 宏观检查表明,事例中的弹簧属于脆性断裂,裂纹源发生在图 1 和图 2 箭头 3 部位,从理论上分析,受压缩的弹簧,工作时最大应力处为横截面的内侧,而本弹簧裂纹源部位基本属于外侧,所受的应力是较小的。裂纹源不是产生在工作应力最大部位的这一现象表明,本起事例破坏的主要原因不是强度设计不足。

(2) 金相检查结果表明,事例中的弹簧在 B 试样边缘(A 试样裂纹源部位沿轴向延伸处)检查出微裂纹,抛光后的表面有较多的孔洞缺陷,表明制造弹簧的材质有缺陷。经硝酸酒精溶液浸蚀的金相表面没有检查出表层脱碳的损伤;经苦味酸二甲苯酒精溶液浸蚀的金相上观察到材料某些部位有晶界弱化形貌,表明有回火脆性特征,回火脆性现象通常是由回火工艺不当引起的。

(3) 在能谱检测中,断口上没有检查到引起材料发生晶间腐蚀的物质元素。

(4) 断口的微观检测中,观察到清晰的冰糖块状结构,表明断口是沿晶开裂破坏。多个视场观察到二次裂纹,特别是在裂纹源附近紧靠簧丝的圆柱面处也观察到二次裂纹。

根据以上分析,本起案例中弹簧的断裂属于脆性沿晶断裂,材料内部的晶界弱化以及组织上的微孔洞和微裂纹缺陷是弹簧失效的主要原因。由于簧丝材料表面存在微裂纹缺陷,当弹簧工作时,应力集中发展成裂纹源,而材料内部存在微孔洞,并且晶界上有回火脆性特征,使裂纹源沿微孔洞或晶界处发展,最后造成沿晶断裂破坏。

#### 参考文献:

- [1] 廖景娱,刘正义. 金属构件失效分析[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
- [2] 金相分析技术[M]. 上海:上海科学技术文献出版社,1987.
- [3] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京:人民教育出版社,1979.