

文章编号:1000-582x(2001)02-0085-03

# 热轧 60Si<sub>2</sub>Mn 钢热卷开裂原因分析\*

李远睿

(重庆大学 材料科学与工程学院,重庆 400044)

**摘要:**为弄清机车圆柱压缩螺旋弹簧热卷成形时表层开裂的原因,对制造此种弹簧的 φ38 mm 热轧 60Si<sub>2</sub>Mn 钢进行了化学成分、表层金相组织等分析后,采用波谱法和剥层分析法确定了该材料在 (1 050 ± 50)℃ 的煤气燃烧炉内加热 1.3~1.5 h 后表层显著增硫是造成弹簧热卷成形时其外侧表面层开裂的根本原因。

为避免加热时对钢表层的硫腐蚀,除对材料表面质量提出了进一步的要求外,还提出了采用可控气氛,对发生炉煤气进行脱硫处理及使用低硫无烟煤作发生炉煤气的原料等解决措施。文中立足现有设备条件而采用后者亦很好地解决了此问题。

**关键词:**热轧;钢;热卷;开裂

**中图分类号:** TG 156.8<sup>+</sup>4

**文献标识码:**A

重庆某配件厂 φ38 mm 60Si<sub>2</sub>Mn 热轧弹簧钢在用发生炉煤气为燃料的加热炉中,采用 (1 050 ± 50)℃ × (1.3~1.5) h 加热后,进行机车螺旋弹簧热卷成形时,在平行于弹簧轴线的外侧表面层上出现了大量的裂纹甚至裂口,如图 1 示。对此现象进行了取样分析和研究后得出:是加热时钢的表层被显著增硫所致。



图 1 弹簧出现裂纹示意图

## 1 材料

对尚未加热的该批 φ38 mm 热轧 60Si<sub>2</sub>Mn 弹簧钢进行了表面质量、几何尺寸、化学成分、热酸蚀、表层脱碳程度、内部组织和非金属夹杂等进行检验、分析和试验后,认定材料质量是符合 GB1222-85《弹簧钢》标准规定。故热卷成形时弹簧外侧表层开裂不是材料的质

量因素所致。

## 2 加热后的表面状态

热卷前该批 φ38 mm 热轧 60Si<sub>2</sub>Mn 钢直条是在燃烧发生炉煤气的加热炉内进行加热的,而煤气则由煤气发生炉直接供给。按 (1 050 ± 50)℃ 加热保温 (1.3~1.5) h 的工艺参数加热后,钢表面氧化严重,使用英国剑桥仪器厂制造的扫描电镜观察到的表面形貌如图 2 所示。由图 2 看出:加热后钢表面氧化烧损并龟裂的现象随处可见。

再制成金相试样,观察拍摄其表层的金相组织,得到图 3。从图 3 看到:加热后钢表层脱碳很明显,脱碳层深度约 1.5 mm,其中全脱碳层近 1.0 mm。



图 2 加热后钢表面的 SEM 形貌 ×15

\* 收稿日期:2000-06-27

作者简介:李远睿(1946-),男,重庆人,重庆大学副教授。从事弹性材料、表面工程及钛合金等研究。

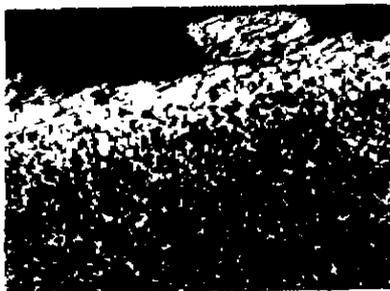


图 3 加热后钢表层脱碳情况的金相组织  $\times 100$

### 3 含硫分析

#### 3.1 波谱分析

采用英国剑桥仪器厂制造的扫描电镜和其配备的 WDX-2A 型波谱仪 (Wavelength Dispersive X-ray Spectromer) 对加热后的材料表面的氧化物成分进行面扫描波谱分析, 结果如表 1 所列。

表 1 表面氧化物成分波谱分析结果

| 元素 | I/nA | 相对值     | 标样值     | 含量/%  |
|----|------|---------|---------|-------|
| S  | 35   | 255.6   | 8 491.7 | 3.01  |
| O  | 200  | 312.3   | 1 310.6 | 23.83 |
| Fe | 4    | 3 201.5 | 4 421.9 | 72.40 |

波谱分析结果证实, 加热时形成的氧化皮中含有约 3% 的硫。

#### 3.2 表层含硫量

将加热后的 60Si<sub>2</sub>Mn 钢横切取样并制备后, 在其横断面上从表面向内部沿直径方向进行线扫描分析硫的分布情况。图 4 为样品形貌, 粗箭头所指处为波谱仪分析并开始打出波谱处, 打印出样品中硫的分布波谱如图 5 所示。图 5 上的另两个细箭头则为其余两次波谱分析的起点, 但后两处未打出波谱线(为了醒目和示出三次波谱分析的起点, 图 5 中仅打出了从最下面的一个小箭头开始的一条硫峰波谱线, 且将其从它的扫描定位线处向下移动, 令两者分开, 但硫峰波谱线是扫描定位线上的硫分布情况)。



图 4 波谱分析用样品的 SEM 形貌  $\times 15$

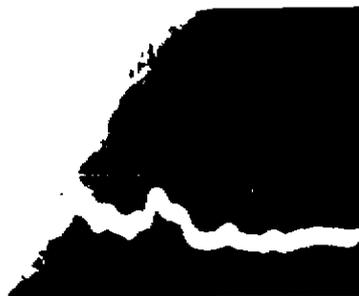


图 5 第一次分析的扫描线及其含硫波谱线  $\times 800$

图 5 中的第一个波峰系加热后的 60Si<sub>2</sub>Mn 钢表面的硫峰, 且在表面层看到硫呈一定梯度分布。出现的第二个波峰应解释为钢内的硫化物夹杂。三次线扫描分析后, 将表面硫含量的分析结果列于表 2。

表 2 加热后的 60Si<sub>2</sub>Mn 钢表面三处的硫含量

| 序号 | I/nA | 相对值   | 标样值     | 硫含量/% |
|----|------|-------|---------|-------|
| 1  | 35   | 159.6 | 8 491.7 | 1.88  |
| 2  | 35   | 147.1 | 8 491.7 | 1.73  |
| 3  | 35   | 162.2 | 8 491.7 | 1.97  |

波谱分析结果表明: 尽管波谱分析时轻元素如 O、S 和凹凸不平的表面会有一些的误差, 但加热后钢表面生成的铁的氧化物中含有较多的硫, 且次表面的硫含量亦显著高于 60Si<sub>2</sub>Mn 钢标准所允许的硫含量 ( $\leq 0.040\%$ ) 是确定无疑的。

#### 3.3 剥层分析

为准确分析出除去加热时形成的氧化皮后钢的表层内的硫含量, 对加热前和加热后的该批  $\phi 38$  mm 60Si<sub>2</sub>Mn 钢用碳硫自动分析仪对硫进行剥层分析, 结果如表 3 所列。

表 3 钢表面层硫含量剥层分析结果

| 距表面/mm   | 0.1   | 0.2   | 0.3   | 0.4   | 0.5   |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 加热前硫含量/% | 0.042 | 0.036 | 0.034 | 0.032 | 0.033 |
| 加热后硫含量/% | 1.82  | 1.48  | 1.36  | 1.15  | 0.98  |
| 距表面/mm   | 0.6   | 0.7   | 0.8   | 0.9   | 1.0   |
| 加热前硫含量/% | 0.035 | 0.030 | 0.032 | 0.034 | 0.030 |
| 加热后硫含量/% | 0.74  | 0.57  | 0.48  | 0.42  | 0.35  |

剥层分析结果证实, 在上述条件下对钢加热后其表层出现了渗硫现象, 表层中的硫含量已远高于它在加热前的原始硫含量。

## 4 讨论

我们知道,由于煤气发生炉中产生的发生炉煤气内存在的硫蒸气、SO<sub>2</sub> 及 H<sub>2</sub>S 等,燃烧加热钢材会加速钢的腐蚀。其原因是:金属硫化物与其氧化物比较,具有因生成自由能较氧化物高而稳定性差;硫化物(如 FeS、NiS、MoS、CuS 等)的体积与其相应的金属体积相比更大,通常在(2.5~3.0):1 之间,致使表面的氧化物层更易破裂(如图 2 上看到的龟裂现象);另外,硫化物内的晶格缺陷更多(如 FeO<sub>1.055-1.10</sub>, FeS<sub>1.0-1.3</sub>),故钢的氧化层中含有 FeS 时更为疏松,从而更有利于物质在其内的迁移而加速腐蚀等特点,造成被加热的钢材表面及表层质量恶化<sup>[1]</sup>。

更为严重的是:渗入钢表层的硫与基体金属铁、氧化物及硫化物等会形成如表 4 所列的一些低熔点的共晶物。

表 4 硫化物的共晶温度

| 共晶物     | 共晶温度/℃ |
|---------|--------|
| FeO-FeS | 950    |
| Fe-FeS  | 985    |
| MnS-FeS | 1 101  |

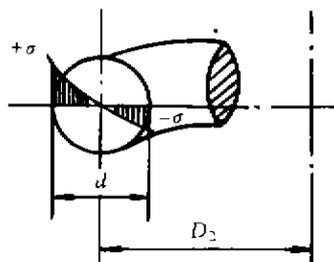


图 6 弹簧热卷成形时材料截面上应力分布示意图

显然,当 φ38 mm 60Si<sub>2</sub>Mn 钢在燃气炉中加热而造成其氧化物中硫含量达到 3.0% 左右、表层内硫含量也大大高出 60Si<sub>2</sub>Mn 钢标准规定的允许值时,钢的表层内会有大量分散的低熔点共晶物是完全可能的。而弹簧热卷成形的加热温度为(1 050±10)℃,这会使表层中存在的这些低熔点的硫化物共晶组织处于熔化或者近熔化状态。当被加热成此种状态的 60Si<sub>2</sub>Mn 钢从炉内拉出并立即热卷成圆柱螺旋弹簧的胚簧时,由于弹簧的外侧表层受到快速拉应力作用,而内侧表

层则受到压应力作用(见图 6),致使弹簧外侧的表层产生大量平行于其轴线的裂纹及裂口就是很自然的事了。

当然,钢表面层脱碳后亦会造成一定的拉应力<sup>[2]</sup>,两者叠加的结果,更易造成热卷成形时其外侧表面的开裂现象。但这里,主要原因是因加热时钢表层渗硫后造成的“热脆”现象。

综上分析和讨论知:出现此种现象是因为由发生炉中产生出的煤气内有过高的含硫组分,使钢材高温加热时,于燃气中被含硫气氛腐蚀及表层渗硫所致。

## 5 措施

针对前面的分析和讨论结果,通常可采用如下两种方式加以克服。

使气氛中的含硫组分在(1 050±10)℃下低于同温同压下 FeS 的分解压,则 FeS 不会形成,也难以形成其低熔点的共晶物。但要做到这一点,应对设备进行改造,使其对发生炉所产生的发生炉煤气能够进行脱硫处理,或直接采用可控气氛炉对钢进行加热。

若尚无条件改造设备及改用可控气氛炉,则考虑煤气发生炉用煤应选用低硫优质无烟煤作发生炉煤气的原料,亦可显著降低发生炉煤气中的含硫组分,从而避免了热卷开裂现象。

此外,由表 3 知,该批 φ38 mm 60Si<sub>2</sub>Mn 钢在加热前其最表层已有了轻微增硫现象,这是在轧制前加热胚料时出现的表面增硫现象,但因轧制时的减面率及氧化皮剥离等大大削弱了此种现象。因而,弹簧钢胚加热过程中注意到其表面不被含硫气氛腐蚀则更好。

## 6 结论

发生炉煤气中的含硫组分过高,使钢加热时表层渗硫形成了低熔点的硫化物共晶体,是造成弹簧热卷成形时,其外侧表面开裂的根本原因。

### 参考文献:

- [1] 朱日彰. 金属腐蚀学[M]. 北京:冶金工业出版社,1989. 35-36.
- [2] 安运铮. 热处理工艺学[M]. 北京:机械工业出版社,1982. 19.

(下转 99 页)

