

## 铁路货车 60Si2CrVAT 钢弹簧疲劳试验断裂分析和工艺改进

郑国昱

(石家庄钢铁有限责任公司,石家庄 050031)

**摘要**  $\Phi 16$  mm 60Si2CrVAT 弹簧钢( /% : 0.58C, 1.76Si, 0.66Mn, 0.010P, 0.005S, 1.15Cr, 0.15V) 生产流程为转炉-LF-VD-220 mm  $\times$  300 mm 连铸-轧制-退火工艺。弹簧制造主要工艺为冲床下料-中频感应加热-热卷簧-余热淬火(890 ~ 870  $^{\circ}$ C, 油冷)-530  $^{\circ}$ C 电阻炉回火-打磨-抛丸-预压缩。分析了  $\Phi 16$  mm K6 弹簧在疲劳试验过程 62 万次发生断裂(标准要求  $\geq 300$  万次)的原因。结果表明,弹簧支撑圈与工作圈之间在点接触产生的硌伤而导致应力集中是弹簧早期疲劳断裂的主要原因,同时弹簧局部存在异常下贝氏体也对弹簧疲劳寿命产生了不良影响。通过改进制簧工艺,包括保证支撑圈几何尺寸和弹簧淬火温度,防止弹簧疲劳试验时发生局部点接触等措施,使 60Si2CrVAT 钢弹簧的疲劳试验寿命  $\geq 300$  万次。

**关键词** 60Si2CrVAT 钢 铁路货车用弹簧 疲劳断裂 点接触 应力集中 下贝氏体

## Analysis on Failure of Spring of Steel 60Si2CrVAT for Railway Freight Train during Fatigue Test and Process Improvement

Zheng Guoyu

(Shijiazhuang Iron and Steel Co Ltd, Shijiazhuang 050031)

**Abstract** The production flowsheet of  $\Phi 16$ mm product of spring steel 60Si2CrVAT ( /% : 0.58C, 1.76Si, 0.66Mn, 0.010P, 0.005S, 1.15Cr, 0.15V) is BOF-LF-VD-220 mm  $\times$  300 mm bloom casting-rolling-annealing process. The main manufacturing process of spring for railway freight train is punching machine unloading-medium frequency induction heating-hot coiling spring-residual heat quenching (890 ~ 870  $^{\circ}$ C, oil cooling)-530  $^{\circ}$ C tempering in electric resistance furnace-grinding-shot blasting-pre-compression process. The cause of fracture of  $\Phi 16$  mm K6 spring with 620 000 times in fatigue test (standard requirement  $\geq 3$  000 000 times) is analyzed. Results show that the hurt at point-contact between spring supporting ring and effective ring led to stress concentration is main cause of earlier fatigue fracture, while the abnormal lower bainite existing at local region of spring is disadvantage for spring fatigue life. With improving spring manufacturing process including insuring supporting ring size and controlling spring quenching temperature, preventing local point contact at spring fatigue test, the test fatigue life of spring of steel 60Si2CrVAT is up to  $\geq 3$  000 000 times.

**Material Index** Steel 60Si2CrVAT, Spring for Railway Freight Train, Fatigue Fracture, Point Contact, Stress Concentration, Lower Bainite

圆柱螺旋压缩弹簧是铁路货车转向架的重要部件,对整个车辆起着减震和支撑作用。铁路货车的运行工况十分恶劣,弹簧受到温度变化、湿度变化、雨雪、腐蚀性气体等因素的影响,因此要求铁路货车弹簧具有较好的抗疲劳性能和抗腐蚀性<sup>[1]</sup>。影响弹簧疲劳性能的主要因素包括弹簧钢材的质量和弹簧的生产制造工艺<sup>[2]</sup>。目前国内货车转向架用弹簧钢材主要为 60Si2CrVAT 银亮材,生产中采用大方坯两火轧制成材工艺<sup>[3]</sup>。弹簧的主要生产工艺为:冲床下料 $\rightarrow$ 端部中频加热制扁 $\rightarrow$ 中频感应加热 $\rightarrow$ 热卷簧 $\rightarrow$ 余热淬火(淬火温度 830 ~ 870  $^{\circ}$ C, 油冷) $\rightarrow$ 电阻炉回火(回火温度 530  $^{\circ}$ C) $\rightarrow$ 支撑圈打磨 $\rightarrow$ 抛丸处理 $\rightarrow$ 预压缩 $\rightarrow$ 磁粉探伤 $\rightarrow$ 喷漆等。

货车转向架弹簧生产厂在 K6 弹簧的疲劳试验过程中, $\Phi 16$  mm 弹簧在疲劳寿命 62 万次时发生断裂(标准要求  $\geq 300$  万次),本文对弹簧断裂失效的

原因进行了综合分析并提出了预防措施。

### 1 失效模式分析

图 1(a)为断裂弹簧的实物形貌,可见断裂发生在与弹簧支撑圈相邻的工作圈。图 1(b, c)为弹簧断裂的断口宏观形貌及断裂源对应表面形貌,由图 1 可见,弹簧断裂起源于表面,断口可见明显的疲劳弧线,因此可以确定弹簧断裂为疲劳断裂。断口可分为疲劳源区、扩展区和瞬断区。疲劳源区存在明显的锈蚀氧化,疲劳源区对应的弹簧表面存在明显的硌伤。

### 2 理化分析

#### 2.1 分析设备

采用 ARL-4460 直读光谱仪分析断裂弹簧化学成分;断口试样经超声波清洗后,采用 FEI XL-30 扫描电子显微镜分析断口形貌;采用 OLYMPUS PMC3

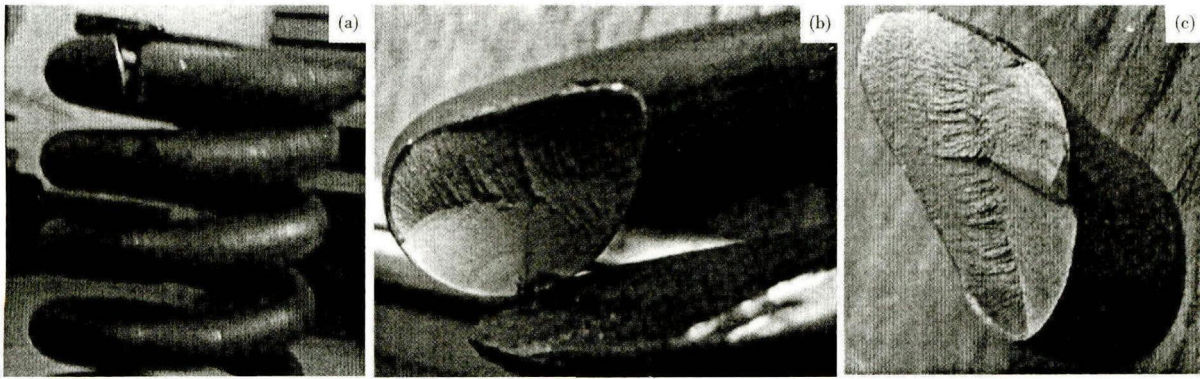


图1 断裂弹簧形貌:(a)疲劳试验断裂,  $\times 1$ ; (b)断口表面,  $\times 10$ ; (c)断裂源对应表面,  $\times 10$

Fig. 1 Morphology of fracture of spring: (a) fatigue test fracture,  $\times 1$ ; (b) fractured surface,  $\times 10$ ; (c) surface corresponding to fracture source,  $\times 10$

表1 60Si2CrVAT 钢断裂弹簧分析成分 / %

Table 1 Analysis of fracture spring of steel 60Si2CrVAT / %

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Ni	Cu
断裂弹簧	0.58	1.76	0.66	0.010	0.005	1.15	0.15	0.01	0.02
技术条件	0.56 ~ 0.64	1.40 ~ 1.80	0.40 ~ 0.70	$\leq 0.015$	$\leq 0.015$	0.90 ~ 1.20	0.10 ~ 0.20	$\leq 0.35$	$\leq 0.20$

金相显微镜观察弹簧断口附近金相组织和评定非金属夹杂物级别;采用 FR-31 洛氏硬度计测试硬度。

## 2.2 化学成分分析

分析断裂弹簧的化学成分,结果见表1。可见,弹簧各元素的含量均符合原铁道部运输局运装货车[2004]342号《铁路货车转向架圆柱螺旋弹簧技术条件》中60Si2CrVAT的要求。

## 2.3 断口扫描电镜分析

图2(a)为弹簧断口扫描电镜形貌,由图2(a)可见,弹簧断裂起源于其表面的硌伤区,疲劳断口存在一条明显的撕裂棱,说明弹簧表面硌伤区在疲劳试验过程中引起极大的应力集中,弹簧疲劳源区存在氧化和磨损已经无法观察其微观断裂形貌。图2(b,c)弹簧断口扩展区和瞬断区微观断裂形貌,为准解理+韧窝断裂。

## 2.4 金相及硬度分析

在距断口约1 cm位置取高倍试样,观察弹簧横截面金相组织。弹簧基体组织为回火屈氏体,但局部存在下贝氏体回火组织,如图3(a,b)所示。弹簧边缘脱碳层不明显,如图3(c)。

依据 GB/T10561-2005《钢中非金属夹杂物含量的测定标准评级图显微检验法》评定断裂弹簧夹杂物级别为:A、B、C、D类分别为0.5、0.5、0、1.0级,符合标准的要求。弹簧基体硬度为45.7、45.9、45.6 HRC,符合标准要求的42~48 HRC。

## 3 分析与讨论

### 3.1 弹簧钢生产工艺分析

该批次60Si2CrVAT弹簧钢的生产工艺为:转炉冶炼→LF精炼→VD脱气→大方坯连铸(220 mm  $\times$  300 mm)→开坯轧制(135 mm方坯)→连轧成材→退火→银亮。该批钢材为银亮磨光状态交

货,符合 GB/T3207-2008《银亮钢》和原铁道部运输局运装货车[2004]342号《铁路货车转向架圆柱螺旋弹簧技术条件》的标准要求,表面无脱碳层和缺陷存在,因此可以排除弹簧表面的硌伤是在弹簧钢银亮材生产中产生的可能性。

### 3.2 弹簧断裂原因分析

K6弹簧疲劳试验设备为PMS-P500型液压脉动试验机,疲劳试验施加的载荷和频率、弹簧的几何形状均符合 TB/T2211-2010《机车车辆悬挂装置钢制螺旋弹簧》和图纸的要求。

弹簧疲劳试验过程中施加的载荷为压应力,弹簧整体受到压应力的作用。但在单个弹簧工作圈的表面存在剪切应力,其内侧的剪切应力值最大<sup>[4]</sup>,剪切力会在表面缺陷或损伤处产生应力集中的现象。在疲劳试验载荷的作用下,弹簧支撑圈端部与相邻工作圈发生接触,则在工作圈圆弧面的局部点上产生挤压损伤引起应力集中并产生接触应力疲劳。接触应力使工作圈局部点在一定深度产生拉应力区,诱发的内部小裂纹与表面挤压损伤裂纹共同形成复合裂纹源,它们交互作用,在弹簧剪切力作用下形成裂纹扩展区<sup>[5]</sup>,并最终导致弹簧的疲劳断裂。弹簧支撑圈与相邻工作圈的接触损伤宏观表现为点接触位置的硌伤。

弹簧化学成分、非金属夹杂物和硬度符合图纸

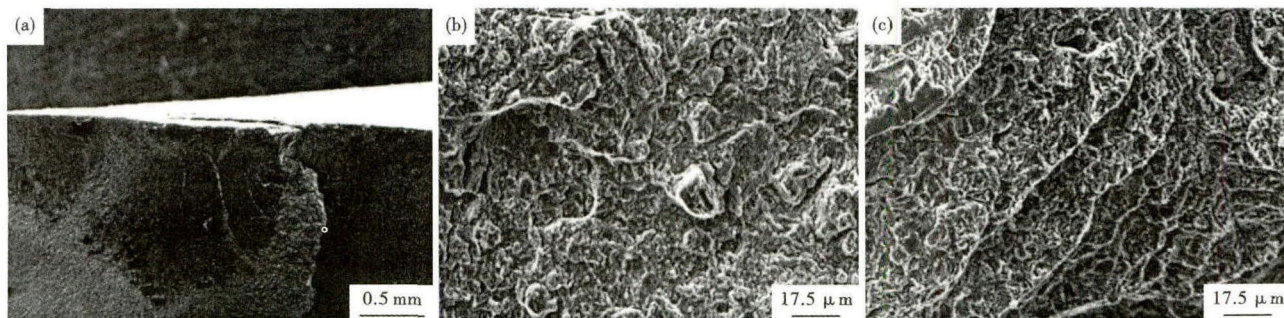


图 2 60Si2CrVAT 钢断口 SEM 形貌:(a)疲劳源区;(b)扩展区微观断裂;(c)瞬断区微观断裂

Fig. 2 SEM morphology of fracture of steel 60Si2CrVAT; (a) fatigue source region; (b) micro-fracture propagation region; (c) micro-fracture in instantaneous collapse region

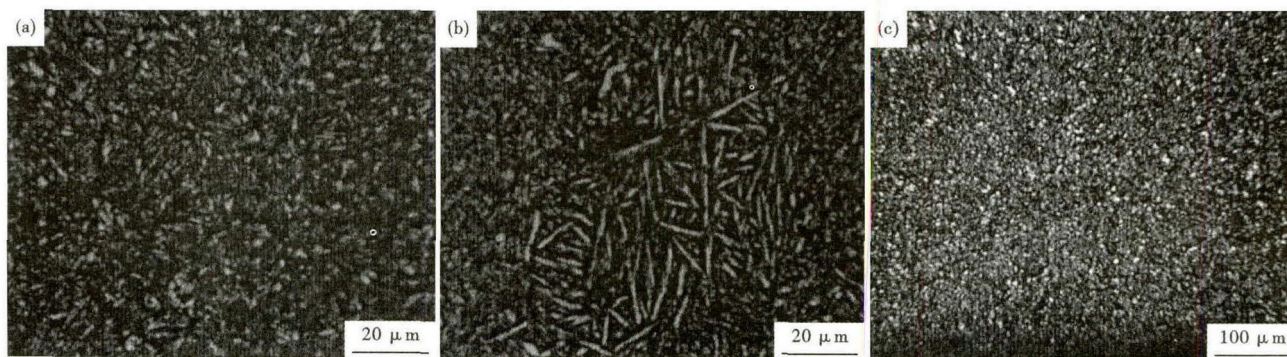


图 3 60Si2CrVAT 钢断裂区组织形貌:(a)基体-回火屈氏体;(b)局部-下贝氏体;(c)横截面边缘

Fig. 3 Morphology of structure in fracture region of steel 60Si2CrVAT; (a) matrix-tempered troostite; (b) local-lower bainite; (c) edge of cross section

的要求,但其局部存在异常的下贝氏体组织,对弹簧疲劳性能产生不良影响。异常下贝氏体组织的产生应该与其淬火热处理过程相关,产生原因应该为弹簧余热淬火前弹簧支撑圈及与其相邻的工作圈降温较快、或夏季淬火油池局部温度偏高、或生产节奏过快导致弹簧在油池中堆积使个别弹簧局部淬火冷却速度不足。

### 3.3 改进措施及效果

(1) 弹簧生产过程中应严格按照 TB/T2211-2010《机车车辆悬挂装置钢制螺旋弹簧》附录 A 要求,保证支撑圈的几何尺寸,在规定的静载荷下支撑圈与工作圈接触线长度为弹簧中径的 0.33 倍,至少应达到 20 mm。同时保证支撑圈末端与工作圈之间间隙不能过小,以防止弹簧疲劳试验时发生局部点接触。

(2) 保证弹簧的淬火温度和油池温度,同时保持正常的生产节奏,以保证弹簧淬火热处理质量。对于规格较小弹簧(Φ12 mm、Φ16 mm)可以采用二次加热淬火方式以保证淬火温度。

(3) 通过采取上述改进措施,弹簧通过了 300

万次的疲劳试验,并实现了批量供货。

### 4 结论

(1) K6 弹簧支撑圈与工作圈存在点接触而产生接触应力疲劳,同时点接触位置引起弹簧表面剪切应力集中是弹簧早期疲劳断裂的主要原因。

(2) 弹簧局部存在异常的下贝氏体组织,对弹簧疲劳寿命产生不良影响。

### 参考文献

- [1] 刘 强. 铁路货车螺旋弹簧疲劳寿命研究[D]. 大连:大连交通大学,2008.
- [2] 王 红,商跃进,孟广浦. 新型货车转向架变刚度弹簧组的试验寿命估算及疲劳强度分析[J]. 中国铁道科学,2007,28(1):71-75.
- [3] 张仕广,张剑锋,李红星. 60Si2CrVA 圆钢硬度超标问题的解决措施[J]. 轧钢,2005,22(5):67-69.
- [4] 李树梅,阎 平. 螺旋弹簧断裂分析及预防措施[J]. 金属热处理,2012,37(11):130-132.
- [5] 陈士伟. 影响货车圆柱螺旋压缩弹簧疲劳的主要因素[J]. 机车车辆工艺,2004(2):33-35.

郑国昱(1963-),男,副总工程师,北京科技大学(本科)毕业,金属材料研究。

收稿日期:2014-12-13