

# 上海轨道交通 03A01 型车辆轴箱弹簧断裂原因分析

沈 豪

(申通南车(上海)轨道交通车辆维修有限公司,201814,上海//高级工程师)

**摘 要** 针对上海轨道交通 03A01 型列车 15 年架修阶段的轴箱弹簧发生疲劳断裂现象,采用化学元素分析、金相检验、硬度测试和断口扫描电镜等测试方法,综合分析了导致弹簧断裂失效的原因。运用磁粉检测识别检修阶段的弹簧表面缺陷,防止弹簧装车后发生断裂失效。

**关键词** 城市轨道交通车辆;轴箱弹簧断裂;故障分析;磁粉检测

**中图分类号** U270.331+.4

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2019.05.020

## Analysis of the Axle-box Spring Fracture of 03A01 Type Train in Shanghai Metro

SHEN Hao

**Abstract** Focusing on the fatigue fracture of axle-box spring during the 15-year overhaul of Shanghai metro 03A01 type trains, causes of the primary spring fatigue fracture are comprehensively analyzed by using methods of chemical element analysis, metallographic examination, hardness testing and fracture scanning electron microscopy testing. Finally, magnetic particle testing method is used to identify the spring surface defects during the maintenance phase, in order to prevent the spring fatigue fracture after loading.

**Key words** urban rail transit vehicle; axle-box spring fracture; fault analysis; magnetic particle testing

**Author's address** Shentong CSR(Shanghai) Rail Transit Vehicle Maintenance Co., Ltd., 201814, Shanghai, China

地铁列车行驶过程中,轴箱弹簧往往承受着高频往复压缩运动,起着缓冲和减振作用,其质量好坏对列车的平稳性、安全性起着至关重要的作用。地铁列车运行一定里程后,部分轴箱弹簧会出现疲劳断裂失效的现象。国内学者普遍认为,内部缺陷是造成弹簧早期失效的主要原因,其中包括由材料的异常组织、非金属夹杂物等原因引起的失效。此外,材料表面的缺陷(如表面脱碳和表面的凹坑、划痕等)及材料的热处理工艺也可导致弹簧的失效<sup>[1]</sup>。而在长期的使用中,即便没有夹杂和组织异

常等原因,弹簧的某些部位亦会在载荷作用下发生疲劳断裂。上海轨道交通 3 号线 03A01 型车辆检修阶段的轴箱弹簧在长期交变载荷作用下,部分弹簧发生了疲劳断裂现象。鉴于此,本文采用化学成分分析、金相检验及硬度测试、断口扫描电镜等方法,综合分析导致该型车辆弹簧失效断裂的原因,并运用磁粉检测原理,发现导致车辆弹簧断裂失效的表面缺陷。

## 1 弹簧断裂原因分析

### 1.1 化学元素分析

在上海轨道交通 3 号线 03A01 型车辆弹簧有效圆圈部位分别取 1#试样和 2#试样进行化学成分元素分析,其结果见表 1。

表 1 上海轨道交通 3 号线车辆弹簧化学分析结果

试样	各元素质量分数/%								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
1#	0.54	0.30	0.88	0.009	0.007	0.99	0.10	0.02	0.13
2#	0.55	0.30	0.88	0.009	0.008	0.99	0.10	0.02	0.13

经过化学元素分析,该类弹簧化学成分符合标准 EN 10089《淬火和回火热轧制弹簧钢》中关于 51CrV4 的要求,初步判断上海轨道交通 3 号线车辆轴箱弹簧所用原材料为 51CrV4。

### 1.2 金相组织分析

如图 1 所示,在上海轨道交通 3 号线 03A01 型车辆轴箱弹簧有效圆区域(弹簧的棒料直径为 37.5 mm)沿着圆截面选取 1#试样和 2#试样进行金相分析,发现弹簧中心区域基体组织为回火屈氏体(见图 2),基体组织中存在极少量的枝晶偏析,对组织影响不大。对中心区域进行洛氏硬度测试,在两个试样各选取 3 点,测试硬度值分别为:1#试样 45.0 HRC、44.5 HRC、44.5 HRC;2#试样 45.0 HRC、44.5 HRC、45.0 HRC。测试结果表明,两个试样的弹簧硬度值均正常。

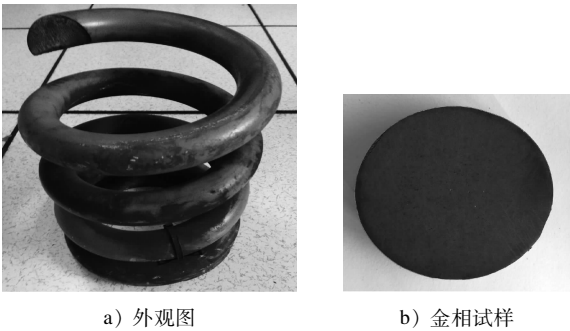


图 1 弹簧及金相试样宏观图

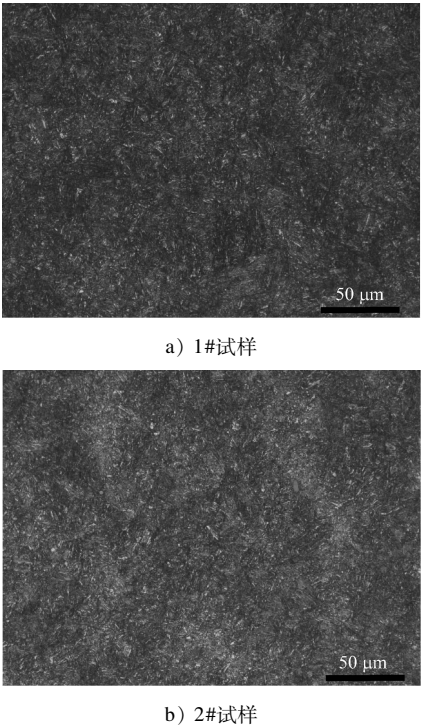
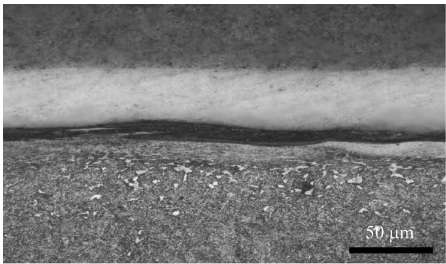


图 2 中心区域金相组织

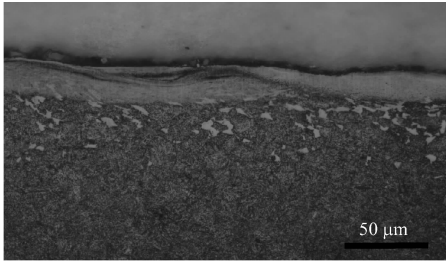
弹簧变形区域组织(见图 3)中含有一定量的变形组织,该组织为形变马氏体,是弹簧在高温形变时发生相变产生的。由于马氏体组织质硬而脆,容易在弹簧的长久使用过程中产生裂纹源。同时发现,弹簧表面区域组织有一定深度的脱碳层(见图 4),其厚度约为 85  $\mu\text{m}$ ,远小于弹簧棒料直径的 1% (375  $\mu\text{m}$ )。

1.3 断口扫描分析

在弹簧断口截面处进行取样(见图 5),进一步分析弹簧断裂原因。疲劳断口位于弹簧支撑圈与有效圈的接触点位置附近(弹簧第 1 圈至 1.2 圈),断口与弹簧圆钢轴线约呈 45°角<sup>[2]</sup>(图 1 弹簧宏观图)。断口清洗后用 SEM(扫描电子显微镜)观察微观形貌。电镜下弹簧断口形貌为典型的疲劳断

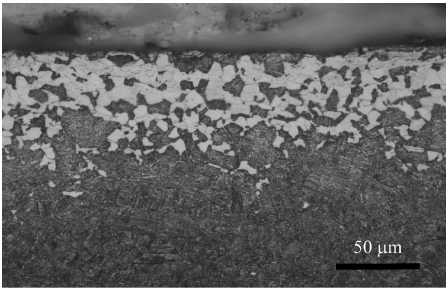


a) 1#试样

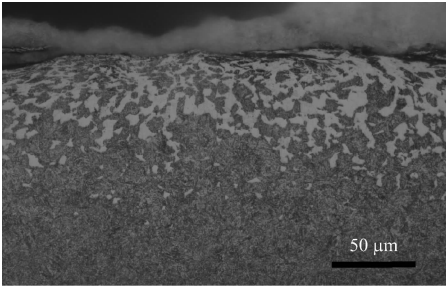


b) 2#试样

图 3 变形区域金相组织



a) 1#试样



b) 2#试样

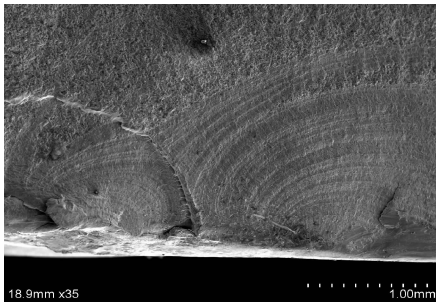
图 4 脱碳层

口,具有三个特征区<sup>[3]</sup>:疲劳源、疲劳裂纹扩展区和瞬间断裂区。图 6 为疲劳源附近微观形貌图,疲劳源起始于弹簧表面的受压部位——有效圈与支撑圈的接触位置(见图 7),由于两者之间接触面积较小,此区域在车辆运行过程中相互碰擦产生的交变应力大,极易产生疲劳裂纹源。裂纹萌生后随即向弹簧内部扩展,形成圆弧形贝纹线。各组贝纹线是以疲劳源为圆心的平行弧线。贝纹线是疲劳区最典型的特征,是弹簧疲劳源在交变载荷作用下引起

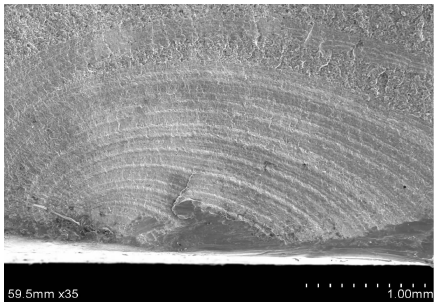


图 5 弹簧断口宏观形貌

的。图 8 为瞬间断裂区的微观形貌,该区域微观断裂机制为准解理断裂和沿晶断裂,从断口形态分析,由于断裂开始于弹簧圈边缘,疲劳源在交变应力作用下产生裂纹扩展,当裂纹扩展到一定程度时,弹簧有效承载截面无法承受载荷应力,发生瞬间

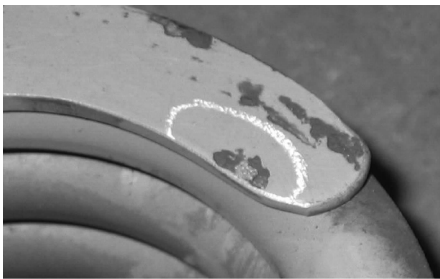


a) 1#弹簧断口



b) 2#弹簧断口

图 6 弹簧断口 SEM 形貌

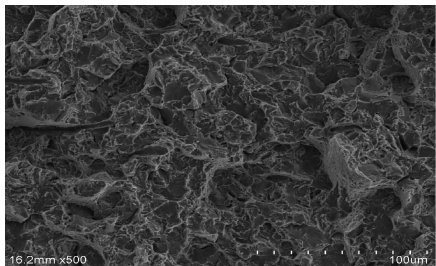


a) 俯视图

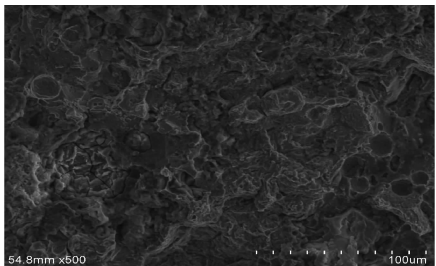


b) 侧面图

图 7 有效圈与支撑圈接触图



a) 1#弹簧断口



b) 2#弹簧断口

图 8 瞬间断裂区 SEM 形貌

断裂。

1.4 磁粉检测分析

为进一步控制弹簧装车后在列车运行过程中发生断裂失效,弹簧检修阶段进行 100% 磁粉检测。由于弹簧油漆层对磁粉检测有影响,在磁粉检测前需对弹簧进行无破坏性脱漆。传统意义上的脱漆方法如机械抛丸、喷丸等会对弹簧表面施加一定程度的压应力,不利于磁粉检测发现早期裂纹等缺陷。本文采用中性脱漆剂对弹簧浸泡脱漆。由于弹簧易发生氢脆现象<sup>[4]</sup>,为证明脱漆对弹簧无危害性,脱漆后对弹簧进行 H 元素含量测定。采用 EM-GA-821 氢测定仪,按照 GB/T 223. 82—2007《钢铁氢含量的测定 惰性脉冲熔融热导法》测定脱漆后弹簧 H 元素含量为 0.35 mg/kg, H 含量较低。因此,使用中性脱漆剂对弹簧基体没有危害性。

由于弹簧特殊的螺旋结构,采用中心导体法加通电法复合磁化对车辆弹簧进行 100% 磁粉探伤。按照 JB/T 7367《圆柱螺旋压缩弹簧 磁粉检测方法》和 EN 10228-1《锻钢件无损检测——第一部分:磁粉检测》对弹簧进行磁粉检测。图 9 为 A1-15/50 试片贴置弹簧表面产生的人工缺陷磁痕,磁痕显示清晰完整,证明了该方法的检测灵敏度。在检修阶段弹簧实际检测中,磁粉检测能够有效地发现弹簧表面出现的纵向缺陷(见图 10)以及横向缺陷(见图 11)。因此,磁粉检测对于本次检修阶段弹簧的表面缺陷具有较好的检测灵敏度。



图 9 A1-15/50 试片清晰显示

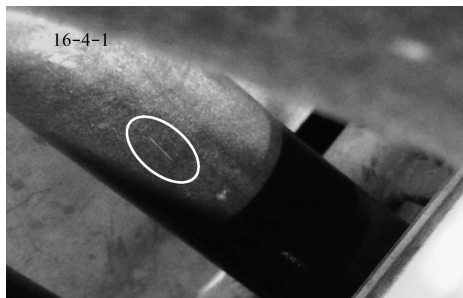


图 10 弹簧纵向磁痕显示

## 2 结论

(1) 上海轨道交通 03A01 型车辆弹簧的化学成分符合标准规定,材质为 51CrV4。

(2) 弹簧的金相组织没有发现异常,基体组织为回火屈氏体;硬度值正常,为 44.5 ~ 45.0 HRC;弹

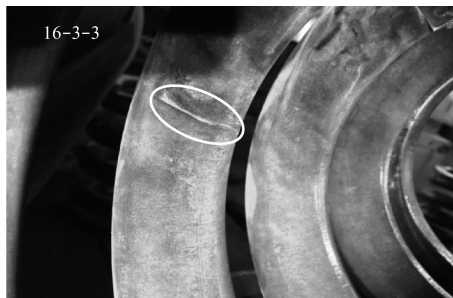


图 11 弹簧横向磁痕显示

簧有约 85  $\mu\text{m}$  厚度的脱碳层(远小于棒料直径的 1%)。

(3) 弹簧的断裂原因:弹簧在交变载荷作用下,弹簧支撑圈与有效圈之间接触产生碰擦,由于接触面积小导致应力大,使得弹簧在该部位变形萌生裂纹源;裂纹源在交变服役载荷作用下开始疲劳扩展;最后,弹簧有效承载截面无法抵抗载荷应力,瞬间断裂。由于上海轨道交通载客量很长时间处于满载负荷,使得弹簧服役条件恶劣,加剧了疲劳源的萌生及扩展。

(4) 磁粉检测对弹簧具有较高的检测灵敏度,能有效发现弹簧表面的纵向缺陷和横向缺陷。在弹簧检修阶段,对拆解后的弹簧进行磁粉检测,能够有效检出弹簧表面缺陷并及时报废,防止弹簧装车后在运行过程中发生断裂失效。

## 参考文献

- [1] 徐石柱,梁益龙. 地铁弹簧断裂失效分析[J]. 热加工工艺, 2014,43(6):224.
- [2] 侯珍,宫心勇,郑秋越. 60Si2CrVA 弹簧断裂原因分析[J]. 理化检测:物理分册,2013,49(11):777.
- [3] 王从曾. 材料性能学[M]. 北京:北京工业大学出版社, 2010:88-89.
- [4] 林文钦. 50 CrVA 弹簧断裂原因分析[J]. 失效分析与预防, 2016,11(1):56.

(收稿日期:2017-08-28)

欢迎访问《城市轨道交通研究》网站

www. umt 1998. com