

## 59 mm×100 mm 矩形 52CrMoV4 弹簧扁钢轧制工艺及失效分析

袁 林, 罗景贤, 陈 阳, 张群琥, 刘 兵

(湖南华菱湘潭钢铁有限公司, 湖南 湘潭 441200)

**摘要:** 针对 59 mm×100 mm 矩形 52CrMoV4 弹簧扁钢易扭转、尺寸不稳定的问题, 进行了孔型设计和轧制工艺优化, 并采用化学成分分析、显微组织分析、力学性能试验等方法对发生断裂的弹簧扁钢的失效原因进行了分析。结果表明: 材料的化学成分符合要求; 力学性能指标中, 抗拉强度为 1511/1494 MPa、屈服强度为 1362/1344 MPa、断后伸长率为 11.5%/9.0%、断面收缩率为 37.0%/36.5%、表面硬度在 42.4~42.9 HRC 之间分布; 表面脱碳层深度为 0.24~0.28 mm, 奥氏体晶粒度为 7.5~8.0 级; 未发现大型夹杂物等冶金缺陷; 材料经热处理后的主要基体组织为回火索氏体+少量贝氏体; 断口起源于表面, 疲劳源区域表面存在明显压痕, 而其他位置未发现压痕, 表明表面压痕是导致材料疲劳寿命降低的直接原因, 瞬断区微观形貌为沿晶+撕裂韧窝。

**关键词:** 52CrMoV4 弹簧扁钢; 疲劳寿命; 断裂; 夹杂物; 脱碳层

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.05.014

**中图分类号:** TG142.41; TG335.5+7

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2024) 05-0109-06

### Rolling process and failure analysis of 59 mm×100 mm rectangular 52CrMoV4 spring flat steel

Yuan Lin, Luo Jingxian, Chen Yang, Zhang Qunhu, Liu Bing

(Hunan Hualing Xiangtan Iron and Steel Co., Ltd., Xiangtan 441200, China)

**Abstract:** For the problems of easy torsion and unstable size of 59 mm×100 mm rectangular 52CrMoV4 spring flat steel, the design of hole pattern and the optimization of rolling process were conducted, and the failure cause of broken spring flat steel was analyzed by the methods of chemical composition analysis, microstructure analysis and mechanical performance test. The results show that the chemical composition of material meets the requirements. In the mechanical performance indicators, the tensile strength is 1511/1494 MPa, the yield strength is 1362/1344 MPa, the elongation after fracture is 11.5%/9.0%, the reduction of area is 37.0%/36.5%, the surface hardness is distributed between 42.4 and 42.9 HRC, the depth of surface decarburization layer is 0.24~0.28 mm, and the austenite grain size is 7.5~8.0 grades. No metallurgical defects such as large inclusions are found, and the main matrix structure of material after heat treatment is tempered martensite+a small amount of bainite. The fracture originates from the surface, and there are obvious indentations on the surface of fatigue source area, while no indentations are found in other positions. Therefore, the surface indentations are the direct cause for the fatigue life of material, and the microstructure of instantaneous fracture zone is intergranular+tearing dimples.

**Key words:** 52CrMoV4 spring flat steel; fatigue life; fracture; inclusions; decarburization layer

弹簧扁钢 (简称弹扁) 包括 60Si2Mn、50CrV4、51CrV4、52CrMoV4, 主要用于汽车用钢。近年来, 随着国内企业生产设备的更新换代以及汽车工业发展的需要, 弹扁的需求量呈现快速增长的趋势<sup>[1-2]</sup>。其中, 52CrMoV4 钢具有高强度、高韧性、耐腐蚀性等特点, 广泛应用于高温、高压和高应力的机械零件<sup>[3-4]</sup>。华菱湘潭钢铁有限公司 (湘钢) 棒三线特

钢生产线原设计生产  $\Phi 20 \sim \Phi 90$  mm 的圆钢, 湘钢棒三线在不改变原有设备的基础上, 成功开发并生产了厚度为 59.0 mm、宽度为 100.5 mm 的 52CrMoV4 弹簧扁钢, 其生产工艺流程图如图 1 所示<sup>[5]</sup>。59 mm×100 mm 外形尺寸的弹簧扁钢, 因其厚度较高且高宽比为 1.74, 因此在设计孔型时, 需合理分配各道次之间的压下量, 便于提高轧槽寿命及控制外观性状及尺寸。某汽车板簧厂使用该类弹簧扁钢生产空气悬架导向臂, 所得导向臂在进行疲劳寿命测试时在 30 万次时出现断裂。为提高疲劳寿命, 对轧制工艺及弹簧扁钢崩料断裂原因进行

收稿日期: 2023-12-26; 修订日期: 2024-03-04

作者简介: 袁 林 (1994-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: 767238701@qq.com

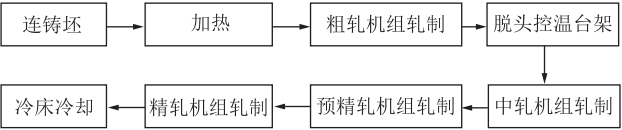


图 1 棒三线生产工艺流程图  
Fig. 1 Production process flow diagram of bar three lines

了分析，为后续工艺改进及产品质量提升提供了参考依据。

1 孔型设计及轧制工艺

1.1 孔型设计

59 mm×100 mm 矩形 52CrMoV4 弹扁的轧制程序如表 1 所示，湘钢棒三线轧线总共 20 架轧机，其中前 10 架采用箱型-椭圆-圆孔型系统，将 280 方（280mm×280mm）的原料坯轧制成Φ108mm的

表 1 59 mm×100 mm 矩形 52CrMoV4 弹扁轧制程序（mm）  
Table 1 Rolling program of 59 mm×100 mm rectangular 52CrMoV4 spring flat steel（mm）

机架号	孔型	轧件高度	轧件宽度	机架号	孔型	轧件高度	轧件宽度
1H	箱型	245.00	296.00	11H	平辊	80.00	122.50
2V	箱型	242.00	252.00	12V	空过	—	—
3H	箱型	170.00	275.00	13H	平辊	53.00	136.00
4V	箱型	186.00	194.00	14V	K4	110.00	60.80
5H	椭圆	142.00	211.00	15H	平辊	55.00	110.90
6V	圆	162.00	162.00	16V	空过	—	—
7H	椭圆	115.00	168.00	17H	平辊	50.60	115.10
8V	圆	131.00	131.00	18V	K2	99.70	54.60
9H	椭圆	99.80	140.36	19H	平辊	50.60	101.20
10V	圆	108.00	108.00	20V	空过	—	—

圆形半成品轧件。从第 11 架轧机开始为平辊加矩形立孔孔型，其中 K2、K4 孔型图如图 2 所示。

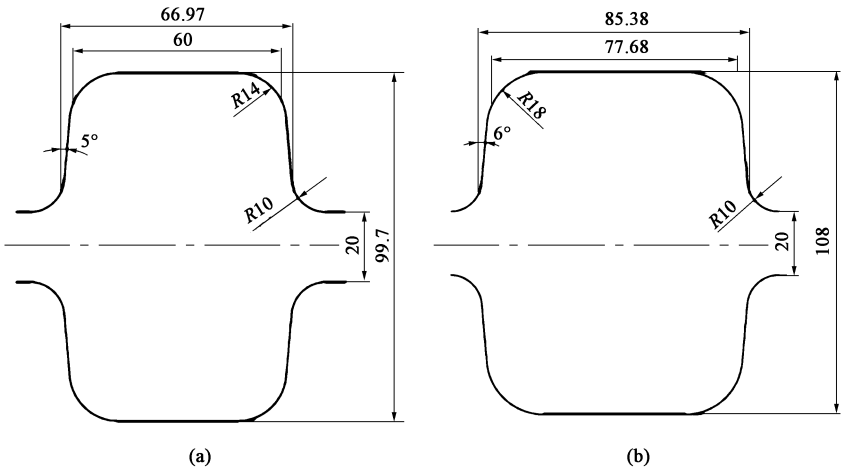


图 2 59 mm×100 mm 矩形 52CrMoV4 弹扁孔型图  
(a) K2 型 (b) K4 型  
Fig. 2 Hole pattern diagrams of 59 mm×100 mm rectangular 52CrMoV4 spring flat steel  
(a) K2 type (b) K4 type

1.2 加热工艺及缓冷工艺

为避免加热温度对 52CrMoV4 钢性能的影响，本文中加热温度及在炉时间严格按照表 2 进行控制。钢种进炉后残氧量全过程控制≤2%，炉内微正压。尽量控制缩短加热段的温度和时间，钢坯在均热段快速加热。缓冷工艺根据之前的研究结果<sup>[5]</sup>，上冷床温度为 950 ℃，缓冷速度宜控制在 0.5 ℃·s<sup>-1</sup> 左右，锯切温度控制在 100 ℃左右。

2 结果与分析

2.1 尺寸分析

在不改变原有设备的条件下，只对工装准备进

表 2 加热温度及在炉时间表

Table 2 Heating temperature and furnace schedule

参数	炉温控制/℃				在炉时间/ min
	预热段	加热 1 段	加热 2 段	均热段	
数值	≤700	关闭	1030±20	1030±20	≤300

行重新开发，在 2022—2023 年，湘钢组织了约 1.5 万吨的 59 mm×100 mm 矩形 52CrMoV4 弹扁生产，尺寸精度均能控制在厚度为±0.25 mm、宽度为±0.7 mm、R 角为 14 mm。如图 2a 所示，59 mm×100 mm 弹扁的 K2（18V）孔型的槽底设计为 60.00 mm、槽口设计为 66.97 mm、R 角设

计为 14 mm、侧壁斜度为 5°，无凸度；如图 2b 所示，K4（14V）孔型的槽底设计为 77.68 mm、槽口设计为 85.38 mm、*R* 角设计为 18 mm、侧壁斜度为 6°，无凸度。从图 2 可知，K4 孔型和 K2 孔型的侧壁斜度均保持一致 5°，有效地保证了扁钢尺寸外形，且轧辊车削仅需要车削 5~7 mm，提高了轧辊利用率，降低了成本消耗。K4 型到 K2 型的 *R* 角从 18 mm 缩减至 14 mm，在保证角

部尺寸的同时使得材料 *R* 角处不会出现褶皱、簇状裂纹等缺陷<sup>[6]</sup>。各道次之间压下量参照表 1，有效地保证了每架轧机轧槽过钢吨位在 2000 t 以上。

2.2 化学成分分析

从弹簧扁钢断口处取样，经砂轮和砂纸打磨去除氧化皮后进行化学成分分析，结果见表 3，弹簧钢中各元素的含量均符合 ISO 683-14—2004<sup>[7]</sup>的要求。

表 3 弹扁断口处的化学成分（%，质量分数）

Table 3 Chemical compositions of spring flat steel at fracture surface（%，mass fraction）								
参数	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	S	P
标准	0.48~0.56	<0.4	0.70~1.10	0.90~1.20	0.15~0.25	0.10~0.20	≤0.030	≤0.030
实测	0.51~0.53	0.25~0.28	0.90~1.01	1.05~1.10	0.15~0.17	0.13~0.15	≤0.005	≤0.015

2.3 断口形貌分析

图 3 和图 4 分别为弹扁断口处的宏、微观形貌。由图 3 可知，断口起源于表面，疲劳源区域表面存在明显压痕，而其他位置未发现压痕。由图 4 可知：源区未发现大型夹杂物等冶金缺陷；扩展区微观形貌光滑，存在明显的磨损现象和疲劳条纹；瞬断区微观形貌为沿晶+撕裂韧窝<sup>[8-9]</sup>。

2.4 显微组织及物相组成分析

在断口附近取横截面进行显微组织观察，图 5 为样品的显微组织图。由图 5a 和图 5b 可知：疲劳源表面存在严重的组织变形区域，在组织变形区域存在细小的疲劳裂纹且断口附近出现明显的二次裂纹；同时还发现，表面脱碳层深度为 0.24~0.28 mm。分析其原因为：湘钢棒三线采用的加热制度，即采用较低的加热工艺和较低的炉内氧化性气体有利于弹簧钢表面脱碳层深度的减少。由图 5c 和图 5f 可

知，1/4 处与心部组织为回火索氏体+少量贝氏体<sup>[10-11]</sup>，晶粒度为 7.5~8.0 级。

2.5 夹杂物分析

由图 6 可知，在材料的纵截面中检测到 B 类（氧化铝类）、C 类（硅酸盐类）夹杂物。其中，杂物级别为 A1（硫化物类）、D1（球状氧化物类）和 Ds0.5。利用能谱仪对断面上夹杂物的成分进行分析，如图 7 所示，主要为 Fe 和 O 含量，其原因为断口表面覆盖一层氧化铁。

2.6 力学性能测试

某汽车板簧厂的主要工艺为：下料—加热—轧制—热处理—喷丸。经热处理后力学性能指标如表 4 所示，其抗拉强度最大值和最小值为 1511、1494 MPa，屈服强度最大值和最小值为 1362、1344 MPa，断后伸长率最大值和最小值为 11.5%、9.0%，断面收缩率最大值和最小值为 37.0%、36.5%，表面硬度在

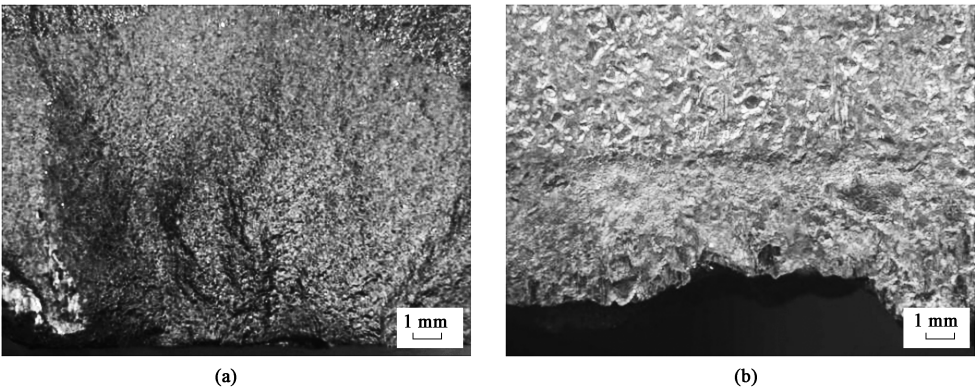


图 3 弹扁断口处宏观形貌图  
(a) 后视图 (b) 正视图  
Fig. 3 Macro morphology diagrams at fracture surface of spring flat steel  
(a) Rear view (b) Front view



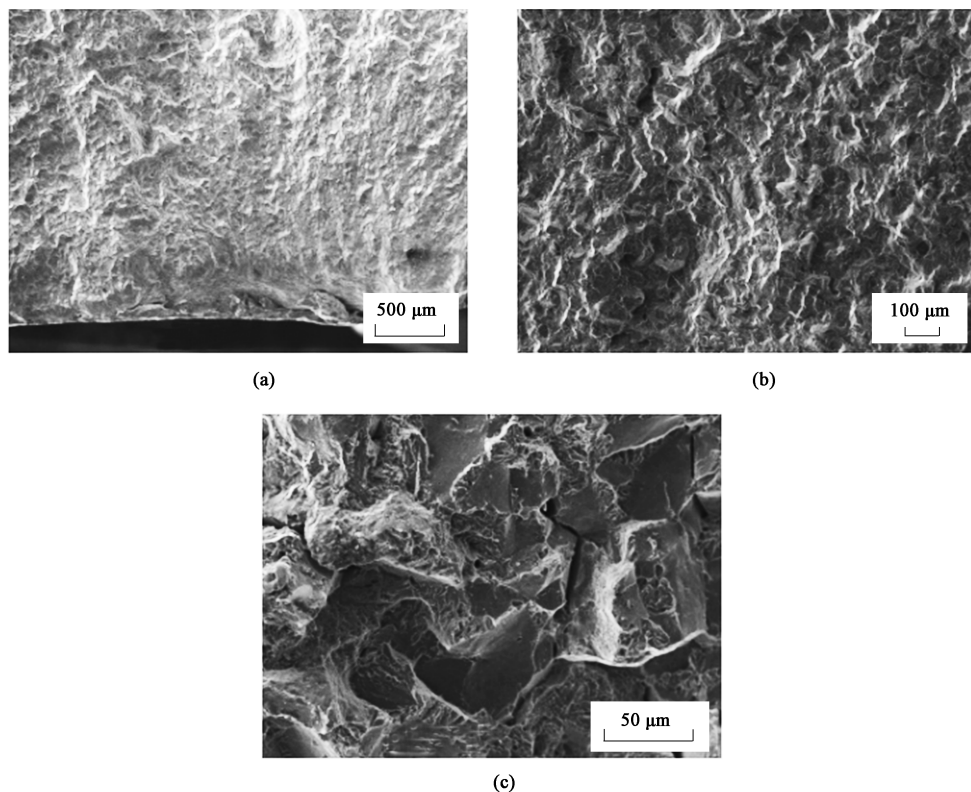


图 4 弹扁微观形貌图

(a) 疲劳源处形貌图 (b) 扩展区形貌图 (c) 瞬断区形貌图

Fig. 4 Microscopic morphology diagrams of spring flat steel

(a) Morphology diagram at fatigue source (b) Morphology diagram at extended zone (c) Morphology diagram at transient zone

42.4~42.9 HRC 之间分布,力学性能未发现异常。而未经退火处理的 59 mm×100 mm 矩形 52CrMoV4 弹扁的硬度分布在 33.9~34.4 HRC,主要原因为棒三线冷床配备有 9 m 长缓冷罩,控制弹扁的冷却速度为  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$  左右。因硬度过高会影响客户锯切下料,增加客户成本及降低客户的生产效率,因此,客户期望 52CrMoV4 弹扁产品具有较低的硬度值。

### 3 失效原因分析

弹簧钢通常需要承受扭曲、拉伸、挤压等多种不同形式的力作用,因此,应具备优秀的疲劳性能,而疲劳性能与材料的化学成分、表面粗糙度和夹杂物相关<sup>[12]</sup>。各种元素对于优化和提升弹簧钢中的力学、疲劳等性能起着不可或缺的作用,不同种类的元素在钢材中也会具有不同的作用,而失效的 52CrMoV4 弹簧扁钢的化学成分均符合要求<sup>[13]</sup>,排除材料化学成分不符对疲劳寿命的影响。结合表 4 中的力学性能指标,对于韧性较好的材料而言,疲劳条纹扩展就是在裂纹源附近滑移带内发生剧烈的微变形过程,因此,

扩展区微观形貌光滑,存在明显的磨损现象和疲劳条纹属于正常现象。瞬断区微观形貌主要为韧窝撕裂,这是因为应力强度因子大到足以破坏钢的显微组织并沿主裂纹扩展。此外,随着应力场强度因子的增加,静态断裂机理也越来越突出。当最大应力强度因子达到临界应力强度因子时,最终会发生不稳定断裂,断裂形态以韧窝为主<sup>[14]</sup>,材料形貌与力学性能指标符合相关关系。断口起源于表面,疲劳源区域表面存在明显压痕,而其他位置未发现压痕,因此,表面压痕是导致材料疲劳寿命未满足要求的直接原因。

### 4 结论

(1) 湘钢棒三线利用现有的设备条件,通过孔型设计及轧制工艺优化,设计了专用的 K4 和 K2 立孔型,得到不易扭转且尺寸稳定的 59 mm×100 mm 矩形 52CrMoV4 弹簧扁钢。

(2) 失效的 52CrMoV4 弹簧扁钢的化学成分、力学性能指标、脱碳层均符合要求,且未发现大型夹杂物等冶金缺陷。



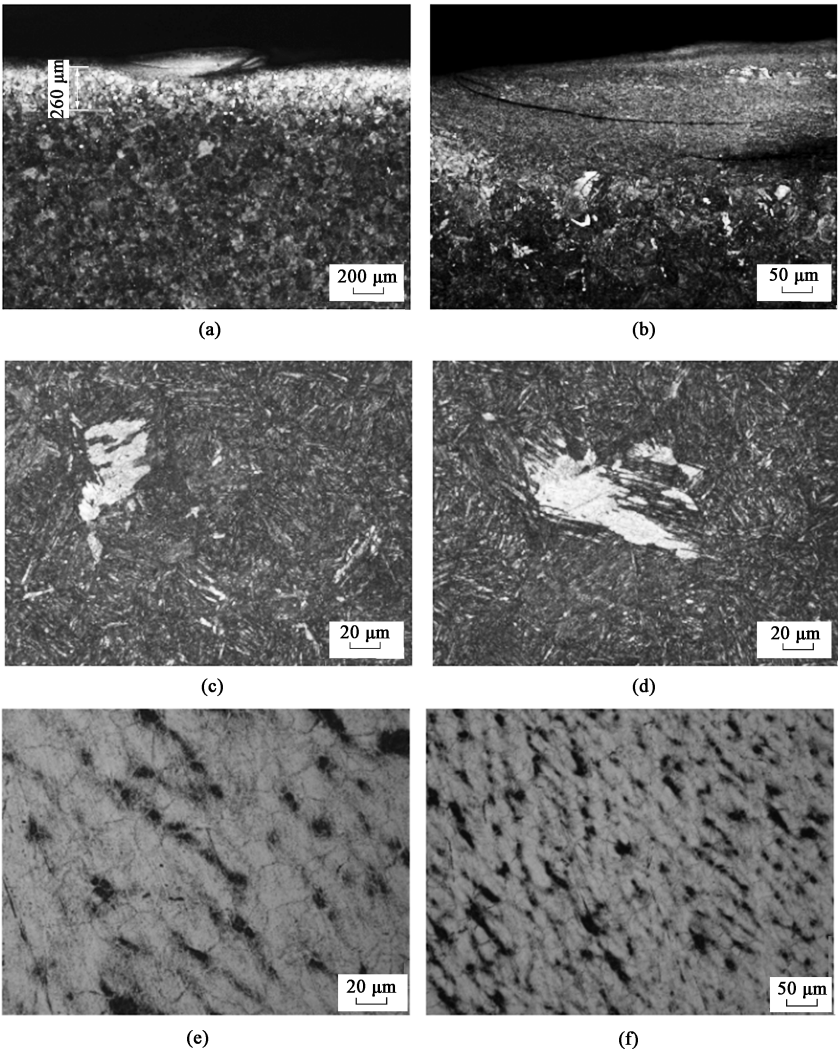


图 5 弹扁的显微组织图

(a) 低倍, 疲劳源处 (b) 高倍, 疲劳源处 (c) 1/4 处与心部, 位置 1 (d) 1/4 处与心部, 位置 2  
(e) 低倍, 1/4 处与心部, 奥氏体晶粒度图 (f) 高倍, 1/4 处与心部, 奥氏体晶粒度图

Fig. 5 Microstructural diagrams of spring flat steel

(a) Low power, at source of fatigue (b) High power, at source of fatigue (c) High power, quarter and core, point 1  
(d) High power, quarter and core, point 2 (e) Low power, quarter and core, austenite grain size diagram  
(f) High power, quarter and core, austenite grain size diagram

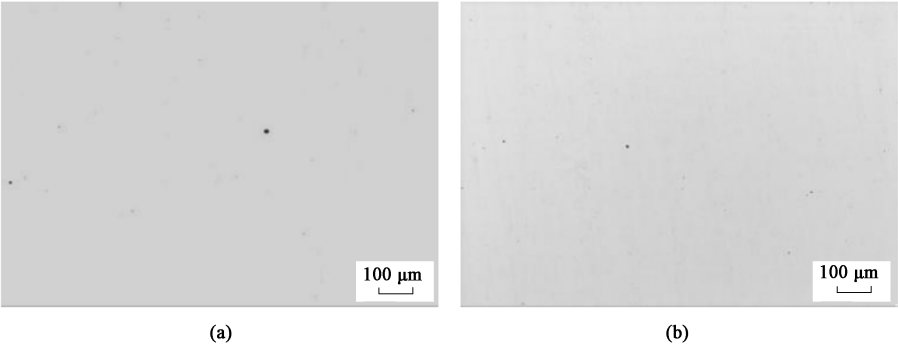


图 6 弹扁夹杂物图

(a) 位置 1 (b) 位置 2

Fig. 6 Inclusion diagrams of spring flat steel

(a) Point 1 (b) Point 2

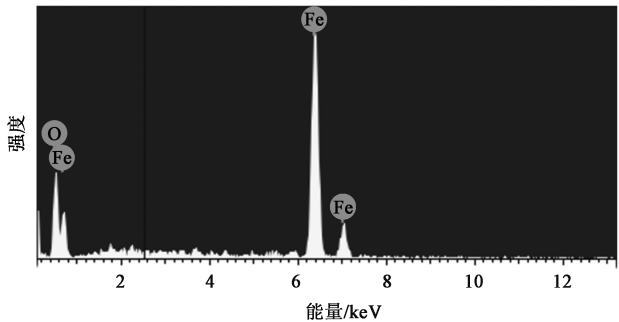


图 7 弹簧能谱分析结果

Fig. 7 Energy spectrometer analysis result of spring flat steel

表 4 热处理后材料力学性能

Table 4 Mechanical performance of materials after heat treatment

参数	抗拉强度	屈服强度	断后伸长	断面收缩	表面硬度/HRC
	$R_m$ /MPa	$R_{eL}$ /MPa	率 $A$ /%	率 $Z$ /%	
最小值	1494	1344	9.0	36.5	42.4、42.9、42.2、
最大值	1511	1362	11.5	37.0	42.5、42.8

(3) 失效的 52CrMoV4 弹簧扁钢断口起源于表面, 起源处表面存在明显的压痕, 这是直接导致材料在进行疲劳寿命试验时断裂的主要原因。

(4) 失效的 52CrMoV4 弹簧扁钢经热处理后主要基体组织为回火索氏体+少量贝氏体。

参考文献:

[1] 徐平伟, 梁益龙, 黄朝文. 奥氏体晶粒对 52CrMoV4 弹簧钢强韧性的影响 [J]. 材料热处理学报, 2012, 33 (1): 89-93.  
Xu P W, Liang Y L, Huang C W. Effect of austenite grain size on strength and toughness of a spring steel 52CrMoV4 [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33 (1): 89-93.

[2] 王建新, 张春辉. 高强度与高韧性弹簧扁钢的产品开发 [J]. 新疆钢铁, 2023, (3): 1-3.  
Wang J X, Zhang C H. Product development of high-strength and high toughness spring flat steel [J]. Xinjiang Iron and Steel, 2023, (3): 1-3.

[3] 杨奇军, 杨庚朝, 刘建, 等. 52CrMoV4 弹簧扁钢连铸坯内部裂纹产生机理及预防 [J]. 连铸, 2023, (1): 41-46.  
Yang Q J, Yang G C, Liu J, et al. Mechanism and prevention of internal cracks in continuous casting billets of 52CrMoV4 spring flat steel [J]. Continuous Casting, 2023, (1): 41-46.

[4] 焦力隆, 侯现军, 李绍杰, 等. 铁路机车用 52CrMoV4 弹簧失效分析 [J]. 河北冶金, 2013, (5): 64-66, 36.  
Jiao L L, Hou X J, Li S J, et al. Failure analysis for 52CrMoV4 spring used by locomotive [J]. Hebei Metallurgy, 2013, (5):

64-66, 36.

[5] 张江涛, 李佳军, 罗景贤, 等. 湘钢中小棒 56×100.5 平面矩形扁钢轧制工艺研究 [J]. 金属材料与冶金工程, 2022, 50 (2): 48-51, 58.  
Zhang J T, Li J J, Luo J X, et al. Research on rolling process of 56×100.5 planar rectangular flat steel for small and medium bars at Xianggang [J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2022, 50 (2): 48-51, 58.

[6] 李红星. 弹簧扁钢半连续轧制工艺技术 [J]. 轧钢, 2001, (1): 28-30.  
Li H X. Semi continuous rolling technology for spring flat steel [J]. Steel Rolling, 2001, (1): 28-30.

[7] ISO 683-14—2004, Heat-treatable steels, alloy steels and free-cutting steels. Part 14: Hot-rolled steels for quenched and tempered springs [S].

[8] 杨志钦. 50CrVA 弹簧钢断裂失效分析 [J]. 中国铸造装备与技术, 2023, 58 (3): 83-88.  
Yang Z Q. Fracture failure analysis of 50CrVA spring steel [J]. China Foundry Machinery & Technology, 2023, 58 (3): 83-88.

[9] 聂小龙, 高加强, 孟开仁, 等. 60Si2Mn 弹簧钢的断裂失效分析 [J]. 金属热处理, 2021, 46 (8): 246-250.  
Nie X L, Gao J Q, Meng K R, et al. Fracture failure analysis of 60Si2Mn spring steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46 (8): 246-250.

[10] 张志洋, 崔慕春, 王勇, 等. 60Si2MnA 弹簧钢失效分析及工艺改进 [J]. 矿业装备, 2019, (3): 24-25.  
Zhang Z Y, Cui M C, Wang Y, et al. Failure analysis and process improvement of 60Si2MnA spring steel [J]. Mining Equipment, 2019, (3): 24-25.

[11] 侯环宇, 黄艳新, 田志强, 等. 弹簧钢 52CrMoV4 连续冷却相变的组织变化 [J]. 材料热处理学报, 2016, 37 (9): 129-132.  
Hou H Y, Huang Y X, Tian Z Q, et al. Microstructure evolution of spring steel 52CrMoV4 during continuous cooling transformation [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37 (9): 129-132.

[12] 黄伟. 51CrV4 弹簧钢高温变形行为及疲劳性能研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2022.  
Huang W. Research on High Temperature Deformation Behavior and Fatigue Performance of 51CrV4 Spring Steel [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2022.

[13] 涂天权. 汽车用超高强度弹簧钢的组织与性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2022.  
Tu T Q. Study on the Structure and Properties of Ultra High Strength Spring Steel for Automobile [D]. Xi'an: Chang'an University, 2022.

[14] 万正东, 彭文屹, 杨湘杰, 等. 60Si2Mn 弹簧扁钢崩断原因分析 [J]. 机械工程材料, 2009, 33 (12): 94-97.  
Wan Z D, Peng W Q, Yang X J, et al. Reason Analysis for Avalanche Fracture of 60Si2Mn Spring Flat Steel [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2009, 33 (12): 94-97.