

DOI: 10.3969/j.issn.0254-0150.2017.03.025

S38C 车轴钢的旋转弯曲和超声振动疲劳性能*

李亚波¹ 杨凯¹ 陈一萍¹ 姜青青² 孙成奇² 洪友士²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司工程实验室 山东青岛 266111;

2. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室 北京 100190)

摘要: 选取经硬化(强化)处理的 S38C 车轴钢小试样,分别采用旋转弯曲疲劳试验机和超声振动疲劳试验机进行疲劳试验,研究其旋转弯曲和超声振动疲劳性能。研究表明,对于具有低温回火马氏体组织的 S38C 车轴材料,若以 4×10^8 周次不发生疲劳破坏的最大应力为疲劳极限,旋转弯曲疲劳试验得到的疲劳极限为 775 MPa,超声疲劳试验得到的疲劳极限为 675 MPa。通过升降法试验得到(旋转弯曲加载)的具有低温回火马氏体组织的 S38C 材料在 10^8 周次的疲劳极限:对应失效概率 10%、置信度 95% 的疲劳强度下极限为 707 MPa;对应失效概率 1%、置信度 95% 的疲劳强度下极限为 647 MPa。

关键词: S38C 钢; 旋转弯曲; 超声振动; 疲劳性能

中图分类号: TG113.25 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-0150(2017)03-124-05

Rotating Bending and Ultrasonic Vibration Fatigue Properties of Axle Steel S38C

LI Yabo¹ YANG Kai¹ CHEN Yiping¹ JIANG Qingqing² SUN Chengqi² HONG Youshi²

(1. Engineering Laboratory, CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao Shandong 266111; 2. State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The hardening treatment of axle steel S38C small samples were tested by using rotating bending fatigue testing machine and ultrasonic fatigue testing machine to investigate the rotating bending and ultrasonic vibration fatigue properties. The experimental results show that if the maximum value of the stress level at which the fatigue failure does not occur until 4×10^8 cycles is defined as the fatigue limit, the fatigue limit of S38C sample with the low temperature tempering Martensite microstructure is 775 MPa from rotating bending fatigue test, and 675 MPa from ultrasonic fatigue test. When the cycles is 10^8 , the lower-bound limit of fatigue strength for the S38C by using staircase method is 707 MPa associated with the failure probability 10% and the confidence level 95%, and 647 MPa associated with the failure probability 1% and the confidence level 95%.

Keywords: S38C steel; rotating bending; ultrasonic vibration; fatigue property

车轴是机车车辆中涉及安全的最重要部件,轮轴通过过盈配合连接,承受机车车辆的全部质量^[1]。由于高速列车车轴属于超高周疲劳范畴^[2],因此,车轴材料的超高周疲劳性能的研究对高速列车的设计制造具有十分重要的意义^[3-4]。王弘^[5]对正火热处理的 50 车轴钢和 40Cr 钢的疲劳性能和疲劳断裂机制进行研究,结果表明该车轴钢在 $10^5 \sim 10^{10}$ 循环周次范围内的 $S-N$ 曲线呈现“阶梯状”特征,在 $10^6 \sim 10^8$ 周次

范围内出现一段水平平台,平台对应的应力幅以下超高周疲劳范围内,试样仍发生疲劳破坏。赵永翔等^[6]对 LZ50 钢随机疲劳长裂纹扩展率概率模型进行了研究,提出了试验数据分散性与样本数量对概率评价影响的概率模型。王清远等^[7]利用超声疲劳实验对钢轨钢等共 7 种高速铁路用材进行了试验测试,结果表明试验周次超过 10^7 后材料仍发生疲劳破坏。因此,把 10^7 周次循环以内的数据作为高速铁路材料疲劳设计的依据是不准确的。王树青等^[8]通过试验,设计出了车轴中频感应加热器、喷水冷却器及实物车轴淬火机床,优化了车轴中频感应加热淬火工艺,与未经处理的试样相比,经表面高频淬火的试样其旋转弯曲疲劳极限较高。AKAMA 等^[9-11]用概率断裂力学对车轴进行可靠性分析,得出残余压应力分布和初始裂纹尺寸

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (11172304; 11202210)。

收稿日期: 2016-04-06

作者简介: 李亚波 (1963), 学士, 教授级高级工程师, 研究方向为高速动车组轮轴疲劳、转向架零部件疲劳等。E-mail: 15820088321@163.com.

分布对车轴故障概率的影响很大、而线路对车轴故障概率影响很小的结论。

S38C 是表面经过淬火处理的非均质车轴材料,属于 CRH2 型动车组日系车轴材料。本文作者对 S38C 试验材料进行硬化(强化)处理后,分别采用旋转弯曲疲劳试验机和超声振动疲劳试验机进行疲劳试验,研究 S38C 车轴钢的旋转弯曲和超声振动疲劳性能。

1 试验部分

1.1 试样材料

试验材料为从 CRH2 型动车组日系车轴截取的 S38C 材料,其成分如表 1 所示。

表 1 日系车轴 S38C 化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of S38C from axle made in Japan %

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.41	0.26	0.76	0.95	0.20	其他

1.2 试验设备和试验方法

旋转弯曲疲劳试样如图 1 所示,超声振动疲劳试样如图 2 所示,试样试验前经研磨和抛光,使表面足够光滑,消除机加工的痕迹。

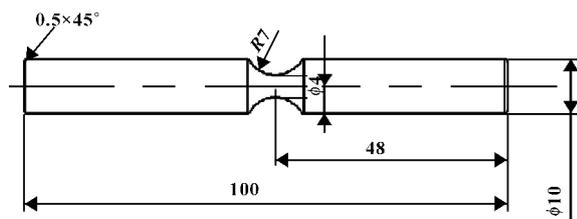


图 1 旋转弯曲疲劳试样 (mm)

Fig 1 Rotating bending fatigue specimens (mm)

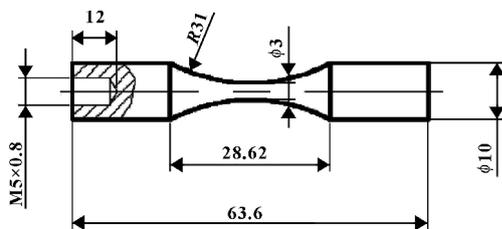


图 2 超声振动疲劳试样 (mm)

Fig 2 Ultrasonic fatigue specimens (mm)

疲劳试验前先对从车轴上截取并加工成图 1 和图 2 的小试样进行淬火-回火处理,使试样基本达到实

际车轴硬化(强化)表层的状态。对旋转弯曲疲劳试样的哑铃段区域进行高频(300 kHz)感应加热、淬火,然后 220 °C 回火 2 h。对于超声试样,在马弗炉中加热到 880 °C (木炭粉保护),保温 1 h,在 5% 的盐水中淬火,之后 190 °C 回火 4 h。

疲劳试验前,对旋转弯曲疲劳试样和超声疲劳试样进行显微组织观测和显微硬度测试,并对淬火-回火的试样进行单轴拉伸试验。对试样截面研磨、抛光,用 5% 的硝酸乙醇溶液腐蚀,然后使用 Polyvar-met 光学显微镜对试样进行显微组织分析,并采用 MH-5L 显微硬度计对试样进行显微硬度测试。

经表面高频感应处理并经显微硬度检验合格的旋转弯曲试样用于旋转弯曲疲劳试验,获得相应的疲劳强度与寿命数据,并采用升降法^[12]得到 10⁸ 周次对应的疲劳极限。旋转弯曲疲劳试验机如图 3 所示,超声疲劳试验机如图 4 所示。

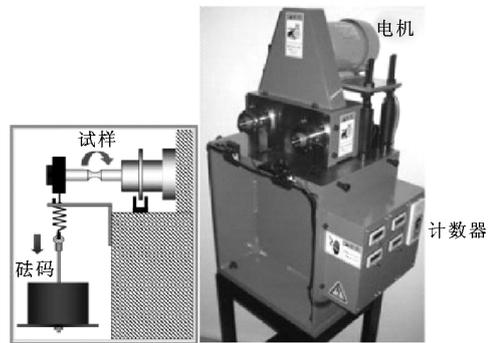


图 3 旋转弯曲疲劳试验机

Fig 3 Rotating bending fatigue machine

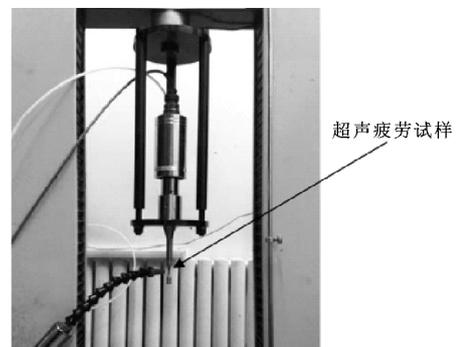


图 4 超声疲劳试验机

Fig 4 Ultrasonic fatigue machine

旋转疲劳试验机的转速范围为 1 000 ~ 5 000 r/min,加载频率相应为 16.7 ~ 83.3 Hz,疲劳试验加

载频率控制在 55 Hz 左右, 应力比 $R = -1$ 。

超声疲劳试验时, 试样的一端与振动杆相连, 另一端自由, 试样最小截面受力是按正弦曲线变化的拉压应力, 加载频率为 20 kHz, 应力比 $R = -1$ 。试验过程中采用压缩空气对试样进行冷却。

1.3 试验材料基本性能与显微组织

对 3 件 S38C 淬火试样进行拉伸试验, 取平均值, 得到平均屈服强度为 1 600 MPa, 平均拉伸强度为 1 970 MPa。

由于 S38C 旋转弯曲疲劳试验为单件处理, 对每件该类试样进行显微硬度测试, 共 33 件, 198 个测试点, 结果为 HV (550 ± 66)。由于 S38C 超声疲劳试验为成批集中处理, 取 3 件该类试样进行显微硬度测试, 测试结果为 HV (551 ± 36)。随机选取的 3 件旋转弯曲疲劳试样和 3 件超声疲劳试样的硬度测试结果列于表 2 和表 3。结果表明, 两类试样的显微硬度与实际车轴硬化表层硬度^[13] (HV530 ~ 580) 相符。

表 2 旋转弯曲疲劳试样硬度测试结果

Table 2 Hardness test results of rotating bending fatigue specimens

试样编号	1	2	3
硬度 HV	550 ± 36	563 ± 32	554 ± 9

表 3 超声疲劳试样硬度测试结果

Table 3 Hardness test results of ultrasonic fatigue specimens

试样编号	4	5	6
硬度 HV5	54 ± 33	545 ± 29	553 ± 30

对表 1、2 所示的 6 件试样的横剖面进行研磨和腐蚀, 然后采用 Polyvar-met 光学显微镜进行显微组织观察, 结果分别如图 5 和图 6 所示。这些图像显示, 沿试样横截面的显微组织均匀, 为淬火-低温回火组织, 即低温回火马氏体形态, 与实际车轴硬化(强化)表层的显微组织^[1]相符。

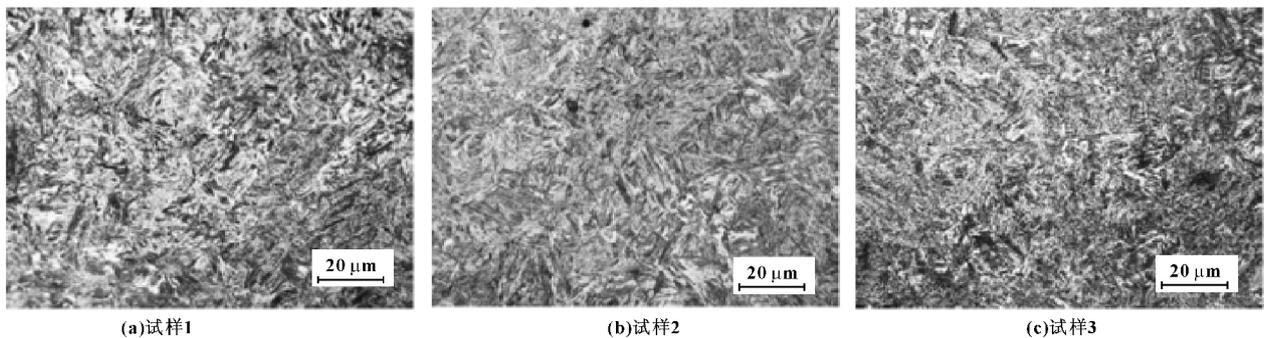


图 5 旋弯试样显微组织照片

Fig 5 Microstructure for rotating bending specimens by optical microscope

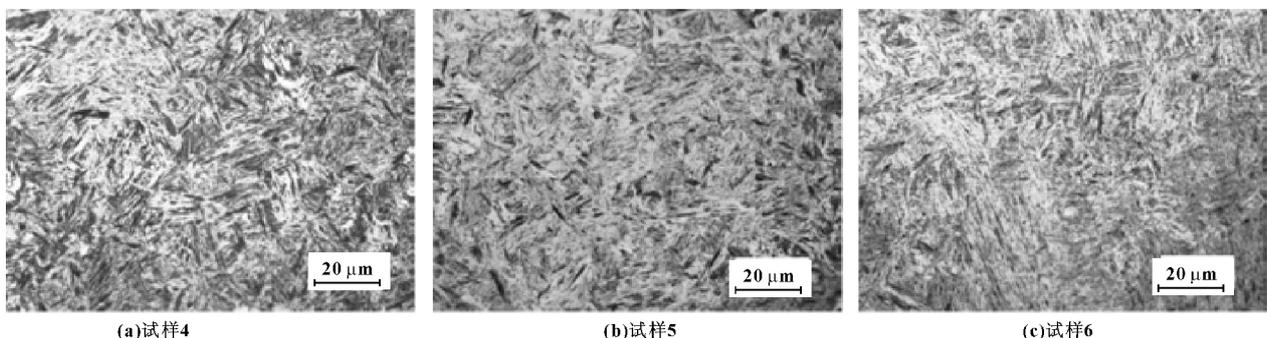


图 6 超声试样显微组织照片

Fig 6 Microstructure for ultrasonic specimens by optical microscope

2 疲劳试验结果

2.1 旋转弯曲疲劳 $S-N$ 数据

图 7 给出了 S38C 旋转弯曲疲劳小试样 $S-N$ (应

力-寿命) 数据, 最高疲劳加载周次为 6×10^8 , 最高疲劳断裂周次为 2.4×10^8 。可以看出, $S-N$ 曲线整体呈下降趋势, 随施加应力降低, 疲劳寿命增大。

若以 4×10^8 之前未发生断裂的最大应力定义为疲劳极限 σ_w , 则疲劳极限为 775 MPa。

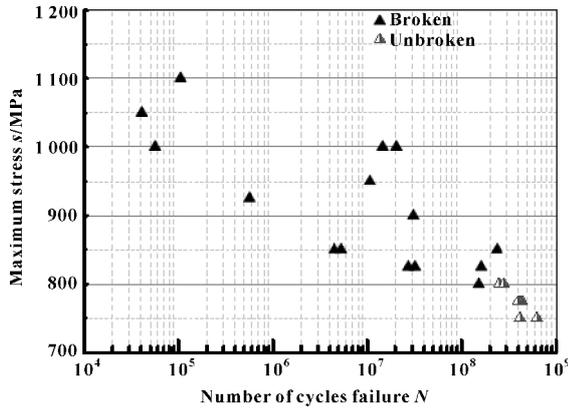


图7 旋转弯曲疲劳试样 S-N 数据

Fig 7 S-N data for rotating bending fatigue specimens

2.2 超声振动疲劳 S-N 数据

图 8 给出了 S38C 超声振动疲劳小试样 S-N 数据, 最高疲劳加载周次为 5×10^9 , 最高疲劳断裂周次为 3.92×10^8 。可以看出, 与旋转弯曲疲劳 S-N 数据的趋势一样, 超声振动疲劳小试样 S-N 曲线整体呈下降趋势, 随施加应力降低, 疲劳寿命增大。若以 4×10^8 之前未发生断裂的最大应力定义为疲劳极限 σ_w , 则疲劳极限为 675 MPa。

与旋转弯曲疲劳试验的疲劳强度 (见图 7) 和疲劳极限 (775 MPa) 比较, 超声疲劳试验得到的疲劳强度 (见图 8) 和疲劳极限 (675 MPa) 明显低于前者。其原因是: (1) 对于高强度材料, 超声频率导致的加载频率效应^[14]; (2) 旋转弯曲试样与超声疲劳试样控制体积不同引起的控制体积效应^[15]。

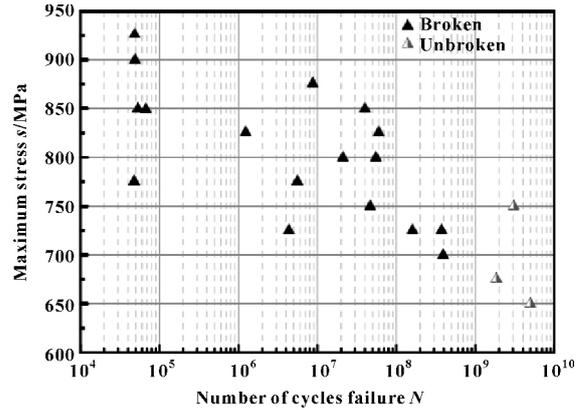


图8 超声疲劳试样 S-N 数据

Fig 8 S-N data for ultrasonic fatigue specimens

2.3 升降法测试疲劳极限

按照国家标准 GB/T 24176 - 2009^[12], 采用升降法测试 (经高频感应淬火) S38C 材料 (旋转弯曲加载) 的疲劳极限。根据试验获得的 S38C 的疲劳试验数据^[11], 取 750 MPa 为估计的疲劳极限, 取 25 MPa (估计疲劳极限的 3.33%, 文献 [16] 认为应力级差在疲劳强度 2% ~ 6% 范围内合理) 作为应力台阶。被测试样按逐渐增加的应力水平顺序进行加载, 直到发生疲劳断裂。试样旋转弯曲加载的最高加载周次为 10^8 ; 超过 10^8 周次未发生断裂的试样标记为“通过”; 未至 10^8 周次发生断裂的试样标记为“失效”。

表 4 列出了升降法测试的 5 个应力水平所有 21 件试样的情况。按规定, 以第一件发生断裂的前一件试样作为第一个有效数据, 即表 4 中试样“1”为计入的第一件试样。

表4 升降法试验数据

Table 4 Experimental data by staircase method

应力 S_i /MPa	试样系列号																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
850											×										
825								×		○		×						×			
800		×				○		○				×				○		×			×
775		○		×		○								×		○					○
750	○*				○										○						

注: ×表示失效; ○表示通过; ○*表示按标准不计入。

在不同应力水平下, 按被测试试样失效或非失效的出现情况安排新的试验点, 记录失效和非失效的加载周次, 并对得到的数据进行分析。

将应力水平按升序排列 $S_0 < S_1 < \dots < S_l$, 这里 l 是应力水平数最大值。疲劳强度的平均值 μ_y 和标准偏差 δ_y 由下列式子给出, 用于疲劳强度统计分析:

$$\mu_y = S_0 + d \left(\frac{A}{C} \pm \frac{1}{2} \right) \quad (1)$$

$$\delta_y = 1.62 \times d \times (D + 0.029) \quad (2)$$

$$\text{且 } A = \sum_{i=1}^l i f_i, B = \sum_{i=1}^l i^2 f_i, C = \sum_{i=1}^l f_i, D = \frac{BC - A^2}{C^2} \quad (3)$$

式中: f_i 是指定事件数; d 是指定应力台阶。

在式 (1) 中, 被分析事件失效时取 $-1/2$; 被分析事件非失效时取 $1/2$ 。

根据表 4 的试验结果, 不发生失效的第一个有效数据为 775 MPa。在这一系列试验中, 有 10 个试样发生失效, 10 个试样未发生失效。失效试样在分析过程中被当作一种情况。因此只分析 4 个应力水平。如表 5 所示, $S_0 = 775$ MPa, 应力台阶 $d = 25$ MPa。并由式 (3) 得到 $A = 13, B = 25, C = 10, D = 0.81$ 。则疲劳强度的平均值和标准偏差为

$$\mu_y = 775 + 25 \times \left(\frac{13}{10} \pm \frac{1}{2} \right) = 795 \text{ MPa}$$

$$\delta_y = 1.62 \times 25 \times (0.81 + 0.029) \approx 33.98 \text{ MPa}$$

$$\text{疲劳强度的变动系数 } \eta_s = \frac{\delta_y}{\mu_y} = \frac{33.98}{795} = 0.0427$$

表 5 升降法数据分析

Table 5 Analysis of data by staircase method

应力 S_i /MPa	应力水平数 i	数值		
		f_i	$i f_i$	$i^2 f_i$
850	3	1	3	9
825	2	3	6	12
800	1	4	4	4
775	0	2	0	0
总和	-	10	13	25

一般的, 疲劳强度符合正态分布, 置信度为 $1 - \alpha$ 、失效概率为 P 下的疲劳强度下极限按下式估计:

$$Y_{(P, 1-\alpha)} = \mu_y - k_{(P, 1-\alpha, \nu)} \delta_y \quad (4)$$

式中: 系数 $k_{(P, 1-\alpha, \nu)}$ 是正态分布的单边误差限; 自由度 ν 规定为试验中“相反事件”成对的数量, 即发生“失效”和“通过”相邻的两个试样称为一对“相反事件”^[1-2]。试验共有 7 对相反事件, 自由度 ν 为 70。

对于失效概率 10%、置信度 95%, 对应的 $k_{(0.1, 0.95, 7)}$ 为 2.582。由式 (4) 得到失效概率 10%、置信度 95% 时的疲劳强度下极限为

$$Y_{(0.1, 0.95)} = 795 - (2.582 \times 33.98) \approx 707 \text{ MPa}$$

同理, 对于失效概率 1%、置信度 95%, $k_{(0.01, 0.95, 7)}$ 为 4.353。由式 (4) 得到疲劳强度下极限为

$$Y_{(0.01, 0.95)} = 795 - (4.353 \times 33.98) \approx 647 \text{ MPa}$$

3 结论

(1) 采用高频感应加热方式淬火 - 回火处理的旋转弯曲疲劳试样和采用马弗炉整体加热淬火 - 回火处理的超声疲劳试样的显微组织均为低温回火马氏体形态, 与实际车轴硬化 (强化) 表层的显微组织相符。旋转弯曲疲劳试样的显微硬度为 HV(550 ± 66), 超声疲劳试样的显微硬度 HV(551 ± 36), 与实际车轴硬化 (强化) 表层的显微硬度 (HV530 ~ 580) 相符。此外, 马弗炉加热淬火 - 回火试样的平均屈服强度为 1 600 MPa, 平均拉伸强度为 1 970 MPa。

(2) 对于具有低温回火马氏体组织的 S38C 车轴材料, 若以 4×10^8 周次不发生疲劳破坏的最大应力为疲劳极限, 旋转弯曲疲劳试验得到的疲劳极限为 775 MPa, 超声疲劳试验得到的疲劳极限为 675 MPa。

(3) 通过升降法试验得到 (旋转弯曲加载) 的具有低温回火马氏体组织的 S38C 材料在 10^8 周次的疲劳极限: 对应失效概率 10%、置信度 95% 的疲劳强度下极限为 707 MPa; 对应失效概率 1%、置信度 95% 的疲劳强度下极限为 647 MPa。

参考文献

- 【1】杨广雪. 高速列车车轴旋转弯曲作用下微动疲劳损伤研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2010: 1 - 2.
- 【2】翟婉明, 金学松, 赵永翔. 高速铁路工程中若干典型力学问题 [J]. 力学进展, 2010, 40(4): 358 - 373.
ZHAI W M, JIN X S, ZHAO Y X. Some typical mechanics problems in high-speed railway engineering [J]. Advances in Mechanics, 2010, 40(4): 358 - 373.
- 【3】黄国, 黄海明, 王超, 等. 45# 车轴钢疲劳性能试验研究 [J]. 中国铁道科学, 2013, 34(4): 71 - 76.
HUANG G, HUANG HA M, WANG C, et al. Experimental study on the fatigue properties of 45# axle steel [J]. China Railway Science, 2013, 34(4): 71 - 76.
- 【4】ZERBST U, BERETTA S, KÖHLER G, et al. Safe life and damage tolerance aspects of railway axles: a review [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2013, 98: 214 - 271.
- 【5】王弘. 40Cr、50 车轴钢超高周疲劳性能研究及疲劳断裂机理探讨 [D]. 成都: 西南交通大学, 2004: 9 - 10.
- 【6】赵永翔, 杨冰, 孙亚芳, 等. LZ50 车轴钢的概率循环本构模型 [J]. 机械工程学报, 2004, 40(9): 48 - 53.
ZHAO Y X, YANG B, SUN Y F, et al. Probabilistic cyclic constitutive model of LZ50 axle steel [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(9): 48 - 53.
- 【7】王清远, 王中光, 李守新. 高速铁路关键材料超长寿命疲劳断裂性能 [J]. 机车电传动, 2003(S1): 28 - 31.
WANG Q Y, WANG Z G, LI S X. Extra-long life fatigue behavior of key materials for high-speed railway [J]. Electric Drive for Locomotives, 2003(S1): 28 - 31.

(下转第 140 页)

断,机械杂质实测值较高的样品,其实际的颗粒量与机械杂质 10~15 mg/kg 的样品相比,并无明显的增加。结合对应设备运行工况的规律性考虑,可能是因为样品的滤出物中,还含有相对量较高的 X-蜡等在电场力作用下形成的不溶性聚合物^[6]所致。文献[7]研究表明,高温更易形成 X-蜡,而 X-蜡的增加,除了对绝缘强度有影响,往往还可能影响油中的含气量;另外,GB 4016-83 对术语“机械杂质”(Mechanical impurities)定义为:存在于油品中所有不溶于规定溶剂的杂质。因此,将不溶性的油品衰变产物计入机械杂质是有意义的。

文中研究的样品的测试结果标准差为 17 mg/kg,根据前述,建议对于变压器油机械杂质的报警值设定在 30~35 mg/kg (约 2 倍标准差),对于超过报警值的样品,应采用显微镜考察颗粒污染物,并加强油中含气量的监测。

4 结论

(1) 微孔滤膜过滤称重分析测试变压器油中的颗粒污染物具有技术可行性和实际意义。

(2) 用膜过滤法测得的颗粒杂质,除了机械颗粒污染物外,还可能包含油品衰变产物。

(3) 用膜过滤法测得的变压器油机械杂质含量与油品的冷却方式和设备(油品)的运行时间有较强的相关性。

参考文献

- 【1】 BIRLASEKARAN S, DARVENIZA M. Micro-discharges from particle in transformer oil [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1976, 11 (4): 162-163.
- 【2】 石景燕. 变压器油中金属杂质的隐患及处理 [J]. 变压器, 2006(5): 44-46.
SHI J Y. Hidden trouble and treatment of metal impurity in transformer oil [J]. Transformer, 2006(5): 44-46.
- 【3】 罗固事. 油处理设备的应用 [J]. 润滑与密封, 2000, 25(2): 48-49.
LUO G S. Application of oil treatment equipment [J]. Lubrication Engineering, 2000, 25(2): 48-49.
- 【4】 QIAN Y H. Comparative study on the impurities content of hydrogenated transformer oil under static condition [J]. Advanced Materials Research, 2012, #21: 129-135.
- 【5】 LEU V I. Electric purification of transformer oil from mechanical impurities in the direct electric field [J]. Elektronnaya Obrabotka Materialov, 2002, 5: 55-59.
- 【6】 凌愍. 变压器用油的析气性问题 [J]. 电力设备, 2005(1): 12-15.
LIN M. Gas evolution of transformer oil [J]. Power Equipment, 2005(1): 12-15.
- 【7】 ASOKAN T, BANDARUN S. X-wax formation in transformer liquid dielectrics [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Dielectric Liquids, 2005: 401-404.
- 【8】 王树青, 周振国, 詹新伟. 车轴感应淬火技术研究 [J]. 金属热处理, 2001, 26(8): 31-34.
WANG S Q. Research on axle induction quenching technology [J]. Metal heat treatment, 2001, 26(8): 31-34.
- 【9】 AKAMA M, ISHIZUKA H. Reliability analysis of Shinkansen vehicle axle using probabilistic fracture mechanics [J]. JSME International Journal, 1995, 38: 378-383.
- 【10】 AKAMA M, SUSUKI I. Fatigue crack growth simulation and estimation for rolling contact [J]. Key Engineering Materials, 2000, 22: 183-184.
- 【11】 AKAMA M, MORI T. Boundary element analysis of surface initiated rolling contact fatigue [J]. Wear, 2002, 253: 35-41.
- 【12】 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 金属材料疲劳试验 数据统计方案与分析方法: GB/T 24176-2009/ISO 12107 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- 【13】 张晓乐, 孙成奇, 刘小龙, 等. 车轴材料(S38C)显微组织、显微硬度和(EA4T)小试样疲劳性能 [R]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2013.
- 【14】 ZHAO A G, XIE J J, SUN C Q, et al. Effects of strength level and loading frequency on very-high-cycle fatigue behavior for a bearing steel [J]. International Journal of Fatigue, 2012, 38: 46-56.
- 【15】 LEI Z Q, XIE J J, SUN C Q, et al. Effects of loading condition on very-high-cycle fatigue behaviour and dominant variable analysis [J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2014, 57(1): 74-82.
- 【16】 陈玲, 郭跃虹, 周俊. 疲劳极限升降法中应力增量选取的讨论 [J]. 天津理工学院学报, 1999, 15(3): 55-58.
CHEN L, GUO Y H, ZHOU J. Discussion on the selection of stress increment in fatigue limit [J]. Journal of Tianjin Institute of Technology, 1999, 15(3): 55-58.

(上接第 128 页)