

冲击载荷下50CrVA弹簧钢的多轴疲劳行为研究

赵凯^{1,2*}, 何玉怀^{1,2}, 刘新灵^{1,2}, 陶春虎^{1,2}

1. 北京航空材料研究院 中国航空工业集团公司失效分析中心, 北京 100095

2. 航空材料检测与评价北京市重点实验室, 北京 100095

摘要: 本文用MTS 809拉-扭电液伺服材料试验机研究了50CrVA弹簧钢标准试样在冲击载荷下的多轴疲劳寿命, 对试样的断口进行了宏微观观察。研究结果表明: 冲击载荷会明显降低试样的寿命; 试样的寿命随轴向拉力的增大而减小; 宏观损伤方面, 试样整个断口可见稳定扩展区、快速扩展区和瞬断区; 稳定扩展区面积较小, 快速扩展区磨损严重; 与源区对侧存在一台阶, 台阶与源区正对的位置存在一偏转角; 台阶附近区域未出现明显的磨损, 为瞬断区; 微观损伤方面, 裂纹源萌生于试样表面, 稳定扩展区疲劳条带不明显, 快速扩展区以剪切拉长韧窝和磨损形貌为主。

关键词: 50CrVA弹簧钢; 比例加载; 冲击载荷; 多轴疲劳

中图分类号: TG113.25

文献标识码: A

文章编号: 1007-5453 (2014) 07-0068-05

机械运行中产生冲击的现象很普遍。机械零件在冲击载荷作用下产生的应力和应变值均比静载下的相应值大得多, 所以冲击问题早就引起工程界的广泛注意^[1]。另外, 多轴疲劳是指疲劳损伤发生在多轴加载条件下, 即至少有两个或三个方向施加的应力独立地随时间发生变化。多轴疲劳的研究比单轴疲劳更加接近工程实际, 因此受到工程界的支持。近年来, 人们逐渐认识到多轴疲劳问题的重要性, 对其研究也逐渐的深入^[2~7]。本文用MTS 809拉-扭电液伺服材料试验机研究了50CrVA弹簧钢标准试样在冲击载荷下的多轴疲劳寿命, 探明了冲击载荷对试样疲劳寿命的影响。对疲劳断口进行了宏微观观察, 找出了拉-扭多轴疲劳载荷下50CrVA的损伤特征。

1 试验材料和方法

标准试样外形、尺寸如图1所示。试样加工选用50CrVA弹簧钢, 取自直径为35mm的棒材, 该材料为制造电机软轴所选用的材料。将棒材加工成毛坯后, 对其进行热处理。其热处理工艺过程为, 加热到860℃, 保温1h后油淬→400℃

90min回火。试样材料经热处理后的力学性能见表1。完成热处理工艺后再对毛坯进行精加工。

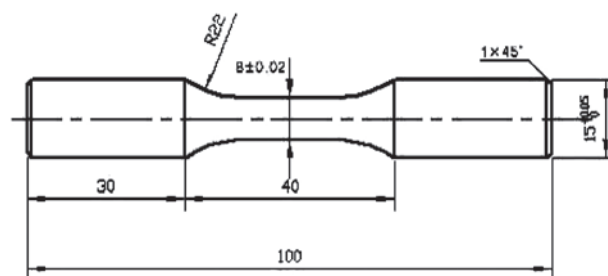


图1 试样形状及尺寸

Fig.1 Shape and size of specimens

试验机为MTS 809拉-扭电液伺服材料试验机, 所有试验均在室温空气介质下进行。所施加的载荷: 轴向拉力波形为正弦波, 扭矩波形也为正弦波。试验应力比为 $R=0.1$, 频率为10Hz。两个波形同步, 无相位角即比例加载, 见图2。载荷类型共分4种, 具体见表2。扭矩冲击是每50个循环周期叠加一个冲击载荷, 扭矩幅值增大到100N·m。每种载荷类型的试样数量为8根左右。

收稿日期: 2014-04-02; 录用日期: 2014-05-10

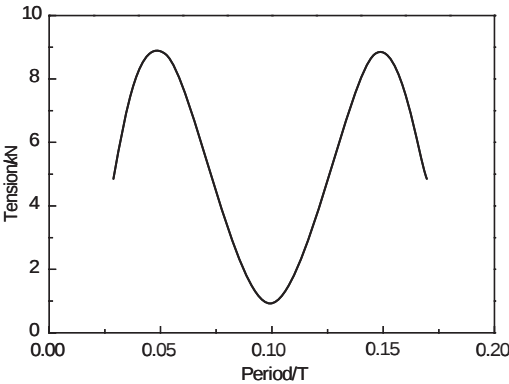
基金项目: 航空科学基金(2010ZF210011)

*通讯作者. Tel.: 010-83017599 E-mail: 37253728@qq.com

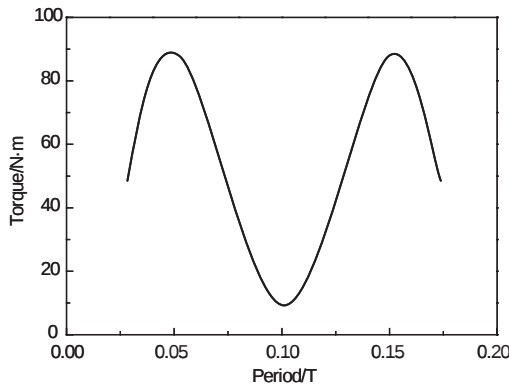
引用格式: ZHAO Kai, HE Yuhuai, LIU Xinling, et al. Multiaxial fatigue behavior of 50CrVA spring steel under impact loading[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25(07): 68-72. 赵凯, 何玉怀, 刘新灵, 等. 冲击载荷下50CrVA弹簧钢的多轴疲劳行为研究[J]. 航空科学技术, 2014, 25(07): 68-72.

表1 50CrVA力学性能参数
Table 1 Mechanical properties of 50CrVA

E/GPa	ν	$\sigma_{p0.2}/\text{MPa}$	σ_b/MPa	$\psi/\%$	$\delta_{10}/\%$
201	0.3	1295	1388	57.1	7.3



(a) 轴向拉力波形曲线



(b) 扭矩波形曲线

图2 波形曲线

Fig.2 Waveform

表2 载荷类型(应力比R=0.1)

Table 2 Load style (Stress Ratio R=0.1)

序号	轴向拉力幅值/kN	扭矩幅值/N·m	扭矩冲击幅值/N·m
I	9	90	无
II	18	90	无
III	9	90	100
IV	18	90	100

2 结果分析

将同一载荷类型条件下试样的疲劳寿命平均值绘制成柱形图进行对比,见图3。从统计的各试样疲劳寿命平均值来看,Ⅲ载荷条件下试样的寿命平均值与 I 载荷条件下相

比,寿命下降53.0%;Ⅳ载荷条件下试样的寿命平均值与Ⅱ载荷条件下相比,寿命下降60.0%。可以明显看出,当存在冲击载荷时,标准试样的疲劳寿命会有较为明显的下降。Ⅱ载荷条件下试样的寿命平均值与 I 载荷条件下相比,寿命下降39.2%。Ⅳ载荷条件下试样的寿命平均值与Ⅲ载荷条件下相比,寿命下降48%。可以明显看出,随着轴向拉力幅值的增大,试样的寿命下降也比较明显。

Brown-Miller模型最先被Brown和Miller[8]提出,他们通过大量的实验观察到,疲劳裂纹的萌生由两个参数控制,除了最大剪应变 $\gamma_{\max}$ 是裂纹萌生的主要力量外,裂纹萌生也受到最大剪平面上的正应变 ϵ_n 的影响^[9-10],这一点可以从图4看出。

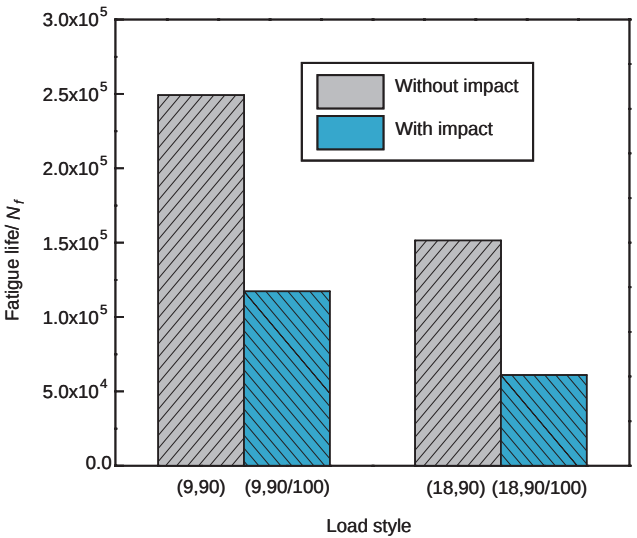
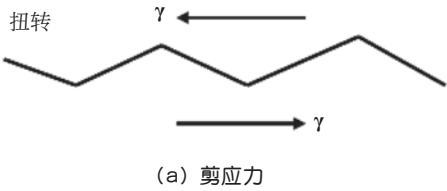
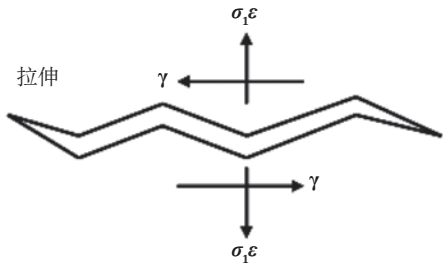


图3 冲击载荷条件下疲劳寿命柱形对比图

Fig.3 Histogram of fatigue life under impact load



(a) 剪应力



(b) 正应力应变

图4 Brown-Miller模型

Fig.4 Brown-Miller Model

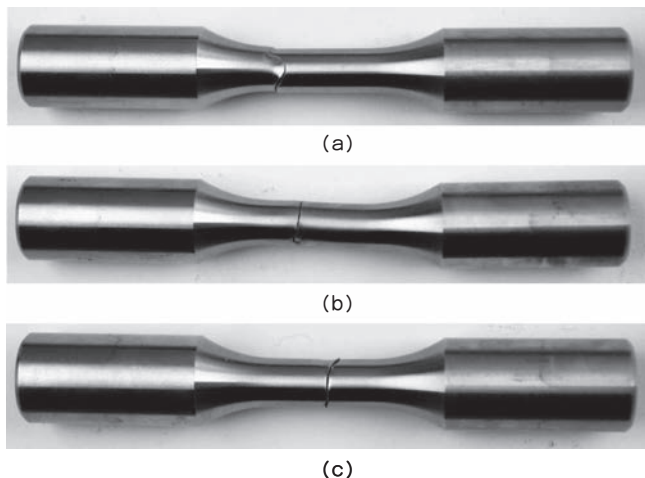
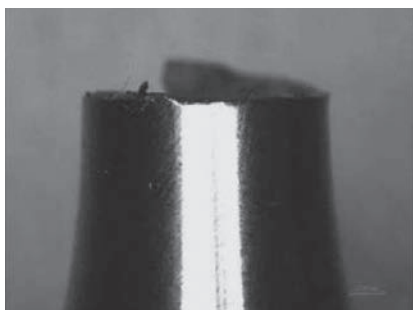


图5 断裂位置
Fig.5 Broken location



(a)



(b)



(c)

图6 断口角度
Fig.6 Fracture angle

从图4可以看出,作用在最大剪平面上的剪应变 $\gamma_{\max}$ 导致了疲劳裂纹的萌生,而裂纹面之间的摩擦会阻碍这个进程。如果作用一个拉应力或应变在正平面上,裂纹面就会裂开,摩擦阻力减小,疲劳损伤累积的就会更快^[11]。因此,轴向应力幅值增大后,裂纹面之间的摩擦阻力小,其疲劳裂纹扩展得更快,寿命更短。在冲击载荷的作用下,一方面裂纹萌生寿命缩短;另一方面,裂纹在扩展过程中,最大剪平面上的剪应变 $\gamma_{\max}$ 突然增大,疲劳裂纹的扩展速率加快,相应的疲劳寿命会降低。

3 断口宏观形貌

3.1 断口宏观形貌

各试样宏观断裂位置并无明显的规律,见图5。其断面呈现螺旋走向,绝大部分断口螺旋角度较小,见图6a和图6b。极少数断口呈现较大的螺旋角,其角度大小约为 45° ,见图6c。

将断口放在Olympus体视显微镜下观察,其整体形貌见图7。整个断口存在较为严重的磨损。整个断口可见稳定扩展区、快速扩展区和瞬断区。疲劳稳定扩展区面积较小,快速扩展区磨损严重。与源区对侧存在一台阶,台阶与源区正对的位置存在一偏转角 α 。由于在疲劳裂纹扩展的过程中,轴还在不断的旋转,疲劳裂纹的前沿向旋转的相反方向偏转。因此,最后的破坏区(台阶)也向旋转的相反方向偏转一个角度^[12]。由于疲劳裂纹扩展面不在同一平面上,在瞬断区两个扩展面相交合从而形成图中看到的台阶。台阶附近区域未出现明显的磨损,为瞬断区。大部分标准试样的断口形貌均与此相一致。

3.2 断口微观形貌

将承受冲击载荷的试样断口放在扫描电子显微镜(SEM)下观察。裂纹源萌生于试样表面,源区形貌见图8a和图8b。在稳定扩展区可观察到疲劳条带,疲劳条带形貌见图8c。快速扩展区以剪切拉长韧窝特征为主,有明显的磨损痕迹,见图8d和图8e。无冲击载荷的试样断口与此断口一致。

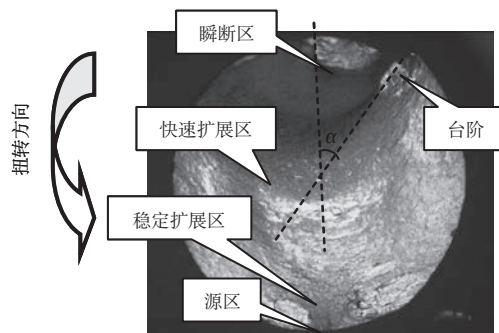


图7 断口形貌
Fig.7 Fracture feature

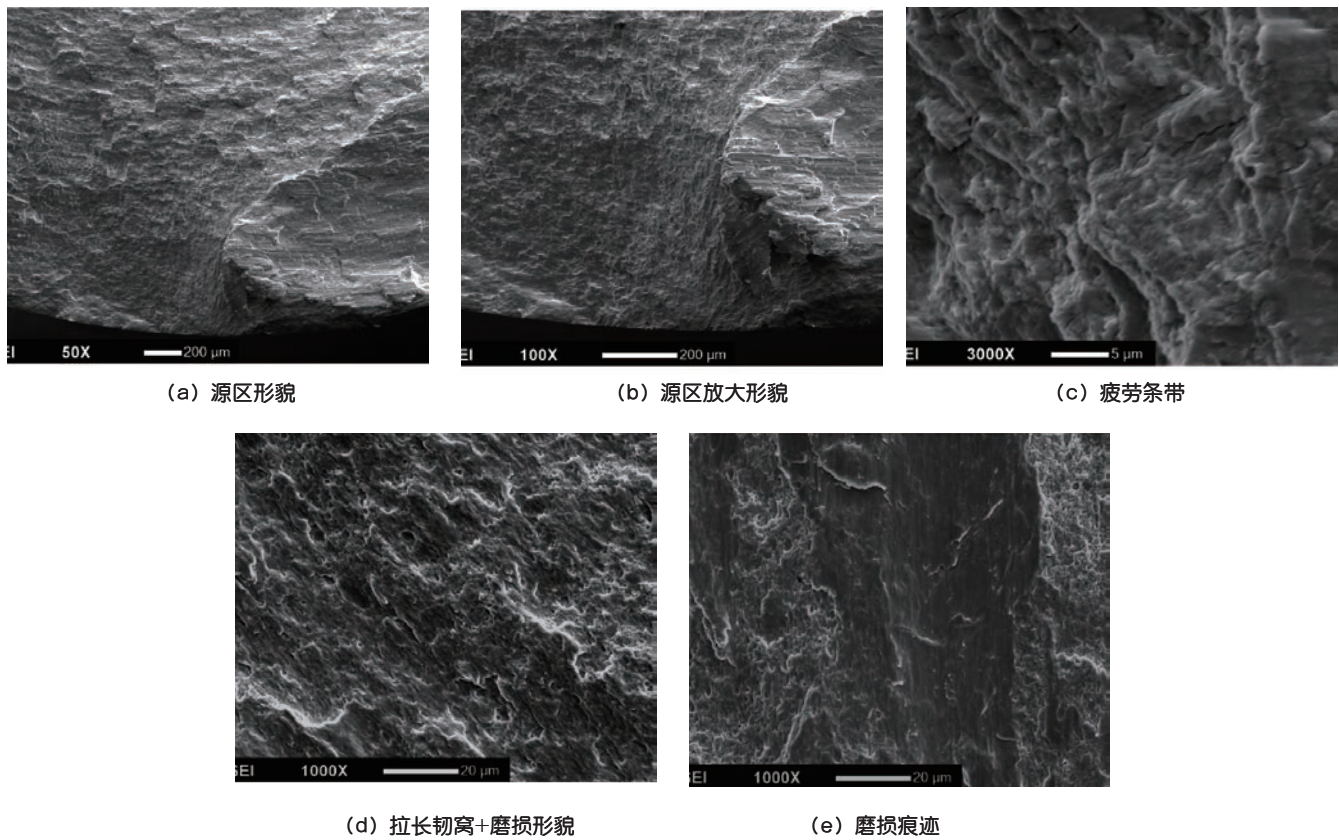


图8 断口微观形貌(承受载荷幅值:9kN, 90/100N•m)

Fig.8 Micro-appearance of fracture (Load: 9kN, 90/100N•m)

4 结论

研究结果表明:

(1) 冲击载荷会明显降低试样的寿命;

(2) 试样的寿命随轴向拉力幅值的增大而减小;

(3) 宏观损伤方面,拉扭试样整个断口可见稳定扩展区、快速扩展区和瞬断区。疲劳稳定扩展区面积较小,快速扩展区磨损严重。源区对面存在一台阶,台阶与源区正对的位置存在一偏转角。台阶附近区域未出现明显的磨损,为瞬断区;

(4) 微观损伤方面,裂纹源萌生于试样表面,稳定扩展区疲劳条带不明显,快速扩展区以剪切拉长韧窝和磨损形貌为主。

AST

参考文献

[1] 姜玉明. 扭转轴在冲击载荷作用下冲击应力和动载系数的计算. 南京农业大学学报[J], 1994, 17(4): 138~141.

JIANG Yuming. Calculation of impact stress and dynamic load factor on torsion shaft acted by impulsive load. Journal of Nanjing Agricultural University [J],1994,17(4):138~141.(in

Chinese)

[2] Bannantine J A, Socie D F. A variable amplitude multiaxial fatigue life prediction method. In: Kussmaul K, McDiarmidD, Socie D, eds. Fatigue Under Biaxial and Multiaxial Loading ESIS10. London: Mechanical Engineering Publications, 1991. 35~51.

[3] WANG C H, Brown M W. A path-independent parameter for fatigue under proportional and non-proportional loading. Fatigue Fract Engng Mater Struct., 1993, 16: 1285~1298.

[4] WANG C H, Brown M W. Life prediction techniques for variable amplitude multiaxial fatigue—Parth 1: Theories. ASMETrans JEngngMat Tech, 1996, 18: 367~370.

[5] WANG C H, Brown M W. Life prediction techniques for variable amplitude multiaxial fatigue—Part 2: Comparison with experimental results. ASME Trans J Engng Mat Tech, 1996,18: 371~374.

[6] Kim K S, Park J C,Lee J W. Multiaxial fatigue under variable amplitude loads. ASME Trans J Engng Mat Tech, 1999, 121: 286~293.

- [7] ZHAO Yun, MENG Qihong, WANG Guoan . Fracture Analysis of Wheel-side Axle of Skid Loader[J]. Failure Analysis and Prevention, 2011, 6(3): 174-177.
- [8] Brown M W, Miller K J. A theory for fatigue failure under multiaxial stress and strain condition[J]. Proc Inst Mechanical Engineers 1973, 181(1): 705-755.
- [9] 陈旭,高庆,孙训方,等. 非比例载荷下多轴低周疲劳研究最新进展,力学进展[J], 1997, 27(3): 313-325.
- CHEN Xu, Gao qing, Sun Xunfang, et al. Recent advances of multiaxial low-cycle fatigue under nonportional loading. Advances in mechanics[J], 1997,27(3):313-325.(in Chinese)
- [10] D. F. Socie, GB. Marquis. Multiaxial Fatigue[M]. Warrendale. Pa: Society of Automotive Engineers, 2000.
- [11] 程远存. W6Mo5Cr4V2钢传动轴强度与疲劳寿命分析[D]. 武汉: 武汉理工大学,2010.
- CHENG Yuancun. W6Mo5Cr4V2 steel shaft strength and fatigue life analysis [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [12] 张栋, 钟培道, 陶春虎, 等. 失效分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- ZHANG Dong, ZHONG Peidao, TAO Chunhu, et al. Failure analysis[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008. (in Chinese)

作者简介

赵凯(1986—) 男,硕士,助理工程师。主要研究方向:失效分析,固体力学。

Tel: 010-83017599 E-mail: 37253728@qq.com

Multiaxial Fatigue Behavior of 50CrVA Spring Steel under Impact Loading

ZHAO Kai^{1,2*}, HE Yuhuai^{1,2}, LIU Xinling^{1,2}, TAO Chunhu^{1,2}

1.AVIC Failure Analysis Center, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China

2.Beijing Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Beijing 100095, China

Abstract: Multiaxial fatigue life of 50CrVA spring steel standard specimens under impact loading was studied with MTS 809 tension-torsion electro-hydraulic servo tester. The results show that impact loading can obviously reduce the specimens' life. Specimens' life decreases with the increasing of axial tension. In macroscopic damage aspect, slow, fast propagation and final fracture zone can be observed throughout the specimen's fracture. The area of slow propagation zone was small and fast propagation zone was worn badly. A step exists opposite the source, which is the final fracture zone. There is a one-sided corner between step and the opposition of the source region. In microscopic damage aspect, fatigue sources initiate at the surface and fatigue stripes can't be found easily on the slow propagation zone. Elongated dimples and wear are the main characteristics for the fast propagation zone.

Key Words: 50CrVA spring steel; proportional loading; impact load; multiaxial fatigue

Received: 2014-04-02; Accepted: 2014-05-10

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(2010ZF210011)

* Corresponding author. Tel. : 010-83017599 E-mail: 37253728@qq.com