

石油制绳钢丝疲劳损伤动力学过程的声发射监测

朱祖铭 邵永波* 尹万全

(中国科学院金属研究所材料疲劳与断裂国家重点实验室)

(*东北大学信息科学与工程学院)

ACOUSTIC EMISSION MONITORING ON STEEL WIRE DURING FATIGUE DAMAGE

ZHU Zuming, SHAO Yongbo*, YIN Wanquan

(State Key Laboratory of Fatigue and Fracture on Materials,

Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences)

(School of Information Science & Engineering, Northeastern University)

摘 要 应用声发射(AE)技术对制绳钢丝疲劳损伤过程进行动态监测。结果表明疲劳损伤普遍产生于钢丝长度方向上的不同部位,所有部位的损伤经过钢丝初始塑性变形阶段之后都同时进入一个长期的慢速发展阶段,在此期间主导裂纹形成。由于主导裂纹以快速扩展方式发展,因而疲劳寿命主要由裂纹孕育及生成期构成。

关键词 制绳钢丝, 声发射监测, 疲劳损伤

中图分类号 O347.5

ABSTRACT Fatigue damage of steel wire has been monitored using acoustic emission(AE) technique. The results show that fatigue damage occurs everywhere on the surface of wire. After plastic deformation of wire, all the damage enter a slowly advancing stage, during which the dominant crack initiates. Because dominant crack propagates quickly, the fatigue life of wire is mainly determined by nucleation and initiation of dominant crack.

KEY WORDS steel wire, acoustic emission monitoring, fatigue damage

疲劳是钢丝绳最主要的失效方式之一。制绳钢丝作为钢丝绳的基本组元,其性能直接关系到钢丝绳的使用寿命,因而研究制绳钢丝的疲劳行为便成为研究钢丝绳疲劳损伤规律及对其进行寿命预测的基础。以往对于制绳钢丝的研究多侧重于钢丝表面质量对其疲劳性能的影响^[1-2],以及进行常规的力学性能测试^[3-4]。但对于钢丝疲劳裂纹生成及扩展的动态过程则所知甚少,这一方面是由于疲劳损伤过程难于观测所致,另一方面是由于缺少实时动态监测手段。钢丝直径小,圆柱形外貌,其表面粗糙,加之疲劳源生成区域不固定,这些都导致常规的裂纹观测方法对其不再适用。对此本研究采用声发射(AE)技术对石油用制绳钢丝疲劳损伤过程进行了动态监测。AE方法作为一种实时监测手段非常适合于材料动态损伤过程的研究。

1 实验方法

截取长 220mm 的钢丝试样($\phi 1.75\text{mm}$),强化其两端,试样标距为 60mm。其中一部分试样在中部开出深 0.5mm 的尖锐缺口,这部分试样的标距为 50mm。试样的化学成分及机械性能见表 1。在 SKN 岛津疲劳试验机上进行拉-拉疲劳试验,循环频率为 12Hz,最大应力为 1078.8N/mm^2 ,应力比 $R=0.1$ 。声发射装置为 LOCAN AT 系统,采用中心频率为 150KHz 的谐振式换能器和频带为 100~300KHz 的前置放大器。系统总增益为 75db,门槛电平为 25db。两只换能器间距 90mm,采用线定位技术进行测试。

表 1 钢丝化学成分及力学性能

Table 1 The chemical composition and mechanical property of steel wire									
化学成分 (wt %)							力学性能		
C	Si	Mn	P	S	Al	N	抗拉强度 σ_b / N/mm ²	延伸率 δ %	断面收缩率 ψ %
0.72	0.26	0.55	0.010	<0.006	0.006	0.011	1984.6	1.25	50

2 实验结果

图 1(a)和(b)为换能器之间钢丝上不同位置处 AE 事件及能量定位图。可以看出整个损伤过程中 AE 事件产生于钢丝长度方向上的各个部位,由图 1(a)看出距左侧换能器约 63mm 处, AE 活性最高,图 1(b)更清楚地表明此处 AE 能量较其它部位明显高出许多,实测表明这一部位正是断口处,高能量主要是钢丝最终瞬断释放声能的结果。图 2(a)和(b)给出 AE 累计事件和累计计数与疲劳循环次数的关系曲线,可以看出整个 AE 过程分为三个阶段:初始阶段 0~9240 周循环内,AE 具有一定程度的活性及强度,计数率由大变小;而在第二阶段 9240~36960 周内,AE 趋于平静,累计事件和累计计数增幅很小;及进入第三阶段 36960~55440 周之后,AE 活性及强度大幅增加,尤以 AE 计数最为突出。

图 3(a)、(b)和(c)为带缺口试样 AE 定位点图,对比无缺口试样可以看出 AE 事件更明显地集中于钢丝中部约 50mm 的范围内。由图 3(a)可以看出,AE 过程也有三个阶段:在初始阶段 0~90 秒时间内,AE 生成部位并不很密集,但缺口处高幅值 AE 事件明显多于其它各处,如图 3(c)所示;这之后约 90~270 秒时间内 AE 较为平静;在第三阶段 270~651 秒时间内 AE 源更为密集,尤其是后期缺口处 AE 事件明显增多直至在此处断裂。这一时期高幅值 AE 事件主要产生于缺口处,如图 3(b)所示。

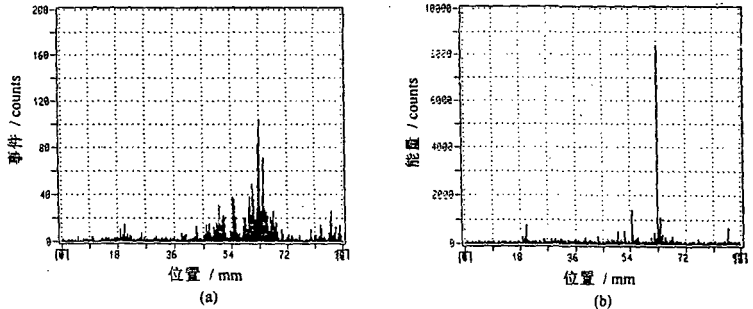


图1 钢丝缺陷活动AE定位图

Fig.1 AE location of defect activities in wire

(a)AE事件定位图 (b)AE能量定位图

3 讨论

钢丝表面存在纵向沟槽、马氏体破裂、夹杂物破损孔等缺陷^[1]。实际观察发现这其中以纵向沟槽最为普遍,它们导致钢丝表面局部应力集中。局部高应力将导致产生局部高密度位错^[5]。对珠光体钢的疲劳研究^[6]已经发现,在铁素体和碳素体界面附近存在着由疲劳引起的高密度位错。由此可以认为在钢丝疲劳初始阶段,局部应力集中很快即导致钢丝表面各

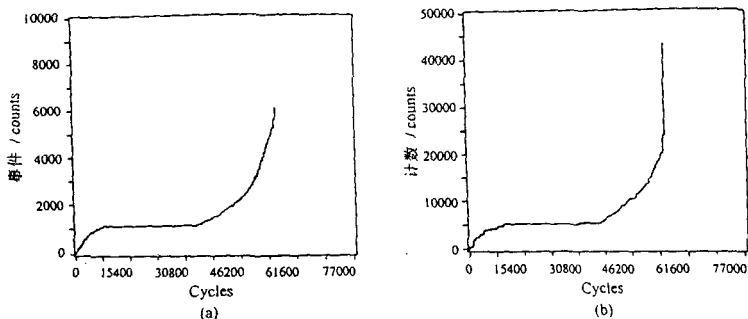


图2 钢丝疲劳损伤过程中的AE行为

Fig.2 AE behaviors during fatigue damage of steel wires

(a) AE累计事件与循环次数曲线 (b) AE累计计数与循环次数曲线

缺陷处产生高密度位错从而产生大量 AE 事件。疲劳损伤初期 AE 事件主要来自于钢丝表面缺陷变形, AE 源分布相对较疏, 疲劳后期钢丝各处皆已受到损伤, 故 AE 源分布密集, 这由缺口钢丝的定位图即可以看出, 如图 3(c)和(a)所示。无缺口试样标距之外的区域处, 也产生很多 AE 事件, 这是由于在较长的疲劳损伤过程中, 这些区域同样出现损伤的结果, 这与缺口钢丝有所不同。对于缺口钢丝, 由于其损伤过程很短, 标距外的区域受损程度轻, 因而 AE 活性也相当低, AE 源主要集中于标距之内, 如图 3 所示。

随着疲劳损伤的发展, 一方面损伤区域有所增加; 另一方面局部缺陷处出现加工硬化现象。但总的趋势是位错增殖逐渐减少, 相应的 AE 事件率和计数率也逐渐减小, 由此形成 AE 过程的第一阶段, 如图 2(a)和(b)所示。如果对局部过程进行细致观察, 会发现 AE 事件的生成过程具有脉动现象。

在 AE 过程的第二阶段, AE 活性较低, 这是位错增殖与消失之间出现动态平衡的结果^[7], 这时大量局部塑性变形已先后进入发展极为缓慢的状态。在钢丝表面最大切应力处, 择优滑移系经过相当长的一段应变积累后逐渐演变成为主导裂纹。这一过程中, 循环滑移由表面晶粒处开始, 逐渐发展, 穿过晶界直到一至两个晶粒处^[8]。文献[5]认为应变累计及引发的加工硬化是裂纹萌生的原因。

当主导裂纹继续发展时即进入裂纹扩展阶段, 这时 AE 事件率及计数率明显增高并持续到钢丝完全失效。断口分析表明, 钢丝疲劳裂纹扩展基本上属了解理断裂, 如图 4(a)所示。这是裂纹快速扩展的一个原因。这一阶段的 AE 事件除来自了解理断裂这种形式的裂纹扩展外, 还来自于(1)裂纹面闭合时的研磨过程; (2)裂纹尖端塑性区变形; (3)夹杂物的脱粘和断裂; (4)纵向二次裂纹的开裂过程。由于钢丝为高强度钢, 处于拉一拉加载条件下, 由(1)、(2)和(3)所产生的 AE 事件并不多, 这一时期的 AE 事件主要来自于主导裂纹和二次裂纹的开裂过程。

二次裂纹是由铁素体等纵向缺陷与钢丝横向运动共同作用的结果, 是裂纹扩展过程中出现的普遍现象。钢丝含有一定量的铁素体, 经冷拔后沿纵向排列, 研究表明它们是疲劳裂纹的择优扩展路径^[9]。在裂纹扩展阶段, 钢丝由于主导裂纹的存在而产生横向分力, 这使其有一往复的弯折运动, 导致二次裂纹出现并不断变宽变大, 如图 4(b)所示。对于服役钢丝绳疲劳损伤的研究^[10]同样发现二次裂纹存在于主裂纹扩展区域。二次裂纹是导致主导裂纹

快速扩展的另一个原因。由图1可见在主导裂纹附近 AE 活性及强度较高，由上述事实可知这些 AE 事件大部分来自于二次裂纹的开裂过程。

由 AE 过程曲线可见，主导裂纹的形成过程较长，约占整个疲劳寿命的 70%，而裂纹快速扩展仅占 30%。除主导裂纹外，其它各处损伤也在发展，图 3(b)中除缺口外还有一处缺陷，损伤后期其 AE 强度较高，可说明这一点。

对于深度缺口试样，在整个疲劳过程中，缺口之外的 AE 事件实际上绝大多数仍来自于局部塑性变形，其整个过程相当于无缺口试样 AE 过程的第一阶段。因为二者加载条件一样，除缺口外表面状态基本相同，在同样的时间内，其损伤情况也应大致相同。缺口试样 AE 过程的第二阶段实际上相当于无缺口试样 AE 过程第一阶段中出现的脉动情况。缺口试样的不同之处在于缺口处的损伤过程，由于局部应力明显提高，损伤初期即产生较多的高幅值 AE 事件，如图 3(c)所示。这表明其塑性变形严重，因而使其应变累计过程缩短，缺口处很快即进入加工硬化阶段，变形呈胶着状态，这使得其 AE 活性大为降低，如图 3(a)所示。由于上述原因裂纹生成时间也大为缩短。一旦裂纹形成，很快即进入快速扩展阶段，高幅值 AE 事件激增，直至试样最终断裂。

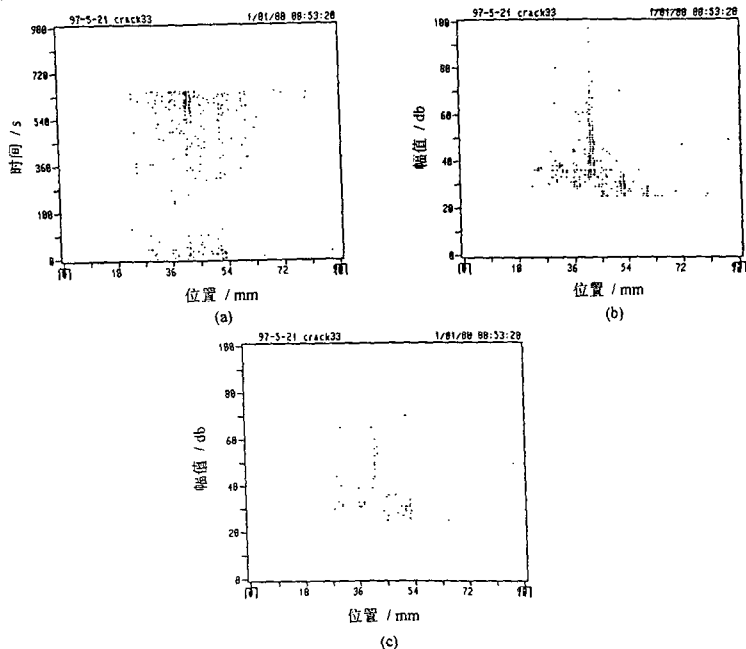


图3 缺口钢丝 AE 活动定位图

Fig.3 Location of AE activities in wire with notch

(a)AE 事件生成时时刻定位图 (b)AE 事件幅值表征定位图 (c)初始阶段 AE 表征定位图

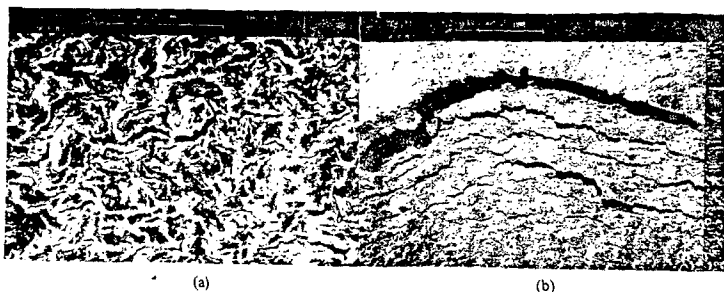


图 4 SEM 断口形貌

Fig.4 SEM fracture morphologies

(a) 解理断裂面 (b) 断面上二次裂纹

4 结论

- (1) 根据 AE 可了解钢丝疲劳损伤部位及其发展的动态过程。
- (2) 初始疲劳损伤起源于钢丝表面各个缺陷处, 及至断裂时钢丝长度方向上的各处皆已受到损伤。
- (3) 主导裂纹的孕育及生成期约占整个疲劳寿命的 70%, 而裂纹扩展仅占 30%。
- (4) 钢丝表面严重缺陷, 如人工缺口将使钢丝疲劳寿命大为缩短。

参考文献

- 1 D'Heane U, Lefever I, Verpoest I. Factors Influencing Fatigue of Wire. *Wire Industry*, 1987, 54: 179-181
- 2 Golisa I B, Debicki I R, Imbora M I. Fatigue Limit of Galvanized Wires. *Wire Industry*, 1986, 53:759-760
- 3 汪嘉荣, 曾祥华. 理化检验—物理分册. 1991,27(1): 41-45
- 4 尹万全, 朱祖铭, 等. 金属制品, 1998, (2): 15-18
- 5 Schrems K K. Wear-Related Fatigue in a Wire Rope Failure. *J. testing and evaluation*, 1994, 22(5):490-499
- 6 Dollar M, Bernstein I M, et al. The Effect of Cyclic Loading on the Dislocation Structure of Fully Pearlitic Steel. *Metall. Trans. A*. 1989, 20A: 447-451
- 7 Morris E F. *Met. Trans. A*, 1980, 11A: 365-379
- 8 Daeubler M A, Thompson A W, Bernstein I M. Influence of Microstructure on Fatigue Behavior and Surface Fatigue Crack Growth of Fully Pearlitic Steels. *Metall. Trans.*, 1990, 21A: 925-933
- 9 Aita C R, Weertman J. The Effect of Microstructure on Fatigue Crack Propagation in Iron-Carbon Alloys. *Met. Trans. A*, 1979, 10A: 535-544