

MATLAB 在激光涂层零件可靠性建模中的应用

钟鸣¹, 傅戈雁²

(1. 苏州市职业大学, 苏州 215104; 2. 苏州大学, 苏州 215021)

[摘要] 制备了自熔合金粉末激光熔覆涂层试件,在多次撞击疲劳试验机上进行了可靠性试验。借助 MATLAB 对样本数据进行分析,建立了激光涂层零件的多冲可靠性模型。分析得出激光涂层零件在多冲载荷下疲劳寿命服从对数正态分布,并拟合 $P-S-N$ 曲线,建立了多冲应力与疲劳寿命以及可靠度之间的关系。在理论分析的基础上设计了可靠性建模界面,为进一步的可靠性分析提供基础。

[关键词] 激光涂层; MATLAB; 可靠性

[中图分类号] TG115.5+6

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2010)02-0090-03

Reliability Modeling of Laser Cladding Part Based on MATLAB

ZHONG Ming¹, FU Ge-yan²

(1. Suzhou Vocational University, Suzhou 215104, China; 2. Suzhou University, Suzhou 215021, China)

[Abstract] The coating work-pieces were made by laser cladding with the autolytic alloy powder and it's reliability was tested by repeated impact on the fatigue test machine. The sample data was analyzed by MATLAB. The reliability model of laser cladding part under repeated impact load was made. The results show that the fatigue life of laser cladding submits the logarithmic normal distribution. The P-S-N curve is fitted to analyze the relation between the stress of the repeated impact and fatigue life. To provide the foundation of the further reliability analysis, the interface of modeling was designed on the basis of the theory.

[Key words] laser cladding coating; MATLAB; reliability

用激光熔覆方法对作反复相对撞击运动的零件进行表面强化,可以提高其使用寿命,已有成功的尝试^[1]。但是用这种方法进行强化后的零件在多冲载荷下因为熔覆工艺、载荷条件、涂层材料等多因素的影响,使其寿命数据呈现较大离散性,所以有必要在实验的基础上对多冲载荷下的激光涂层零件建立可靠性模型,为进一步的可靠性分析提供基础。同时建立面向 MATLAB 的用户界面,依靠这种直观、形象,易于使用和改造的界面,简化建模和分析。

1 试验过程^[2]

试件由基体与涂层 2 部分组成,涂层选用经试验和使用表明适合于多冲的 3 种激光涂层材料:即 Ni 基

自熔合金(Ni-2)、Co 基自熔合金(WFcl-11)和 Fe 基自熔合金(WF-312)。基体选用与上述涂层材料具有较好相容性的 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢、45 钢和 40Cr 钢 3 种典型材料。在 TJ-HL-T5000 型 CO₂ 激光器上进行熔覆加工。涂层经探伤检验后,在平面磨床上精磨涂层接触表面,磨后涂层厚度选取了 3 个范围,即 0.6~0.8 mm(薄)、1.5~1.8 mm(中)、2.2~2.5 mm(厚)。多冲试验在自制的多冲撞击疲劳试验机上进行^[3]。由前期试验^[4]确定失效判据:(1)撞击面上出现的宏观裂纹长度 $a > 1$ mm;(2)基体-涂层系统尚未出现宏观可检裂纹但总累积相对形变率已达 $\delta > 15\%$ ^[3]。疲劳试验沿横、纵 2 个方向铺开。横向采用多因素正交方法^[5],表 1 为试验因素水平表。采用 L₉(3⁴)正交表(略),建立 9 条正交方案。纵向:对每一条

[收稿日期] 2009-11-08; **[修订日期]** 2010-01-18

[基金项目] 国家自然科学基金项目(10972150)

[作者简介] 钟鸣(1979-),女,苏州人,硕士,讲师,主要研究方向为先进制造技术中的设计理论与方法。

[通讯作者] 傅戈雁(1958-),女,湖南邵阳人,博士,教授,主要研究方向为激光加工与表面强化。

正交方案采用成组试验法。循环周次大致控制在 5×10^6 以内。应力 S 的等级取 4 级,第 1 级应力取为涂层屈服极限的 25%~30%,第 4 级应力的选取要满足对应的平均循环周次在 10^6 以上。应力级差按对数等距离选取。每组保证有效试件个数为:较高水平的 1, 2 级应力下每组 5 个,较低水平的 3,4 级应力下每组 6 个,最终得试验数据。表 2 为一条正交方案的试验结果,其他试验结果略。

表 1 试验因素水平表

Tab.1 The table of the factors and its grades

水平	涂层材料	涂层厚度	基体材料
1	Co 基	薄	1Gr18Ni9Ti
2	Ni 基	中	45
3	Fe 基(软)	厚	40Gr

表 2 正交方案的试验结果

Tab.2 The results of the orthogonal scheme

S	N/万次					
$/(N \cdot \text{mm}^{-2})$						
280	20	28.5	31	35.2	42.3	
200	20.5	24	37.5	50	59	
140	57	60.5	68.2	73.5	96	135.5
100	101.8	120.5	141.5	162	188	197

2 基于 MATLAB 进行数据分析与可靠性建模

2.1 分布模型的选择

在成组试验中疲劳寿命多数遵循对数正态分布或威布尔分布^[5],依据以往激光涂层零件的多冲试验的数据分析结果,本试验的寿命数据(N)可能服从正态分布或对数正态分布。利用 MATLAB 将表 2 中 280 N/mm² 应力水平下的寿命数据取对数前后的值在正态概率纸上描点连线^[6],见图 1 和图 2。由图 1 和图 2 比较可见,在 280 N/mm² 应力水平下寿命数据更好地服从对数正态分布。对其它应力水平及其它正交方案做同样的正态概率纸分析,得到同样结论。所以假设激光涂层零件的多冲疲劳寿命服从对数正态分布。

2.2 数据处理及分布模型参数的估计

对正交试验的所有寿命数据求取对数后出现了具有较大离散性的奇异值,需要将它们剔除。在 MATLAB 环境中作各应力下对数寿命数据的 BOX 图^[6]。图 3 为根据表 2 中 280 N/mm² 应力下的对数寿命数据作的 BOX 图。由图 3 可知该应力下对数寿命数据关于均值对称,基本没有奇异数据。本文在 BOX 图基础上,再选用肖维奈准则^[5]进行进一步的奇异值分析并剔除奇异值。

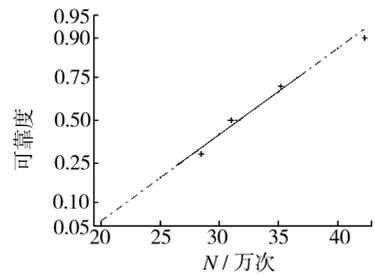


图 1 N 值分布图

Fig. 1 The scatter gram of N

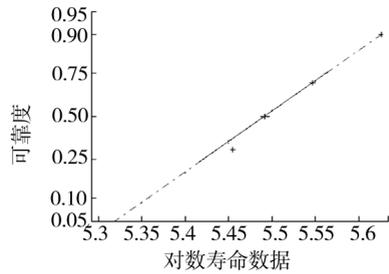


图 2 log N 的分布图

Fig. 2 The scatter gram of log N

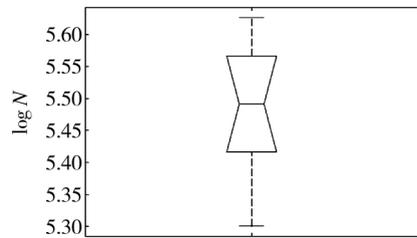


图 3 log N 的 BOX 图

Fig. 3 The BOX figure of logarithmic life-time data

结合无偏估计^[7]和随机加权^[8]2 种方法利用 MATLAB 求得分布参数中的参数估计值。例如在应力水平为 280 N/mm² 时,对数寿命数据的均值为 5.484,均方差为 0.12 099。

2.3 模型检验

选用柯尔莫哥洛夫检验法^[9]检验各应力下寿命数据是否服从对数正态分布,即对数寿命数据是否服从正态分布。柯尔莫哥洛夫检验法即 $t-s$ 检验法,计算公式如下:

$$D_n = \max[|F_n(x_i) - F(x_i)|, |F_n(x_{i-1}) - F(x_i)|] \quad (1)$$

$$\text{式中: } F(x_i) = \Phi\left(\frac{x_i - \bar{x}}{s}\right) = \Phi(u_i) \quad (2)$$

$$F_n(x_i) = \frac{\text{样本中} \leq x_i \text{ 的测定值的个数}}{\text{样本容量}} \quad (3)$$

式中: \bar{x} 和 s 为样本均值和方差,若 D_n 值小于显著性水平 α 下的柯尔莫哥洛夫检验临界值 $D_{\alpha,n}$,则样本值所属总体遵从正态分布,否则不遵从正态分布。如计算应力为 280 N/mm² 下的对数寿命数据,得

$D_n=0.2052, D_{a,n}=0.563(\alpha=0.05), D_n < D_{a,n}$ 。对其它应力下的对数寿命数据均进行了计算,得到相同的结论,所以模型服从对数正态分布的假设正确。

试验的样本容量对以后数据分析的可行性和准确性都起着重要的作用。特别是在这样的小样本试验中,由于试件的疲劳试验是破坏性的,并且试验周期长代价高,不可能在每一应力下选用大量的试件作为研究对象。所以样本容量的检验就尤为重要。一般选用中值疲劳寿命样本容量检验和安全寿命样本容量检验两种样本容量的检验方法^[5]。

中值疲劳寿命测定时,要求子样容量满足下式:

$$\frac{\delta_{\max}\sqrt{n}}{t_\gamma} \geq \frac{\sigma}{\mu} \quad (4)$$

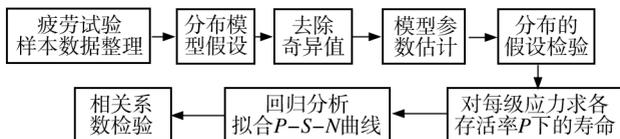
式中: δ_{\max} 为误差极限,取5%,给定置信度 $\gamma=90\%$ 后,根据样本容量 n ,可查表得 t_γ 。将各组样本容量代入上式,在MATLAB环境中编程计算得到各组样本容量全部满足要求。安全寿命测定时,要求子样容量满足下式:

$$\frac{\delta_{\max}}{t_\gamma \sqrt{\frac{1}{n} + u_p^2(\beta^2 - 1) - \delta_{\max} u_p \beta}} \geq \frac{\sigma}{\mu} \quad (5)$$

δ_{\max}, t_γ 定义同上, u_p 是对应任一可靠度 p 的标准正态偏量,此处可靠度取95%。将各组样本容量代入上式,在MATLAB环境中编程计算得到各组样本容量基本满足要求。

2.4 P-S-N 曲线

对每级应力求存活率 P 下的寿命,对每一正交方案用最小二乘法拟合 P - S - N 曲线,并用相关系数法检验其线形相关性。如用最小二乘法拟合表2正交方案在安全寿命 $P=99\%$ 下的 S - N 曲线为 $\log S = -0.4675 \log N + 4.767$,安全寿命 $P=90\%$ 下的 S - N 曲线为 $\log S = -0.5213 \log N + 5.1373$,中值疲劳寿命($P=50\%$)下的 S - N 曲线为 $\log S = -0.5883 \log N + 5.6198$ 。用相关系数法^[10]进行相关性的检验得到相关系数分别为0.9022,0.9361,0.9724,在显著性水平 $\alpha=5\%$ 时都大于分布表中的值,说明所拟合的直线有意义。用相同的方法可以求得其他正交方案下的 P - S - N 曲线。激光涂层的可靠性建模的全过程:



3 建立可靠性建模的用户界面

MATLAB 是一个为工程计算和数据分析而专门

设计的高级交互式软件包。MATLAB 提供了一组用于创建和操作线、面、文字、图像等基本图形对象的底层(low lever)图形指令。在MATLAB环境中可以方便地进行用户界面的设计。借助MATLAB将上面介绍的从参数估计、奇异值分析以及 P - S - N 曲线的绘制和拟合的整个可靠性建模过程建立用户界面,在使用时只要输入应力组和对应的寿命数据组,控制按件就可以进行数据处理、检验、曲线拟合等工作了。图4为其中的“ P - S - N 曲线绘制”界面,图4所示为280 N/mm²应力水平下选择可靠度 $P=50\%, 90\%, 99\%$ 时所自动绘制的 P - S - N 曲线。其他应用界面略。

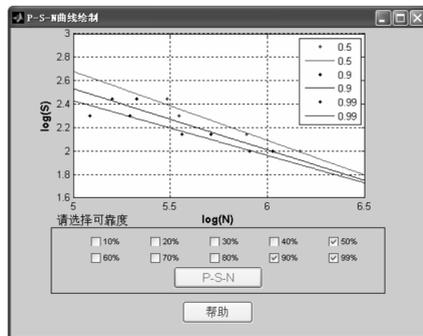


图4 “ P - S - N 曲线绘制”界面

Fig. 4 The surface of "the drawing of P - S - N curve"

4 结论

所建立的激光涂层零件的可靠性模型最大的特点是借助MATLAB实现了可视化。运用MATLAB的可靠性模型界面,可以在不掌握可靠性建模中的理论依据和准则,甚至不了解可靠性试验过程的情况下也能建立可靠性模型,这为以后激光涂层零件多冲疲劳试验数据分析带来了很大的方便。用该模型还可以完成给定应力、存活率求对应的寿命,或给定寿命、存活率求对应的疲劳强度。在该可靠性模型的基础上可以验证激光熔覆方法是强化零件表面的有效途径,同时可以研究涂层材料、基体材料、涂层厚度等各因素对涂层零件疲劳可靠性的影响,从而指导今后的激光熔覆工艺。

[参 考 文 献]

- [1] 傅戈雁,石世宏.激光熔覆甲胺泵进排液阀零件密封面[J].金属热处理,2000,(1):20-21.
- [2] 钟鸣,傅戈雁.激光涂层多冲碰撞疲劳强度的正交分析[J].机械设计,2005(8):52-53.
- [3] 傅戈雁,石世宏,钟鸣.激光涂层零件的疲劳撞击可靠性寿命试验分析[J].中国机械工程,2004,(18):1687-1691.

4 结论

通过对各种常见的金属涂层缺陷产生的原因及防治方法的分析总结,采取相应的防治措施,确保有效控制电弧喷涂层的质量,即保证了涂层的外观和防腐蚀效果,又可以提高防腐施工的效率、减少不必要的返工

及维护费用,增加钢建造物使用寿命和经济效益。

[参 考 文 献]

- [1] 易春龙. 电弧喷涂技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [2] 任必年. 公路桥梁腐蚀与防护[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.

(上接第 82 页)

[参 考 文 献]

- [1] 钟卫佳. 高品质无氧铜的生产[J]. 世界有色金属, 2003, (9): 8-11.
- [2] 于清秀. 无氧铜的制备及电子铜的发展趋势[J]. 电工材料, 2006, (1): 10-13.
- [3] 王艳辉. 国外无氧铜管材组织与性能分析[J]. 湖南有色金属, 2002, 18(4): 29-32.
- [4] 岩石. Cu/Nb-Ti 超导线材常温抗拉试验方法[J]. 等离子体应用技术快报, 1999, (11): 18-20.
- [5] Stuart W. 超导体对铜市场的影响[J]. 有色金属技术经济研究, 1989, (5): 12-18.
- [6] 宁兴龙. 磁体用超导材料[J]. 稀有金属快报, 2003, (3): 3-4.
- [7] 雷光勇. 铜及铜合金酸洗工艺探讨[J]. 表面技术, 1991, 20(1): 40-43.
- [8] 钟卫佳. 铜与铜合金加工实用手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
- [9] 曾祥德. 铜制件光亮酸洗钝化无污染工艺[J]. 中国表面工程, 1996, (3): 39-42.
- [10] 吴祖昌. 铜及铜合金零件无黄烟光亮酸洗工艺研究与应用[J]. 表面技术, 2001, 30(3): 9-11.
- [11] 曾祥德. 铜及铜合金的无黄烟光亮酸洗工艺[J]. 材料保

护, 2003, 36(8): 20-23.

- [12] 杨颀. 氮氧化物减排技术及烟气脱硝工程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [13] 张卯均. 三废治理与利用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- [14] 苏彦勋. 流量计量与测试[M]. 北京: 中国计量出版社, 1982.
- [15] 谭天恩. 化工原理[M]. 3 版. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [16] Ahmed Syed Younus, Asan Grandhid P, Al_farayedhi A A. Pipeline Drying Using Dehumidified Air with Low Dew Point Temperature[J]. Applied Thermal Engineering, 1998, 18(5): 231-244.
- [17] Battarra Viliam, SANDRO Selandari, Ardo Ugobil. Mathematical Model Predicts Performance of Pipeline Drying with Air[J]. Oil & Gas Journal, 1984, 82 (24): 114-116.
- [18] 于国琮. 化工机械工程手册[K]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [19] 黄虎. 压缩空气冷冻干燥系统工作过程热力计算及实验验证[J]. 南京师范大学学报, 2004, 4(1): 5-7.
- [20] 邹家庆. 工业废水处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.

(上接第 92 页)

- [4] 傅戈雁, 石世宏, 欧阳八生, 等. 覆层零件多冲碰撞试验与失效特征[J]. 材料科学与工程学报, 2004, 22(2): 216-219.
- [5] 高镇同, 蒋新桐, 熊峻江. 疲劳性能试验设计和数据处理: 直升机金属材料疲劳性能可靠性手册[K]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1999.
- [6] 何仁斌. MATLAB6 工程计算及应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2001.

- [7] 韩於羹. 应用数理统计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [8] 金星, 洪延姬. 可靠性数据计算及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [9] 邓勃. 分析测试数据的统计处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
- [10] 《数学手册》编写组. 数学手册[M]. 1 版. 北京: 高等教育出版社, 1979.