

激光喷丸诱导三维残余应力场的二级模糊综合评判

蒋素琴¹ 叶鸿伟²

(¹淮阴工学院机械工程学院, 江苏 淮安 223003)
(²江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 基于模糊数学理论,综合考虑影响激光喷丸(LSP)强化诱导三维残余应力场的多种因素及其多层次性,建立了残余应力场优劣的二级模糊综合评判模型。以两组有限元分析的数据为例,对激光喷丸诱导三维残余应力场的优劣进行模糊综合评判,并对两组疲劳试样进行疲劳模拟试验,得到的疲劳寿命结果很好地证明了模糊综合评判结果的正确性。该方法可为优化和控制激光喷丸强化诱导三维残余应力场提供理论依据。

关键词 激光技术;激光喷丸;模糊综合评判;残余应力场

中图分类号 TG665;TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.121404

Secondary Fuzzy Comprehensive Evaluation on 3D Residual Stress Field by Laser Shot Peening

Jiang Suqin¹ Ye Hongwei²

(¹Faculty of Mechanical Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an, Jiangsu 223003, China)
(²School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract Multiple factors and their multi-level effects on the three-dimensional (3D) residual stress field by laser shot peening (LSP) are considered comprehensively, and the model of secondary fuzzy comprehensive evaluation is established based on fuzzy mathematics theory. With such a technical method, the relative merits of residual stress field in LSP by finite element analysis are evaluated, and the fatigue simulation tests of the specimen treated by LSP are done. The fatigue life results show that fuzzy comprehensive evaluation for 3D residual stress field by LSP is effective and feasible. This method will provide guidance for the optimization and control of 3D residual stress field by LSP.

Key words laser technique; laser shot peening; fuzzy comprehensive evaluation; residual stress field

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引言

工程中通过各种强化手段获得残余压应力、较细的表层显微组织和较高的表面质量,以提高零部件的抗疲劳、耐磨和抗应力腐蚀等性能^[1,2],其强化机制可归因于这3个主要方面共同作用的结果,其中以残余压应力占主导地位^[3]。有学者以 Inconel718 镍合金为对象,进行了激光喷丸(LSP)和机械喷丸对比实验,结果表明,前者产生的压应力层深度是后者的3~4倍^[4]。鉴于激光喷丸强化的优越性和激光技术的不断发展,国内外众多学者致力于激光喷丸的强化机理研究,通过实验及有限元方法分析残余应力场的产生、测量及其有效控制方法^[5~7]。

残余应力场作为激光喷丸强化效应的主要评价指标,在工程实施中受到各种复杂因素的影响,各因素相互之间存在一定的交互性和多层次性,而且还具有较强的模糊性,如果简单地按单个因素(比如表面平均残

收稿日期: 2012-08-24; **收到修改稿日期**: 2012-09-28; **网络出版日期**: 2012-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(51175212)、江苏省自然科学基金(BK2010351)和江苏省光子制造科学与技术重点实验室开放基金(GZ200901)资助课题。

作者简介: 蒋素琴(1975—),女,硕士,讲师,主要从事构件的激光成形、激光表面强化与检测等方面的研究。

E-mail: jsq20040404@163.com

余压应力)去评判,在一定程度上无法客观地反映残余应力场的优劣程度。对于三维残余应力场此类难以用精确的解析方法做定量分析的问题,为了综合考虑所有因素的影响,本文依据模糊数学理论,按影响残余应力场的各因素的属性,将其分成不同层次、评判等级及隶属度,按由低到高的顺序逐层进行综合评判^[8~10],最终获得更能反映客观真实性的残余应力场总的评判结果。

2 模糊综合评判模型的建立

残余应力场的模糊综合评判就是应用模糊集,对所有影响评判结果的每个因素先进行单一决策,然后综合各因素的影响情况,得出残余应力场优劣的正确评判结果^[9]。当影响因素较多时,为了克服一级模型中权重数难分配且无法反映各因素的多层次性等问题,需采用二级模糊综合评判方法建立三维残余应力场的评价模型。

2.1 因素集

因素集是以影响评判对象的因素为元素所组成的一个普通集合,通常用大写字母 U 表示,即

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}, \quad (1)$$

各元素 $u_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 即代表各影响因素,这些因素都具有不同程度的模糊性。激光喷丸处理诱导的残余应力场通常用 4 个特征参数描述^[11],即残余压应力场深度 Z_0 、最大残余压应力深度 Z_{\max} 、最大残余压应力 $\sigma_{\max}^{\text{rc}}$ 和表面平均残余压应力 σ_s^{rc} 。分析影响三维残余应力场的所有因素,根据文献[11],这里选取这 4 个主要指标作为残余应力场的 4 个评价因素。

2.2 评判等级及其权重集

由于影响激光喷丸诱导的残余应力场的各评价因素及其评判等级的模糊性,很难把某个因素具体地规定为它的某一个等级,因而可把各个因素视为等级论域上的模糊子集。根据每个因素的属性类别,按其残余应力场的影响程度,由大到小进行排序,其等级论域上的模糊子集可记为

$$u_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in}\}, \quad (2)$$

式中 u_{ij} 在 $[0, 1]$ 范围内取值,它是第 i 类因素的第 j 个评判等级对该因素的隶属度。

根据检索资料确定各因素的隶属度,对各个等级所占的相对比重及其等第倾向进行评估。对 u_{ij} 进行归一化处理后,第 i 个因素等级权重集可表示为

$$A_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}), \quad (3)$$

式中 $a_{ij} = u_{ij} / \sum_{j=1}^n u_{ij}, (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$ 。

考虑到计算工作量及实际评定需要,将各因素对残余应力场的影响程度分为 4 个评判等级:小、较小、较大和很大。

2.3 备择集

备择集是以总评判中各种可能的结果为元素所组成的集合,故不论因素的分类情况,备择集只有 1 个,通常用大型字母 V 表示,即

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_p\}, \quad (4)$$

各元素 $v_k (k = 1, 2, \dots, p)$ 即代表各种可能的总评判结果。这里把三维残余应力场优劣的评判结果分为 4 个等级:差、一般、较好和很好。

2.4 一级模糊综合评判

一级模糊综合评判是单一因素多个等级的综合评判,单一因素对评判对象的影响可由它各个等级的综合评判给出。设评判对象按第 i 个因素的第 j 个评价等级 u_{ij} 评判,对备择集中第 k 个元素的隶属度为 r_{ijk} ; 依据备择集和因素集,建立单因素的等级评判矩阵为

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \cdots & r_{i1p} \\ r_{i21} & r_{i22} & \cdots & r_{i2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{in1} & r_{in2} & \cdots & r_{inp} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

矩阵中的第 j 行表示第 i 个因素的第 j 个等级评判的结果。由(5)式可以得出一级模糊综合评判集为

$$\mathbf{B}_i = \mathbf{A}_i \cdot \mathbf{R}_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}) \cdot \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \dots & r_{i1p} \\ r_{i21} & r_{i22} & \dots & r_{i2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{in1} & r_{in2} & \dots & r_{inp} \end{bmatrix} = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{ip}), \quad (6)$$

式中 $b_{ik} = \sum_{j=1}^m a_{ij} r_{ijk}$, ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, p$)。

(6)式采用综合评判模型Ⅳ即 $M(\square, +)$ 进行运算,该模型考虑了所有因素的影响,一定程度上避免了部分较弱因素信息的丢失,以免综合评判结果失准或失效。以 b_{ik} 为元素组成的一级模糊综合评判矩阵为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{B}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1p} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \dots & b_{mp} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

2.5 二级模糊综合评判模型

2.5.1 因素类权重集

因各因素影响评价对象的重要程度是不同的,为了反映其重要程度,赋予每个因素 u_i 以相应的权数 a_i ,且满足归一化和非负性条件。则因素类的权重集为

$$\mathbf{A} = (a_1, a_2, \dots, a_m), \quad \sum_{i=1}^m a_i = 1, \quad a_i \geq 0. \quad (8)$$

综合评价是通过多项指标来进行的,根据被评价对象在各评价指标上的数值差异大小,判断其评价信息的强弱,以此利用变异系数法确定权重。各指标的变异系数公式可用公式计算:

$$u_i = s_i / |\bar{w}_i|, \quad (9)$$

式中 $\bar{w}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n a_{ij}$ 为第 i 项指标的平均值, $s_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (a_{ij} - \bar{w}_i)^2$ 为第 i 项指标值的方差。对 u_i 进行归一

化处理,即得到各项指标的权数 $a_i = u_i / \sum u_i$ 。

2.5.2 二级模糊综合评判

按所有影响因素进行综合评判,采用综合评判模型 $M(\square, +)$ 进行运算,则二级模糊综合评判集为

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{R} = (b_1, b_2, \dots, b_p), \quad (10)$$

式中 $b_k = \sum_{i=1}^m a_i b_{ik}$, ($k = 1, 2, \dots, p$)。

2.6 残余应力场的评判

因备择集为非数性量,故根据最大隶属度法对残余应力场的优劣结果进行评判,取与 $\max_k b_k$ 相应的备择元素 v_L 为参数 v 的值,即

$$v = \{v_L \mid v_L \rightarrow \max_{1 \leq k \leq p} b_k\}. \quad (11)$$

3 应用实例

对 ZK60 镁合金中心孔疲劳试样进行激光喷丸强化有限元模拟,采用二级模糊综合评判方法对强化后的三维残余应力场进行综合评价。模拟试验分两组进行,激光参数包括激光冲击波峰值压力 A 、光斑直径 B 及喷丸次数 C ,残余应力场模拟结果见表 1,模拟方法及数据来源于文献[12]。

根据专家经验和逐级估计法对各评价因素采用简便、直观的图像法建立隶属函数^[10]。4 项评价因素的隶属函数图像如图 1 所示。

三维残余应力场的二级模糊综合评判步骤如下。

1) 建立因素集: $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4\} = \{Z_0, Z_{\max}, \sigma_{\max}^{\text{rc}}, \sigma_s^{\text{rc}}\}$ 。

表 1 激光喷丸参数及残余应力场模拟结果

Table 1 Parameters of LSP and simulation results of residual stress field

Test No.	Parameters of LSP			Results of residual stress field			
	A /GPa	B /mm	C	Z ₀ /mm	Z _{max} /mm	σ _{max} ^{rc} /MPa	σ _s ^{rc} /MPa
1	1.5	5	1	0.513	0.083	179.13	160.05
2	3.5	5	3	1.356	0.353	199.36	86.05

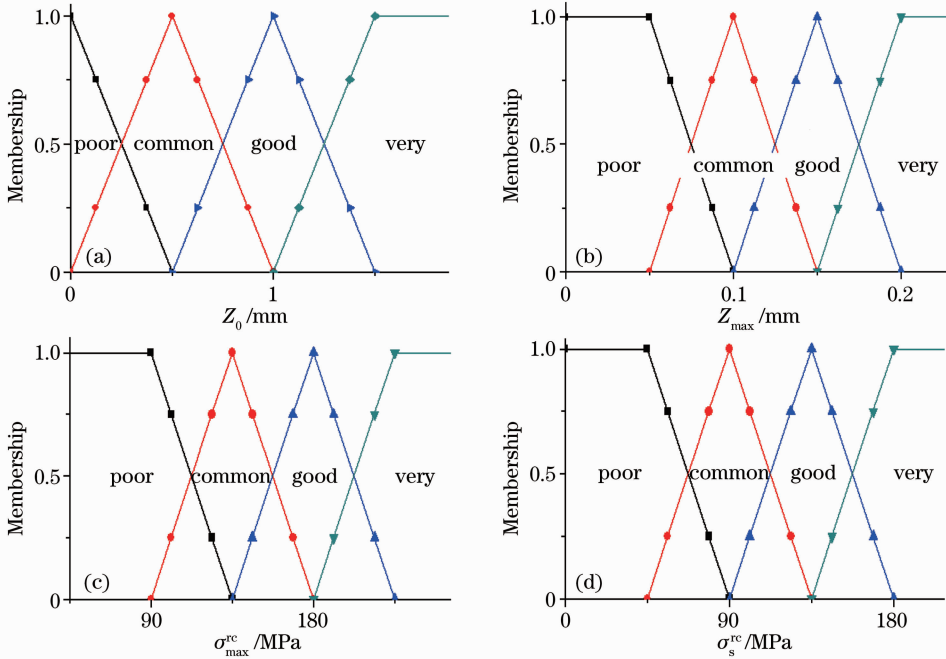


图 1 评价因素的隶属函数图像。(a)残余压应力层深度；(b)最大残余压应力深度；(c)最大残余压应力；(d)表面平均残余压应力

Fig. 1 Images of membership function for evaluation factors. (a) Z₀; (b) Z_{max}; (c) σ_{max}^{rc}; (d) σ_s^{rc}

2) 建立备择集: $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{\text{差, 一般, 较好, 很好}\}$ 。

3) 建立各因素的等级权重集。首先建立评判域上的模糊子集。是根据激光喷丸诱导三维残余应力试验结合专家分析法并参阅有关残余应力场的文献,用隶属度确定 u_{ij} :

$$u_1 = \{0.3, 0.5, 0.4, 0\}, u_2 = \{0.4, 0.5, 0.3, 0\}, u_3 = \{0.2, 0.4, 0.6, 0.3\}, u_4 = \{0.1, 0.4, 0.7, 0.2\}.$$

对 u_{ij} 归一化后,建立各因素的等级权重集:

$$A_1 = \{0.25, 0.42, 0.33, 0\}, \quad A_2 = \{0.33, 0.42, 0.25, 0\},$$

$$A_3 = \{0.13, 0.27, 0.40, 0.20\}, \quad A_4 = \{0.07, 0.28, 0.51, 0.14\}.$$

4) 根据图 1 所示的各因素隶属函数,将表 1 残余应力表征值结果代入各隶属函数中,算出相应的隶属度,建立各因素的等级评判矩阵。

第 1 组试验结果的等级评判矩阵为

$$R_i = \begin{bmatrix} 0 & 0.75 & 0.25 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.04 & 0.96 & 0 \\ 0 & 0 & 0.06 & 0.94 \end{bmatrix},$$

其一级模糊综合评判矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0.42 & 0.2007 & 0.3793 & 0 \\ 0.42 & 0.2575 & 0.3225 & 0 \\ 0.27 & 0.1135 & 0.4285 & 0.1880 \\ 0.28 & 0.0729 & 0.5155 & 0.1316 \end{bmatrix}.$$

第 2 组试验结果的等级评判矩阵为

$$R_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.29 & 0.71 \\ 0 & 0 & 0 & 1.00 \\ 0 & 0 & 0.55 & 0.45 \\ 0.15 & 0.85 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

其一级模糊综合评判矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.2540 & 0.7460 \\ 0 & 0 & 0.2332 & 0.7668 \\ 0.030 & 0.170 & 0.2577 & 0.5423 \\ 0.021 & 0.119 & 0.3008 & 0.5592 \end{bmatrix}.$$

5) 根据试验和分析中不同因素对应力场的影响,利用变异系数法确定因素权重集为 $A = (0.1, 0.2, 0.3, 0.4)$ 。

6) 由 $B = A \cdot R$ 得到二级模糊综合评判集。

第 1 组: $B = (0.31900, 0.13478, 0.43718, 0.10904)$ 。

第 2 组: $B = (0.01740, 0.09860, 0.26967, 0.61433)$ 。

按最大隶属度原则,第 1 组模拟试验所得的三维残余应力场为“较好”,第 2 组模拟试验所得的三维残余应力场为“很好”。

4 评判结果的检验

激光喷丸的强化效应在模拟试验中主要体现在应力强化方面,强化过程中诱导的三维残余应力场的优劣可通过疲劳性能来体现。分别对激光喷丸前后的 ZK60 镁合金疲劳试样进行疲劳试验模拟,分析其疲劳全寿命变化^[12],疲劳试验模拟采用单向正弦波拉-拉载荷谱,最大载荷 3.2 kN,应力比 0.1,试验频率 20 Hz。第 1 组和第 2 组试样的疲劳对数寿命值分别为 5.10 和 5.22,均高于未喷丸试样的 4.92。疲劳试验结果表明,第 2 组试样的强化效果优于第 1 组,这与二级模糊综合评判的结论相吻合。激光喷丸诱导的残余压应力改善了材料原有的应力分布状态,从而达到提高其抗疲劳性能的目的。

5 结 论

综合考虑影响激光喷丸强化诱导三维残余应力场的多种因素及其多层次,应用模糊数学理论,建立了三维残余应力场优劣的二级模糊综合评判模型。针对残余应力场的四个特征参数的模糊性及其对残余应力场贡献的大小,确定其评价等级及隶属度。评判模型不仅考虑了各因素的影响,而且保留了各级评价的全部信息,避免了综合评判失准或失效。

以有限元分析的激光喷丸残余应力场各指标的模拟数据为例,应用建立的二维模糊综合评判模型进行两组试验结果的评判,结果表明,第 2 组残余应力场优于第 1 组。在此基础上,以疲劳模拟试验的疲劳寿命结果进行验证,进一步证明了用模糊综合判定来评价残余应力场的可行性。该方法在一定程度上降低了人为主观因素的影响,保证了评价结果的准确性,可为优化和控制激光喷丸强化诱导的三维残余应力场提供可靠的依据和指导。

参 考 文 献

- 1 Wang Min. Manufacturing Principle and Technology of Anti-Fatigue[M]. Nanjing: Jiangsu Science Press, 1999
王 珉. 抗疲劳制造原理与技术[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1999
- 2 Zhang Xingquan, He Guangde, Qi Xiaoli *et al.*. Investigation on contact fatigue strength of gear affected by laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3187~3191
张兴权, 何广德, 戚晓利 等. 激光冲击强化对齿轮接触疲劳的影响[J]. 中国激光, 2010, **37**(12): 3187~3191
- 3 Y. K. Gao, Y. F. Yin, M. Yao. Effect of shot peening on fatigue properties of 0Cr13Ni8Mo2Al steel[J]. *Mater. Sci.*

- Technol., 2003, **19**(3): 372~374
- 4 C. S. Montross, T. Wei, L. Ye *et al.*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review[J]. *International Journal of Fatigue*, 2002, **24**(10): 1021~1036
- 5 Zhou Jianzhong, Yang Xiaodong, Huang Shu *et al.*. Residual stress field of ZK60 specimen with central hole induced by both-side laser shot peening[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1850~1855
周建忠, 杨小东, 黄舒等. 双面激光喷丸强化 ZK60 镁合金的残余应力数值研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7): 1850~1855
- 6 Chumhui Yang, Peter Damian Hodgson, Qianchu Liu *et al.*. Geometrical effects on residual stresses in 7050-T7451 aluminum alloy rods subject to laser shock peening[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2008, **201**(1-3): 303~309
- 7 Hu Yongxiang, Yao Zhenqiang, Hu Jun. Numerical simulation of residual stress field for laser shock processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 846~851
胡永祥, 姚振强, 胡俊. 激光冲击强化残余应力场的数值仿真分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6): 846~851
- 8 V. Ravi, P. J. Ready, H. J. Zimmermann. Fuzzy global optimization of complex system reliability[J]. *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, 2000, **8**(3): 241~248
- 9 Li Zhaokun. Stress Field Analysis and Evaluation for Milling Insert with Complex Groove[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2005
李兆坤. 三维复杂槽型铣刀片应力场分析及评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2005
- 10 Peng Zuzeng, Sun Yunyu. Fuzzy Mathematics and Application[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002
彭祖赠, 孙毓玉. 模糊数学及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002
- 11 Wang Renzhi. Residual stress and fatigue properties of spring[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis Part A (Physical Testing)*, 2005, **41**(11): 541~548
王仁智. 残余应力与弹簧的疲劳性能[J]. *理化检验-物理分册*, 2005, **41**(11): 541~548
- 12 Jiang Suqin. Research on the Fatigue Behavior of Magnesium Alloy Treated by Laser Shot Peening Based on Numerical Analysis and Experiment[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009. 32~41
蒋素琴. 激光喷丸镁合金疲劳行为的数值分析及实验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009. 32~41