激光毛化技术对18-8不锈钢疲劳性能影响的研究*

STUDY ON THE 18-8 STAINLESS STEEL FATIGUE PROPERTIES WITH DIFFERENT MELTING-SOLIDIFICATION ZONE COVERAGE RATES

邓忠民**[1] 刘 敬[1] 赵亦兵[2] 洪友士[2]

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083)

(2. 中科院力学所 非线性力学国家重点实验室(LNM), 北京 100080)

DENG ZhongMin[1] LIU Jin[1] ZHAO YiBin[2] HONG YouShi[2]

(1. *School of Space Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing* 100083, *China*)

(2. *State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080, *China*)

摘要 通过模拟分析,对激光毛化18-8不锈钢的疲劳寿命与毛化覆盖率的关系进行研究,预测结果与相关实验结果进行对比。结果显示,由于激光毛化处理的影响,18-8不锈钢的疲劳寿命得到改善,而且在毛化覆盖率为20%左右时,材料疲劳性能最好。

关键词 激光毛化 疲劳 **18-8**不锈钢 模拟分析 覆盖率

中图分类号 TG665 TG142.71 O346.23

Abstract The relation between laser texturing overlaid rate and 18-8 stainless steel fatigue life was analyzed by numerical simulation and related experiments. The result shows that the fatigue life of 18-8 stainless steel is improved after laser texturing treatment, and its fatigue property is better when the laser texturing overlaid rate is about 20%.

Key words Laser texturing; Fatigue; 18-8 stainless steel; Simulation; Overlaid rate

Corresponding author: *DENG ZhongMin*, *E-mail*: *dengzm*9742@263.*net*, *Fax*: + 86-10-82316530

Manuscript received 20040425, in revised form 20040714.

1 引言

激光毛化技术是一种新型的材料处理工艺,其对材料的影响区仅局限于材料表面很薄的一层。主要用于提高与材料表面属性紧密相关的材料力学性能,如材料的疲劳寿命和摩擦磨损性能[1]。

激光毛化技术在材料表面形成一个个硬质点和微坑,单向拉拉循环载荷下,这些微区使得材料表层的应力应变分布不均匀,容易萌生损伤,从而导致材料疲劳寿命降低;同时,由于激光毛化技术使材料表面产生残余压应力,残余压应力又能缓解表层损伤的萌生,提高材料的疲劳寿命。因此,激光毛化技术既有可能提高材料的疲劳寿命(当残余应力影响占优时),又有可能减低材料抗疲劳性能(当微缺陷(硬质点、微坑)的影响占优时)。

本文通过模拟分析,讨论激光毛化18-8不锈钢(1Cr18Ni9Ti)的拉拉疲劳性能,就毛化覆盖率对材料疲劳性能的影响进行分析预测,并与四种毛化覆盖率材料拉拉疲劳实验进行对比。

2 基本公式

材料疲劳寿命 N_f 与材料参数之间的关系[2]为

$$\frac{\Delta\varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma_{f'}}{E}(2N_f)^b \tag{1}$$

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varepsilon_{f'}(2N_f)^c \tag{2}$$

$$\frac{\Delta\varepsilon_t}{2} = \frac{\Delta\varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \frac{\sigma_{f'}}{E}(2N)^b + \varepsilon_{f'}(2N)^c \tag{3}$$

公式(3)仅仅对对称循环 $R = -1$ 有效。若 $R \neq -1$,式(3)修改为

$$\frac{\Delta\varepsilon_t}{2} = \frac{\sigma_{f'} - \sigma_m}{E}(2N)^b + \varepsilon_{f'}(2N)^c \tag{4}$$

式中 $\sigma_{f'}$ 为材料疲劳强度系数,σ_m 为循环平均应力,$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$,$\varepsilon_{f'}$ 为材料疲劳延性系数,b 为材料疲劳强度指数,c 为材料疲劳延性指数。

对于经激光毛化处理的材料,在其表层产生的残

* 20040425收到初稿,20040714收到修改稿。

** 邓忠民,男,1968年11月生,江西鄱阳人,汉族。副教授,博士,研究方向为飞行器结构强度、材料的力学性能。

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

余应力将影响疲劳寿命。因此, 式(4) 可修改为[3]

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma_{f'} - \sigma_m - \sigma_r}{E}(2N)^b + \varepsilon_{f'}\left(\frac{\sigma_{f'} - \sigma_r}{\sigma_{f'}}\right)^{d/b}(2N)^c \tag{5}$$

式中 σ_r 为激光毛化处理的残余应力。材料的疲劳强度系数 $\sigma_{f'}$、延性系数 $\varepsilon_{f'}$、疲劳强度指数 b、延性指数 c 不随毛化覆盖率发生变化, 且 b、c 为负数[4]。

3　有限元分析模型

由于激光毛化技术在材料表面形成有规律排列的硬化坑(图 1), 为了分析材料毛化覆盖率对材料拉拉疲劳的影响, 建立如下有限元分析计算模型(图 2)。

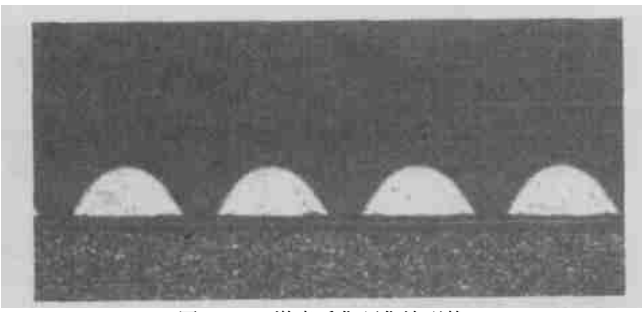

图 1　CO_2 激光毛化硬化坑形状

Fig. 1　The CO_2 laser textured hardness pit

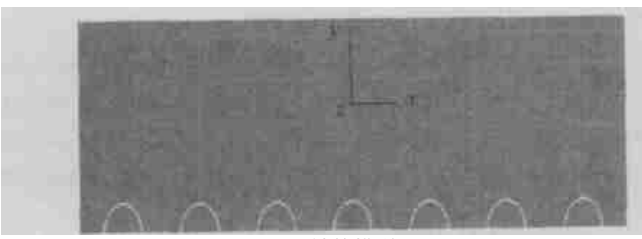

图 2　计算模型

Fig. 2　Calculate model

模型为一含有硬化点的试件, 试件表面按毛化覆盖率不同分布着硬质点。材料单调拉伸的应力应变关系见图 3, 弹性模量取 170 GPa, 基体屈服强度为 243 MPa, 硬质点(图中材料表层曲线内) 的屈服强度为 450 MPa[6] (从材料硬质点硬度与基体硬度对比换算得到), 泊松比取为 0.28。

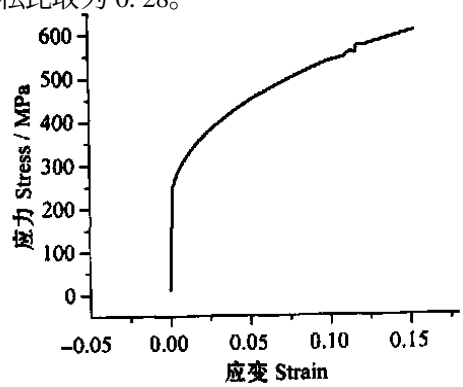

图 3　1Cr18Ni9Ti 应力应变关系曲线

Fig. 3　1Cr18Ni9Ti stress-strain curve

激光毛化材料表面残余压应力大约为几十兆帕[6], 表面残余压应力与毛化覆盖率的关系曲线假设为图 4, 数值模拟在 ABAQUS 软件相应的模块上进行。

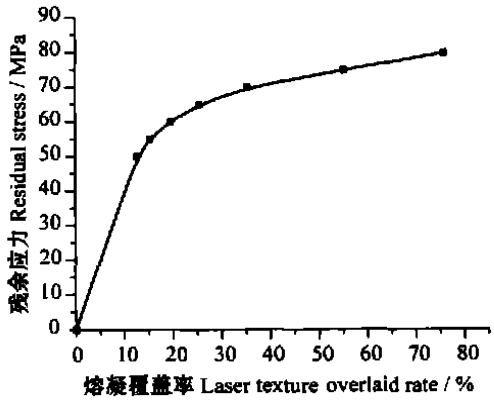

图 4　残余压应力与毛化覆盖率的关系

Fig. 4　The relation between laser texture overlaid rate and residents

4　结果和讨论

模拟分析取覆盖率 λ分别为 0%、12.6%、15.3%、19.6%、25.6%、35.5%、55.3%、75.8% 试件。假设覆盖率为 0% 的材料疲劳寿命为 1, 同时, 不考虑材料弹性变形对寿命的影响, 则其他覆盖率材料相对于未处理不锈钢的寿命为

$$\lg\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_p(\lambda = 0)} - K\lg\left(1 - \frac{\sigma_r}{\sigma_{f'}}\right) = c\lg N \tag{6}$$

式中 N 为相对于未处理激光毛化材料寿命比。其他相关参数取如下数值, 疲劳强度系数 $\sigma_{f'}$ 为 1 600 MPa, 疲劳延性指数 C 为 − 0.5, 指数 K = 16.1。

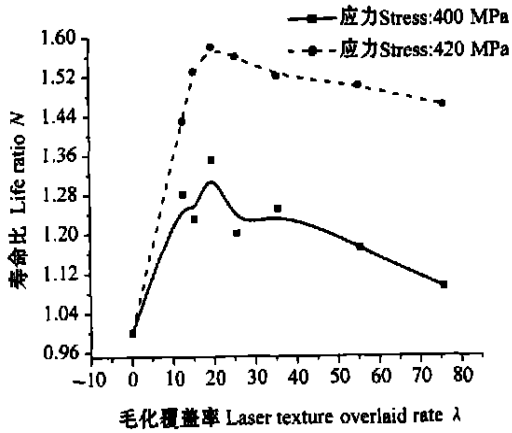

图 5　激光毛化覆盖率对材料拉拉疲劳寿命的影响

Fig. 5　The relations between N and λ

毛化覆盖率与材料疲劳寿命之间的关系见图 5。

分析结果显示, 当应力低于硬化点屈服强度(450 MPa), 而高于基体屈服极限(243 MPa), 毛化覆盖率不同, 材料相对疲劳寿命不同, 其中覆盖率为 20% 左右试样相对寿命 N 最好, 与毛化覆盖率为 20% 左右, 材料高周疲劳寿命最好的实验结果[5](图 6) 相一致。对

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

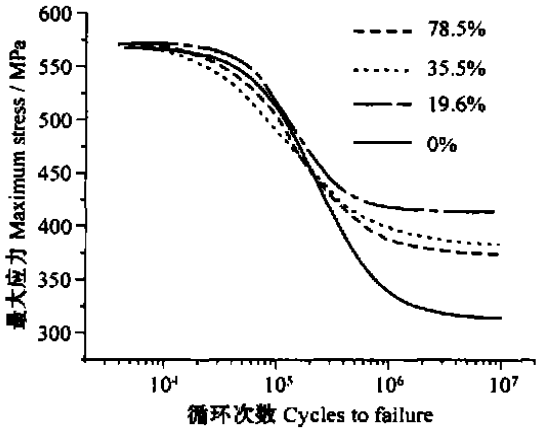

图 6 四种激光毛化覆盖率试样的 $S-N$ 曲线[6]

Fig. 6 $S-N$ curves of four laser texturing rate overlaid samples [6]

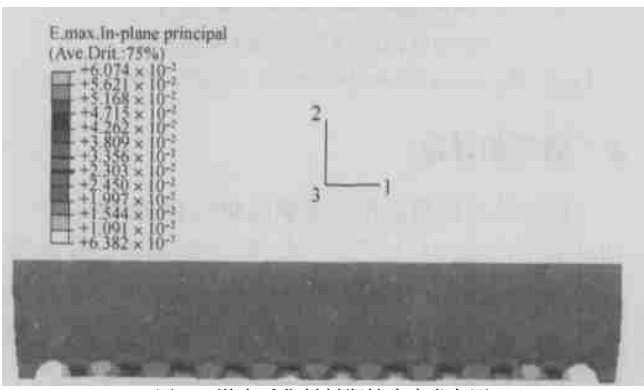

图 7 激光毛化材料塑性应变分布图

Fig. 7 Plastic-strain distribution of laser texturing materials

比实验结果与分析结果得到, 图 7 显示, 除覆盖率为 0 的点, 应力为 420 MPa 时, 曲线相对平坦, 相对寿命变化随毛化覆盖率变化不大; 应力为 400 MPa 时, 相对寿命随毛化覆盖率变化幅度要大一点。图 6 也有同样的现象, 随应力增大, 毛化覆盖率对寿命的影响减弱。至于分析结果中未处理试样的异常现象有待于进一步研究。

数值模拟结果还显示, 大塑性应变存在于硬质点之间(图 7) 。据此可以推测, 材料疲劳裂纹萌生于此。疲劳试样断口形貌观察亦证实了这一点[6] 。

5 结论

本文通过模拟分析, 对激光毛化覆盖率与材料拉拉疲劳寿命的关系进行初步预测, 与相应拉拉疲劳实验进行对比, 趋势一致。模拟结果和实验结果都显示, 激光毛化技术能改进 18-8 不锈钢的疲劳性能, 并且在毛化覆盖率为 20% 左右时, 材料的抗疲劳性能最好。

References

1 Deng Z M, Zhao Y B, Hong Y S. Influence of microstructure on materials fatigue life with different MSZ coverage rates under contact loads. Key Engineering of Materials, 2003, 243-244: 219 ~ 223.

2 Koh S K. Fatigue life simulation and estimation of an autofrettaged thick-walled pressure vessel with an external groove. Int. J. Fatigue, 1996, 18(1): 49 ~ 56.

3 Duprat D, Davy A, Boetsch R, Boudet R. Fatigue damage calculation in stress concentration fields under variable uniaxial stress. Int. J. Fatigue, 1996, 18(4): 245 ~ 254.

4 Suresh S, Translated by Wang Z G. Material fatigue. Beijing: National Defense Technology Press, 1993(In Chinese) (Suresh S 著, 王中光译. 材料的疲劳. 北京: 国防工业出版社, 1993).

5 Zhao Y B. Study on the surface microstructure and mechanical properties of 1Cr18Ni9Ti steel treated by laser texture〔Pr D Thesis〕. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy Science, 2004(In Chinese) (赵亦兵. 激光熔凝处理 1Cr18Ni9Ti 钢表层组织与力学性能的影响〔博士学位论文〕. 北京: 中国科学院力学研究所, 2004).

6 Peng L H. On properties of YAG laser textured steel sheets and cladding techniques by YAG pulse laser〔Ph D Thesis〕. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy Science, 1997(In Chinese) (彭林华. YAG 脉冲激光毛化钢板的性能和 YAG 脉冲激光表面涂覆的研究〔博士学位论文〕. 北京: 中国科学院力学研究所, 1997).

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net