

文章编号: 0258-0926(2015)05-0199-05; doi: 10.13832/j.jnpe.2015.05.0199

上海光源挡光元件的热疲劳寿命评估

肖维灵^{1,2}, 陈海波¹, 殷 琰¹

1. 中国科学技术大学近代力学系, 合肥, 230026; 2. 中国直升机设计研究所, 江西景德镇, 333000

摘要: 以上海光源(SSRF)前端区挡光元件结构为分析对象, 进行热负载作用下的温度和弹塑性应力有限元模拟, 采用修正的 Von Mises 等效应变模型并结合 Miner 线性累积损伤理论进行疲劳寿命预估, 同时考虑表面粗糙度的影响以及光束长时间照射的保持效应, 最终给出挡光元件的热疲劳寿命评估方法, 并依此提出挡光元件的有限寿命的设计方法, 以达到改善目前保守的设计、提升装置的总体性能的目的。

关键词: 同步辐射; 挡光元件; 有限元模拟; 疲劳寿命预测; 有限寿命设计方法

中图分类号: O344.3; O346.2 **文献标志码:** A

Evaluation of Thermal Fatigue Life for SSRF High-Heat-Load Components

Xiao Weiling^{1,2}, Chen Haibo¹, Yin Yan¹

1. University of Science and Technology of China, Department of Modern Mechanics, Hefei, 230026, China;

2. China Helicopter Design Research Institute, Jingdezhen, Jiangxi, 333000, China

Abstract: This paper focuses on a typical high heat load component at the front end of Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF). The temperature and elastoplastic stress-strain are simulated with the finite element method. The modified Von Mises equivalent strain model, combining with Miner linear cumulative damage theory, is used to predict the fatigue lives. Meanwhile, taking into account the effects of surface roughness and hold time, we ultimately provide a thermal fatigue life evaluation method for the high heat load components. The finite life design method is accordingly proposed, which aims to improve the current conservative design method and to promote the overall performance of the facility.

Key words: Synchrotron radiation, High heat load component, Finite element simulation, Fatigue life prediction, Finite life design method

0 引 言

同步辐射装置位于前端区的挡光元件是光束线上至关重要的部件, 承受着高功率密度的辐照载荷作用^[1]。目前服役的第三代同步辐射装置前端挡光元件大都按线弹性静强度准则设计^[2-3], 并未考虑疲劳寿命问题, 设计非常保守。若要改变过度保守设计的现状, 可采用有限热疲劳寿命的设计方法来取代现有的线弹性静强度方法, 这样对前端区整个光学元件的紧凑布局和同步辐射装

置整体性能的提升具有促进作用。

热疲劳本质上属于低周应变疲劳^[4]。在预测材料或结构的低周应变疲劳寿命时, 危险点处的循环应变就作为衡量损伤的参考量^[5]。工程上, 当结构承受多轴疲劳时, 常将单轴的 Manson-Coffin 方程^[6]推广, 用 Von Mises 等效应变幅值作为衡量损伤的主要参量。本研究考虑了平均应力和塑性泊松比对 Manson-Coffin 方程的修正, 提出修正的 Von Mises 等效应变模型; 与

收稿日期: 2015-03-06; 修回日期: 2015-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(10975130)

作者简介: 肖维灵(1985—), 男, 工程师, 现主要从事金属和复合材料结构的疲劳设计工作

实验结果^[7-8]的对比研究发现,该模型的预测结果与 2 个典型实验的疲劳寿命吻合较好^[9]。采用修正的 Von Mises 等效应变模型作为疲劳寿命预估模型,系统评估上海光源 (SSRF) 前端区承受热负载密度最高的挡光元件 (Mask2) 的热疲劳寿命,并依据评估结果提出挡光元件的有限寿命的设计方法。

1 理论与计算模型

首先讨论用于疲劳寿命预测的理论分析模型。基于 Von Mises 等效应变幅的 Manson-Coffin 疲劳寿命预测公式为:

$$\frac{\Delta \varepsilon_{vm}}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (1)$$

式中, E 为弹性模量; σ_f' 为疲劳强度系数; ε_f' 为疲劳延性系数; b 为疲劳强度指数; c 为疲劳延性指数; N_f 为疲劳裂纹萌生寿命; $\Delta \varepsilon_{vm}$ 为 Von Mises 等效应变。考虑泊松比在材料弹性和塑性阶段的不同,以及平均应力不为零的影响,可得到修正的 Von Mises 等效应变模型^[9]:

$$\frac{\Delta \varepsilon_{vm}}{2} = \frac{1+\nu_e}{1+\nu} \frac{\sigma_f'}{E} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_f'} \right) (2N_f)^b + \frac{1+\nu_p}{1+\nu} \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (2)$$

式中, ν_e 为弹性泊松比; ν_p 为塑性泊松比 (对于金属材料 $\nu_p = 0.5$); σ_m 为平均应力。

其次,确定用于分析计算的挡光元件及模型工况。前端区的挡光元件具有阻挡部分同步辐射光通过通光孔的作用,它吸收光束的部分能量,以便下游实验站对光束的利用。其中,Mask2 吸收的功率大,局部热应力水平高,被选为本文的分析对象,其结构图可见文献^[9]。同步辐射光束

从较大口径的入口进入,照射到挡光元件倾斜的受光面时,这些表面会引起升温 and 热应力。当光束循环作用时,则挡光元件即出现热疲劳问题。有限元模拟时,挡光元件受光面上承受的热负载可近似为表面热源,具体的热负载功率密度分布见文献^[10]。元件中布置有横向排列的直径为 6 mm 水冷管道,壁面对流换热系数为 $0.015 \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$ ^[3]。

实际工作时,光束线正常工作状态称为束流正常情况,与之对应的则是光束线非正常情况即束流发生漂移。SSRF 的存储环在束流运行中可能会遇到断电、控制系统故障等突发情况造成束流轨道产生偏差,使得存储环引出的同步辐射光发生位置和角度的漂移。按规定,光束在允许的范围内容移时,挡光元件的温度和热应力也应满足设计要求^[3]。图 1 为束流正常和漂移的示意图,当束流发生漂移时,光斑的空间位置发生轻微偏移,元件的倾斜面上将承受更多的热负载,此时元件上的最高温度和最大热应力比束流正常时高。本文将采用有限元模拟这 2 种不同工况的温度场和热应力场。

2 有限元应力应变模拟

2.1 线性有限元模拟

SSRF 的第一期 7 条光束线设计采用的是线性有限元方法模拟挡光元件 Mask2 的温度和热应力响应,其设计要求^[11]: 最高温度 T_{max} 小于 $300 \text{ }^\circ\text{C}$,防止 Glidcop 材料的高温蠕变; 冷却管道壁面的最高温度 $T_{w,max}$ 小于 $100 \text{ }^\circ\text{C}$,保证冷却水在整个管道流动过程中不会出现沸腾现象,始终保持单相流动状态; 采用线性有限元计算的最大 Von Mises 等效热应力 σ_{max} 不超过 430 MPa 。

线性有限元分析得到存储环束流为 300 mA

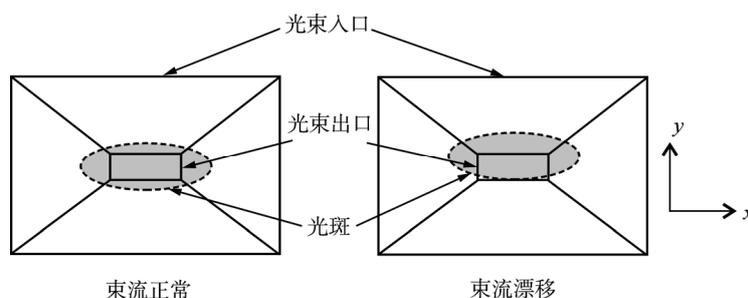


图 1 存储环束流正常和漂移的情况下热负载的对比

Fig. 1 Comparison of High Heat Loads between Conditions of Normal Beam on and Beam Shift

和 400 mA 下温度与最大应力结果 (表 1), 可见 400 mA 下束流漂移时的热应力已超过了设计指标允许的最大热应力值。

表 1 300 mA 和 400 mA 下温度和应力计算结果
Table 1 Calculated Temperature and Stress Results under Beam Current 300 mA and 400 mA

存储环束流/mA	是否漂移	$T_{max}/$	$T_{w,max}/$	$\sigma_{max}/$ MPa
300	否	100.6	46.8	274.5
	是	138.8	53.1	432.6
400	否	124.1	52.4	366.0
	是	175.1	60.8	576.8

2.2 非线性有限元模拟

线弹性有限元分析将材料的热物性和力学属性等参数设为常温下的不变量, 忽略了材料属性随温度而变化的特性, 缺乏合理性, 所以应采用材料参数和本构关系可随温度变化的非线性有限元分析方法。本部分分析用到的弹塑性本构关系等非线性材料属性均采用文献[12]的实验测量结果。

加载方式为循环加载, 每个加载周期前 30 s 加载, 后 30 s 卸载, 共加载 3 个周期。图 2 是束流强度 300 mA 和 400 mA 下束流发生漂移时的温度结果, 其中非线性有限元计算的最高温度较线性有限元的高。

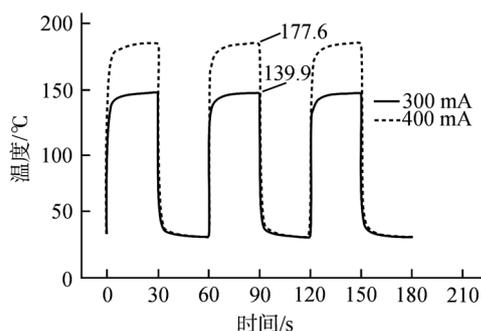


图 2 发生漂移时温度随时间变化曲线
Fig. 2 Peak Temperature Versus Time in Case of Beam Shift

图 3 为 2 种束流发生漂移情况下元件内最大塑性应变点 (即最危险位置) 的循环应力-应变响应曲线。可以看出, 300 mA 束流发生漂移情况下, 由于加载时产生的压缩塑性应变较小, 在同步辐射热负载卸载后, 应力-应变始终处于弹性范围内, 没有进入反向屈服状态, 所以应力-应变没有

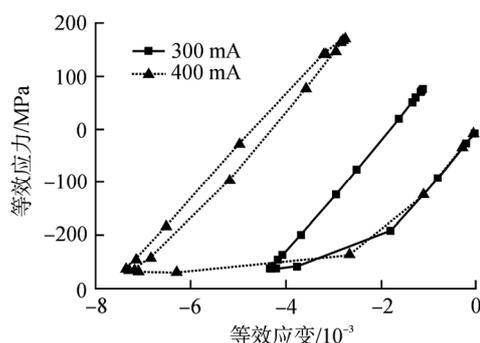


图 3 300 mA 和 400 mA 下束流发生漂移时的循环应力-应变响应曲线

Fig. 3 Cyclic Stress-Strain Curves in Case of Beam Shift at Beam Current 300 mA and 400 mA

形成迟滞环。400 mA 束流发生漂移情况下, 加载时产生的压缩塑性应变较大, 卸载后应力-应变进入反向屈服状态, 后续的循环热负载加卸载过程中应力-应变形成了稳定的迟滞环。

3 挡光元件的热疲劳寿命预测

采用非线性有限元分析了 Mask2 在同步辐射循环热负载作用下的应力-应变响应之后, 可依据修正的 Von Mises 等效应变模型式 (2) 对 Mask2 进行疲劳寿命预测。模型中涉及的各项材料参数由此前对 SSRF 提供的 Glidcop 材料测试得到^[12]。表 2 给出了 Mask2 在不同的束流强度下, 束流正常和发生漂移时的疲劳寿命预测结果。由此可见, 目前设计的挡光元件即便在 400 mA 甚至 500 mA 也可稳定安全地服役 ($N_f > 10^4$)。因此, 目前 300 mA 工作束流强度下, 采用线弹性准则设计挡光元件非常保守。

表 2 多种工况下所预估的疲劳寿命结果

Table 2 Fatigue Life Prediction Results in Various Cases

存储环束流/mA	是否漂移	$\Delta\varepsilon_{vm}/\%$	σ_m /MPa	N_f /循环次数
400	否	0.242	-100	38×10^7
	是	0.411	-30	15×10^4
500	否	0.306	-75	0.88×10^7
	是	0.608	-14	1.2×10^4

实际上, 在 SSRF 存储环和光束线运行稳定后, 束流大部分时间都处于正常工作情况, 仅少部分情况会发生漂移。为此, 可利用 Miner 疲劳累积损伤理论综合得到束流正常和发生漂移的疲劳寿命^[13]:

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (3)$$

式中, N_i 是第 i 种交变应力水平作用下的疲劳寿命; n_i 是该应力水平的加载周次。在 SSRF 的每一个束流强度下, 此处仅定义束流正常和束流漂移 2 个典型载荷块, 假设发生漂移的概率为 α , 则有:

$$\frac{(1-\alpha)N_f}{N_1} + \frac{\alpha N_f}{N_2} = 1 \quad (4)$$

式中, N_1 、 N_2 分别对应于表 2 中的束流正常和漂移下的预估寿命, 由式(4)可求解出综合束流正常和发生漂移后的疲劳寿命 N_f :

$$N_f = \frac{N_1 N_2}{(1-\alpha)N_2 + \alpha N_1} \quad (5)$$

若从挡光元件的实际服役状况出发, 应考虑元件的表面粗糙度的影响, 以及光束长时间照射的保持效应。对挡光元件的制作材料 Glidcop 进行的不同表面粗糙度试样的疲劳试验发现, 材料的疲劳性能受表面粗糙度影响的敏感程度较高^[14]。实际的挡光元件由于狭长的双 V 型内空腔结构, 线切割加工时难以控制内表面的表面粗糙度, 工程要求 SSRF 挡光元件的表面粗糙度 R_a 不大于 $3.2 \mu\text{m}$ ^[11]。与光滑表面相比, 该粗糙度对疲劳寿命的影响系数 $\beta \approx 0.6$ ^[14]。此外, 挡光元件 1 个加载循环一般持续 12 h 以上, 考虑相应高温保持时间对疲劳寿命的影响, 本文引用由试验得到的折减系数 $\gamma = 0.8$ ^[15]。

表 3 给出考虑表面粗糙度和保持时间影响的 Mask2 最终疲劳寿命预估结果, 结果表明一期设计的 SSRF 挡光元件若把束流强度提升到 400 mA 甚至 500 mA, 其疲劳寿命都能满足指标要求。

表 3 考虑表面粗糙度和保持时间影响的元件最终疲劳寿命

Table 3 Ultimate Fatigue Life Prediction Results Taking into Account Surface Roughness and Hold Time

束流强度/mA	α /%	N_f /循环次数	$\beta \cdot \gamma$	最终疲劳寿命 $N_f \cdot \beta \cdot \gamma$ /循环次数
400	10	1.5×10^6	0.48	7.2×10^5
500	10	1.19×10^5	0.48	5.7×10^4

4 挡光元件的有限寿命设计方法

对于同步辐射装置上的挡光元件, 其热疲劳寿命评估方法过程为: 利用热弹塑有限元模拟

元件在循环热负载下的应力-应变响应, 光束正常照射和发生漂移的情况需要分别计算, 从模拟结果中提取疲劳损伤参量的数值 ($\Delta \epsilon_{vm}$ 和 σ_m); 根据修正的 Von Mises 等效应变模型式(2)初步预估束流总是正常或总是漂移情况下的疲劳寿命; 由于束流大部分时间都处于正常情况, 发生漂移的情况很少, 定义发生漂移的概率 α , 再结合 Miner 线性疲劳累积损伤理论, 综合得到考虑束流发生漂移的元件疲劳寿命; 根据挡光元件的实际服役状况, 应考虑一些不可忽略的影响因素, 如机械加工的表面粗糙度和光束持续运行的保持时间等, 这些因素一般对疲劳寿命有负面作用, 以小于 1.0 的 γ 表征。

5 结论

(1) 非线性有限元考虑了材料属性和本构关系随温度变化的特性, 应用其分析挡光元件的温度场和应力应变关系较线性有限元方法合理。

(2) 修正的 Von Mises 等效应变模型考虑弹性泊松比和塑性泊松比的区别, 并引入平均应力的影响, 可用于预测受同步辐射光照的挡光元件的热疲劳寿命。

(3) 在对挡光元件进行寿命预测和设计时应定义发生束流漂移的概率, 再结合 Miner 线性累积损伤理论预估寿命。

(4) 设计时应全面考虑影响疲劳寿命各因素的作用, 特别是一些不利的影响因素, 如表面粗糙度和保持时间等。

参考文献:

- [1] Jaski Y, Trakhtenberg E, Collins J, et al. Thermomechanical Analysis of High-Heat-Load Components for the Canted-Undulator Front End[C]. Proceedings of MEDSI2002, Illinois, USA, September 5-6, 2002.
- [2] Herbeaux C. Status of the storage ring vacuum system [C]. Soleil 2nd MAC meeting, Canada, February 26-27, 2002.
- [3] 金建峰, 刘学, 吴冠原, 等. SSRF 前端光子挡光器的结构设计和热应力分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(10): 1231-1235.
- [4] 夏鹏成, 陈蕴博, 葛学元, 等. 热作模具钢热疲劳性能的研究现状与发展趋势[J]. 金属热处理, 2008, 33(12): 1-5.
- [5] 付德龙. 基于有限元分析的低周疲劳寿命预测方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学学位论文, 2006.
- [6] Manson S, Hirschberg M. Fatigue Behavior in Strain Cycling in the Low-and Intermediate-Cycle Range[C]. Proceedings of the 10th Sagamore Army Materials

- Research Conference, New York, USA, Syracuse University Press, 1964.
- [7] Takahashi S, Sano M, Mochizuki T, et al. Fatigue life prediction for high-heat-load components made of Glidcop by elastic-plastic analysis[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2008, 15:144-150.
- [8] Ravindranath V, Sharma S, Rusthoven B, et al. Thermal Fatigue of High-Heat-Load Synchrotron Components[C]. Proceedings of MEDSI2008, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, June 10-13, 2008.
- [9] 肖维灵. Glidcop 材料疲劳特性及同步辐射挡光元件的热疲劳寿命研究[D]. 合肥:中国科学技术大学学位论文, 2014.
- [10] 王纳秀. 同步辐射光束线热缓释技术研究及冷却技术的应用[D]. 上海: 上海应用物理研究所学位论文, 2006.
- [11] 吴冠原. SSRF 前端区工程设计报告[R]. 上海: 中科院上海应用物理研究所, 2006.
- [12] 刘家骅. Glidcop 材料性能测试与 SSRF 热缓释部件热结构分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学学位论文, 2009.
- [13] 徐灏. 疲劳强度[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988: 124-126.
- [14] 肖维灵, 陈海波, 殷琰. 表面粗糙度对 Glidcop 和 Q345 低周疲劳寿命影响的试验研究[J]. 实验力学, 2014, 29(4): 417-425.
- [15] Ravindranath V. Thermal fatigue of Glidcop AL-15[D]. USA: Illinois Institute of Technology, 2006.

(责任编辑：马 蓉)