

文章编号: 1001-4888(2009)02-0108-07

半寿命低周疲劳 Glidcop[®] 材料导热系数的测量

刘家骅¹, 焦冬生², 王桂娟², 金建峰¹, 陈海波^{1*}

(1. 中国科学技术大学 近代力学系, 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室;

2. 中国科学技术大学 热科学与能源工程系, 安徽合肥 230027)

摘要: 针对上海同步辐射装置(SSRF)光束线前端挡光元件需要承受高热负载的要求, 对挡光元件所使用的纳米 Al_2O_3 颗粒增强 Cu 基复合材料 Glidcop[®], 采用一维稳态纵向热流法测量其在不同应变状态下的热传导系数。用有限元模拟了试件的温度场分布, 并对试验结果进行了误差分析, 揭示了试验误差的主要来源。试验测量结果表明, 经历半寿命低周疲劳循环所产生的应变损伤累积对 Glidcop[®] 导热系数的影响可以忽略。

关键词: Glidcop[®]; 一维稳态导热; 导热系数; 疲劳

中图分类号: O482

文献标识码: A

0 引言

上海同步辐射装置(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF)是一台高性能的第三代同步辐射光源^[1], 其电子储存环设计能量为 3.5 GeV, 最大流强为 300 mA。光束线前端挡光元件承受高热负载的同步辐射光, 以保护下游部件及其它光学元件不因高热负载破坏^[1, 2]。挡光元件的主要材料为纳米 Al_2O_3 颗粒增强铜基复合材料 Glidcop[®], 国内对 Al_2O_3 颗粒增强铜基复合材料的研究主要集中在制备方法的选取和纳米颗粒分散均匀性的分析, 但对商用材料热性能的研究较少^[3, 4]。国外文献给出了无疲劳应变 Glidcop[®] 导热系数随温度变化的曲线^[4, 5], 但未发现有疲劳应变对导热系数影响的研究。光束线前端工作时, 挡光元件要经历热和机械耦合作用下的疲劳状态, 需要确定疲劳对 Glidcop[®] 导热系数的影响^[6]。本文针对上海同步辐射装置光束线上构件的设计要求, 进行了 Glidcop[®] 的热传导系数与应变状态的相关性测量, 对比了历经一半疲劳寿命循环与无应变材料的导热系数, 分析了试验误差, 并对试验过程进行了有限元模拟。

1 试验原理

材料导热系数的测量方法主要有稳态法和非稳态法。非稳态法主要指热线法、瞬态热丝法和热探针法, 稳态法主要是指均匀热平板法和长圆筒层法。由于均匀热平板法容易实现且计算方便, 所以现今大部分导热系数测试仪都是基于热平板法原理进行测量。基于热平板法的导热系数测试仪要求材料有较大的尺寸, 且适于测量导热系数较低的材料。由于本文在疲劳试验时须将待测材料加工成尺寸较小的棒状试件, 且铜基材料的导热系数较高, 所以 HOT DISK 导热系数仪等常用导热系数测量仪器并不适用。本文基于稳态纵向热流法设计了一套试验方案, 经过测试, 应用一维稳态导热公式计算了被测材

* 收稿日期: 2009-01-11; 修订日期: 2009-03-20

基金项目: 国家大科学工程 SSRF(上海光源)资助

通讯作者: 陈海波(1968—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事数值分析方法及工程应用、振动工程研究方向研究。

E-mail: hbchen@ustc.edu.cn

料的热传导系数。

对一粗细均匀的金属圆柱体,一端与热源接触,一端与冷源接触,四周隔热,热量沿着金属体传向冷源,稳定时,金属体内温度分布不变,即温度梯度和热流率不变。不考虑径向热流,温度梯度可作一维处理。由傅立叶定律得:

$$Q = A\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

式中, Q 为一维导热的热流(单位为 W); A 为热流通过的截面积(单位为 m^2); dT/dx 为导热方向上的温度梯度(单位为 K/m); 比例因子 λ 即为导热系数(单位为 $\text{W/m} \cdot \text{K}$)。

试验测得输入功率 Q 、试件截面积 A 和试件沿纵向各点的温度变化,由(1)式计算导热系数 λ 。

2 试验过程与数据分析

为满足一维导热问题的条件,试件应呈细长形,特别是细长试件便于增大温度变化范围,降低对热电偶的精度要求。但若试件过长,疲劳试验时容易失稳,对包裹材料的保温性能要求提高,也不易满足低周疲劳试验国标对试件的要求。另外考虑到材料价格较高,以及被加工原材料的形状、尺寸和材料试验机对装夹试件的要求,将 Glidcop® 块材按照国家标准^[7]加工成标准疲劳试件,如图 1 所示。试件总长 105mm,平行段长 30mm,平行段直径 6mm,夹持段直径 9mm。进行低周疲劳试验时,考虑到同步辐射光束线上构件的工况与设计要求,同时按低周疲劳试验要求采用应变控制^[8],控制的应变范围为 0~0.8%,在材料试验机 MTS-809 上进行 2500 周加卸载循环(约为该试件疲劳寿命的一半),此时试件表面完整且没有可见裂纹。同时另取没有经过疲劳试验的试件,进行下面的对比试验。

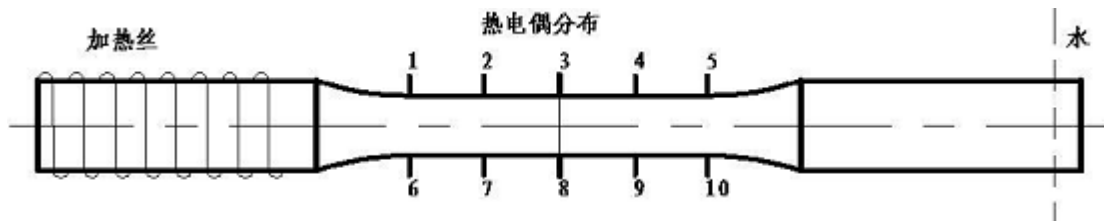


图 1 试件和热电偶分布示意图

Fig. 1 Configuration of specimen and the distribution of thermal couples

试验用的设备有 WYK-305 直流稳压电源, SB2238 型直流数字电压电流表, PF66A 型数字多用表, Agilent34970A 型数据采集/开关单元,其中使用了模块 34901A。

试件一端用电热丝加热,作为热源,由稳压源控制输入的电流电压。另一端置于恒温水浴中,水浴作为冷源。在中间等截面的圆柱部分布置 5 组热电偶,每组的 2 根热电偶分布在同一横截面上。试件外面包裹铝箔及泡沫保温材料。由于材料的导热系数较高,而试件长度较短,为了增加测试段的温度梯度,在保温材料能够承受的范围内,适当加大了热源端的输入功率。试验所取的两根试件编号为 P3 和 P4,其中 P3 是原始试件,P4 是经历 2500 次应变幅为 0.8% 的循环载荷的疲劳试件。每隔 60 秒电脑自动记录一组测试数据,多个连续测点的温度变化小于 0.5℃ 时认为系统已经稳定,如图 2 所示。

除了 7 号测点的测试值(Point7)稳定性稍差,其它 9 个测点的测试值在 500 秒后都较稳定。图 1 中的 1~5 号测点,对应图 2 中从高到低的 5 条连续实线(Point1~5);图 1 中的 6~10 号测点,对应图 2 中从高到低的 5 条虚线(Point6~10)。图 2 中一对测量点(如 Point1 和 Point6)所测得的温度差别,不仅有这两个热电偶的系统偏差,还有这两个测点沿纵向实际位置的差别。读取稳定后各点温度,计算一段时间内的平均温度作为稳态下各个测温点的温度,如图 3 所示。

拟合温度曲线,得到试件中部平行段的温度梯度 dT/dx ,将数据代入公式(1)中,计算得到试件的导热系数。本试验分三组,其中两组的热功率接近,另一组热功率加大近一倍,每一组原始试件 P3 和疲劳试件 P4 同时在同种条件下测试,它们的输入热功率 Q 、温度梯度 dT/dx 和最后计算得到的导热系数列于表 1。

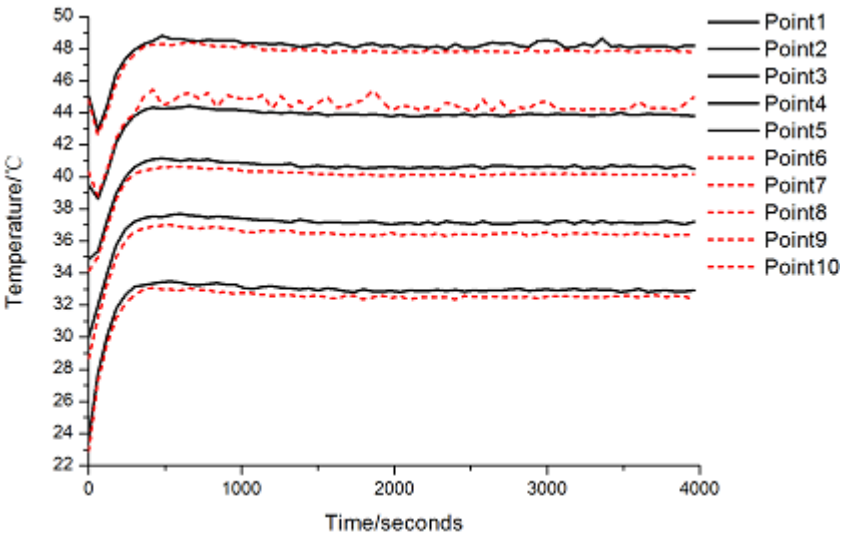


图 2 加热功率为 6.41W 时 P3 试件各测点温度随时间变化曲线
Fig. 2 Temperature History of the Measured Points of Specimen P3 under thermal input 6.41W

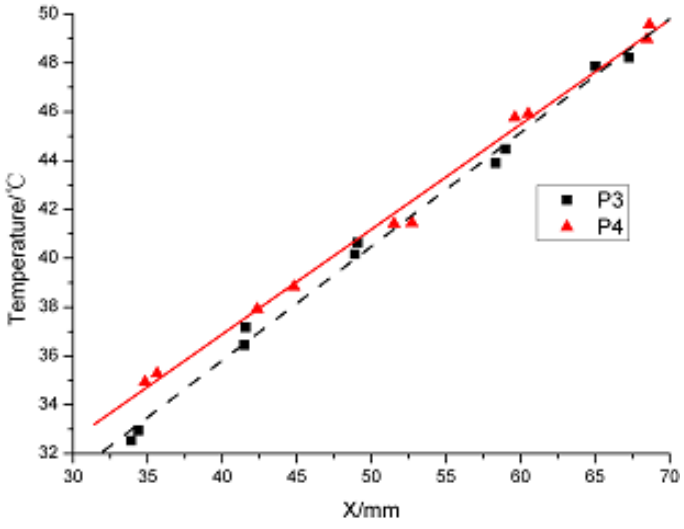


图 3 试验三两试件的温度分布
Fig. 3 Temperature Distributions of the Two Specimens in Test 3

表 1 试验与计算数据
Tab. 1 Experimental and evaluated data

	试件	输入功率 W_i (W)	热损功率 W_o (W)	热流功率 Q (W)	dT/dx ($^{\circ}\text{C}/\text{mm}$)	导热系数 λ ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)	λ 的 误差限
试验一	原始试件 P3	3.30	0.40	2.90	0.232	442	4.33%
	疲劳试件 P4	3.23	0.39	2.84	0.210	478	4.33%
试验二	原始试件 P3	3.24	0.40	2.84	0.224	448	4.41%
	疲劳试件 P4	3.24	0.39	2.85	0.208	485	4.54%
试验三	原始试件 P3	6.41	0.40	6.01	0.466	456	3.26%
	疲劳试件 P4	6.41	0.40	6.01	0.430	494	3.33%

注：试验三冷端为冰水恒温水槽，其它均为室温下水槽，表内导热系数已计入热损。

在没有热损的情况下, 输入的电流功率 W_1 等于输入热流 Q , 而实际测试系统存在热损 W_0 , 通过以下方法可测出热损 W_0 。将试件置于空气中加热, 暴露在空气中的冷端用同样的隔热材料隔热, 调节输入功率, 使试件稳定后的温度接近测试时的平均温度, 此时输入的电流功率作为此温度下系统的热损。通过稳态热平衡法估测不同温度不同包装条件下的热量损失 W_0 , 则实际输入的热流功率 $Q = W_1 - W_0$, 表1中的功率 Q 即为考虑热量损失的输入热量功率。综合三次试验结果, 原始试件 P3 的平均导热系数为 $449 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 疲劳试件 P4 的平均导热系数为 $486 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 两者相对偏差约为 8% 。

3 误差分析

SB2238 型直流数字电压电流表在 20 V 量程时, 电压的基本误差为 $\pm(0.006\% \times \text{读数} + 0.0002)$; PF66A 型数字多用表在 10 A 量程时, 电流的基本误差为 $\pm(0.8\% \times \text{读数} + 0.005)$; 由游标卡尺测得的试件尺寸及测温点位置测量精度可达 0.02 mm ; 热电偶精度为 0.5°C 。试验三中相邻两个测点的温差在 4°C 左右, 受试验条件所限, 温度测量的精度相对较低。一般情况下, 热电偶精度一定, 提高测量精度的方法是: 增加试件长度, 增大温度梯度, 减少热电偶测温精度对试验结果的影响。如前所述, 本试验试件尺寸受疲劳试验的国标规定限制, 所能调整的范围有限。下面就试验三中试件 P3 所得导热系数进行误差分析。

由公式(1)经过求全微分、合并同类项及取绝对值, 可得热传导系数的最大误差限的计算公式为^[9]:

$$\left| \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right| = \left| \frac{\Delta Q}{Q} \right| + \left| \frac{\Delta A}{A} \right| + \left| \Delta \frac{dT}{dx} / \frac{dT}{dx} \right| \quad (2)$$

代入试验三中 P3 的测量值, 容易计算(2)式中右边前二项的值分别为 0.97% 和 0.67% 。(2)式中右边第三项是对试件温度分布进行最小二乘线性拟合时的温度梯度误差, 对于拟合公式 $T = a_0 + a_1 x$, 有:

$$a_1 = \frac{dT}{dx} = \frac{-\sum_{i=1}^N x_i \cdot \sum_{i=1}^N y_i + \sum_{i=1}^N 1 \cdot \sum_{i=1}^N y_i x_i}{\sum_{i=1}^N 1 \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2} = \frac{\sum_{i=1}^N (Nx_i - \sum_{i=1}^N x_i) y_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2} \quad (3)$$

式中, N 为参与拟合的数据点数。代入试验测量数据, a_1 的相对误差限可计算得:

$$\left| \frac{\Delta a_1}{a_1} \right| = \left| \Delta \frac{dT}{dx} / \frac{dT}{dx} \right| = \frac{\sum_{i=1}^N |Nx_i - \sum_{i=1}^N x_i| |\Delta y_i|}{\left| \sum_{i=1}^N (Nx_i - \sum_{i=1}^N x_i) y_i \right|} = 1.63\% \quad (4)$$

这样, 导热系数 λ 的相对误差限为 $|\Delta \lambda / \lambda| = 3.26\%$, 小于试件 P3 与 P4 导热系数 8% 的相对偏差量。考虑到(2)式中 Q 和 ΔQ 并不容易准确给出, 因为它们是针对试验有效段的导热功率和导热功率误差。尽管 Q 的计算已考虑了热损 W_0 , 但 W_0 仅是本试验系统在某一特定温度下的热量损失, 而不是实际有明显温度梯度时系统的热量损失, 同时试验段透过泡沫保温材料也会有热损, 因此上面计算的导热系数误差偏保守。

由于两根试件导热系数的偏差量与导热系数的相对误差接近, 且都是较小的值, 可以认为没有应变的 Glidcop® 试件与历经一半疲劳寿命循环的 Glidcop® 试件的导热系数是一致的, 即在此次试验条件下, 认为 Glidcop® 的导热系数不随应变状态的改变而改变。

为了考察计算 Q 时热损 W_0 对结果的影响, 下一节将进行有限元模拟, 并作进一步分析。

4 有限元模拟

用有限元软件 ANSYS 模拟试验三的温度场, 按疲劳试件尺寸建立模型^[6], 使用 SOLID90 单元, 一端输入 6.41 W 的热流功率, 另一端保持恒温 0°C , 进行稳态热分析, 得到试件温度分布如图4所示。

考虑到隔热材料的热量损失 W_0 是系统误差的主要来源, 模拟时对上节的输入功率 Q 做进一步修正, 这是引入输入功率的修正量 w_s , 使得有限元模拟的输入功率等于 $Q - w_s$ 。为了使有限元模拟接近真实试验情况, 定义变量 err 为对应节点上温度的试验测量值与有限元模拟值的均方差, 模拟时将 w_s

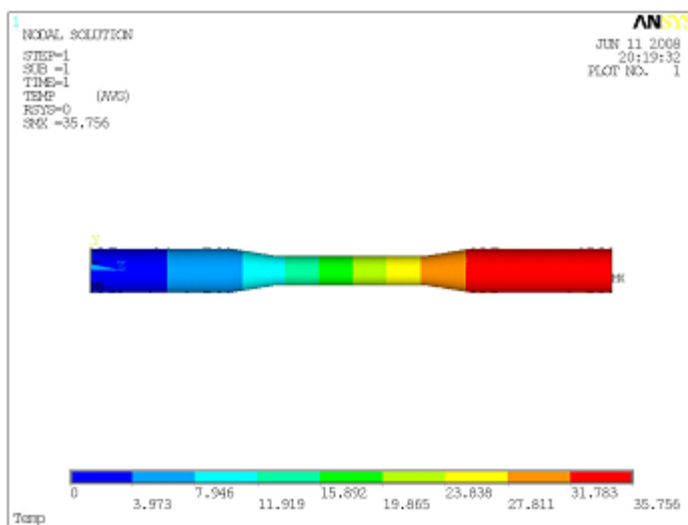
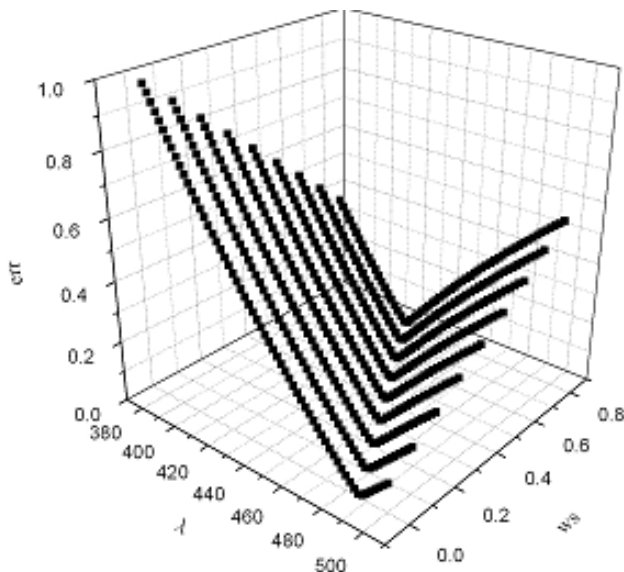


图 4 试件的有限元模拟温度分布图

Fig. 4 FEA Temperature Distribution of the Test Bar

和导热系数 kx 设为变量, 索寻使 err 最小的参数组合。图 5 给出 err 随参数 ω_s 和 kx 的变化趋势, 对某个 ω_s 都有一个对应的 kx , 使得 err 取得极小值, 偏离这个特定 kx , err 将显著增大。模拟得到的参数如下:

图 5 测量温度和有限元计算温度的均方差 err 随参数 kx , ω_s 的变化Fig. 5 Root-mean-square error of the measured and FEA temperatures with respect to parameter kx and ω_s

选取一组参数 $kx=450\text{W/m}\cdot\text{K}$ 、 $\omega_s=0.2\text{W}$ 和试件表面的对流换热系数为 $7.8\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$, 得到试件中部平行段温度模拟值与试验测量值如图 6 所示, 显然此时它们有比较好的一致性。

如表 1 所示, 试验计算得到的导热系数偏大, 模拟时需要引入一个输入功率修正量 ω_s 才能使导热系数接近文献值^[5]。根据图 5, 试验测得的热量损失偏小约 $0.2\sim 0.4\text{W}$ 。可能的原因为, 通过稳态热平衡法测量热量损失时, 虽然平均温度保持一致, 但温度梯度大大降低, 加热端的最高温度降低, 因此侧到的热量损失偏小。众所周知, 对于高导热金属材料的导热系数测量, 技术上有一定难度, 精度不易提高。与有关文献相比, 本文试验测得的热传导系数偏高, 与该材料的实际值可能有较大误差, 但作为有无应变两根试件热导系数的测量对比试验, 本文的方法和结果具有一定的可信度。

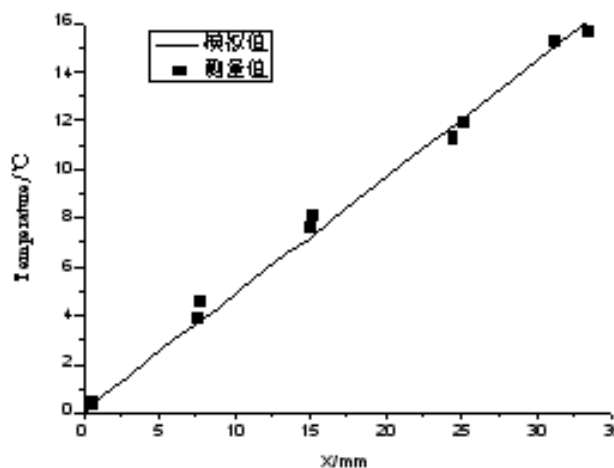


图6 有限元模拟温度与测量温度对比

Fig. 6 Temperature of FEA Simulation and Experimentation

5 结语

本文对上海光源 SSRF 光束线前端主要材料 Glidcop® 的导热系数与应变状态的相关性进行了研究。先按照国标要求在 MTS 试验机上进行了室温条件下的低周疲劳试验,将积累了疲劳塑性应变的试件与没有应变的原始试件进行稳态导热对比试验,用一维稳态纵向热流法测量了无应变状态与历经一半低周疲劳寿命循环的 Glidcop® 试件的导热系数,结果发现两种状态下导热系数偏差在 10% 以内,在试验容许的误差范围内,亦即对于温度范围在室温到 100℃ 之间的 Glidcop® 材料,热传导系数与应变状态无关。最后用有限元软件模拟了试件的温度分布,结果证明将试件的热量损失集中到加热端集中,用修正的输入功率代入一维稳态导热的表达式计算导热系数是合理的。

参考文献:

- [1] 金建峰,刘学,吴冠原,王纳秀,陈海波,张培强. 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 (JIN Jian-feng, LIU Xue, WU Guan-yuan, WANG Na-xiu, CHEN Hai-bo, ZHANG Pei-qiang. Structure design and thermal stress analysis of photo shutter on SSRF front end [J]. JOURNAL OF UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA, 2007, 37(10): 1231—1235 (in Chinese))
- [2] Mannan S L, Valsan M. High-temperature low cycle fatigue, creep-fatigue and thermomechanical fatigue of steels and their welds [J]. International Journal of Mechanical Science, 2006, 48(2): 160—175.
- [3] 李玉桐,董治中 等. 纳米 Al_2O_3 增强铜基复合材料的组织及性能[J]. 天津大学学报,1996,29(1):123—129 (Li Yutong, Dong Zhizhong, et al. Microstructure and Properties of Cu-Matrix Composite Reinforced by Nano- Al_2O_3 Particle [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 1996, 29(1): 123—129 (in Chinese))
- [4] 程建奕,汪明朴. 高强高导高耐热弥散强化铜合金的研究现状[J]. 材料导报,2004,18(2):38—41 (CHENG Jian-yi, WANG Ming-pu. Progress in Research on High-strength High-conductivity and High-heat Resistance Dispersion Strengthened Copper Alloy [J]. 2004, 18(2): 38—41 (in Chinese))
- [5] Troxell J D. GlidCop dispersion strengthened copper, potential application infusion power enerators [C]. Fusion Engineering Proceedings. IEEE Thirteenth Symposium, 1989, 2: 761—765.
- [6] Jing Yilin. Analyzing Two Problems in the Experiment to Determine Heat Conduction Coefficient of the Metal [J]. Physics and Engineering, 2008, 4(13): 39—64.
- [7] GB/T 15248-94. 金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法[S] (GB/T 15248-94, Method of axial forece controlled fatigue testing of metals[S] (in Chinese))
- [8] 石德珂,金志浩. 材料力学性能[M]. 西安交通大学出版社,1998 (Shi Deke, Jin Zhihao. Mechanical Properties of Materials [M]. Press of Xi'an Jiaotong University, 1998 (in Chinese))

- [9] 张善杰,唐汉,高瑞章.实用计算方法[M].南京大学出版社,2000(Zhang Shanjie, Tang Han, Gao RuiZhang. Applied Computational Methods. Press of Nanjing University, 2000(in Chinese))

Thermal Conductivity Measurement of GlidCop[®] in a Half-life Low-cycle Fatigue State

LIU Jia-hua¹, JIAO Dong-sheng², WANG Gui-juan², JIN Jian-feng¹, CHEN Hai-bo¹

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Material, Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China; 2. Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China)

Abstract: The components on the front end of synchrotron radiation beam line are usually used for absorbing high power density of synchrotron radiation. Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF), a third-generation synchrotron radiation light source, uses Al_2O_3 -Cu composite material Glidcop[®] to manufacture components on the front end. One-dimensional steady longitudinal heat flow method was used to study the thermal conductivity of Glidcop[®] in different strain states. Test error was analyzed and a FEM simulation of specimen's temperature distribution was performed to reveal the error source. Test results show that the strain damage accumulation produced by half-life low-cycle fatigue loading does not have obvious effect on the thermal conductivity of Glidcop[®].

Keywords: Glidcop[®]; one-dimensional stable heat transfer; stable heat transfer in one dimension; coefficient of heat conductivity; fatigue