

金属热疲劳 $\alpha-N$ 曲线测定方法的研究

Study on a Method for Measuring $\alpha-N$ Curves of Thermal Fatigue of Metals

韩增祥

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

HAN Zeng-xiang

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 提出了在金属的热疲劳试验中, 用测试样表面裂纹代替测断口裂纹, 用“单组试样法”代替“多组试样法”来测定 $\alpha-N$ 曲线; 通过同一循环次数时试样在不同表面粗糙度条件下的实际观测和所测裂纹长度的比较, 确定出测量表面裂纹长度所必须达到的粗糙度指标; 给出了用“单组试样法”测定 $\alpha-N$ 曲线的具体操作方法; 分析了金属热疲劳裂纹扩展的一般规律并提出了拟合 $\alpha-N$ 曲线的方法。

关键词: 热疲劳; 热应力; 裂纹长度; 循环次数

中图分类号: V216.4⁺3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007)11-0045-04

Abstract: A method was proposed to measure $\alpha-N$ curves of thermal fatigue of metals by measuring surface crack other than fracture crack with “single group of specimens” other than “multiple groups of specimens”. The index of toughness necessary to measure surface crack length is determined by comparing the actual observation and measured crack length under the same surface toughness condition at the same cycles. The special operation method for measuring $\alpha-N$ curves with “single group of specimens” was also presented. A common rule of thermal fatigue of metals was analyzed and a method for fitting $\alpha-N$ curves was proposed.

Key words: thermal fatigue; thermal stress; crack length; cycle number

随着现代工业的高速发展, 承受高温、高压的各类设备中, 零、部件的热疲劳强度已成为广大设计者、使用者和原材料研究开发工作者所十分关心的问题。测定金属热疲劳性能的试验方法大体上可分为两种: 即热疲劳试验和热/机械疲劳试验。其中, 热疲劳试验, 试样只承受循环温度造成的循环热应力的作用。因此, 人们也常把这种条件下的试验称为冷热疲劳试验或热应力疲劳试验, 而把循环温度和循环机械载荷共同作用下的试验称为热/机械疲劳试验。与试验条件复杂、试验成本昂贵的热/机械疲劳试验相比, 热疲劳试验具有周期短、成本低、试验数据可靠等特点, 因此被广泛应用于新材料研制、工艺选择、原材料复验和失效分析等工作中^[1]。

国内外在开展热疲劳研究中, 所采用的试验方法是多种多样的。但到目前为止, 尚未看到任何一部国家级的标准金属热疲劳试验方法。国内有关单位在热疲劳研究中广泛采用的标准试验方法是“金属板材热疲劳试验方法”(HB6660—1992)^[1], 这是我国唯一一部行业以上级别的金属热疲劳试验方法。在

HB6660—1992 所规定的试验方法中, 由于测裂纹长度和循环次数的关系曲线(即 $\alpha-N$ 曲线)可以涵盖其他两种方法的内容, 并且能更全面地观察裂纹扩展的趋势和规律, 因此成为应用最多的一种试验方法。然而, 该方法也存在着明显的缺点, 原标准规定的测定 $\alpha-N$ 曲线的方法为“多组试样法”, 即用多组试样, 通过测每组试样在不同循环次数断口裂纹长度的方法来测定 $\alpha-N$ 曲线, 故试验周期长、成本高, 而且有些形态的裂纹(如横向裂纹等)还不适于用测断口裂纹的方法测定裂纹长度。因此, 这种方法已较少采用。目前, 人们经常采用的方法是“单组试样法”, 即只用一组试样, 通过测试样在不同循环次数表面裂纹长度的方法来测定 $\alpha-N$ 曲线, 从而大幅度降低了和试验时间和试验成本。此外, 原标准在拟合 $\alpha-N$ 曲线时采用直线方程^[1], 然而研究表明, 这一规定仅在裂纹扩展的某一阶段才是正确的, 对于裂纹扩展的全过程来说, $\alpha-N$ 曲线应是非线性的。本文仅就笔者近年来采用“单组试样法”测定 $\alpha-N$ 曲线所作的实验和探索作一阐述, 特别是通过在同一循环次数时, 同一试样在不同表面粗糙度条件下

对被测裂纹清晰程度的观察和所测裂纹长度的比较, 确定出金属热疲劳试验测量表面裂纹长度所必须达到的粗糙度指标, 从而保证了所测表面裂纹长度的准确、可靠, 进而给出了用“单组试样法”测定 $\alpha-N$ 曲线的具体操作方法。本工作还对金属热疲劳裂纹扩展的一般规律进行了较为深入的分析, 提出了拟合 $\alpha-N$ 曲线的方法。

1 试验机与试样

金属热疲劳 $\alpha-N$ 曲线的测定可以在任何满足 HB6660—1992 规定的试验机上进行。图 1 和图 2 分别为试验机主机的示意图和试样图。其工作原理和基本操作方法是: 将试样连同夹具一起装入试验机后, 试样在电炉内加热, 加热时间受时间继电器控制; 到时时, 传动机构带动试样进入水槽内冷却; 冷却时间结束后, 试样又重新回到电炉中加热, 如此循环往复。试样在循环温度造成的循环热应力的反复作用下发生疲劳破坏, 到规定循环次数时, 将试样取出, 进行裂纹检测。

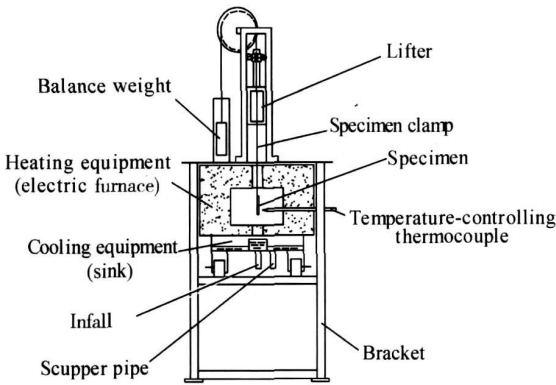


图 1 板材热疲劳试验机示意图
Fig. 1 Schematic diagram of plate shaped specimen thermal fatigue testing machine

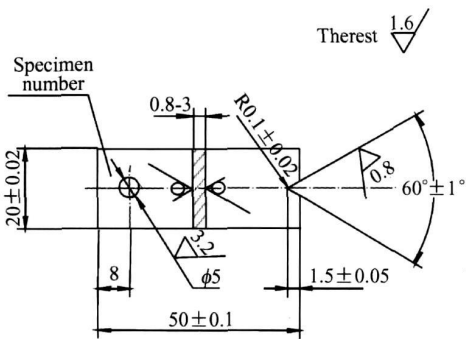


图 2 板材热疲劳试样图
Fig. 2 Thermal fatigue plate-shaped specimen

2 影响表面裂纹测量的主要因素与测量表面裂纹的基本要求

2.1 影响表面裂纹测量的主要因素

用“单组试样法”通过测试样在不同循环次数表面裂纹长度的方法来测定 $\alpha-N$ 曲线, 关键在于所测表面裂纹长度必须准确。原标准之所以采用多组试样, 用测每组试样在不同循环次数断口裂纹的方法测定 $\alpha-N$ 曲线, 其原因也在于相对表面裂纹来说, 断口裂纹的前缘轮廓清晰, 裂纹长度的重复测量值和不同人的测量值均较为一致; 而测量表面裂纹, 不同人之间的测量值往往会有很大差别; 即使是同一个人, 在重复测量中, 所测得的数值也往往会不一致。因此, 要想用“单组试样法”通过测试样在不同循环次数表面裂纹长度的方法来测定 $\alpha-N$ 曲线, 就必须找到一种有效的办法来确保所测表面裂纹长度的准确。

实验表明, 试样表面粗糙度对表面裂纹的测量精度有重要影响。虽然原标准也对表面裂纹的测量方法作了规定, 并指出: 如果在显微镜下观测到的试样表面裂纹不清晰, 允许用砂纸打磨。但对打磨后试样表面应达到的粗糙度的具体指标却未作规定。而事实上, 保证试样表面粗糙度小于某一规定值对于确保表面裂纹的测量精度是至关重要的。由于在试验过程中的高温氧化和在水中冷却时形成的水垢, 不进行打磨和抛光就不可能观测到清晰的表面裂纹; 简单的打磨也难以准确地观测到裂纹的全貌; 即使用颗粒度较细的 800# 金相砂纸打磨, 在裂纹较短和较细的情况下, 也很难判断出裂纹末端的准确位置, 而且极易与某些划痕相混淆。这也是造成不同人测量同一裂纹以及同一个人在重复测量中, 所测得的裂纹长度不一致的主要原因。原标准测量表面裂纹的目的主要是用于判断断口裂纹可能达到的长度。

2.2 测量表面裂纹的基本要求

如前所述, 试样表面粗糙度对表面裂纹的测量精度有重要影响。为了确定出测量表面裂纹所必须达到的粗糙度指标, 笔者进行了如下试验: 用不同粒度的金相砂纸和抛光机对某高温合金试样在热疲劳试验中不同循环次数时的同一表面, 按由粗到细的顺序进行打磨或抛光, 并测出相应条件下试样表面的粗糙度和裂纹长度, 测试结果如表 1 所示。从表中可以看出, 随着粗糙度 R_a 的降低, 测量结果趋于一致, 测量误差呈递减的趋势。这表明, 降低试样的表面粗糙度确实能有效地提高表面裂纹的测量精度。实际观测表明, 当试样表面的粗糙度 $R_a \leq 0.028$ 时, 可以清晰地观测到裂纹全貌, 准确地判断出裂纹末端的位置以及裂纹与划

痕的区别。一般情况下, 打磨或抛光后试样表面的粗糙度 R_a 至少应 ≤ 0.1 , 才能较为清晰地观测到试样的表面裂纹。当被测试样的裂纹较细或较短时, 则试样表面的粗糙度 R_a 应 ≤ 0.028 , 显微镜的放大倍数应 ≥ 100 ; 而当粗糙度 $R_a > 0.028$ 时, 就会有模糊不清的感

觉, 难以判断出裂纹末端的准确位置, 从而造成较大的测量误差。但应当指出的是, 在相同条件下, 裂纹的扩展速率与试样厚度相关^[2], 试样越厚, 裂纹扩展速率越低。所以, 打磨和抛光只应降低粗糙度, 而不对试样厚度产生太大的影响。

表 1 同一表面在不同粗糙度条件下所测裂纹长度的比较
Table 1 Comparison of crack lengths detected with different roughness in the same surface

Specimen number	Method for lowering roughness		Roughness of specimen surface (R_a)	Surface crack length till specified cycle times / mm						
				500	1000	1200	1500	1800	2000	2500
				cycles	cycles	cycles	cycles	cycles	cycles	cycles
1	Grinding with sand paper	500# sand paper	0.225	0.31	0.74	0.67	0.67	0.75	0.80	0.94
		800# sand paper	0.096	0.43	0.60	0.64	0.68	0.76	0.81	0.99
	Polish with polisher	Cloth wheel + polish paste	0.028	0.30	0.57	0.60	0.70	0.75	0.83	0.98
2	Grinding with sand paper	500# sand paper	0.225	0.35	0.71	0.67	0.75	0.68	0.77	0.81
		800# sand paper	0.096	0.37	0.57	0.63	0.68	0.77	0.78	0.87
	Polish with polisher	Cloth wheel + polish paste	0.028	0.34	0.58	0.65	0.70	0.76	0.78	0.86

表面裂纹长度的测量应取与试样缺口相连接的裂纹; 若裂纹不止一条, 则应取其中最长的。两个表面的裂纹都要测量, 取两表面中最长一条裂纹的长度作为试样的表面裂纹长度。

3 用“单组试样法”测定 α - N 曲线的操作方法与曲线的拟合

3.1 用“单组试样法”测定 α - N 曲线的操作方法

用“单组试样法”测定 α - N 曲线可用 3~5 片试样, 按预定循环次数由低到高的顺序分成 5 个以上的测试点进行试验。首先测出该组试样在最低循环次数时的表面裂纹长度, 再重新装夹试样, 按同样的方法依次测出剩余各循环次数时的表面裂纹长度。在进行表面裂纹长度测量之前, 应按 2.2 的要求, 对试样进行打磨和抛光。最后, 对所测数据用回归分析的方法求出曲线方程, 按曲线方程拟合 α - N 曲线。

3.2 金属热疲劳裂纹扩展的一般规律与 α - N 曲线的拟合

从热疲劳试验机的工作原理可知, 在热疲劳试验中, 试样不承受外加机械载荷的作用, 试样疲劳破坏完全是循环热应力反复作用的结果。研究表明, 热应力的大小与温差成正比。如前所述, 在热疲劳试验中, 加热和冷却反复进行。冷却时, 试样从上限温度降至下限温度在极短的时间内完成。因此, 试样表面与内部在瞬间内形成极大的温差, 试样表面由于温度骤然降低而急剧收缩, 而试样内部则仍处于高温膨胀状态, 试样表面的收缩由于受到内部高温膨胀的约束, 在瞬间

产生极大的表面拉应力。加热时, 情况刚好相反, 同样由于温差的原因, 试样表面的热膨胀受到内部的约束而产生压应力。显然, 在温度循环的过程中, 由温差形成的热应力并非均匀分布, 而是表面最大。当表面热应力大于材料的断裂强度时, 就会产生表面裂纹, 这也是金属的热疲劳裂纹往往首先形成于试样表面的原因。由于试样缺口处存在应力集中, 因此, 试样的表面裂纹将首先产生在缺口处。与此同时, 试样还承受另一种热应力的作用。航标 HB6660—1992 规定, 加热时, 试样处于均温区; 而冷却时, 试样仅缺口端 5~6mm 淬入水中。在冷却的过程中, 试样淬水的部分由于温度骤然降低而急剧收缩, 而未淬水的部分则仍处于高温膨胀状态。因此, 未淬水部分将对淬水部分产生约束作用, 从而对淬水部分产生拉应力。但这部分热应力在温度循环的过程中仅有数值大小的变化, 淬水部分与未淬水部分所受热应力的方向不变。当试验刚开始, 试样尚未产生裂纹的情况下, 在冷却的过程中, 试样淬水部分受到约束的面积最大, 此时, 试样缺口处所受到的拉应力也最大; 当裂纹形成后, 由于约束状态发生变化, 使应力重新分布, 试样淬水部分受约束的面积随着裂纹长度的增加而减小, 裂纹尖端处所受到的拉应力也随之减小; 当裂纹扩展到一定程度时, 会发生应力松弛, 致使裂纹扩展速率显著下降, 直至停止扩展。在热疲劳试验中, 疲劳裂纹的产生和扩展, 是上述两种热应力共同作用的结果, 尽管不同材料以及相同材料在不同温度下所表现出的热疲劳性能不同, 但它们的裂纹扩展过程和基本规律是相同的。其中, 以变形高温合金最为典型。图 3 为 GH783 在两种不同

温度条件下, da/dN 与裂纹长度 a 的关系曲线。从图中可以看到, 当裂纹萌生后, da/dN 随裂纹长度的增加递减递增; 当裂纹扩展到某一长度时, da/dN 达到最大值; 其后, da/dN 随裂纹长度的增加而逐步下降。 da/dN 最大值所对应的裂纹长度与材料和试验温度有关。因此, 按照 da/dN 的变化规律, 金属热疲劳的 $a-N$ 曲线大致可分为 da/dN 随循环次数递增和递减两个阶段。只有在裂纹长度接近某值, da/dN 达到最大值前后所对应的一段裂纹长度, da/dN 变化不大, $a-N$ 关系接近直线(见图 4)。从图 3 中还可以看到, 虽然两种试验仅上限温度相差 50°C , 但 $700 \approx 20^{\circ}\text{C}$ 的试验, da/dN 达到最大值时, 裂纹长度仅有 0.4mm 左右; 而 $750 \approx 20^{\circ}\text{C}$ 的试验, da/dN 达到最大值时, 裂纹长度则长达 1.8mm 。也就是说, 这两种温度条件下的试验, 只有当裂纹长度分别为 0.4mm 和 1.8mm 前后的一段裂纹, $a-N$ 关系接近线性; 尔后, 随着 da/dN 逐步下降, $a-N$ 关系将偏离直线。在这种情况下, 如果仍然按线性关系拟合曲线, 必将带来较大的误差。因此, 原标准规定: 测定 $a-N$ 曲线, 始末两点的裂纹长度应在 0.2mm 和 2mm 左右, 然后对所测各点的数据按线性方程作曲线拟合^[2], 这种规定不符合金属热疲劳裂纹扩展的一般规律。目前, 在拟合金属热疲劳的 $a-N$ 曲线时, 一般采用多项式拟合(如图 4, 6 所示), 能较好地反映金属热疲劳从裂纹起始到最终停止扩展全过程的裂纹扩展规律。当然, 如果我们只研究裂纹扩展过程中某一阶段(如 da/dN 达到最大值前后所对应的一段裂纹长度)的裂纹扩展规律, 按线性方程作曲线拟合也是可以的, 但这段裂纹的长度并不一定在 0.2mm 到 2mm 之间。

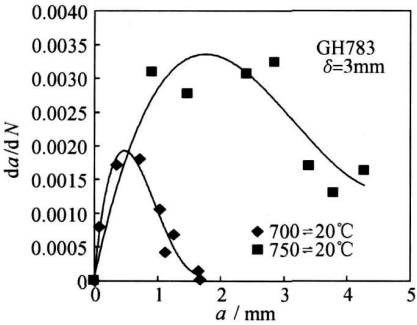


图 3 热疲劳 da/dN - a 关系曲线

Fig. 3 da/dN - a relationship of thermal fatigue

应当指出的是, 并非所有材料在每种试验温度下的 $a-N$ 曲线, 其 da/dN 的变化都经过由递增到递减两个阶段。实验表明, 同一材料在不同试验温度下以及不同材料在相同温度下, 其 da/dN 随裂纹长度的变化可呈现出不同的特点。图 5 和图 6 分别为 GH648 合

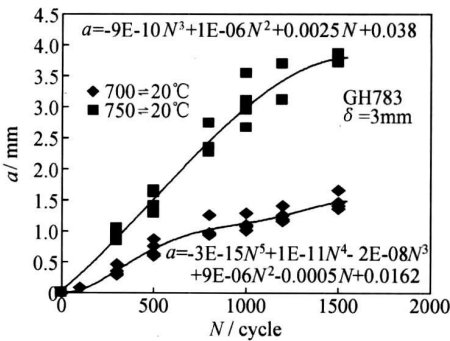


图 4 热疲劳 $a-N$ 关系曲线

Fig. 4 $a-N$ relationship of thermal fatigue

金在两种不同试验温度下的 da/dN - a 与 $a-N$ 关系曲线。从图中可以看到, 试验温度较低的曲线($900 \approx 20^{\circ}\text{C}$), da/dN 的变化经过由递增到递减两个阶段; 试验温度较高的曲线($1000 \approx 20^{\circ}\text{C}$), da/dN 的变化只呈现逐步递减的过程。这是因为在上限温度较高的情况下, 试样在温度循环的过程中, 材料因热胀冷缩和温度梯度的加大而产生的热应力增大以及材料强度降低等原因^[3], 试样的 da/dN 在试验一开始便达到最大值, 随着裂纹长度的增加, 裂纹尖端处所受到的热应力逐步下降, da/dN 也随之递减, 直至 $da/dN = 0$, 裂纹停止扩展。因此, 在上限温度较高的情况下, $a-N$ 曲线在

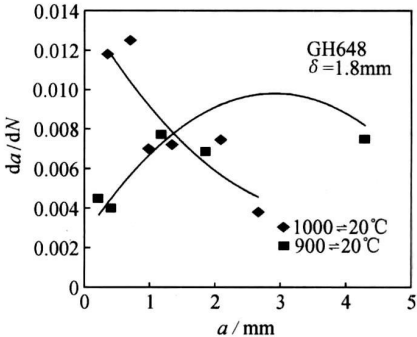


图 5 试验温度对 da/dN - a 关系曲线的影响

Fig. 5 Effect of test temperature on da/dN - a curves

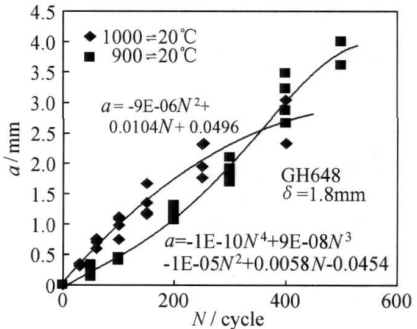


图 6 试验温度对 $a-N$ 关系曲线的影响

Fig. 6 Effect of test temperature on $a-N$ curves

PASK 的主链结构上引入了酰胺基团, 聚合物为所设计的结构, 达到了预期目标;

(3) 发现共聚物 PASK/A 同 PASA 相比具有更

优良的耐热性能和热稳定性; 并对其溶解性能进行研究, 发现共聚物一定程度改善了 PASK 的溶解性能, 从而弥补了聚苯硫醚酮溶解性差的缺点。

表 2 PASK/A 在一些常用溶剂中的溶解性

Table 2 The solubility of PASK/A in some common solutions

Solvent	Room temperature	High temperature	Solvent	Room temperature	High temperature
Concentrated sulfuric acid	+	+	Cyclohexane	—	—
N-methylpyrrolidone(NMP)	Δ	Δ	Dimethyl Sulfoxide(DMSO)	Δ	Δ
Tetrahydrofuran(THF)	Δ	Δ	Dimethyl formamide(DMF)	Δ	Δ
Dioxane	Δ	Δ	Chloroform	Δ	Δ
Acetone	Δ	Δ	Absolute ethyl alcohol	Δ	Δ

(+): Soluble, (Δ): Slightly soluble, (—): Insoluble

参考文献

[1] 杨杰,王华东,龙盛如,等.高性能结构材料聚芳硫醚[J].工程塑料应用,2003,31(4):63–66.

[2] BOBSEIN R L, Jr E C. USA Patent, 4808698. 1989.

[3] CAMPBELL R W. USA Patent, 4102875. 1978.

[4] CAMPBELL R W. USA Patent, 4016145. 1977.

[5] 尹维英,周宝文,李风亭,等.耐高温腐蚀树脂聚芳硫醚酮(PKS)的合成[J].工程塑料应用,1995,23(3):12–15.

[6] 周祚万,伍齐贤,陈永荣等.聚苯硫醚酰胺的合成与表征[J].高分子材料科学与工程,1992,(5):26–29.

[7] 许双喜.聚苯硫醚酮/酮共聚物的合成、表征及性能研究[D].四川

大学硕士学位论文,2005.

[8] FREDERICK G J. Europe Patent, 0 274 754.

[9] 余自力,杨杰,伍齐贤,等.聚苯酮硫醚(PPSK)的合成和表征[J].四川大学学报(自然科学版),1991,28(4):501–505.

收稿日期:2007-02-05;修订日期:2007-08-11

作者简介:汤霞(1981–),女,硕士研究生,主要从事高分子材料的合成与改性研究,联系地址:四川大学东区分析测试中心(610064)。E-mail: gogotang24@126.com

(上接第48页)

da/dN 的下降幅度显著变小之前的部分呈抛物线状;其后,由于 da/dN 逐渐趋近于 0,故 α -N 曲线也逐渐趋近于水平线。也就是说,在上限温度较高时, α -N 曲线只具有上限温度较低条件下 da/dN 达到最大值之后所具有的特征和规律。

4 结论

- (1)金属热疲劳的 α -N 曲线可用“单组试样法”,通过测试样在不同循环次数表面裂纹长度的方法测定。
- (2)试样表面的粗糙度对裂纹长度的测量精度有重要影响。要清晰准确地观察和测量出试样的表面裂纹,必须对试样表面进行打磨和抛光,其粗糙度 R_a 至少应 ≤ 0.1 ;当裂纹较细或较短时,试样 R_a 应 ≤ 0.028 ,显微镜的放大倍数应 ≥ 100 。
- (3)金属热疲劳的 α -N 曲线可按 da/dN 的变化,分为 da/dN 随循环次数递增和其后随循环次数递减

两个阶段。因此, α -N 曲线是非线性的,用多项式拟合 α -N 曲线,能较好地反映金属材料从裂纹起始到最终停止扩展全过程的裂纹扩展规律。

(4)试验温度对 α -N 曲线有显著影响。当上限温度达到某一温度以上时, α -N 曲线只具有上限温度较低条件下 da/dN 达到最大值之后所具有的特征和规律。

参考文献

[1] HB6660–1992,金属板材热疲劳试验方法[S].

[2] 中国航空材料手册编辑委员会.中国航空材料手册(2)[M].第2版.北京:中国标准出版社,2002:70

[3] 郭秀芬,王海清.DZ-22 定向铸造合金晶体取向和试验温度对热应力疲劳性能的影响[J].航空材料,1984,(6):1–4

收稿日期:2007-04-26;修订日期:2007-08-10

作者简介:韩增祥(1949–),男,工程师,研究方向为金属的热疲劳,联系地址:北京81信箱23分箱(100095)。