

微磨损测试数据分析

陈平¹, 陈华辉², 李文博²

(1.北京科技大学机械工程学院, 北京 100083; 2.中国矿业大学机电与信息工程学院, 北京 100083)

摘要: 本文利用自行研制的多功能微磨损试验机研究涂层的微磨损测试数据, 主要分析了线接触工况下磨痕的测量误差对磨损系数误差的影响, 讨论了获得合理而准确的测量值的微磨损测试条件。分析结果表明, 涂层和基体的磨损系数 k_c 和 k_s 的误差取决于涂层和基体磨损系数的比值 k_c/k_s 、无量纲参数 a^2/Rt 以及磨痕内宽度 a 和涂层厚度 t 的相对测量误差; 当磨痕内宽度的最小尺寸 a_0 大于最小极限值时, 涂层和基体磨损系数的误差降低; a_0 的最小尺寸取决于对磨环半径和磨料粒径。

关键词: 微磨损; 涂层; 磨损系数; 误差; 线接触

1 引言

微磨损测试是一种用来评价涂层磨损性能的一种实用技术, 目前也用来评价整体材料的磨损性能^[1-5]。该方法通常在细磨粒作用下, 用硬钢球在试样表面滚动, 试样在磨料磨损作用下产生球形磨痕。表征磨痕尺寸的参数有涂层厚度 t 、磨痕内径 a 、磨痕外径 b 、磨痕总深度 h 等, 可用其中任意两个参数表示磨损体积, 从而计算出材料的磨损系数。

对涂层而言, 由 Kassman^[1]提出的磨损方程式, 涂层和基体的磨损系数可综合表示为:

$$SN = \frac{V_c}{K_c} + \frac{V_s}{K_s} \quad (1)$$

式中, V_c —涂层的磨损体积; V_s —基体的磨损体积; K_c —涂层磨损系数; K_s —基体磨损系数。

磨损系数的可靠性不仅取决于数据分析方法的正确选取, 同时也取决于测量误差的范围。Kusano^[5]已详细分析了点接触工况下磨痕的测量误差对涂层和基体磨损系数误差的影响, 但未讨论线接触工况下磨损系数的可靠性问题。因此, 本文利用自行研制的多功能微磨损试验机分析研究涂层在线接触、涂层磨穿情况下, 涂层和基体磨损系数的误差估计及其影响因素。

2 磨痕测量参数的选择

对磨环在细磨料作用下与试样对磨, 试样表面将产生矩形磨痕, 如图 1 所示, 具体试验参数及测试方法见文献[6]。

磨痕尺寸定义如下:

$$t \approx \frac{1}{8R}(b^2 - a^2); h' \approx \frac{a^2}{8R}; h \approx \frac{b^2}{8R} \approx \frac{a^2}{8R} + t$$

式中, a —磨痕内宽度; b —磨痕外宽度; R —对磨环半径; t —涂层厚度; h' —磨痕在基体中的深度; h —磨痕总深度。

假设磨痕形状遵行形状保持原则, 则涂层和基体磨损体积 V_c 和 V_s 可分别用磨痕内宽度 a 、磨痕外径 b 、涂层厚度 t 和磨痕总深度 h 中的任意两个参数表示, 不同磨损体积表达式见表 1。

在实际的测试条件下, 由近似方程式产生的误差远远小于磨痕参数的测量误差。Hutchings^[3]在点接触工况下所形成的球形磨痕尺寸分析中, 建议采用磨痕外径 b 和涂层厚度 t 来计算涂层和基体的磨损体积 V_c 和 V_s , 其中涂层厚度 t 可根据磨痕内径 a 和磨痕外径 b 估算出来。但是 a 和 b 的测量误差都将传递到涂层厚度 t 和磨损体积 V 的计算值中。Trezon^[7]研究表明, 磨痕内径 a 的测量值通常比磨痕外径 b 的测量值更准确, 因为磨痕内径 a 不受磨痕外界擦伤环的影响。同理, 对于线接触所形成的矩形磨痕, 磨痕内宽度 a 的测量值通常比磨

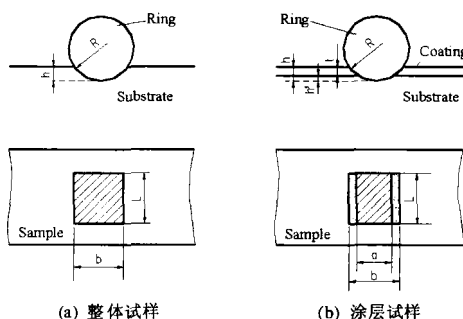


图 1 微磨损试验中试样表面磨痕示意图

表 1 矩形磨痕体积表达式

测量参数	V_c	V_s	V
a	—	$\frac{a^3 L}{16R}$	—
b	—	—	$\frac{b^3 L}{16R}$
h	—	—	$\sqrt{2LR}^{1/2} h^{3/2}$
a 和 b	$\frac{L}{16R}(b^3 - a^3)$	$\frac{a^3 L}{16R}$	$\frac{b^3 L}{16R}$
a 和 t	$\frac{(a^2 + 4Rt)}{a} \cdot tL$	$\frac{a^3 L}{16R}$	$\frac{a^3 L}{16R} + \frac{(a^2 + 4Rt)}{a} \cdot tL$
a 和 h	$\sqrt{2LR}^{1/2} h^{3/2} - \frac{a^3 L}{16R}$	$\frac{a^3 L}{16R}$	$\sqrt{2LR}^{1/2} h^{3/2}$
b 和 t	$\frac{(b^2 + 4Rt)}{b} \cdot tL$	$\frac{b^3 L}{16R} - \frac{(b^2 + 4Rt)}{b} \cdot tL$	$\frac{b^3 L}{16R}$
h 和 t	$\sqrt{2LR}^{1/2} [h^{3/2} - (h-t)^{3/2}]$	$\sqrt{2LR}^{1/2} (h-t)^{3/2}$	$\sqrt{2LR}^{1/2} h^{3/2}$

其中： L —对磨环厚度。如果 $\frac{t}{R} \ll \frac{a}{R} < \frac{b}{R} \ll 1$ ，则表 1 中各近似值是有效的。

痕外宽度 b 的测量值更准确。

3 磨损系数误差分析

测量误差对磨损系数产生的影响如下^[9]。

涂层及基体的磨损体积 V_c 和 V_s 可用其真值 V_{c0} 和 V_{s0} 以及相应的误差 ΔV_{c0} 和 ΔV_{s0} 来表示：

$$V_c = V_{c0} + \Delta V_c = V_{c0} \left(1 + \frac{\Delta V_c}{V_{c0}} \right) \quad (2)$$

$$V_s = V_{s0} + \Delta V_s = V_{s0} \left(1 + \frac{\Delta V_s}{V_{s0}} \right) \quad (3)$$

同理，涂层及基体的磨损系数 K_c 和 K_s 也可用其真值 K_{c0} 和 K_{s0} 以及相应的误差 ΔK_c 和 ΔK_s 来表示：

$$K_c = K_{c0} + \Delta K_c = K_{c0} \left(1 + \frac{\Delta K_c}{K_{c0}} \right) \quad (4)$$

$$K_s = K_{s0} + \Delta K_s = K_{s0} \left(1 + \frac{\Delta K_s}{K_{s0}} \right) \quad (5)$$

将 (2)、(3)、(4)、(5) 式代入 (1) 式，并整理可得：

$$\left(1 + \frac{\Delta V_c}{V_{c0}} \right) \cdot \frac{K_{c0}}{1 + \frac{\Delta K_c}{K_{c0}}} + \frac{K_{c0}}{K_{s0}} \cdot \frac{V_{s0}}{V_{c0}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta V_s}{V_{s0}} \right) \cdot \frac{K_{s0}}{1 + \frac{\Delta K_s}{K_{s0}}} = \frac{\Delta V_c}{V_{c0}} + \frac{K_{c0}}{K_{s0}} \cdot \frac{V_{s0}}{V_{c0}} \cdot \frac{\Delta V_s}{V_{s0}} \quad (6)$$

如果要选用最佳的数据分析方法使产生的总误差最小，则可以假设方程式 (6) 左边两项的影响是相等的，经整理可得：

$$\left| \frac{\Delta K_c}{K_{c0}} \right| \approx \frac{\left| \frac{\Delta V_c}{V_{c0}} \right| + \frac{K_{c0}}{K_{s0}} \cdot \frac{V_{s0}}{V_{c0}} \cdot \left| \frac{\Delta V_s}{V_{s0}} \right|}{2 - \left(\left| \frac{\Delta V_c}{V_{c0}} \right| + \frac{K_{c0}}{K_{s0}} \cdot \frac{V_{s0}}{V_{c0}} \cdot \left| \frac{\Delta V_s}{V_{s0}} \right| \right)} \quad (7)$$

同理：

$$\left| \frac{\Delta K_s}{K_{s0}} \right| \approx \frac{\left| \frac{\Delta V_s}{V_{s0}} \right| + \frac{K_{s0}}{K_{c0}} \cdot \frac{V_{c0}}{V_{s0}} \cdot \left| \frac{\Delta V_c}{V_{c0}} \right|}{2 - \left(\left| \frac{\Delta V_s}{V_{s0}} \right| + \frac{K_{s0}}{K_{c0}} \cdot \frac{V_{c0}}{V_{s0}} \cdot \left| \frac{\Delta V_c}{V_{c0}} \right| \right)} \quad (8)$$

记 $a = a_0 + \Delta a = a_0 \left(1 + \frac{\Delta a}{a_0} \right)$ ； $t = t_0 + \Delta t = t_0 \left(1 + \frac{\Delta t}{t_0} \right)$

对于线接触产生的基体磨损体积和涂层磨损体积，有

$$V_s \approx \frac{a^3 L}{16R} \approx \frac{a_0^3 L}{16R} \left(1 + \frac{\Delta a}{a_0} \right)^3 \approx V_{s0} \cdot \left(1 + 3 \cdot \frac{\Delta a}{a_0} \right) \quad (9)$$

$$V_c \approx \frac{(a^2 + 4Rt)}{a} \cdot tL \approx V_{c0} \cdot \left[1 + \frac{1 + 8 \cdot \frac{Rt_0}{a_0^2}}{1 + 4 \cdot \frac{Rt_0}{a_0^2}} \cdot \frac{\Delta t}{t_0} + \frac{2}{1 + 4 \cdot \frac{Rt_0}{a_0^2}} \cdot \frac{\Delta a}{a_0} \right] \quad (10)$$

将(9)、(10)式代入(7)、(8)式中,可得涂层和基体磨损系数的相对误差,分别表示如下:

$$\frac{\Delta K_c}{K_c} = \frac{8 + \frac{a_0^2}{Rt_0} \left| \frac{\Delta t}{t_0} \right| + \left[\frac{a_0^2}{Rt_0} \left(2 + \frac{3}{16} \frac{\kappa_{c0}}{\kappa_{s0}} \frac{a_0^2}{Rt_0} \right) \left| \frac{\Delta a}{a_0} \right|}{4 + \frac{a_0^2}{Rt_0}} \right]}{2 - \left[\frac{8 + \frac{a_0^2}{Rt_0} \left| \frac{\Delta t}{t_0} \right| + \left[\frac{a_0^2}{Rt_0} \left(2 + \frac{3}{16} \frac{\kappa_{c0}}{\kappa_{s0}} \frac{a_0^2}{Rt_0} \right) \left| \frac{\Delta a}{a_0} \right|}{4 + \frac{a_0^2}{Rt_0}} \right]} \right]} \quad (11)$$

$$\frac{\Delta K_s}{K_s} = \frac{\frac{16}{\kappa_{s0}} \frac{a_0^2}{Rt_0} \left(1 + \frac{8}{\frac{a_0^2}{Rt_0}} \right) \left| \frac{\Delta t}{t_0} \right| + \left(3 + \frac{32}{\kappa_{s0}} \frac{a_0^2}{Rt_0} \right) \left| \frac{\Delta a}{a_0} \right|}{2 - \left[\frac{16}{\kappa_{s0}} \frac{a_0^2}{Rt_0} \left(1 + \frac{8}{\frac{a_0^2}{Rt_0}} \right) \left| \frac{\Delta t}{t_0} \right| + \left(3 + \frac{32}{\kappa_{s0}} \frac{a_0^2}{Rt_0} \right) \left| \frac{\Delta a}{a_0} \right| \right]} \quad (12)$$

式中, K_{c0} 、 K_{s0} 、 a_0 和 t_0 分别表示涂层磨损系数 K_c 、基体磨损系数 K_s 、磨痕内宽度 a 和涂层厚度 t 的真值, ΔK_{c0} 、 ΔK_{s0} 、 Δa 和 Δt 分别为其误差值。因此,涂层和基体的磨损系数 K_c 和 K_s 的误差取决于 K_c/K_s 的比值、无量纲参数 a_0^2/Rt_0 以及磨痕内宽度 a

与涂层厚度 t 的相对测量误差 $\Delta a/a_0$ 与 $\Delta t/t_0$ 。显然,减小 $\Delta a/a_0$ 与 $\Delta t/t_0$ 的值就能降低 K_c 和 K_s 的误差。

图2为涂层和基体的磨损系数 K_c 和 K_s 的误差与 K_c/K_s 关系曲线,其中,磨痕内宽度的测量误差值为 $\Delta a/a_0=0.01$, 涂层厚度的测量误差为 $\Delta t/t_0=0.05$ 。从图可知,涂层磨损系数 K_c 的误差随着 K_c/K_s 的减小而减小;反之,基体磨损系数 K_s 的误差随着 K_c/K_s 的增大而减小。

图3为涂层和基体的磨损系数 K_c 和 K_s 的误差与 a_0^2/Rt_0 关系曲线,其中,磨痕内宽度的测量误差值为 $\Delta a/a_0=0.01$, 涂层厚度的测量误差为 $\Delta t/t_0=0.05$ 。易知,随着 a_0^2/Rt_0 的减小,涂层磨损系数 K_c 的误差越来越小;反之,随着 a_0^2/Rt_0 的增大,基体磨损系数 K_s 的误差越来越小。

涂层的微磨损测试通常是针对于 $K_c < K_s$ 的涂层试样而言。如果 $K_c \gg K_s$, 则测量误差 $\Delta a/a_0$ 和 $\Delta t/t_0$ 减小,同时 a_0^2/Rt_0 降低,涂层和基体磨损系数 K_c 和 K_s 的误差也必然很低(见图3c)。如果涂层足够厚,则可视为整体试样,误差分析更简单,本文不予讨论。

以上讨论中,都是假设 a 的误差来自于测量方

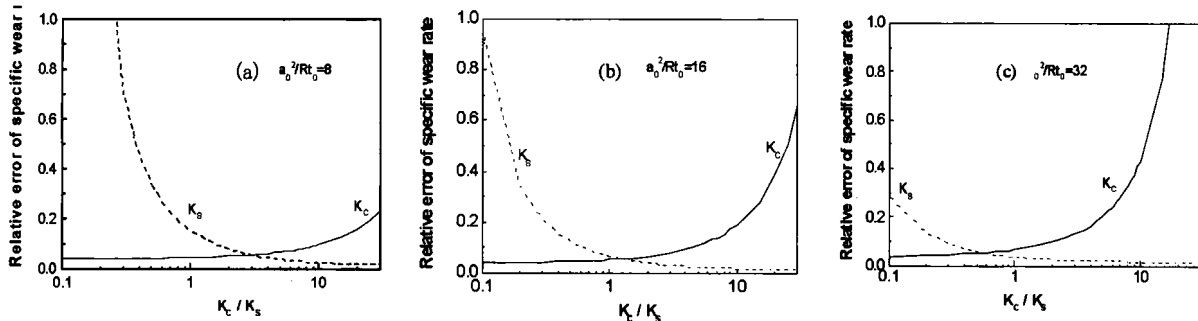


图2 涂层和基体单位磨损率相对误差与 K_c/K_s 关系曲线

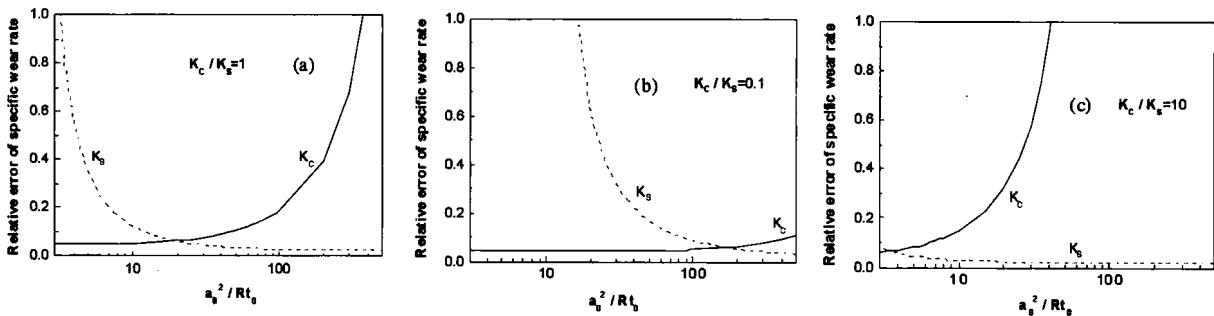


图3 涂层和基体单位磨损率相对误差与 a_0^2/Rt_0 关系曲线

法, 并且假设磨痕的内边界(涂层与基体的结合面)很容易确定。实际上, 由于磨损过程的非连续性导致磨痕边界模糊, 磨痕深度越小, 磨痕边界的不确定性越大, 这种不确定性比测量误差更大。Kusano 等^[9]分析认为, 当基体磨痕深度 h' 超过磨粒大小 d 时, a 的测量误差起主要作用。

$$d < h' \approx \frac{a_0^2}{8R} \quad (13)$$

则有

$$a_0 > (8Rd)^{0.5} \quad (14)$$

或者

$$a_0^2/Rt_0 > \frac{8d}{t} \quad (15)$$

条件式(14)说明, 磨痕内宽度 a_0 的最小尺寸取决于对磨环半径和磨料粒径, 只有当 a_0 大于最小极限值时, 才能减小其测量误差, 从而降低涂层和基体磨损系数的误差。从图 2 可以看出, 在对磨环半径 R 和试样涂层厚度 t 一定的情况下, 随着磨痕尺寸的增大, 涂层和基体的磨损系数误差都减小(图 2c)。由条件式(15), 也可用无量纲深度 a_0^2/Rt_0 来限制磨痕内宽度。例如, 当对磨环半径为 12.7mm, 磨料粒径为 4.5 μ m, 则 $(8Rd)^{0.5}$ 近似为 0.68mm, 即在该试验条件下所产生磨痕的磨痕内宽度应大于 0.68mm^[6]。

4 结论

(1) 涂层和基体磨损系数 K_c 和 K_s 的误差取决

于涂层和基体磨损系数的比值 K_c/K_s 、无量纲参数 a^2/Rt 以及磨痕内宽度 a 和涂层厚度 t 的相对测量误差。

(2) 由于磨痕边界的不确定性, 为了获得合理而准确的试验数据, 提出了磨痕内宽度的最小尺寸 a_0 的最小极限值, 该值取决于对磨环半径和磨料大小。因此, 需要根据对磨环半径和磨料粒径确定试验时间, 从而保证磨痕内宽度的最小尺寸。

参考文献

- [1] Kassman A, Jacobson S, Erickson L, et al. A new test method for the intrinsic abrasion resistance of thin coating [J]. Surface and coatings technology, 1991, 50:75-84.
- [2] Stack M M, Mathew M. Micro-abrasion transitions of metallic materials [J]. Wear, 2003(255):14-22.
- [3] Gee M G, Gant A J, Hutchings I M, et al. Results from an interlaboratory exercise to validate the micro-scale abrasion test [J]. Wear, 2005, 259: 27-35.
- [4] Holmberg K. Friction and wear of coated surfaces—scale, modeling and simulation of tribomechanisms [J]. Surface and coating technology, 2007(202):1035-1049.
- [5] Kusano Y, Van Acker K, Hutchings I M. Methods of data analysis for the micro-scale abrasion test on coated substrates [J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 183(2-3): 312-327.
- [6] 陈平. 多功能微磨损试验机的研制及材料的微磨损性能研究[D]. 博士学位论文, 中国矿业大学(北京), 2007.
- [7] Trezon R I, Hutchings I M. Three-body abrasive wear testing of soft materials [J]. Wear, 1999, 233-235:209-221.

Data Analysis for the Micro-scale Wear Testing

Chen Ping¹, Chen Huahui², Li Wenbo²

(1. School of Mechanical Engineering, University Science and Technology of Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: According to test data of coatings obtained using home-made multifunctional micro-wear tester, the influence of crater measurement error on wear coefficient under line condition was mainly analyzed. In order to obtain accurate measurement values, the micro-scale wear test condition was discussed. The results show that the errors in K_c and K_s , of coating and substrate are determined by the ratio of the K_c/K_s , the nondimensional parameter a^2/Rt and the relative measurement errors of the inner crater width. And they will reduce while the minimum dimension of the inner crater width a_0 is less than the minimum boundary value, which is determined by the ring radius and the abrasive particle size.

Key words: micro-scale wear; coating; wear coefficient; error; line contact