

GCr15/35CrMo 摩擦副的塑性接触面积 对滑动磨损的影响

党兴武^{1,2*}, 黄建龙^{1,2}, 陈生圣³

(1. 兰州理工大学 数字制造技术与应用省部共建教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050; 3. 中国科学院 兰州化学物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 基于分形理论, 计算了 35CrMo 钢试样经过压缩疲劳试验后变形区域以及和 GCr15 配副滑动磨损后的实际接触面积 A_r 、塑性接触面积 A_p 和塑性接触面积比率 A_p/A_r , 分析了塑性接触面积 A_p 和塑性接触面积比率 A_p/A_r 的变化量 δA_p 和 $\delta A_p/A_r$ 与磨损量的关系, 采用扫描电子显微镜观察了 35CrMo 钢试样磨损表面的形貌. 结果表明: 35CrMo 试块经过压缩疲劳以及和 GCr15 配副滑动磨损后, 接触面材料的剥落引起了塑性接触面积 A_p 和塑性接触面积比率 A_p/A_r 的减少, 塑性接触面积比率的变化量 $\delta A_p/A_r$ 可以描述磨损量的变化, 当 $\delta A_p/A_r < -0.5$ 时, 磨损量急剧增加.

关键词: 塑性变形; 分形; 真实接触面积; 磨损

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2015)01-0008-07

Influence of Plastic Contact Area on Sliding Wear of GCr15/35CrMo Steel Tribo-pair

DANG Xing-wu^{1,2*}, HUANG Jian-long^{1,2}, CHEN Sheng-sheng³

(1. Key Laboratory of Digital Manufacturing Technology and Application, The Ministry of Education,
Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, China

2. School of Mechanical and Electronical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, China

3. Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Abstract: The real contact area, plastic contact area and fraction of plastic contact area of 35CrMo specimen were calculated in two modes, i. e. deformation region after compression fatigue and worn surface in sliding against GCr15 using fractal theory. The relationships between wear and the plastic contact area, as well as the fraction of plastic contact area were analyzed. The worn morphology is observed using scanning electron microscopy. The results show that both the plastic contact area and the fraction of plastic contact area decreased as a result of delamination in contact area after sliding wear. The variation of the fraction of plastic contact area ($\delta A_p/A_r$) can be used for variation of wear. Once the $\delta A_p/A_r$ was higher than the critical value, the wear increased sharply.

Key words: plastic deformation, fractal, real contact area, wear

塑性变形是金属材料磨损中常见的一种现象, 根据 Bowden 的黏着摩擦理论和 Suh 的剥层磨损理论, 摩擦磨损与塑性变形具有紧密的关系^[1-2], 剥层磨损裂纹实际上是由塑性应变驱动的剪切裂纹^[3].

钟雯等^[4]利用塑性流变层的厚度表征磨损量的大小, 研究了钢轨的磨损, 认为流变层越厚, 磨损越严重. Schiffmann^[5]在纳米尺度研究了金属的多种薄膜涂层的磨损, 试验表明超过 50% 的磨损深度是由塑

性变形引起的.

磨损是由接触作用引起的固体表层材料不断损失的过程^[6]. 由于表面粗糙度的影响,两个相互接触的固体实际接触在离散的微凸体上,这些微凸体对相互接触的固体的摩擦性能具有影响^[7]. 随着载荷的增加,首先接触的小微凸体将发生塑性变形并合并成大的弹性点^[8],形成一定面积的接触界面,接触界面的相互作用使微凸体产生损伤,最后形成磨损. 大多数情况下,磨损是表面微凸体相互作用引起的^[9]. X Yin 等^[10]假设只有完全塑性的微凸体会引起磨损,认为接触面上微凸体的塑性变形会增加磨损率. 对于滑动磨损,塑性接触比弹性接触能导致更高的磨损率,所以研究塑性接触面积 A_p 和磨损的关系,具有一定的实际意义^[11].

35CrMo 合金结构钢具有很高的静力强度、冲击韧性及较高的疲劳极限,常用于制造承受冲击、弯扭和高载荷的重要零件,如传动轴、支承轴等. GCr15 钢是一种具有良好性能,应用最广泛的高碳铬轴承钢,常用于制造各种轴承套圈和滚动体. 这两种材料会经常形成接触,例如无内圈滚针轴承和支承轴等,并产生相对运动,存在摩擦磨损现象. 因此,本文作

者利用高频疲劳试验机经过压缩疲劳取得了 35CrMo 试样的系列变形区域,采用环块摩擦磨损试验机对试样的变形区域进行了滑动摩擦磨损试验,采用表面粗糙度仪测量了变形区域在磨损前后的表面轮廓,利用扫描电镜观察了 35CrMo 试样的磨损表面形貌,运用分形理论计算了变形区域在磨损前后的实际接触面积 A_r 和塑性接触面积 A_p 以及塑性接触面积比率 A_p/A_r ,以期研究塑性接触面积与磨损量之间的关系.

1 实验部分

1.1 试件及其参数

试样变形区域通过岛津 EHF-EM100KN-40L 高频疲劳试验机获得,如图 1(a)所示. 试样 6 是一个长方体试块,固定在下夹具 7 上,下夹具 7 与下活塞杆 2 联接,滚针 5 安装在上夹具 4 上,上夹具 4 与上活塞杆 3 联接. 试块材料为 35CrMo,滚针 5 材料为 GCr15,直径 $\phi 8\text{mm}$,二者的性能参数见表 1. 磨损试验在益华 MRH-3 环块摩擦磨损试验机上进行,如图 1(b)所示,试块 6 装在夹具 8 中,与试环 9 接触,试环 9 材料为 GCr15,性能参数见表 1.

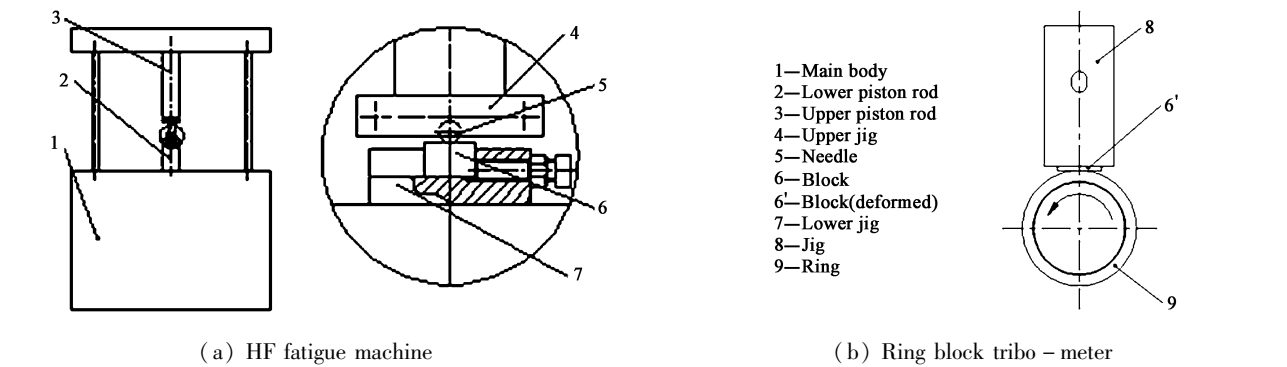


Fig. 1 Scheme of HF fatigue machine and ring block tribo-meter

图 1 高频疲劳试验机和环块摩擦磨损试验示意图

表 1 主要试件的性能参数
Table 1 Properties of main specimen

Specimen	$E \times 10^5 / \text{MPa}$	μ	Hardness, HRC	Roughness/ R_a	σ_y / MPa
Block	2.06	0.3	36.5	0.8	835
Needle	2.08	0.3	60	0.4	1 665 ~ 1 815
Ring	2.08	0.3	58	0.4	1 665 ~ 1 815

1.2 试验方法及试验参数

在压缩疲劳试验过程中,上活塞杆 3 固定,下活塞杆 2 上下往复运动,使试块 6 与滚针 5 循环接触,根据 Hertz 接触理论^[12],接触区域为一个矩形,试块

6 在滚针 5 的循环压缩下,在接触区域产生部分塑性变形. 试块共有 10 个,对应 10 个循环周期,分别为 10 万 ~ 100 万次,载荷 P 为 3.5 kN,频率 40 Hz.

变形区域获得后进行摩擦磨损试验,试块固定

在夹具 8 上,试环 9 和试块 6 为线接触状态,接触区域为试块 6 的变形区域,正压力载荷通过夹具 8 作用在试块 6 和试环 9 的接触区域上,试环 9 转速 1 200 r/min,试验时间 30 min,载荷 P' 为 150 N,采用脂润滑,试验前在试环 9 上均匀涂抹 3# 锂基润滑脂 0.4 mL,试验开始前和结束后均用丙酮超声清洗试块并烘干,用 HANGPING FA-1004 电子天平(精度 0.1 mg)测量磨损质量,利用 Mitutoyo SJ-400 表面粗糙度仪测量试块磨损前和磨损后相同区域的表面轮廓,采样长度 2 mm,采样间距 0.5 μm ,每次采集 4 000 个数据. 利用 JSM-5600LV 低真空扫描电

子显微镜观察磨损表面形貌.

2 结果与讨论

2.1 磨损前后的表面轮廓及其分形参数

图 2 所示为其中一个试块磨损前后的表面轮廓,其中图 2(a)和(b)分别为磨损前、后的局部轮廓,长度 200 μm ,图 2(c)和(d)是分别从图 2(a)和(b)中提取的部分轮廓,长度 50 μm ,可以看出,图 2(c)和(d)的轮廓结构与图 2(a)和(b)十分相似,说明轮廓曲线的局部和整体具有自相似性,磨损前后的表面都具有分形特征^[13].

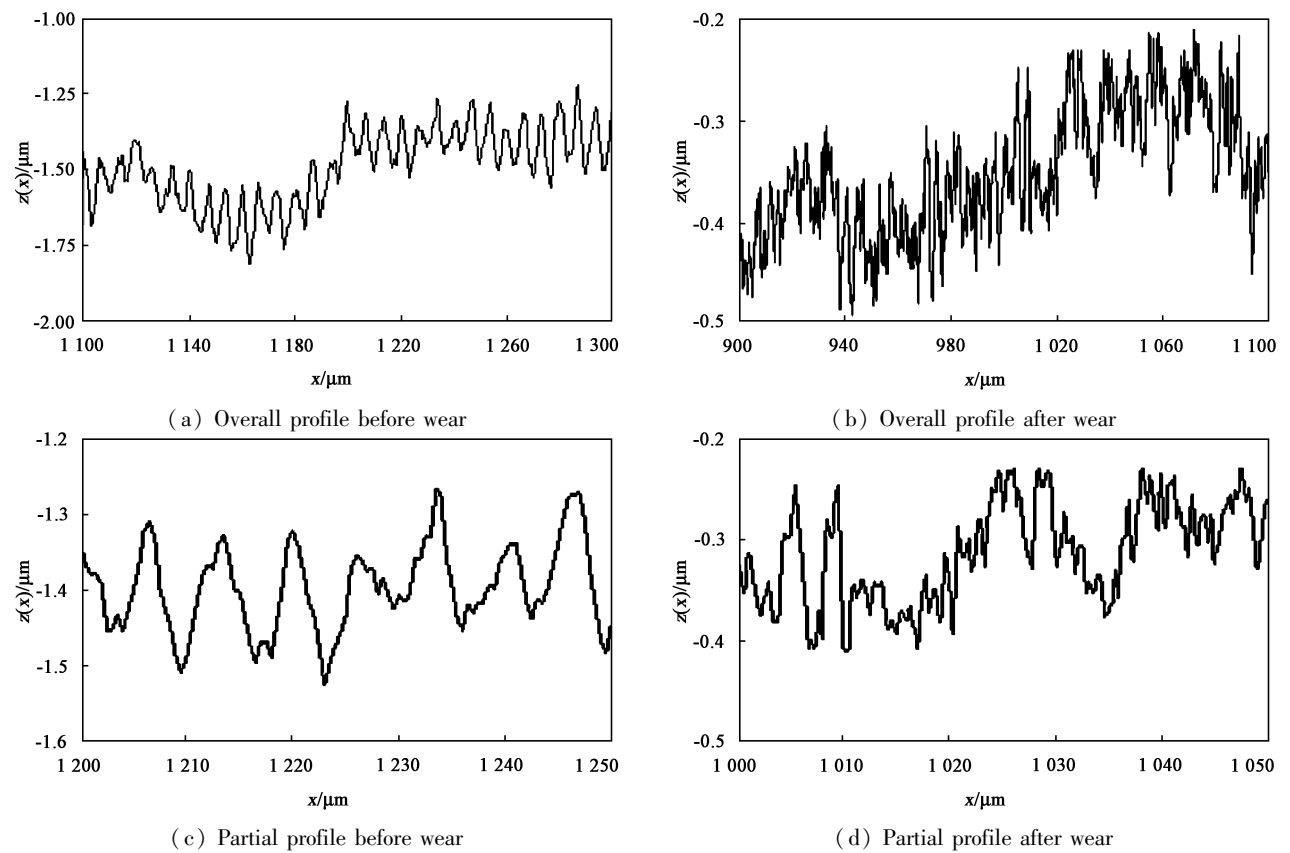


Fig. 2 Wear profile

图 2 磨损轮廓

试验中有 8 个试块的轮廓曲线表现出了自相似性,可以基于 M-B 分形模型来研究它们的接触问题. 利用结构函数法^[9]得到了这 8 个试块磨损前后的分形维数和尺度系数,磨损前分形维数为 D ,尺度系数为 G ;磨损后分形维数为 D' ,尺度系数为 G' ,如表 2 所示. 试块顺序按照循环周期排序.

2.2 磨损前后的塑性接触面积

根据 M-B 分形模型^[8],当 $a_1 > a_c$ 时,部分接触点为塑性接触;当 $a_1 < a_c$ 时,所有的接触点均为

塑性变形,且无论 $a_1 < a_c$ 是否成立,都有

$$A_r = \frac{D}{2-D} a_1 \tag{1}$$

式中 A_r 为真实接触面积, a_1 为最大接触点面积, a_c 为接触点发生塑性变形的临界接触面积,

$$a_c = \frac{G^2}{\left(\frac{K\phi}{2}\right)^{\frac{2}{D-1}}} \tag{2}$$

当 $a_1 > a_c$, 且 $1 < D < 2, D \neq 1.5$ 时,载荷与接触面积的关系为

表 2 磨损前后试块的分形参数

Table 2 Fractal parameters of blocks before and after wear				
Cycles $\times 10^4$	D	$G \times 10^{-10}/\text{m}$	D'	$G' \times 10^{-10}/\text{m}$
10	1.554	5.062	1.643	1.940
20	1.365	0.603	1.716	2.300
30	1.951	598.301	1.568	2.890
50	1.461	1.254	1.588	0.562
60	1.342	0.603	1.835	3.310
70	1.346	2.856	1.809	1.840
90	1.324	0.591	1.941	5.230
100	1.437	3.664	1.571	3.050

$$P^* = \frac{4\sqrt{\pi}}{3} G^{*(D-1)} g_1(D) A_r^{*\frac{D}{2}} \cdot \left\{ \left[\frac{(2-D)A_r^*}{D} \right]^{\frac{3-2D}{2}} - a_c^{*\frac{(3-2D)}{2}} \right\} \cdot K\phi g_2(D) A_r^{*\frac{D}{2}} a_c^{*\frac{(2-D)}{2}} \quad (3)$$

当 $a_1 < a_c$ 时,且 $D = 1.5$ 时,载荷与接触面积的关系为

$$P^* = \sqrt{\pi} G^{*\frac{1}{2}} \left(\frac{A_r^*}{3} \right)^{\frac{3}{4}} \ln \frac{A_r^*}{3a_c^*} + \frac{3K\phi}{4} \left(\frac{A_r^*}{3} \right)^{\frac{3}{4}} a_c^{*\frac{1}{4}} \quad (4)$$

式中

$$g_1(D) = \frac{D}{(3-2D)} \left(\frac{2-D}{D} \right)^{\frac{D}{2}}; \quad g_2(D) = \left(\frac{D}{2-D} \right)^{\frac{2-D}{2}} \quad (5)$$

以及无量纲形式

$$P^* = \frac{P}{A_a E'}; \quad G^* = \frac{G}{\sqrt{A_a}}; \quad A_r^* = \frac{A_r}{A_a}; \quad a_c^* = \frac{a_c}{A_a} \quad (6)$$

当 $a_1 < a_c$ 时,载荷与接触面积的关系为

$$P^* = K\phi A_r^* \quad (7)$$

式中 A_a 为名义接触面积, $A_a = 1.648 \text{ mm}^2$, P 为载荷, G 为分形粗糙度参数, D 为表面轮廓的分形维数, K 为硬度 H 与屈服强度 σ_y 相关系数 ($H = K\sigma_y$), σ_y 为较软材料的屈服强度, $\Phi = \frac{\sigma_y}{E'}$, E' 为综合弹性模量,是材料的特性参数.

对于任一试块,为了判断其接触是否为塑性接触,必须知道最大接触点面积 a_1 和临界接触面积 a_c ,由式(1)可知

$$a_1 = \frac{2-D}{D} A_r \quad (8)$$

现假设部分接触点为塑性接触,部分接触点为弹性接触,即 $a_1 > a_c$ 成立,载荷与接触面积的关系满足式(3),结合式(6),将式(2)的无量纲形式代入式(3),可知,式(3)中仅有 A_r^* 是未知的.求解式(3),并结合式(6)和式(8)即可求得最大接触点面积 a_1 ,比较式(2)和式(8)的结果,判断 $a_1 > a_c$ 是否成立.若判据成立,说明假设成立,载荷与接触面积的关系满足式(3)或式(4),则塑性接触面积由式(9)得出

$$A_{\text{tp}} = \frac{D}{2-D} a_1^{\frac{D}{2}} a_c^{\frac{2-D}{2}} \quad (9)$$

若判据不成立,说明假设不成立,即所有接触点均为塑性接触,载荷与接触面积的关系满足式(7),可由式(7)得出塑性接触面积为

$$A_{\text{tp}} = \frac{P}{K\phi E'} \quad (10)$$

根据以上分析计算,试块磨损前后的最大接触点面积 a_1 和临界接触面积 a_c 如图 3 所示.

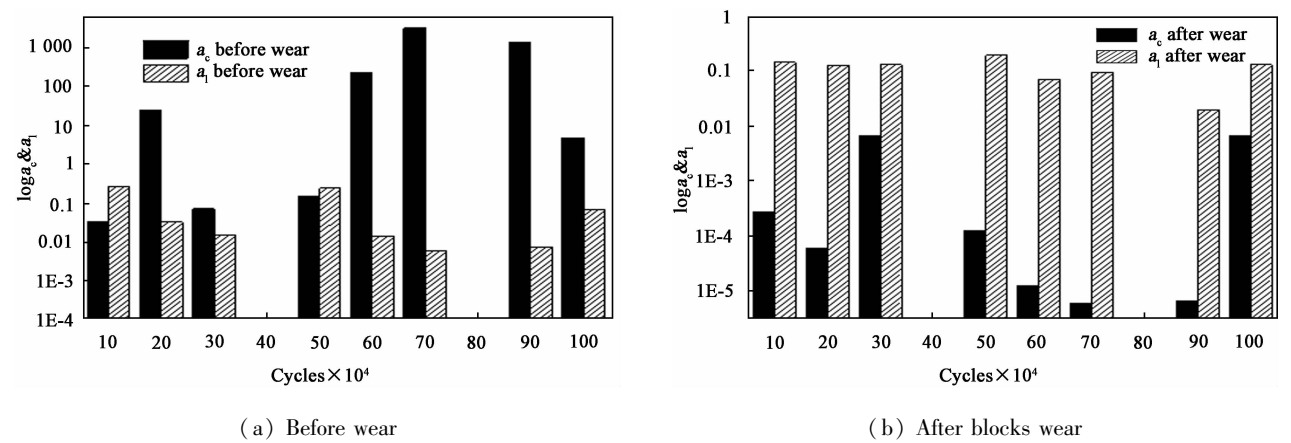


Fig. 3 a_1 & a_c of blocks before and after wear

图 3 试块的 a_1 和 a_c

分析图 3 可以看出:在磨损前,由于压缩疲劳的作用,除循环次数为 10 万次和 50 万次之外,对于其他 6 个试块,均有 $a_1 < a_c$ 成立,所有接触点为塑性接触,由于试块载荷及材料相同,真实接触面积相同,将表 2 中的相关数据代入式(10)可知,有 $A_{ip} =$

$A_r = 0.595 \text{ mm}^2$. 而在发生磨损后,对于所有试块,均有 $a_1 > a_c$ 成立,只有部分接触点为塑性接触,另一部分接触点为弹性接触,试块磨损前后的塑性接触面积 A_{ip} 如图 4(a) 所示,塑性接触面积比率 A_{ip}/A_r 如图 4(b) 所示.

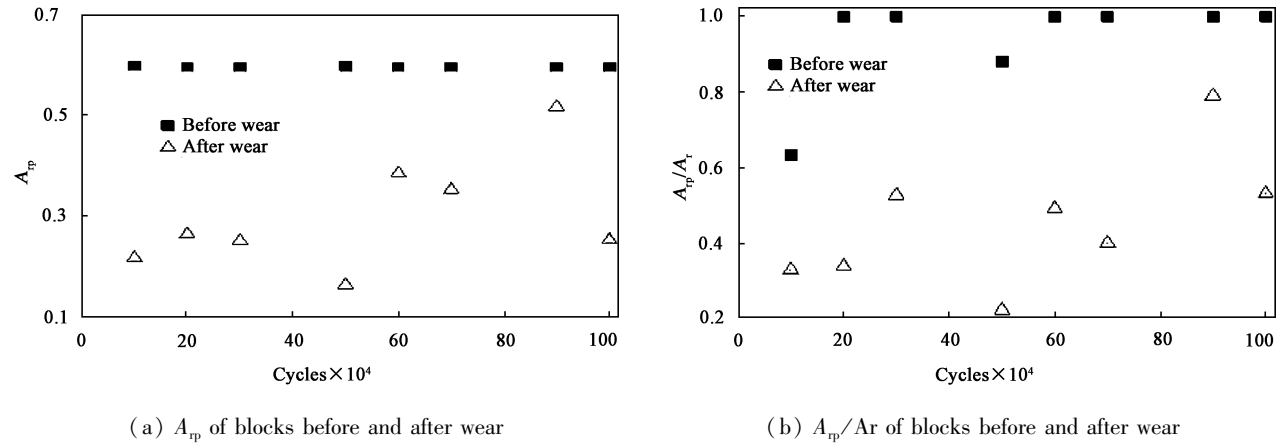


Fig. 4 A_{ip} and A_{ip}/A_r of blocks before&after wear
图 4 试块磨损前后的塑性接触面积和塑性接触面积分数

2.3 塑性接触面积和磨损质量的关系
试块磨损质量如表 4 所示.

表 4 试块磨损质量			
Table 4 Wear mass of blocks			
Cycles $\times 10^4$	Wear mass/mg	Cycles $\times 10^4$	Wear mass/mg
10	4.2	60	2.0
20	8.4	70	3.7
30	1.7	90	1.6
50	5.3	100	1.6

分析图 4(a) 和图 4(b) 可以发现,塑性接触面积 A_{ip} 和塑性接触面积比率 A_{ip}/A_r 在磨损后减少. 这说明在摩擦过程中,接触区域的部分塑性变形区域被磨损掉了. 在 6 个纯塑性接触的试块中,循环周期 20 万次时 A_{ip}/A_r 减少得最多,为 -0.6628 ,其磨损量最大,为 8.4 mg;循环周期 90 万次时 A_{ip}/A_r 减少得最少,为 -0.21086 ,其磨损量最小,为 1.6 mg. 用 δA_{ip} 和 $\delta A_{ip}/A_r$ 表示磨损前后塑性接触面积 A_{ip} 和塑性接触面积比率 A_{ip}/A_r 的变化量,它们与磨损量的关系如图 5 所示.

从图 5(b) 看出:排除两个非纯塑性接触的试块,磨损量在 $\delta A_{ip}/A_r$ 小于 -0.5 后开始急剧增加,试块的循环次数依次为 60、70 和 20 万次; $\delta A_{ip}/A_r$ 大于 -0.5 时,磨损量相差不大. 可以认为 $\delta A_{ip}/A_r$ 为

-0.5 是一个临界值,当 $\delta A_{ip}/A_r$ 小于 -0.5 时,塑性接触面积比率 A_{ip}/A_r 减少得越多,磨损量也就越多.

图 6 是纯塑性接触的试块磨损形貌,按照 $\delta A_{ip}/A_r$ 依次降低的顺序排列. 可以看出,图 6(a) 的磨损很轻微,磨损前的机加工痕迹仍然可见,图 6(b) 出现了黏着和轻微的塑性变形,这是因为加工硬化使试块接触微凸体的屈服强度增加,抵抗塑性变形的能力增强^[14],所以塑性接触面积减少、材料产生裂纹、引起剥落的可能性也降低,磨损量也小;图 6(c) 塑性变形较为明显,图 6(d) 塑性变形增加,同时出现了剥落,图 6(e) 剥落坑面积更大,这说明在磨损过程中,摩擦力作用在接触区域,亚表层出现了最大剪应力^[15],这将导致亚表层萌生疲劳裂纹,裂纹扩展至表层时,可能使塑性接触区域的材料剥离,产生磨损,从而塑性接触面积减少,同时剥离的材料形成磨屑. 随着上述过程的反复进行,塑性接触面积不断减少,磨屑不断形成,从而引起剥落^[16]. 这说明剥落越多,塑性接触区域减少得就越多,磨损量就越大. 图 6(f) 出现了犁沟,是因为加工硬化层完全磨损后,前期剥落形成的磨屑在新的较软的接触面上产生了磨料磨损而形成的,所以此时磨损量最大. 但是由于试块个体性能的差异,图 4 中并没有反映出塑性接触面积 A_{ip} 和塑性接触面积比率 A_{ip}/A_r 与循环次数成正比的关系.

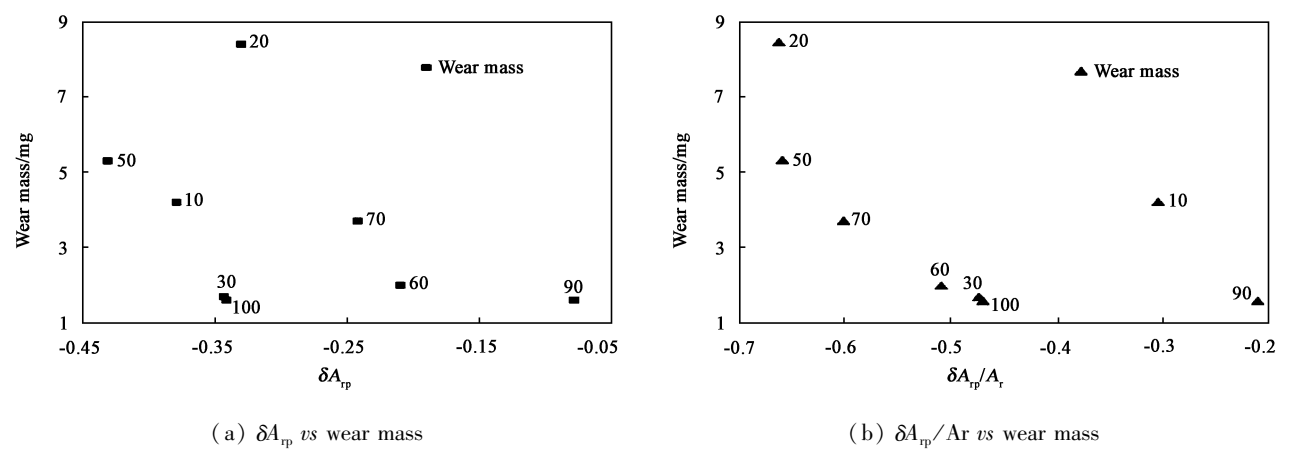


Fig. 5 δA_{tp} vs wear mass and $\delta A_{tp}/A_r$ vs wear mass
图 5 δA_{tp} , $\delta A_{tp}/A_r$ 和磨损量的关系

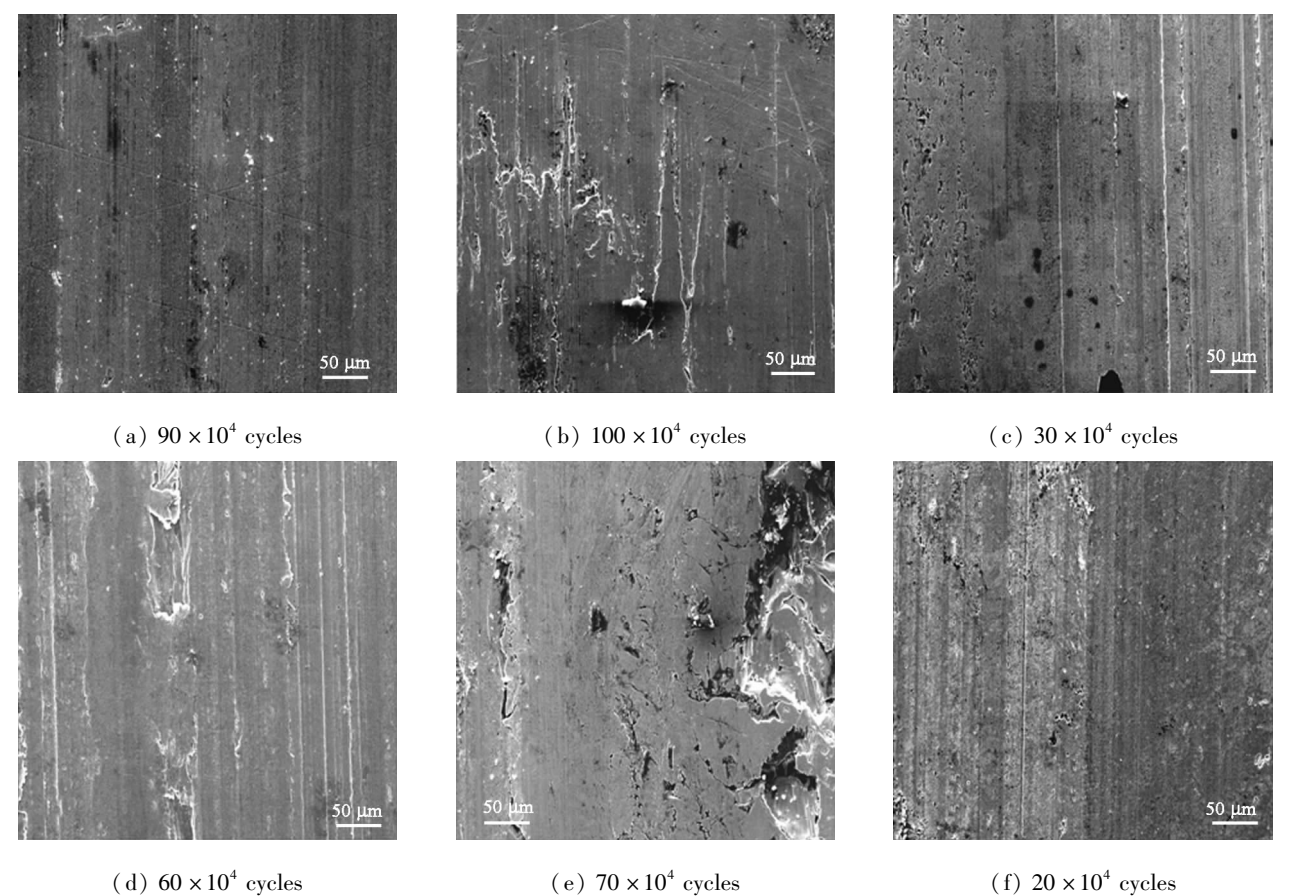


Fig. 6 SEM micrographs of worn surfaces of blocks at different cycles
图 6 不同循环次数的试块磨损形貌

3 结论

a. 35CrMo 试块经过压缩疲劳、磨损后,塑性接触面积 A_{tp} 和塑性接触面积比率 A_{tp}/A_r 减少,一部分接触点变为弹性接触,另一部分接触点仍为塑性接触。

b. 塑性接触面积比率的变化量 $\delta A_{tp}/A_r$ 可以描述磨损量的变化, $\delta A_{tp}/A_r$ 增加,磨损量也逐渐增加。

c. $\delta A_{tp}/A_r$ 存在一个临界值 -0.5 , 当 $\delta A_{tp}/A_r$ 小于 -0.5 时,磨损量急剧增加。

d. 塑性接触面积的减少,可能是由亚表层萌生

的疲劳裂纹扩展至表层时产生的材料剥离引起的.

参考文献:

[1] Wen S Z. Research progress on wear of materials [J]. Tribology, 2008, 28 (1) : 1 – 5 (in Chinese) [温诗铸. 材料磨损研究的进展与思考 [J]. 摩擦学学报, 2008, 28 (1) : 1 – 5].

[2] Suh N. An overview of the delamination theory of wear [J]. Wear, 1977, 44 : 1 – 16.

[3] Johnson K L. Contact mechanics and the wear of metals [J]. Wear, 1995, 190 : 162 – 170.

[4] Zhong W, Dong L, Wang Y, *et al.* A comparative investigation between rolling contact fatigue and wear of high – speed and heavy – haul railway [J]. Tribology, 2012, 32 (1) : 96 – 101 (in Chinese) [钟雯, 董霖, 王宇, 等. 高速与重载铁路的疲劳磨损对比研究 [J]. 摩擦学学报, 2012, 32 (1) : 96 – 101].

[5] Schiffmann K I. Phenomena in microwear experiments on metal – free and metal – containing diamond – like carbon coatings: friction, wear, fatigue and plastic deformation [J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 177 – 178 : 453 – 458.

[6] Goryacheva I G. Contact mechanics in tribology [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998.

[7] Buzio R B, C Valbusa U. Contact mechanics and friction of fractal surfaces probed by atomic force microscopy [J]. Wear, 2003, 254 (9) : 917 – 923.

[8] A Majumdar B B. Fractal model of elastic – plastic contact between rough surfaces [J]. Journal of Tribology, 1991, 113 :

1 – 11.

[9] B Bhushan. Introduction to tribology [M]. Translated by Ge S R. Beijing: China Machine Press, 2007.

[10] Yin X K K. An adhesive wear model of fractal surfaces in normal contact [J]. International Journal of Solids And Structures, 2010, 47 (7 – 8) : 912 – 921.

[11] Ge Shirong, C G. Fractal prediction models of sliding wear during the running – in process [J]. Wear, 1999, 231 : 249 – 255.

[12] Johnson K L. Contact mechanics [M]. London: Cambridge University Press, 1985.

[13] Ge S R, Zhu H. Fractal in tribology [M]. Beijing: China Machine Press, 2005 (in Chinese) [葛世荣, 朱华. 摩擦学的分形 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005].

[14] Zeng D, Lu Liantao, Li Zhengyang, *et al.* Influence of laser dispersed treatment on rolling contact wear and fatigue behavior of railway wheel steel [J]. Materials & Design, 2014, 54 : 137 – 143.

[15] Feng J J, Tan Y Q. Analysis of the slipping contact between a cylinder and a plane on the base of hertz theory [J]. Tribology, 2009, 29 (4) : 346 – 350 (in Chinese) [冯剑军, 谭援强. 基于 Hertz 理论圆柱和平面之间的滑动接触分析 [J]. 摩擦学学报, 2009, 29 (4) : 346 – 350].

[16] Xu X Y, Xu B S, Liu W J, *et al.* Fretting wear behavior of 1Cr18Ni9Ti stainless steel in sliding regime [J]. Tribology, 2002, 22 (6) : 444 – 448 (in Chinese) [徐向阳, 徐滨士, 刘文今. 1Cr18Ni9Ti 不锈钢在滑移区的微动磨损行为 [J]. 摩擦学学报, 2002, 22 (6) : 444 – 448].