

在点线接触条件下钢/钢摩擦副的干摩擦高温减摩抗磨性能的研究

High Temperature Tribological Behaviors of Hot Rolling Steel-steel Pairs at Dry Lubrication

乔玉林^{1,2}, 梁志杰¹, 孙晓峰¹, 徐滨士¹, 小豆岛明²

(1 装甲兵工程学院 装备再制造国防科技重点实验室, 北京 100072;

2 日本横浜国立大学大学院, 横滨 232-0061)

QIAO Yu-lin^{1,2}, LIANG Zhi-jie¹, SUN Xiao-feng¹, XU Bin-shi¹, AZUSHIMA Akira²

(1 National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of

Force Engineering, Beijing 100072, China; 2 Department of Mechanical

Engineering and Material Science, Yokohama National University, Yokohama 232-0061, Japan)

摘要: 用多功能 SRV 实验机评价了钢/钢摩擦副在干摩擦条件下的高温减摩抗磨性能, 并对高温磨损机理进行了探讨。结果表明, 钢/钢摩擦副的高温摩擦系数随着实验负荷的增加呈下降趋势, 而随着实验时间的延长呈增长趋势。钢/钢摩擦副的线接触高温摩擦系数明显比点接触时的高温摩擦系数大, SPHC/GCr15 摩擦副的高温摩擦系数明显高于 GCr15/GCr15 摩擦副的高温摩擦系数。钢球在点接触条件下的磨损随实验负荷的增加呈线性增长趋势, 而钢柱在线接触条件下的磨损随实验负荷的增加呈线性降低趋势。在相同负荷下, SPHC/GCr15 摩擦副的磨损要较 GCr15/GCr15 摩擦副的磨损略微小。钢/钢摩擦副在高速度下的磨损机理主要是磨粒磨损, 而在较低速度下主要是磨粒磨损和粘着磨损。

关键词: 高温; 摩擦系数; 磨损机理

中图分类号: TH 117.1 文献标识码: A 文章编号: 1004-4381(2005)11-0009-04

Abstract: The antiwear and friction-reducing properties of steel/steel pairs under dry lubrication were determined by the SRV multifunctional test system at 500 C. The high temperature lubricating mechanism was discussed. The results showed that the friction coefficient of the steel/steel pairs shows the declining trend with increasing test loads and growing trend with increasing test time at high temperature. The friction coefficient of steel/steel pairs at line contact conditions is lower than that of at point contact conditions obviously. The friction coefficient of SPHC/GCr15 pair is higher than that of GCr15/GCr15 pair obviously. The wear volume of the steel/steel pair at the point contact condition takes on the line-increasing trend with increasing test loads, but the contrary thing was found at line contact conditions. The worn volume of SPHC/GCr15 pair is bigger than that of GCr15/GCr15 pair appreciably. The high temperature worn mechanism of steel/steel pairs is dominating grain wear at higher speed like as 0.32m/s and is adhesive worn and grain worn at lower speed like as 0.10m/s.

Key words: high temperature; friction coefficient; worn mechanism

在金属热轧工艺过程中, 有效地降低轧辊与板材表面之间的摩擦系数, 对提高轧制板材的表面质量, 节约能耗, 减少轧辊表面的损伤, 延长轧辊的使用寿命具有关键的作用^[1-3]。近年来, 随着热轧温度的降低, 热轧压力 and 下压率的提高, 对轧辊和被轧板材之间的摩擦性能要求更加严格。如在热轧生产结晶度约为 1 μm 以下的超细微粒板材时, 就要求轧辊入口时的摩擦系数在 0.3 左右, 而出口时的摩擦系数在 0.15 左右^[4]。而且在热轧过程中, 轧辊与被轧金属板材这一

摩擦副之间涉及极其复杂的高温摩擦学问题。如轧辊从板材入口到出口这一过程中, 温度在很短时间内从低温(约 100 C)升高到高温(约 700 C), 摩擦形式涉及点接触和线接触, 摩擦状态涉及润滑和干摩擦等。目前, 钢/钢摩擦副在不同实验条件下的干摩擦高温摩擦行为的研究还非常缺乏。

本工作的目的是研究钢/钢摩擦副不同实验条件的干摩擦高温摩擦行为, 并探讨钢/钢摩擦副的高温磨损机理。

1 实验过程 and 材料

高温摩擦磨损实验是在 SRV 多功能试验机上进行的。该实验机主要由实验部分、加热控制部分、润滑剂供给循环装置、排烟装置、SRV 控制和分析软件,以及打印装置组成。SRV 多功能试验机的运动形式有振动和转动 2 种运动模型,其接触形式有点接触、面接触和线接触三种形式,可根据研究需要进行选择。

本实验采用振动模型的点接触形式和线接触形式,其运动形式如图 1 所示。采用的实验参数如表 1

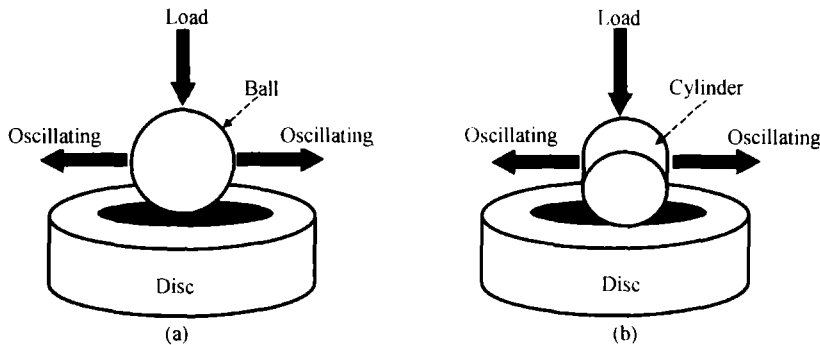


图 1 SRV 摩擦实验的运动形式 (a) 点接触; (b) 线接触
Fig. 1 The point contact (a) and the line contact (b) forms

表 1 SRV 实验所采用的实验参数

Table 1 The test conditions adopted in the experiment		
Test conditions	Point contact	Line contact
Load / N	100, 200, 400	100, 400, 600, 800
Test duration/ min	5, 10, 30	5, 10, 30
Test temperature/ C	500	500
Speed/ (m s ⁻¹)	0.1, 0.32	0.1, 0.32

2 实验结果与讨论

2.1 实验负荷对钢/钢摩擦副的高温点接触和线接触摩擦磨损的影响

图 2 给出了实验负荷对钢/钢摩擦副的高温点接

触和线接触摩擦系数的影响。可以看出,不论在点接触还是线接触条件下,随着实验负荷的增加,钢/钢摩擦副的高温摩擦系数呈下降趋势,但在一定负荷下,钢/钢摩擦副的高温摩擦系数随着实验时间的延长而呈增长趋势。不管是在点接触还是线接触条件下,在较低负荷下,钢/钢摩擦副的高温摩擦系数随着实验时间的延长呈快速增长趋势,而在较高负荷下则呈缓慢增长趋势。

从图 3 可以看出,实验负荷在点接触和线接触条件下对钢/钢摩擦副的高温抗磨性能的影响存在着显著的差异。在实验范围内,钢球在点接触条件下的磨损随着实验负荷的增加呈线性增长趋势,而钢柱在线接触条件下的磨损随着实验负荷的增加呈线性降低趋势。

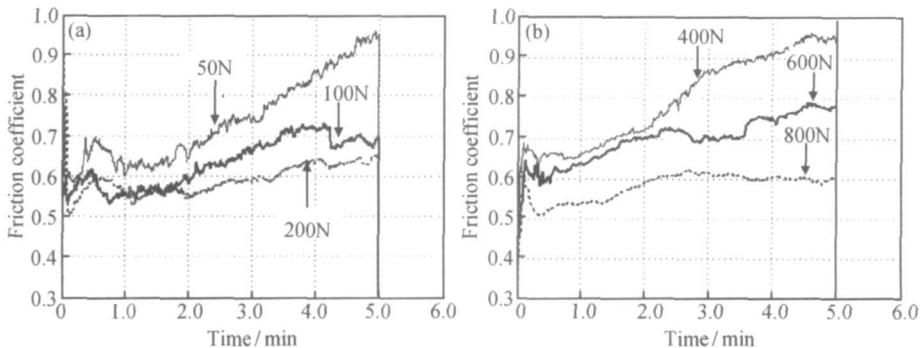


图 2 实验负荷对钢/钢摩擦副的高温点接触(a)和线接触(b)摩擦系数的影响

Fig. 2 Effect of test loads on the friction coefficient of steel/ steel pairs at the point (a) and line contact (b) conditions

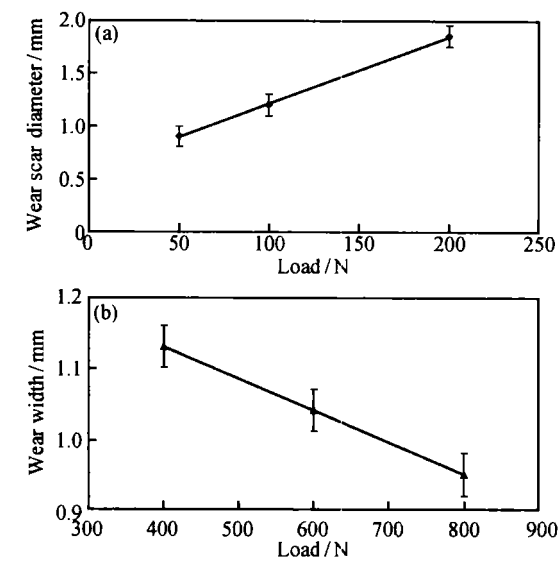


图 3 实验负荷在点接触(a)和线接触(b)条件下对钢/钢摩擦副的高温抗磨性能的影响

Fig. 3 Effect of loads on the antiwear of steel/steel pairs at the point (a) and line contact (b) conditions

2.2 实验速度对钢/钢摩擦副的高温点接触和线接触抗磨减摩性能的影响

从图 4 可以看出, 不管在较低速度和负荷还是较高速度和负荷下, 钢/钢摩擦副的线接触高温摩擦系数都明显比点接触时的高温摩擦系数大。从图 5 可以看出, 实验速度对钢球的高温抗磨性能影响较大, 而实验负荷对钢球的抗磨性能的影响较实验速度要小。

2.3 实验材料对钢/钢摩擦副高温减摩抗磨性能的影响

图 6 给出了实验材料在不同实验负荷条件下对钢/钢摩擦副的高温减摩性能的影响。可以看出, SPHC/GCr15 摩擦副的高温摩擦系数明显高于 GCr15/GCr15 摩擦副的高温摩擦系数。图 7 给出了实验材料对钢/钢摩擦副的高温抗磨性能的影响。可以发现, 钢球在 200N 时的磨损明显小于 400N 时的磨损。在相同负荷下, SPHC/GCr15 摩擦副的磨损要较 GCr15/GCr15 摩擦副的磨损大。

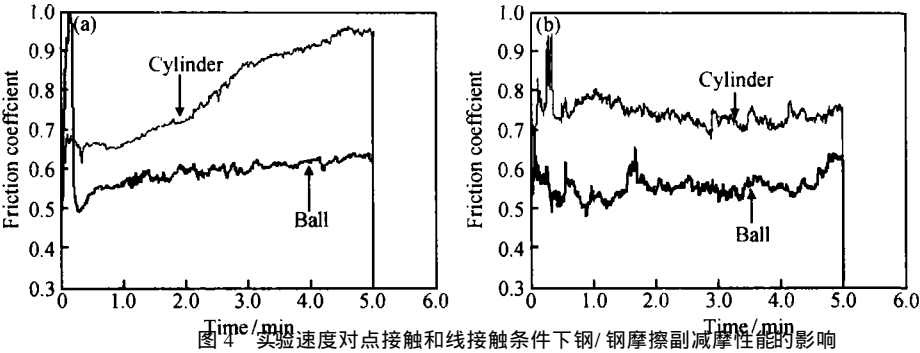


图 4 实验速度对点接触和线接触条件下钢/钢摩擦副减摩性能的影响
(a) 400N, 0.10 m s⁻¹; (b) 100N, 0.32 m s⁻¹

Fig. 4 Effect of test speeds on the friction coefficient of steel/steel pairs at the point and line contact conditions

(a) 400N, 0.10 m s⁻¹; (b) 100N, 0.32 m s⁻¹

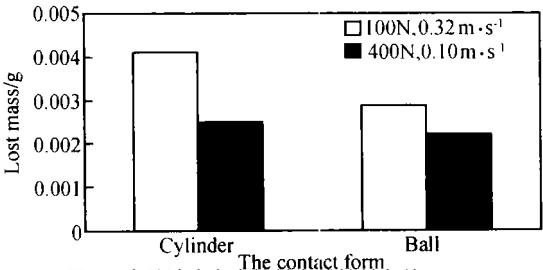


图 5 实验速度在点接触和线接触条件下对钢/钢摩擦副的高温抗磨性能的影响

Fig. 5 Effect of loads on the antiwear properties of steel/steel pairs at the point and line contact conditions

2.4 磨损表面分析

图 8 给出了不同实验条件下钢球磨损表面的形貌。从图 8a 可以看出, 钢球磨损表面存在大量的犁沟, 呈现明

显的磨粒磨损特征^[5]。这主要是由于在 400N 和速度为 0.32 m s⁻¹ 的实验条件下, 钢/钢摩擦副在高温摩擦过程中会产生大量的磨屑, 这些磨屑在高温和摩擦的共同作用下非常容易被氧化, 从而生成铁的氧化物, 而这些铁的氧化物具有比摩擦副材料更高的硬度, 这些高硬度的氧化铁就会以磨粒的形式出现在摩擦过程中, 从而形成三体磨损。从图 8b 可以看出, 钢球磨损表面除了一些微型沟外, 还存在大量的粘着微坑, 这表明在低速条件下, 钢/钢摩擦副之间的磨损机理主要是磨粒磨损和粘着磨损。

图 9 给出了在线接触条件下圆柱磨损表面的形貌。可以发现, 其圆柱磨损表面的形貌与钢球磨损表面的形貌特征相类似。在线接触条件下, 钢/钢摩擦副在高速下的磨损机理主要是磨粒磨损, 而在较低速度下主要是磨粒磨损和粘着磨损。

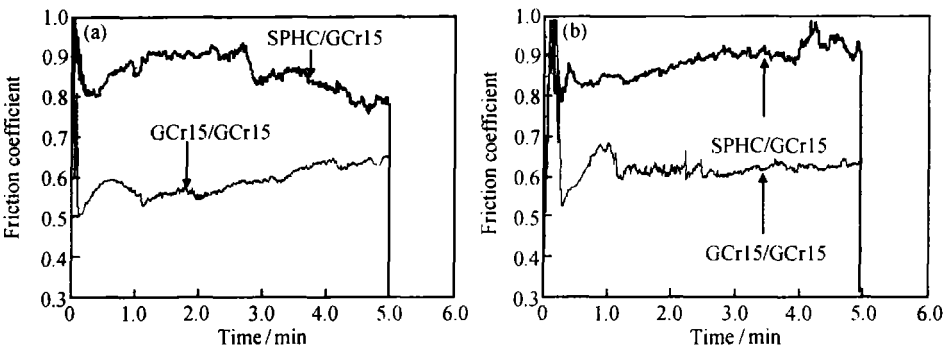


图6 实验材料对钢/钢摩擦副的高温减摩性能的影响

(a) 200N, 0.10 m s⁻¹; (b) 400N, 0.10 m s⁻¹

Fig. 6 Effect of test materials on the friction coefficient of steel/ steel pairs at the point and line contact conditions

(a) 200N, 0.10 m s⁻¹; (b) 400N, 0.10 m s⁻¹

3 结论

(1) 不论在点接触还是线接触条件下, 随着实验负荷的增加, 钢/钢摩擦副的高温摩擦系数呈下降趋势。在实验范围内, 钢球在点接触条件下的磨损随着实验负荷的增加呈线性增长趋势, 而钢柱在线接触条件下的磨损随实验负荷的增加则呈线性降低趋势。

(2) 钢/钢摩擦副的线接触高温摩擦系数明显比点接触高温摩擦系数略微大。实验速度对钢球的高温抗磨性能影响较大, 而实验负荷对钢球的抗磨性能的

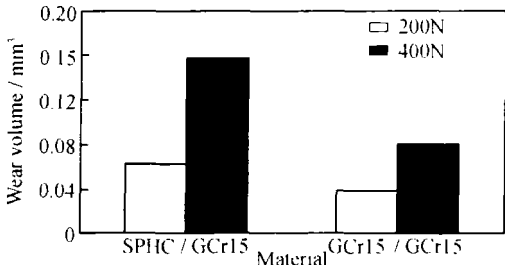


图7 实验材料对钢/钢摩擦副的高温抗磨性能的影响

Fig. 7 Effect of test materials on the antiwear properties of steel/ steel pairs

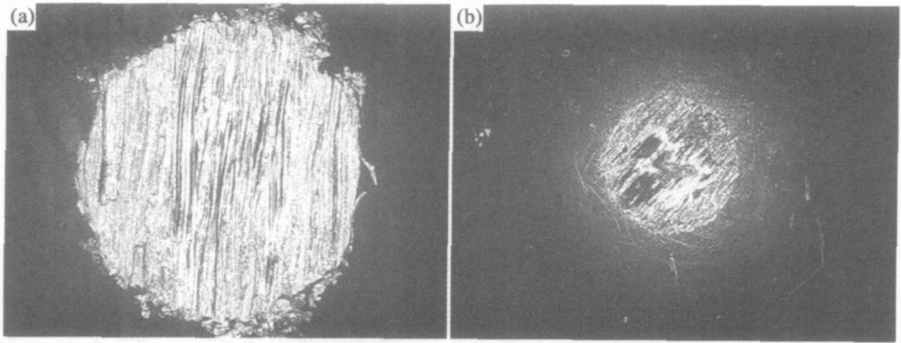


图8 钢球磨损表面的形貌 (负荷 400N, 时间 5min) (a) 0.32m s⁻¹; (b) 0.10m s⁻¹

Fig. 8 The worn surface morphology of the ball under load 400N, temperature 500 C, time 5min (a) 0.32m s⁻¹; (b) 0.10m s⁻¹

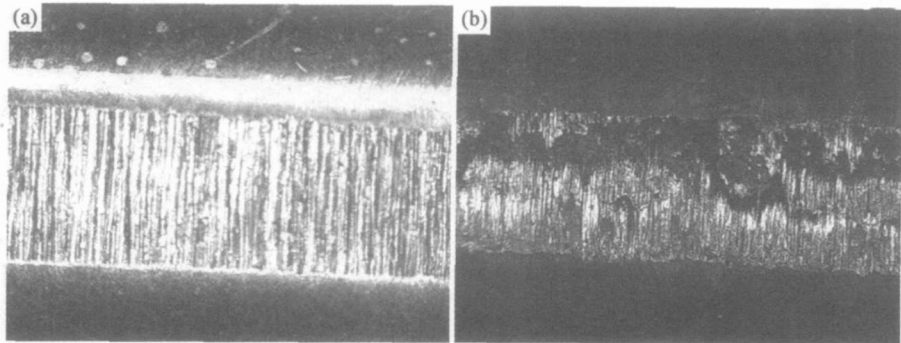


图9 钢柱磨损表面形貌 (时间 10min) (a) 600N, 0.32m s⁻¹; (b) 600N, 0.10m s⁻¹

Fig. 9 The worn surface morphology of the cylinder under load 600N, temperature 500 C, time 10min

(a) 600N, 0.32m s⁻¹; (b) 600N, 0.10m s⁻¹

(下转第 31 页)

的沟边金属,经碾压、疲劳后剥落。随着摩擦过程的延续,磨粒增多,二体型沟式及三体研磨式磨粒磨损加剧,导致摩擦副材料不断磨损。

可以看出,一旦摩擦副的流体润滑膜或边界膜破裂,金属直接接触时锡铜合金中的软相,如石墨,便会产生自润滑作用,提高了材料的抗干磨能力;而硬相(耐磨粒子)由于其高硬度增大了抗磨粒磨损能力。这样,材料中的软、硬相就起到了降低摩擦、减轻磨损的作用。

虽然四种摩擦副和锡青铜颗粒增强材料的磨损机理基本相同,但对锡青铜颗粒增强材料的磨损程度是不同的。从图4所示的磨损形貌可以看出,与12CrNi3A材料对磨后的锡青铜颗粒增强材料,表面较平滑,上面分布着互相平行的很细小的磨痕,与Cr12MoV磨损后的锡青铜颗粒增强材料也有细小的磨痕,而与38CrMoAlA, GCr15磨损后的材料有明显的石墨剥落的坑。

3 结论

(1) 锡青铜颗粒增强材料与12CrNi3A, 38CrMoAlA, GCr15, Cr12MoV四种配对材料对磨,虽然磨损机理基本相同,但摩擦磨损的具体性能是不同的,磨损量和摩擦系数差别很大。

(2) 12CrNi3A是锡青铜颗粒增强材料的最佳配

对材料,这两种材料配对摩擦系数及其磨损量都是最小的。

参考文献

[1] NADKARNI A V. Dispersion strengthened copper: properties and applications[R]. Cleveland, Ohio: SCM Metal Products Inc, 1985.

[2] NADKARNI A V, TROXELL J D, VERNIER F S. ClidCop dispersion strengthened copper: an advanced alloy system for automotive and aerospace applications[R]. Cleveland, Ohio: SCM Metal Products Inc, 1989.

[3] 闫程呼,周延春. TiSnC 颗粒增强铜基复合材料的力学性能[J]. 金属学报, 2003, 39(1): 99- 103.

[4] 刘如铁,李溪滨. 颗粒增强铜基热沉复合材料的研制[J]. 材料科学与工程, 2002, 20(4): 534- 536.

[5] TJONG S C, LAU K C. Tribological behavior of SiC particle-reinforced copper matrix composites[J]. Materials Letters, 2000, 43: 274- 280.

[6] UPADHYAYA A, UPADHYAYA G S. Sintering of copper-alumina composites through blending and mechanical alloying powder metallurgy routes[J]. Materials & Design, 1995, 16(1): 41- 45.

[7] 张剑锋,周志芳. 摩擦磨损与抗磨技术[M]. 天津: 天津科技翻译出版公司, 1993. 118- 124.

收稿日期: 2004-12-21; 修订日期: 2005-07-07
作者简介: 邓陈虹(1973-),女,博士研究生,工程师,材料科学与工程专业,联系地址: 北京钢铁研究总院科技信息室(100081)。

(上接第12页)

影响较实验速度要小。

(3) SPHC/GCr15摩擦副的高温摩擦系数明显高于GCr15/GCr15摩擦副的高温摩擦系数。在相同负荷下,SPHC/GCr15摩擦副的磨损要较GCr15/GCr15摩擦副的磨损大。

(4) 钢/钢摩擦副在高速下的磨损机理主要是磨粒磨损,而在较低速度下主要是磨粒磨损和粘着磨损。

参考文献

[1] SHIRIZLY A, LENARD J G. The effect of lubrication on mill loads during hot rolling of low carbon steel strips[J]. J Mat Proc Technol, 2000, (97): 61- 68.

[2] UN CHIA CHEN, YU SHILIU, CHONG CHINGCHANG. The effect of the additive concentration in emulsions to the tribological behavior of a cold rolling tube under sliding contact[J]. Tribology

International, 2002, (35): 309- 320.

[3] QIAO Yu-lin, AZUSHIMA KITA. Evaluation of base oil for hot rolling by SRV test machine[J]. Current Advances in Materials and Processes. 2003, (16): 1219.

[4] QIAO Yu-lin, AZUSHIMA, KITA. Effects of additive of effects of colza base oil on coefficient of friction in hot rolling[J]. Current Advances in Materials and Processes. 2003, (16): 1220.

[5] 颜志光. 新型润滑材料与润滑技术实用手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 46- 47.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(50235030)
收稿日期: 2004-11-16; 修订日期: 2005-07-15
作者简介: 乔玉林(1965-),男,副研究员,博士,目前主要从事添加剂摩擦化学、武器装备防护研究,联系地址: 北京市丰台区杜家坎21号装甲兵工程学院装备再制造工程系装备表面研究所(100072)。