

等离子熔覆 Fe-Ni 基合金导辊组织结构及失效分析

张丽民¹⁾ 刘均波²⁾ 孙冬柏³⁾ 王书明¹⁾

1) 北京有色金属研究总院国家有色金属及电子材料分析测试中心, 北京 100088 2) 潍坊学院机电工程学院, 潍坊 261061

3) 北京科技大学腐蚀与防护中心, 北京 100083

摘要 采用等离子熔覆技术将 Fe-Ni 基高温耐磨合金粉末熔覆到 45# 圆钢上, 制备了 Fe-Ni 基合金导辊. 采用扫描电子显微镜、能谱仪、X 射线衍射仪研究了 Fe-Ni 基合金涂层的组织结构和 Fe-Ni 基合金导辊的表面失效情况. 结果表明: Fe-Ni 基高温耐磨涂层组织形态良好, 由涂层与基体的结合界面处到涂层的上部其组织由平面晶向树枝晶转变; γ -(Fe-Ni) 的含量在涂层中按底部—中部—上部的方向依次降低, 而 $(Cr-Fe)_7C_3$ 的分布正好相反; Fe-Ni 基合金导辊的失效机制为热疲劳开裂和磨粒磨损.

关键词 Fe-Ni 基合金; 导辊; 等离子熔覆; 组织结构; 失效

分类号 TG 174.442

Microstructure and failure analysis of Fe-Ni based alloy rollers produced by plasma cladding

ZHANG Limin¹⁾, LIU Junbo²⁾, SUN Dongbai³⁾, WANG Shuming¹⁾

1) National Center of Analysis and Testing for Non-ferrous Metals & Electronic Materials General Research Institute for Nonferrous Metals Beijing 100088, China

2) College of Mechanical and Electrical Weifang University Weifang 261061, China

3) Corrosion and Protection Center University of Science and Technology Beijing Beijing 100083, China

ABSTRACT Fe-Ni based high temperature wear-resistant powder was cladded on 45# round steel to obtain an Fe-Ni based alloy roller by plasma cladding. Scanning electric microscope, energy spectrometer and X-ray diffractometer were adopted to study the microstructure of the Fe-Ni based alloy coating and the failure surface of the Fe-Ni based alloy roller. It is shown that the morphology of the Fe-Ni based high-temperature wear-resistant coating is well and the morphology is planar crystal at the coating-substrate bonding while the morphology becomes dendrite at the middle and the top of the coating. The γ -(Fe-Ni) content reduces following the bottom-middle-top order in the coating, but the $(Cr-Fe)_7C_3$ is just the opposite. The failure mechanism of the Fe-Ni based alloy roller is thermal fatigue cracking and grain wear.

KEY WORDS Fe-Ni based alloy; roller; plasma cladding; microstructure; failure

导卫装置是线材轧机的重要组成部分, 众多的产品质量问题和设备、人身事故都与导卫装置有密切的联系. 导辊是导卫装置的关键部件, 也是消耗大、更换频繁的部件. 热轧中发生在导辊周围的传热过程是一个非常复杂的过程, 包括轧件与导辊之间的接触传热、热辐射和冷却水的对流散热^[1-2]. 目前, 常用的导辊为高铬铸钢导辊, 其使用寿命为 8 h,

大大制约了线材的生产效率, 并且价格较高.

等离子熔覆技术是近几年发展起来的表面厚涂层技术, 所获得的涂层可与基体材料达到冶金结合^[3-5]. 目前, 等离子熔覆技术已经成功地应用到矿山机械上, 但在钢铁行业上的应用鲜有报道. 本文采用等离子熔覆技术制备了等离子熔覆合金导辊, 并进行了工况现场试验, 对等离子熔覆 Fe-Ni 基涂

收稿日期: 2009-09-21

作者简介: 张丽民 (1979-), 女, 工程师, 博士, E-mail: zhanglininzh@163.com

层的组织结构和等离子合金导辊的失效情况进行了分析研究.

1 实验方法

1.1 实验材料

高铬铸钢焊接性能差、价格较高;而调质 45[#]钢具有高的屈服强度和疲劳强度,良好的冲击韧性和塑性.因此采用调质 45[#]钢作为导辊心部材料,一方面能够满足导辊在服役条件下的力学性能要求,另一方面可以降低成本.涂层材料采用 Fe-Ni 基高温耐磨合金粉末,其化学成分见表 1.

表 1 Fe-Ni 基高温耐磨涂层合金粉末成分 (质量分数)

									%
Cr	Ni	Mo	B	Si	C	W	Nb	Fe	
28	30	3	2	3	2	6	1	余量	

1.2 实验工艺和方法

在调质 45[#]钢表面等离子熔覆高温耐磨涂层,工艺流程为 45[#]钢圆钢毛坯→导辊毛坯→等离子熔覆→导辊表面打磨处理→等离子合金导辊.等离子熔覆过程中的热输入量由工作电流和扫描速率确定,其工作电流为 300 A,扫描速率为 400 mm·m⁻¹;熔覆过程的送粉速率由送粉气流量确定,送粉气流量为 0.6 m³·h⁻¹ A;另外,等离子气流量 0.6 m³·h⁻¹ A;保护气流量 1.6 m³·h⁻¹ A;等离子熔覆为单层熔覆,制备的涂层的厚度为 2 mm^[6-7].

在剑桥 S-360 型扫描电子显微镜上观察等离子熔覆涂层的显微组织和磨损实验后试样表面的磨损形貌.采用日本理学 Dmax-RB 旋转阳极 X 射线衍射 (XRD) 仪,并结合 TN550 型 Tracor Norhem 能谱仪对高温耐磨涂层组织进行物相和结构分析.

2 Fe-Ni 基高温耐磨涂层的组织结构

等离子熔覆涂层的组织结构呈梯度分布,因此采用线切割的方式将涂层沿层深方向进行切割,分别在涂层中间 (由涂层上部开始 1 mm 处)、涂层与基体的结合区切割分离.对涂层的表层、中间层以及涂层与基体的结合区进行物相分析.图 1 为等离子熔覆 Fe-Ni 基高温耐磨涂层横截面沿层深方向的物相分布. Fe-Ni 基高温耐磨涂层中的主要物相为 γ -(Fe Ni)、(Cr Fe)₇C₃ 和少量的 Mo_{1.24}Ni_{0.76}. 沿涂层层深方向的物相种类相同,但含量不同, γ -(Fe Ni) 和 (Cr Fe)₇C₃ 的含量都发生了明显的变

化.对涂层进行能谱分析,发现从涂层的上部到涂层与基体的结合区,Fe 元素含量逐渐升高,Cr 元素含量逐渐降低,这是因为在涂层的制备过程中,基体材料对涂层存在稀释作用,高温下熔池中的对流、扩散等因素使基体材料中的 Fe 元素到达涂层中,导致涂层底部的 Fe 元素含量增加,同时涂层中的合金元素,如 Cr 也会被稀释而减少.这些元素的互扩散作用对涂层与基体达到冶金结合起到了一定的促进作用.从以上分析可知, γ -(Fe Ni) 在涂层中按底部—中部—上部的方向依次降低,而 (Cr Fe)₇C₃ 的分布正好相反.因此,从物相分布上来看,由基体与涂层的结合区到涂层上部,物相含量的分布是一个渐变的过程.C 元素在其中起了重要的作用,基体材料中 C 的质量分数为 0.45%,涂层合金中 C 的质量分数为 2%.熔覆后,冶金熔池凝固的过程中,在涂层与基体的结合界面处,涂层中的 C 被稀释,而越往涂层上部,C 含量越高,从而使碳化物越容易形成,因而涂层中就形成 (Cr Fe)₇C₃ 的含量由涂层底部到涂层上部呈增多的趋势, γ -(Fe Ni) 则在涂层底部较多,在涂层中、上部较少.

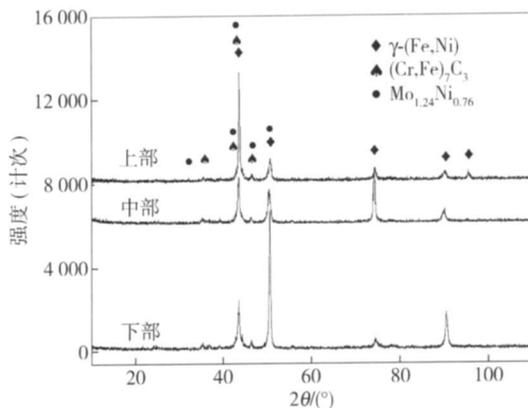


图 1 Fe-Ni 基高温耐磨涂层的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of the Fe-Ni based high temperature wear-resistant coating

图 2 所示为 Fe-Ni 基高温耐磨涂层由底部到中、上部的显微形貌.涂层底部组织呈现为平面晶形态,如图 2(a)所示,熔池底部平面晶晶粒依附于母材半熔化区,晶粒外延长大,表现出联生结晶的特点.涂层中、上部呈现为枝晶状组织,如图 2(b)所示,枝晶表现出择优生长的特点,在等离子束流和冶金熔池的对流作用下,细小的枝晶被打乱,表现为块状和细小的碎片状.微区能谱分析发现,图 2(b)中 P1 为富 Cr 区, P2 为 Fe、Ni 的富集区,白亮点 P3 为 Mo、Nb 元素的聚集区,在 P1 和 P2 处都可检测到 W 元素的存在,可知 W 以合金元素的形式固溶在 γ -

(Fe-Ni) 奥氏体和 $(\text{C}_F\text{Fe})_7\text{C}_3$ 中. 结合 XRD 分析结果可知, P1 为碳化物 $(\text{C}_F\text{Fe})_7\text{C}_3$, P2 为 γ -(Fe

Ni) 奥氏体相, P3 为 $\text{Mo}_{0.24}\text{Ni}_{0.76}$ 化合物, 这些化合物的良好匹配使涂层具有优异的耐磨性能.

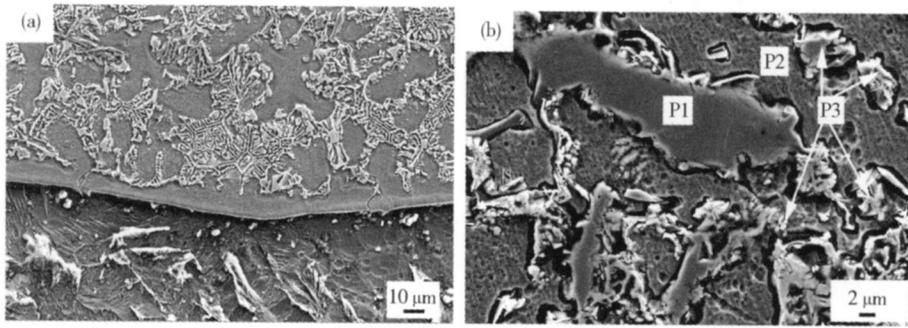


图 2 Fe-Ni 基高温耐磨涂层显微形貌. (a) 涂层与基体结合区; (b) 涂层中、上部

Fig 2 Microstructures of the Fe-Ni based high temperature wear-resistant coating (a) coating matrix bonding (b) middle and upper zones in the coating

3 等离子合金导辊失效分析

将制备好的 Fe-Ni 基合金导辊投入某线材轧钢厂进行工况现场试验, 发现导辊服役 88 h 后失效, 对其进行修复后, 又使用 72 h 后失效报废, 与服役寿命为 8 h 的高铬铸钢导辊相比, 等离子熔覆的 Fe-Ni 基合金导辊的性能有显著的提高, 该种导辊在线材轧钢厂具有广阔的竞争空间. 为进一步提高该种

导辊的性能, 本文对其失效情况进行了分析研究.

3.1 宏观失效分析

图 3 为 Fe-Ni 基合金导辊失效后的实物照片, 图 3(a) 为 Fe-Ni 基合金导辊在使用 88 h 失效后的宏观形貌, 图 3(b) 为 Fe-Ni 基合金导辊进行修复后使用 72 h 再次失效后的宏观形貌. 通过对导辊的表面进行失效分析, 认为该种导辊主要的失效方式如下.

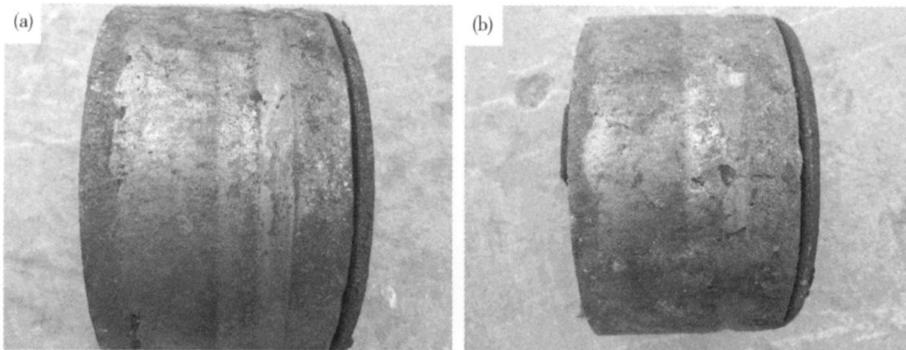


图 3 Fe-Ni 基合金导辊失效后的照片. (a) 新导辊使用 88 h 后; (b) 修复导辊使用 72 h 后

Fig 3 Photos of the Fe-Ni based alloy roller after failure (a) new roller after 88 h application (b) renovation roller after 72 h application

3.1.1 高温磨损

从导辊表面形貌照片中可以看到明显的因磨损而造成的犁沟, 并且在犁沟的表面布满了氧化腐蚀产物, 高温轧件与导辊直接接触并高速运动构成摩擦副, 在轧制过程中, 轧件表面形成的氧化皮脱落对导辊构成磨粒磨损, 导辊自身因受热氧化形成的氧化皮也会成为磨粒, 从而进一步加剧导辊的磨损. 因此, 可以认为 Fe-Ni 基合金导辊在高温下的磨损为磨粒磨损 + 氧化脱落.

3.1.2 热疲劳与热疲劳裂纹失效

导辊在工作过程中承受反复激冷激热的交变热

应力作用, 极易导致热疲劳破坏. 如图 3 所示, 在犁沟的边沿部位布满了裂纹和由裂纹扩展导致的剥落坑.

3.2 微观失效分析

对 Fe-Ni 基合金导辊修复后使用 72 h 后的导辊 (图 3(b)) 进行微观失效分析, 认为主要的失效机制如下.

3.2.1 热疲劳和热疲劳裂纹失效

导辊在服役工程中, 承受着塑性压应变与弹性拉应变的循环作用, 即热疲劳过程. 在热应力作用下热疲劳裂纹产生、扩展并衍生, 从而构成了典型的热疲劳裂纹形貌, 即网络状裂纹^[8-9]. 图 4 为 Fe-Ni

基合金导辊表面的热疲劳裂纹. 图 4(a)为热疲劳引起的十字形热疲劳裂纹;十字形热疲劳裂纹扩展形成如图 4(b)所示的环形裂纹;在轧件的冲击作用

下,环形裂纹失稳,导致涂层块状脱落,如图 4(c)所示. 热疲劳裂纹的扩展和涂层中大面积块状脱落最终导致导辊的失效.

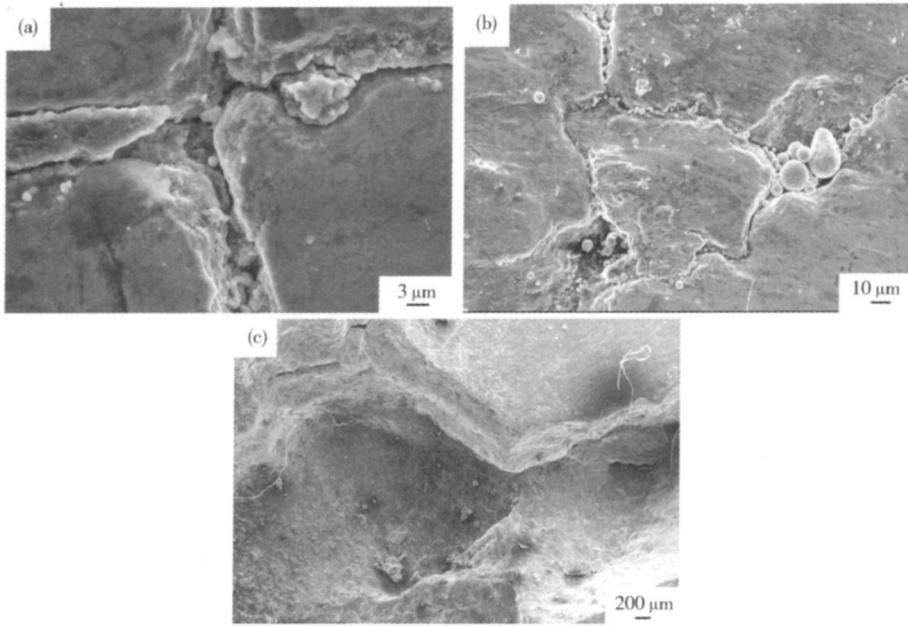


图 4 热疲劳裂纹失效导辊表面形貌 . (a) 十字形裂纹; (b) 环形裂纹; (c) 剥落坑

Fig 4 Surface patterns of the failure roller with thermal fatigue cracks (a) cross cracks (b) cyclic cracks (c) flaking pits

3.2.2 磨粒磨损

图 5(a)为 Fe-Ni 基高温耐磨合金导辊磨损的形貌. 从图中可以看出,涂层的磨损面上出现了犁沟状磨痕、突起和少量的剥落坑,可以认为合金导辊

的磨损机制为磨粒磨损^[10]. 涂层在轧件作用下,表面材料被挤压推移到轧件运动路径的两侧,中间形成“犁沟”,两侧堆积隆起. 同时,轧件对涂层起到显微切削作用,导致涂层形成一些“浮雕”. 工作过程

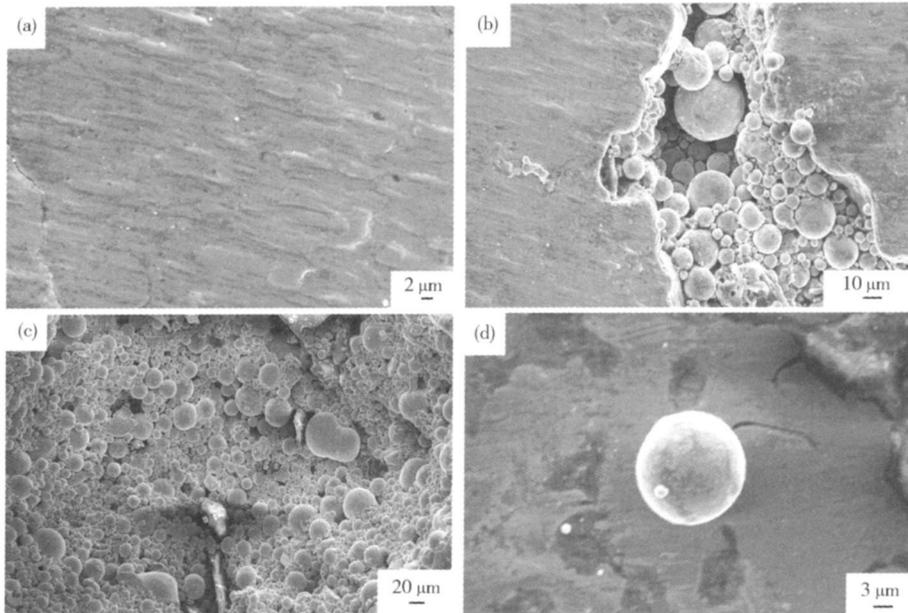


图 5 导辊磨粒磨损失效表面形貌. (a) 磨粒磨损形成的犁沟; (b) 热疲劳裂纹中的球形磨粒; (c) 剥落坑中的球形磨粒; (d) 磨损面上的球形磨粒

Fig 5 Surface patterns of the failure roller with grain abrasion: (a) furrow caused by grain abrasion; (b) spherical abrasive grains in the thermal fatigue crack; (c) spherical abrasive grains in the abscission pits; (d) spherical abrasive grain on the wear surface

中, 导辊表面在高温磨损作用下, 涂层中的块状碳化物和金属间化合物耐磨骨架受到轧件的冲击作用, 可能会断裂或从涂层表面剥落, 从而在导辊表面形成剥落坑, 这些剥落的碳化物和金属间化合物则成为轧件和导辊之间的磨粒, 与导辊、轧件构成了三体磨粒磨损的摩擦副。图 5(b)、(c) 为残存于裂纹和剥落坑中的球状磨粒; 对这些球状磨粒进行能谱分析, 结果如图 6 所示。从图中可知, 这种球形磨粒的化学组成为 Fe-Cr-C-Si 可以认为, 球形磨粒主要由碳化物组成, 在轧件的磨损作用下, 导辊涂层中的碳化物脱落, 在磨损过程中成为球形磨粒。因此, 在磨粒磨损过程中, 材料去除机制是塑性变形-显微切削和断裂-剥落的共同作用。

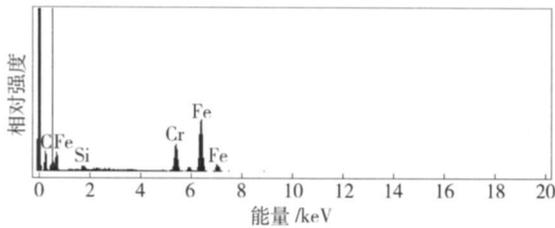


图 6 球形磨粒的能谱分析

Fig 6 EDS spectrum of spherical abrasive grains

4 结论

(1) 利用等离子熔覆技术, 在 45# 圆钢表面熔覆 Fe-Ni 基高温耐磨涂层, 制备了等离子合金导辊。工况现场试验表明, 其使用寿命比高铬铸钢导辊有显著的提高。Fe-Ni 基涂层与基体 45# 钢呈冶金结合状态, 碳化物 $(\text{Fe}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ 、奥氏体 $\gamma-(\text{Fe}, \text{Ni})$ 和 $\text{Mo}_{0.24}\text{Ni}_{0.76}$ 化合物的良好匹配使涂层具有优异的耐磨性能。

(2) 等离子熔覆 Fe-Ni 基合金导辊的失效机制主要为热疲劳开裂和磨粒磨损。

参 考 文 献

- [1] Tang Y H, Chen A H, He B. Analysis of failure of guiding equipment for finishing rolling mill. *Mech Res Appl* 2006, 19(3): 60 (唐永辉, 陈艾华, 何彬. 精轧机导卫装置的失效分析及改善措施. *机械研究与应用*, 2006, 19(3): 60)
- [2] Xing Z Q, Pan H T. Analysis on fracture of prejudiced guide roller (35CrMo) in coiling furnace. *Phys Exam Test* 2009, 27(2): 58 (杏仲全, 潘红涛. 35CrMo 钢卷取炉偏导辊断裂分析. *物理测试*, 2009, 27(2): 58)
- [3] Zhang L M, Sun D B, Li H Q, et al. Research progress in surface metallurgy by DC plasma jet. *Heat Treat Met* 2006, 31(2): 12 (张丽民, 孙冬柏, 李惠琪, 等. 等离子束表面冶金技术研究及其进展. *金属热处理*, 2006, 31(2): 12)
- [4] Zhang L M, Sun D B, Yu H Y, et al. Characteristics of Fe-based alloy coating produced by plasma cladding process. *Mater Sci Eng A* 2007, 457(1/2): 319
- [5] Zhang L M, Sun D B, Yu H Y. Effect of niobium on the microstructure and wear resistance of iron-based alloy coating produced by plasma cladding. *Mater Sci Eng A* 2008, 490: 57
- [6] Zhang L M, Sun D B, Yu H Y. Characteristics of plasma cladding Fe-based alloy coating with rare earth metal elements. *Mater Sci Eng A* 2007, 452/453(15): 619
- [7] Zhang L M, Liu B W, Yu H Y. Rapidly solidified non-equilibrium microstructure and phase transformation of plasma cladding Fe-based alloy coating. *Surf Coat Technol* 2007, 201(12): 5931
- [8] Liu B W, Zhang L M, Li H Q, et al. Study on cracking behavior of Fe-based coating by plasma cladding. *Mater Sci Technol* 2007, 15(4): 545 (刘邦武, 张丽民, 李惠琪, 等. 等离子熔覆铁基涂层开裂行为研究. *材料科学与工艺*, 2007, 15(4): 545)
- [9] Li M. Mechanical fundament of thermal fatigue cracks on hot work die steel. *Mater Mech Eng* 1993, 17(6): 29 (李明. 热作模具钢热疲劳裂纹的力学基础. *机械工程材料*, 1993, 17(6): 29)
- [10] Fu B Y, He D Y, Zhao L D. Abrasive resistance of arc sprayed coatings containing Fe-based amorphous phase. *Tribology* 2008, 28(5): 428 (傅斌友, 贺定勇, 赵力东. 涂铁基非晶涂层的磨粒磨损性能研究. *摩擦学学报*, 2008, 28(5): 428)