

# 微合金元素 Nb 对亚共晶灰铸铁 摩擦磨损性能的影响

孙胃涛<sup>1</sup>, 黄晓明<sup>1</sup>, 刘晓亮<sup>1</sup>, 周文龙<sup>2</sup>

(1. 滨州学院 机电工程学院, 山东 滨州 256600)

(2. 大连理工大学 材料科学与工程学院 辽宁省凝固控制与数字化制备技术重点实验室, 辽宁 大连 116085)

**摘要:** 研究了微合金元素 Nb 对亚共晶灰铸铁摩擦磨损性能的影响。制备 4 种不同 Nb 含量摩擦盘试样(0%、0.12%、0.21%、0.33%, 质量分数), 选用不含石棉的树脂基摩擦材料作为对偶, 利用定速式摩擦试验机进行摩擦试验。测试前, 采用 SEM、TEM 和 OM 对摩擦盘的微观组织结构进行观察。测试结束, 利用 SEM 对摩擦副磨损表面进行分析。结果表明, 系统摩擦系数随 Nb 含量的增加先增大后减小。这与 Nb 对珠光体基体的细化效果有关。其次, Nb 对系统高温工况下摩擦效率有消极影响, 这是因为添加 Nb 后导致石墨组织细化, 影响摩擦界面散热效率。再者, 摩擦盘耐磨性在 Nb 含量为 0%~0.21% 范围内, 随 Nb 含量的增加而提高, 当 Nb 含量为 0.33% 时, 受磨损机制转变影响, 出现明显下降。

**关键词:** Nb 元素; 亚共晶灰铸铁; 摩擦磨损性能; 微观结构; 磨损表面

中图分类号: TG143

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)06-2163-06

汽车制动系统在制动过程中将车辆动能转化为热能, 其表现由摩擦盘和刹车片性能共同决定。一般而言, 摩擦盘应具有适宜的摩擦系数, 良好的耐磨性, 以及优异的散热性<sup>[1]</sup>。多年实践证实, 具有珠光体和石墨结构的灰铸铁是目前制备汽车制动盘的首选材料。

近年来, 许多致力于改善汽车制动系统性能的实验研究集中在灰铸铁盘的优化设计方面。Cho 和 Ghaderi<sup>[2,3]</sup>等人重点探究了灰铸铁中石墨组织在摩擦过程中的作用。结果表明, 高含量、高长径比的石墨可以增加摩擦界面热量散失, 有利于系统在高温工况下维持有效制动等级。文献[4]研究了石墨特征对摩擦盘磨损性能的影响, 认为细小石墨组织可以减少磨粒磨损。此外, 另有业内人士从摩擦盘铸造参数(如铸造温度和冷却速度)出发对摩擦盘性能进行优化。例如, Thornton 等人<sup>[5]</sup>最近发现, 深冷处理可以提高灰铸铁在轴承钢表面滑动时的耐磨性。对上述研究总结不难得出, 通过调整灰铸铁摩擦盘的微观组织结构或机械性能, 可以获得预期摩擦磨损性能。

众所周知, 微合金元素 Nb 对铁基合金组织调控具有重要作用<sup>[6]</sup>。例如, Mejía 等人<sup>[7]</sup>研究结果表明, 在高锰钢中添加 Nb 可得到细化奥氏体组织, 对获得良好力学性能有重要作用。Wang 等人<sup>[8]</sup>研究结果表明,

Nb 的添加提高了 Fe-Cr-C 合金的抗拉强度, 原因在于 Nb 的晶粒细化机制和 NbC 的析出强化机制。但目前, 关于 Nb 对亚共晶灰铸铁影响的研究较少, 尤其在摩擦学性能方面。

因此, 本研究旨在探讨添加 Nb 对灰铸铁摩擦学性能的影响规律和作用机制。其中, 重点关注摩擦盘微观组织结构与摩擦系数的关系。相关结果可为制备具有优良摩擦学性能的汽车制动盘提供依据。

## 1 实验

铸造 4 种不同 Nb 含量(0%、0.12%、0.21%、0.33%, 质量分数, 下同)的灰铸铁摩擦盘试样, 分别命名为 D1、D2、D3 和 D4, 铸造温度控制在(1450±5) °C, 毛坯尺寸为  $\Phi 200$  mm×15 mm, 不同试样成分如表 1 所示。需要说明, 本研究选用 75 硅铁作为孕育剂, 用以拟制铸铁白口倾向<sup>[3]</sup>。

选用自制的含石棉树脂基摩擦材料作为摩擦对偶, 组分及含量如表 2 所示, 按功能分为 5 部分, 粘结剂、增摩剂、润滑剂、填料以及增强组分。它们以酚醛树脂为粘结剂, 在热压作用下将其余各组分粘合在一起成为具有摩擦功能的整体。热压温度为 165 °C, 压力 25 MPa, 保压时间 30 min。

收稿日期: 2020-06-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)(SS2015AA042502)

作者简介: 孙胃涛, 男, 1987 年生, 博士, 滨州学院机电工程学院, 山东 滨州 256600, E-mail: sun\_wei\_tao@163.com

表 1 4 个不同摩擦盘试样成分

Table 1 Composition of the four disc samples used in the present study ( $\omega/\%$ )

Sample	C	Si	Mn	Nb	S	Fe
D1	3.84	2.07	0.72	0	0.074	Bal.
D2	3.82	2.05	0.73	0.12	0.074	Bal.
D3	3.82	2.05	0.71	0.21	0.075	Bal.
D4	3.83	2.05	0.72	0.33	0.075	Bal.

表 2 自制树脂基摩擦材料成分

Table 2 Composition of the resin based friction materials prepared in this study ( $\omega/\%$ )

Category	Ingredient	Content
Binders	Resin	20.4
	Nitrile rubber	5.6
Reinforcements	Carbon fibers	6.4
	Vermiculite	7.4
Fillers	Barite	54.4
	Graphite	2.8
Abrasives	Alumina	3.0

摩擦盘铸坯经机械加工后安装在 JF151 型定速式摩擦试验机上, 结构示意图如图 1 所示, 摩擦盘作为转子, 恒定转速 480 r/min, 工作半径 150 mm。2 个相同自制树脂基摩擦材料样品(25 mm×25 mm×6 mm) 以 1225 N 恒定载荷按压在摩擦盘上。

标准摩擦试验<sup>[9]</sup>包括 6 个阶段: 100、150、200、250、300 和 350 °C。每个温度阶段持续 5000 r。摩擦温度由轻置于摩擦盘表面的热电偶监测, 并由加热装置和冷却系统控制。试验前, 用 400#砂纸对摩擦材料和摩擦盘表面进行打磨(摩擦材料表面粗糙度为  $R_{a0.22}$ , 摩擦盘表面粗糙度为  $R_{a0.19}$ ), 以保证接触良好。对整个过程中的摩擦系数进行监测, 然后对每个温度阶段摩擦系数取平均值。摩擦盘的磨损通过试验前后的厚度损失量来评估。

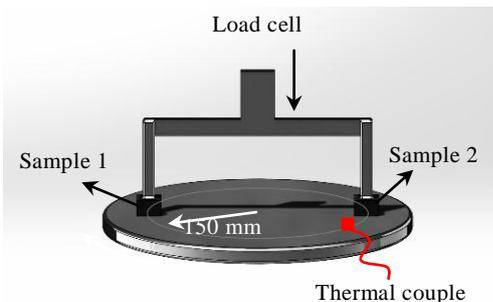


图 1 摩擦试验机结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of friction tester

为探究 Nb 添加对灰铸铁摩擦磨损性能的影响机理, 利用光学显微镜、TEM 和 SEM 观察了不同试样的微观组织结构。测试结束后, 借助 SEM 分析摩擦材料和摩擦盘的磨损表面形貌。

## 2 实验结果

### 2.1 摩擦性能

图 2a 给出了不同摩擦盘试样摩擦系数与温度的关系。在不同温度下, 随 Nb 含量的增加, 摩擦系数先增大后减小, 峰值出现在 Nb 含量为 0.21%(D3 试样) 左右。随温度不断升高, 各摩擦盘摩擦系数逐渐增大, 但超过临界值后, 摩擦系数明显减小。就树脂基摩擦材料作为对偶而言, 类似摩擦效率在高温工况下降低的现象普遍存在, 即出现所谓的热衰退<sup>[10]</sup>。

为评价树脂基摩擦材料与不同摩擦盘对磨时的抗热衰退表现, 公式(1)给出了热衰退率  $\omega$  计算方法<sup>[9]</sup>。

$$\omega = \frac{\mu_{\max} - \mu_{350\text{ °C}}}{\mu_{\max}} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $\mu_{\max}$  为试验过程中的最大摩擦系数,  $\mu_{350\text{ °C}}$  为 350 °C 时的摩擦系数, 计算结果如图 2b 所示。可以看出, 在 Nb 含量为 0%~0.21% 范围内, 随 Nb 含量的增加, 材料热衰退率逐渐增大, 尽管 0.33% 对应材料热衰退率没有增大, 但相比于 D1 和 D2 有所增大。

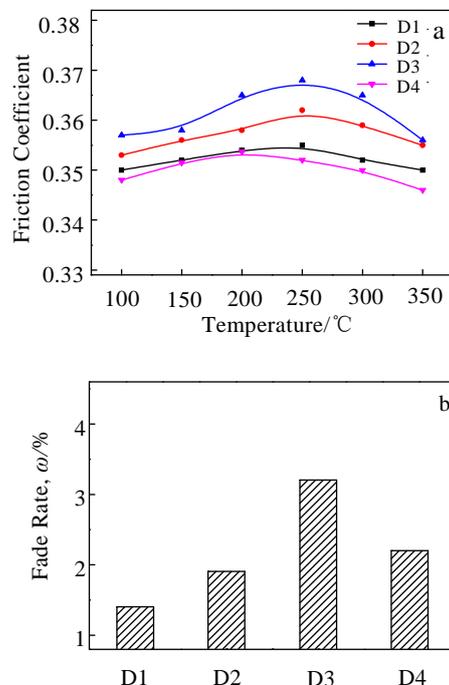


图 2 不同摩擦盘试样摩擦系数随温度的变化及对应树脂基摩擦材料的热衰退率

Fig.2 Friction coefficient of different discs samples versus temperature (a) and the corresponding fade rate of resin based friction materials (b)

### 2.2 磨损性能

图 3 给出了摩擦测试前后不同摩擦盘的厚度损失。可以看出，D1、D2 和 D3 的耐磨性随着 Nb 含量增加而增大，但高含量 Nb D4 试样的耐磨性却较差。

### 2.3 微观组织结构

图 4a1~4d1 分别为 D1、D2、D3 和 D4 摩擦盘腐蚀前的微观组织结构，图 4a2~4d2 分别为 D1、D2、D3 和 D4 摩擦盘经 2% 硝酸乙醇+2% 苦味酸（体积分数）腐蚀后的金相组织。可见，灰铸铁室温组织以珠光体基体和石墨为主，且 Nb 添加对其微观组织特征有很大影响。首先，Nb 对石墨组织有细化效果，而且随 Nb 含量增加，细化能力增强。其次，珠光体片层间距在 0%~0.21% 范围内随 Nb 含量的增加而减小，但当 Nb 含量达到 0.33% 时，珠光体组织又明显粗化。使用 Image Pro Plus 6.0 测量显示，D1、D2、D3 和 D4 珠光体片层间距分别为 3.1、1.9、1.5 和 3.4 μm。需要指出，此处所指珠光体主要由初生奥氏体转变而来，而由共晶奥氏体转变而来的珠光体几乎不受 Nb 影响。

### 2.4 磨损表面

利用 SEM 观察了摩擦结束后摩擦材料和摩擦盘的磨损表面。发现摩擦材料和摩擦盘磨损表面形貌随 Nb 含量增加基本保持不变。以摩擦材料与 D2 对磨为例，图 5a 给出了摩擦材料的磨损表面。可见，分布着大量“接触平台”。研究证实<sup>[11]</sup>，滑动摩擦过程中，材料表面耐磨性差、组分容易磨损，以磨屑形式滞留在摩擦界面，而耐磨性好组分能够钉扎在材料表面，为磨屑在其周围堆积提供基础，后续周围磨屑在压力载荷和剪切应力共同作用下经压实形成接触平台。图 5b 和 5c 分别为图 5a 的局部放大形貌，其中可以识别出一些片层剥落痕迹和犁沟。众所周知，片层剥落行为通常伴随黏着摩擦而产生，而犁沟通常由磨粒摩擦引起<sup>[12]</sup>。这意味着该摩擦副的摩擦磨损性能主要由磨粒摩擦和黏着摩擦 2 种机制决定。

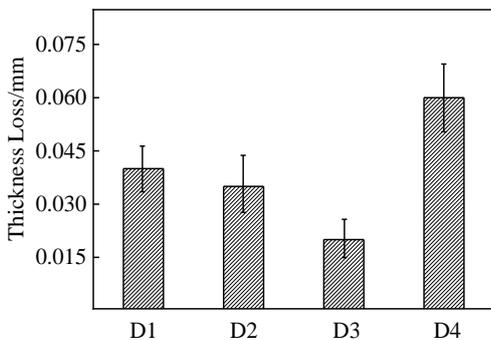


图 3 不同摩擦盘试样在整个试验过程中的厚度损失量  
Fig.3 Thickness loss of different disc samples during the whole test

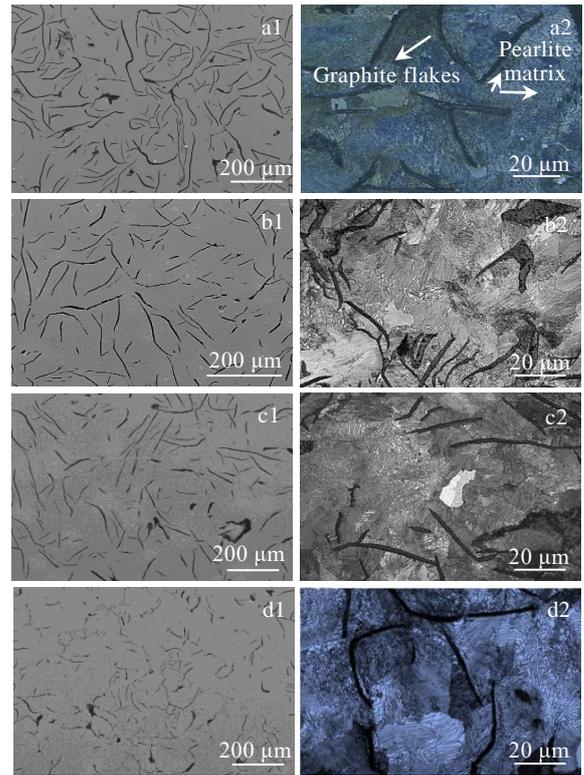


图 4 不同 Nb 含量的摩擦盘的 SEM 照片及腐蚀后的 OM 组织  
Fig.4 Microstructures of discs with different Nb contents: (a1~d1) SEM images of D1, D2, D3, and D4 before etched; (a2~d2) OM images of D1, D2, D3, and D4 after etching

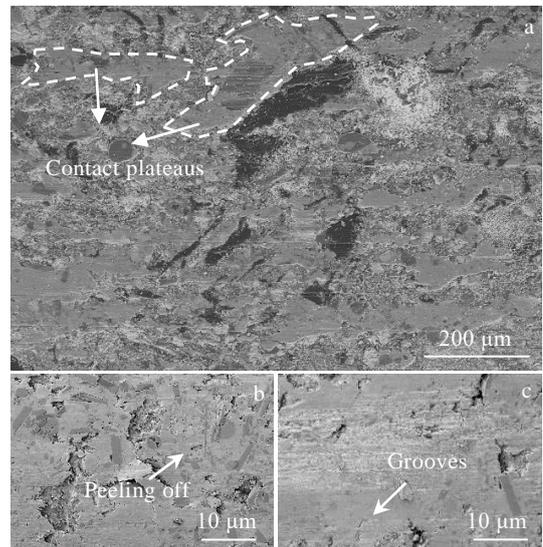


图 5 摩擦材料与 D2 摩擦盘对磨后磨损表面形貌及其局部放大形貌  
Fig.5 Worn surface morphology of friction materials sliding against D2 disc (a) and its partial magnified morphologies (b, c)

图 6a 为 D2 摩擦盘测试结束后磨损表面形貌，可见明显分布的犁沟和附着层。同上，犁沟由磨粒摩擦引起<sup>[12]</sup>。借助(EDS)能谱仪对附着层成分进行表征，结果如图 6b 所示，基本包含了摩擦材料和摩擦盘中所有化成分，这表明部分材料通过黏着摩擦从摩擦材料转移到摩擦盘表面<sup>[13]</sup>。

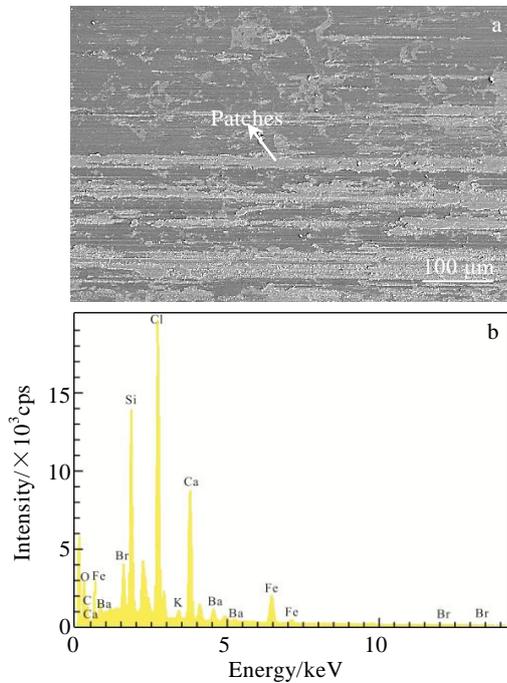


图 6 D2 摩擦盘对应的磨损表面显微形貌以及磨损表面附着层的 EDS 能谱

Fig.6 Worn surfaces SEM image of D2 disc (a) and EDS spectrum of the patches at worn surfaces (b)

### 3 讨论

依据铁碳合金相图(图 7)<sup>[14]</sup>，熔体凝固过程中首先形成初生奥氏体  $\gamma$ ，然后在接近共晶点 C 时，剩余液相转变成奥氏体和石墨的共晶组织。随温度继续下降至共析点 S，初生奥氏体和共晶奥氏体开始发生珠光体转变，最后导致室温摩擦盘微观组织以珠光体 P 和石墨为主。

由图 4 表明，Nb 添加对摩擦盘微观组织结构有重要影响。首先，石墨组织随 Nb 浓度的增加逐渐细化。文献[14]在研究 Nb 对高速钢 W3Mo2Cr4V 力学性能影响时得到类似结果，认为第二相粒子在奥氏体晶界偏聚产生的钉扎作用是其中关键<sup>[15]</sup>。对此，本研究专门利用 TEM 对奥氏体晶界处微观组织结构进行观察，其结果如图 8a 所示，在奥氏体晶界附近观察到大量粒子，经 EDS 分析属于富铌相（如图 8b 所示），证实了上述论断。

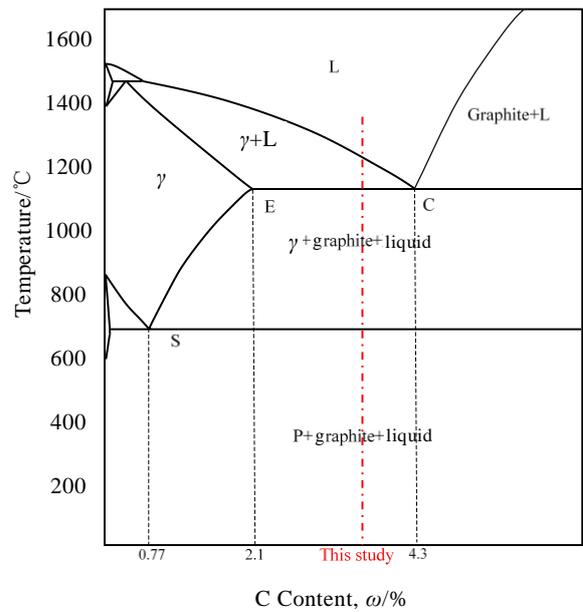


图 7 铁碳合金二元相图

Fig.7 Phase diagram of iron-carbon alloy<sup>[14]</sup>

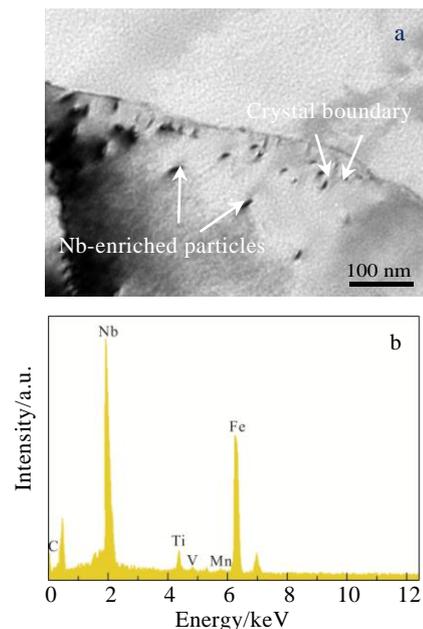


图 8 D2 奥氏体晶界附近的 TEM 照片及富 Nb 颗粒的 EDS 能谱  
Fig.8 TEM image of the austenite crystal boundary for D2 disc (a) and EDS spectrum of the Nb-enriched particles (b)

至于初生奥氏体转变而来的珠光体片层间距，在 Nb 含量 0%~0.21% 范围内，随 Nb 含量增加而减小。这由凝固过程中被细化的初生奥氏体晶粒所决定<sup>[16]</sup>。当 Nb 含量超过临界值，珠光体片间距急剧增加，如图 4d2 所示。针对这一特殊现象，利用 Jmatpro4.0 软件对不同成分熔体的凝固过程进行模拟。图 9 为 D4

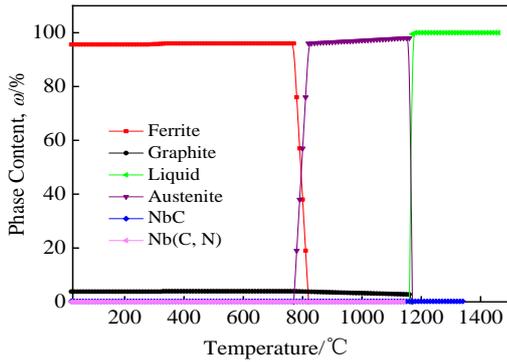


图9 D4 熔体凝固过程中不同相的质量分数

Fig.9 Mass fraction of different phases of D4 during the solidification

熔体凝固过程模拟结果。可以发现,在 1350 °C 左右液相中已经形成碳化铌。作为对比, Nb 浓度较低的 D2 和 D3,在 1140 °C 左右形成的是富 Nb 相。文献[17]针对 NbC 的热力学计算结果表明, Nb 含量 0.23% 为形成 NbC 临界浓度,在一定程度上与本研究结果相吻合。NbC 碳化物具有面心立方 (fcc) 结构,其低晶面指数的 (110)、(100) 和 (111) 与石墨 (0001) 有适宜错配度<sup>[18]</sup>,使得 NbC 在共晶反应中作为异质形核细化石墨组织。但是, NbC 碳化物的形成相应地减少了富奥氏体晶界处富 Nb 相析出,导致初生奥氏体粗化,进而在随后的共析反应中引起珠光体片层间距增加。

从图 5、图 6 显示的摩擦副磨损表面形貌来看,主要有机械犁削和黏着摩擦 2 种作用机制。前者通常由摩擦界面上硬质微凸体或磨料嵌入硬度相对较低材料中引起,又称磨粒摩擦。当摩擦副之间发生相对滑动时,硬质微凸体或磨料在硬度较低材料表面留下大量犁沟痕迹。该过程中,为犁削材料抵抗塑性变形的抗力提供部分摩擦力<sup>[19]</sup>。后者通过分子力或其他形式的键合力在接触平台和摩擦盘之间形成黏着联结点。联结点的断裂抗力为系统提供另一部分摩擦力。前者由较软材料的机械性能(如硬度)决定,而后者受摩擦副真实接触面积和联结点剪切强度影响<sup>[19]</sup>。

当摩擦材料与不同摩擦盘对磨后,磨损表面形貌基本保持不变,而且摩擦副之间黏着联结点的断裂位置出现在树脂基摩擦材料一方。这意味着不同摩擦副间真实接触面积和联结点剪切强度几乎相同。言外之意,系统中黏着摩擦分量保持不变,那么不同摩擦副摩擦性能的差异主要由磨粒摩擦引起。

由图 2a 所示, Nb 含量在 0%~0.21% 范围内,摩擦系数随 Nb 含量增加先增大后减小。根据上述讨论,这是由于 Nb 细化了珠光体组织,改善了摩擦盘的机

械性能,提高了磨粒摩擦等级。当 Nb 含量达到 0.33%,粗大的珠光体组织降低了摩擦盘力学性能,引起磨粒摩擦力降低。在此,借助华银 HB-3000 布氏硬度计对不同摩擦盘进行了测试, D1、D2、D3、D4 对应硬度 (HBS) 分别为 1980、2020、2210、1870 MPa,直接证实上述观点。

随温度升高,所有摩擦副的摩擦系数都呈现逐渐增大趋势,与大量此类研究的结果一致<sup>[20]</sup>。这是因为滑动摩擦过程中产生的磨屑,在压力载荷和剪应力作用下逐渐发展为接触平台<sup>[8]</sup>,接触平台的不断生长增加了摩擦副间真实接触面积,进而导致黏着摩擦分量增加。在高温下,由于树脂基摩擦材料中树脂粘结剂的热降解,每个摩擦副都会出现热衰退现象,而且随 Nb 含量增加,热衰退现象越发严重。这与石墨组织密切相关。许多研究一致认为,石墨含量高、长径比大,有利于提高抗热衰退性能,这由石墨的导热性决定<sup>[3]</sup>。图 4a1~4d1 给出了直接证据,随着 Nb 含量增加,摩擦盘中石墨细化,因此使热衰退加剧。

关于图 3 中摩擦盘的磨损性能,除了磨粒磨损和黏着磨损外,氧化诱导磨损也起着至关重要的作用,这在许多研究中通过氧化铁的存在予以证实<sup>[21]</sup>。一般而言,力学性能优良的金属材料即可以降低硬磨料造成的磨粒磨损,又可以减少黏着摩擦造成的撕裂损伤<sup>[19]</sup>。对于 D1、D2 和 D3, Nb 含量增加细化了摩擦盘珠光体组织,提高其耐磨性。但对于 D4 的严重磨损,与石墨组织细化和珠光体粗化双重因素有关,前者容易引起高温工况下的严重氧化损伤,后者加剧摩擦盘黏着磨损和磨粒磨损。

## 4 结论

1) Nb 添加对灰铸铁显微组织特征有重要影响。在 Nb 含量 0%~0.21% 范围内,随 Nb 含量的增加,石墨和珠光体基体逐渐细化。当 Nb 添加量达到 0.33% 时,石墨组织继续细化,而珠光体基体出现粗化。

2) 在 Nb 含量 0%~0.21% 范围内, Nb 添加可以提高系统摩擦系数,但当超过临界值时,摩擦系数出现明显下降;树脂基摩擦材料的抗热衰退性能随 Nb 含量的增加而降低。

3) 当摩擦盘磨损以磨粒磨损和黏着磨损为主时,添加 0%~0.21% Nb 有利于摩擦盘耐磨性提高;当氧化诱导磨损占主导时, Nb 的添加对摩擦盘耐磨性不利。

## 参考文献 References

- [1] Liu Yu(刘禹), Shan Yingchun(单颖春), Liu Xiandong(刘献栋) et al. *Journal of Mechanical Engineering*(机械工程学

- 报)[J], 2019, 55(8): 97
- [2] Cho M H, Kim S J, Basch R H *et al.* *Wear*[J], 2003, 36(7): 537
- [3] Ghaderi A R, Ahmadabadi M N, Ghasemi H M. *Wear*[J], 2003, 255(1-6): 410
- [4] Polajnara M, Kalina M, Thorbjornsson I *et al.* *Wear*[J], 2017, 382-383(15): 85
- [5] Thornton R, Slatter T, Jones A H *et al.* *Wear*[J], 2011, 271(9-10): 2386
- [6] Cao Guoxin(曹国鑫), Zhang Maicang(张麦仓), Dong Jianxin(董建新) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(1): 103
- [7] Mejía I, Bedolla-Jacunde A, Pablo J R. *Wear*[J], 2013, 301(1-2): 590
- [8] Wang Zhihui(王智慧), He Dingyong(贺定勇). *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2007, 2(1): 55
- [9] Ji Z, Jin H, Luo W *et al.* *Tribology International*[J], 2017, 107: 213
- [10] Wang F H, Liu Y. *Materials and Design*[J], 2014, 57: 449
- [11] Eriksson M, Jacobson S. *Tribology International*[J], 2000, 33(12): 817
- [12] Wang D W, Mo J L, Ouyang H *et al.* *Tribology Letter*[J], 2018, 66(2): 1
- [13] Menezes P L, Kishore, Kailas S V *et al.* *Wear*[J], 2009, 267(1-4): 476
- [14] Zhang Yong(张永). *Special Steel*(特种钢)[J], 2007, 28(3): 44
- [15] Abbasi E, Rainforth W M. *Journal of Materials Science and Technology*[J], 2017, 33(4): 311
- [16] Hamada A S, Karjalainen L P. *Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528(3): 1819
- [17] Yan Yongsheng(阎永生), Zhu Hongbo(朱洪波), Sun Xiaohua(孙小华) *et al.* *Modern Cast Iron*(现代钢铁)[J], 2011(2): 24
- [18] Bramfitt B L. *Metallurgical Transactions*[J], 1970, 1(10): 1987
- [19] Saffar A, Shojaei A. *Wear*[J], 2012, 274-275: 286
- [20] Eriksson M, Lord J, Jacobson S. *Wear*[J], 2001, 249(3): 272
- [21] Österle W, Därfel I, Prietzel C *et al.* *Wear*[J], 2009, 267(5): 781

## Effect of Nb Addition on the Tribology Properties of Gray Cast Iron

Sun Weitao<sup>1</sup>, Huang Xiaoming<sup>1</sup>, Liu Xiaoliang<sup>1</sup>, Zhou Wenlong<sup>2</sup>

(1. College of Mechatronics Engineering, Binzhou University, Binzhou 256600, China)

(2. Key Laboratory of Solidification Control and Digital Preparation Technology (Liaoning Province), School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116085, China)

**Abstract:** The effect of micro-alloyed Nb on the tribology performance of hypoeutectic gray cast iron were studied. Four disc samples containing different contents of Nb (0wt%, 0.12wt%, 0.21wt%, and 0.33wt%) were fabricated. Non-asbestos resin-based friction materials were selected as counterface. The friction test was performed on a constant speed friction machine under different temperature conditions. Prior to test, the microstructure of discs was observed by SEM, TEM and OM. After test, the worn surfaces of friction couples were characterized by SEM. Results show that the friction coefficient increases firstly and then decreases with the increase of the Nb addition. This is determined by the refining effect of Nb on the pearlite matrix. The friction efficiency is adversely influenced by the Nb addition. This is because the as-refined graphite by Nb weakens the heat dissipation capacity. Additionally, the wear resistance of disc increases with the increase of Nb concentration in the range of 0wt%~0.21wt%, but decreases obviously at 0.33wt%. This is closely related to the transformation of wear mechanisms.

**Key words:** micro-alloyed Nb; gray cast iron; tribology performance; microstructure; worn surfaces

Corresponding author: Huang Xiaoming, Ph. D., College of Mechatronics Engineering, Binzhou University, Binzhou 256600, P. R. China, E-mail: hxm2552@163.com