

文章编号: 1004-0609(2004)12-2108-06

镍-铁-石墨-硅自润滑材料及其性能^①

陈丽娟, 朱定一, 汤 伟, 关翔锋
(福州大学 材料科学与工程学院, 福州 350002)

摘 要: 采用熔炼法制备出镍-铁-石墨-硅自润滑材料, 并研究了铁含量对镍-铁-石墨-硅自润滑材料的力学性能、干摩擦磨损性能及油润滑摩擦磨损性能的影响。结果表明: 随着铁含量的增加, 合金中石墨量逐渐增多, 自润滑性能逐渐提高, 材料的冲击韧性和抗拉强度逐渐降低, 硬度值先减小后增大; 材料的干摩擦因数和油润滑摩擦因数均随着铁含量的增加而逐渐降低, 磨损率随着硬度值的增大逐渐减小, 其中 Ni-60Fe-3.5C-1Si 合金(质量分数, %) 的摩擦因数最小, 干摩擦因数和油润滑摩擦因数分别保持在 0.18 和 0.05。

关键词: 镍-铁-石墨-硅合金; 自润滑; 熔炼法; 摩擦磨损

中图分类号: TG 115.5

文献标识码: A

Ni-Fe-C-Si self-lubricating material and its properties

CHEN Li-juan, ZHU Ding-yi, TANG Wei, GUAN Xiang-feng
(School of Materials Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Ni-Fe-C-Si self-lubricating alloy was prepared by melting method. The effects of iron content on the mechanical, dry friction and oil lubrication friction properties were investigated. The results show that with increasing of iron content, the content of graphite and the self-lubrication of the alloy increase, the impact toughness and the tensile strength decrease, and the hardness reduces at first and then increases. Both the coefficients of dry friction and oil lubrication reduce with increasing of iron content, and the wear rate reduces with the increasing of hardness values. The dry friction coefficient of Ni-60Fe-3.5C-1Si alloy (mass fraction, %) is the smallest, and the dry friction and oil lubrication coefficients of the alloy are 0.18 and 0.40, respectively.

Key words: Ni-Fe-C-Si alloy; self-lubricating; melting; friction and wear

镍基合金因其具有优良的抗腐蚀性能和抗氧化性能, 在高温固体自润滑材料中倍受重视, 如镍-铬-石墨系、Ni-Cr-Cu 系和 Ni-MoS₂ 系等^[1-8] 目前均采用粉末冶金法制备。文献[9]表明添加 LaF₃ 的镍基合金的室温干摩擦因数为 0.21~0.37。文献[10]表明铁-青铜-石墨系合金的干摩擦因数为 0.49~0.54, 含油摩擦因数为 0.11~0.13。文献[11]表明采用熔炼法可以制备出新型 Ni₃Al/石墨高温自润滑材料, 铝在镍-铝-石墨系合金中起着强化合金基体的作用, 使材料的硬度和耐磨性显著提

高, 但同时使材料的韧性急剧降低。文献[12]表明镍-石墨二元合金的自润滑性能良好, 但硬度值较低。在镍-石墨合金中加入组元铁, 一方面可以起到对基体的固溶强化作用, 使合金保持良好的抗腐蚀性和抗氧化性; 另一方面可以节约有色金属镍, 降低材料成本。长期以来, 对 Fe-C 合金已进行了较深入的研究, 在工业生产条件下, Fe-C 二元合金中易形成 Fe₃C^[13-14], 减少了石墨的含量, 不利于其自润滑性能的改善, 而金属镍是一种非碳化物形成元素, 可以增加铁的自扩散能力, 促进石墨化。但

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50471007); 福建省自然科学基金资助项目(A0210008); 福建省教育厅科技发展资助项目(K02005) 收稿日期: 2004-06-06; 修订日期: 2004-09-20

作者简介: 陈丽娟(1978-), 女, 硕士研究生。

通讯作者: 朱定一, 博士, 副教授; 电话: 0591-7893540; E-mail: zdy7081@163.com

随着合金中含铁量的增多, 碳化物形成的可能性越来越大, 镍-铁-石墨合金组织中是否会形成 Fe_3C , 目前尚未有相关研究报道。对铸铁的长期研究表明, 硅能够强烈促使碳元素石墨化^[15], 且硅也能固溶于铁素体中, 强化合金基体, 使材料的强度和耐腐蚀性提高, 但当硅超过一定含量后会显著降低材料的韧性。本文作者采用熔炼法制备出镍-铁-石墨-硅系列合金, 在合金中加入 1% 硅以防止 Fe_3C 的形成, 并研究了该系列合金的干摩擦磨损性能和油润滑摩擦磨损性能。

1 实验

1.1 材料制备

采用纯度为 99.8% 的电解镍, 99% 的工业纯铁, 99.8% 的石墨粉, 分别配制 $\text{Ni}20\text{Fe}3.5\text{C}1\text{Si}$ 、 $\text{Ni}40\text{Fe}3.5\text{C}1\text{Si}$ 和 $\text{Ni}60\text{Fe}3.5\text{C}1\text{Si}$ 合金(质量分数, %)。采用真空中频感应炉熔炼, 炉内先用机械泵将低真空抽至 $1.25 \times 10^{-1} \text{ Pa}$, 然后充入氩气进行保护。熔化温度高于 1650°C , 当温度升至熔化温度后保温 8~10 min, 将熔化好的合金浇注到石墨铸型中, 铸型尺寸为 $120 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。

1.2 组织与性能测试

用 MM-6 宽视场显微镜分析凝固组织, 采用 XQF-4A 图像分析仪测定石墨的面密度, 分别在 HB-3000 型布氏硬度机、Instron Model 1185 型万能材料试验机和 294/174J 型冲击试验机上测定材料的布氏硬度、抗拉强度和冲击韧性。其中拉伸试样为平板形试样, 标距段尺寸为 $40 \text{ mm} \times 12.5 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$, 冲击试样为标准无缺口试样, 尺寸为 $55 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。用 MM-200 型磨损实验机分别测定试样的干摩擦磨损性能和油润滑摩擦磨损性能, 油润滑磨损时采用 20# 机油作为润滑油, 试验块尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 对偶环为 GCr15 轴承钢(HRC57), 外径为 $d40 \text{ mm}$, 内径为 $d16 \text{ mm}$, 厚度为 10 mm , 主轴转速为 400 r/min 。在干摩擦磨损条件下, 法向载荷 p 为 49 N ; 在油润滑摩擦磨损条件下, 法向载荷 p 为 98 N 。摩擦磨损时间为 1 h , 每隔 2 min 测量一次摩擦因数。采用感量为 0.1 mg 的电子天平测定试样的磨损质量损失。

2 结果与讨论

2.1 凝固组织

图 1 所示为 3 种合金的凝固组织。由图中可看出, 合金中的石墨均呈片状, 经腐蚀后观察, 3 种合金组织中均没有出现碳化物, 石墨分布均匀。随着铁含量的增加, 石墨的形态发生了变化, 当铁含量为 20% 时, 石墨全部为片状初生相组织; 当铁含量为 40% 时, 除了较粗大的初生相石墨外, 还有细片状共晶石墨组织; 当铁含量为 60% 时, 除了初生相石墨外, 还有不规则的粒状共晶组织。图 2 所示为合金中铁含量与石墨面密度之间的关系曲线。从图中可看出, 随着铁含量的增加, 石墨的面密度越来越高。当铁含量为 60% 时, 石墨的面密度高达 33.4%, 表明在相同的熔炼工艺条件下, 提高合金中的铁含量有利于增加石墨的含量。利用相图分析

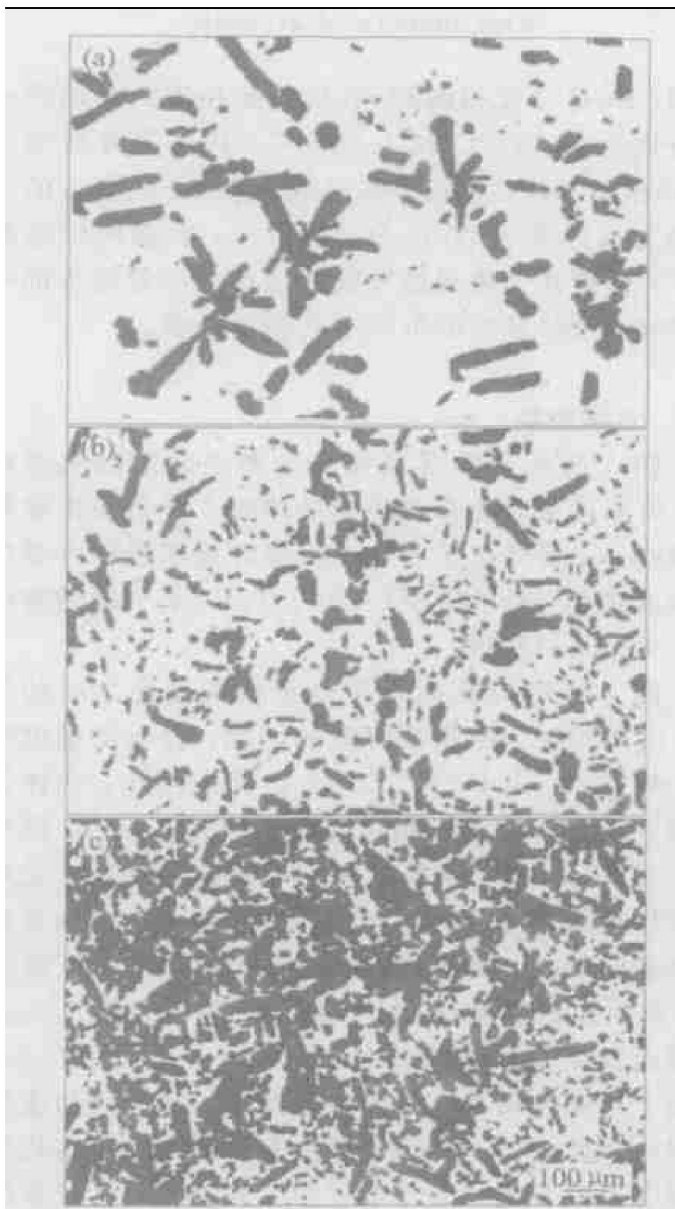


图 1 3 种合金的凝固组织

Fig. 1 Microstructures of alloys

(a) — $\text{Ni}20\text{Fe}3.5\text{C}1\text{Si}$ alloy;

(b) — $\text{Ni}40\text{Fe}3.5\text{C}1\text{Si}$ alloy;

(c) — $\text{Ni}60\text{Fe}3.5\text{C}1\text{Si}$ alloy

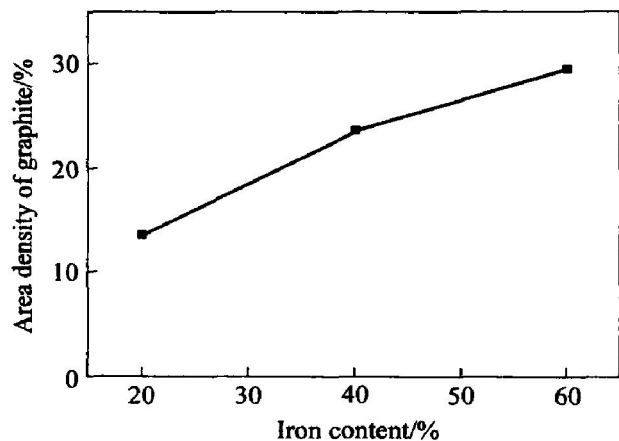


图2 铁含量与石墨面密度之间的关系

Fig. 2 Relationship between iron content and area density of graphite

得到, Fe-C 二元相图和 Ni-C 二元相图的共晶点成分分别为 4.26% C 和 1.97% C, 共晶温度分别为 1 148 和 1 316 °C, 显然共晶成分点 Fe-C 合金的熔碳能力远远高于 Ni-C 合金。因此, 在相同熔炼温度下, 提高铁含量必然导致共晶点向碳量增多的一方移动, 使结晶后的组织中石墨量增多。

2.2 力学性能

图 3 所示为铁含量与合金密度之间的关系曲线。由图可见, 随着铁含量的增加, 合金的密度相应减小, 主要是由于合金中石墨含量随着铁含量的增加而增加, 铁的密度 (7.86 g/cm^3) 小于镍的密度 (8.96 g/cm^3) 所致。

图 4 所示为铁含量与合金布氏硬度之间的关系。由图可见, 随着铁含量的增加, 合金的硬度先减小后增大。由 Fe-Ni 二元合金相图可知, 当铁含量为 20% 时, 室温组织进入相图的有序相区, 形成 AB_3 型 Ni_3Fe 相。由于这种有序相的硬度高于无序固溶体的硬度, 因此, 合金的硬度较高。当铁含量增加到 40% 时, 合金成分接近相图中的共析成分点, 共析点的转变温度为 345 °C, 且在此温度点合金理应发生共析转变: $\gamma(\text{Fe}, \text{Ni}) \rightarrow \alpha\text{-Fe} + \text{Ni}_3\text{Fe}$, 但由于本实验是在石墨型中冷却, 合金的冷却速度较快, 因此, $\gamma(\text{Fe}, \text{Ni})$ 固溶体有可能是由于在较低的温度下没有充分的分解时间, 从而保留了较多的残余奥氏体, 使材料的硬度降低。当铁含量增大到 60%, $\gamma(\text{Fe}, \text{Ni})$ 固溶体在共析转变前首先析出硬度较高的先共析相 $\alpha\text{-Fe}$, 使得合金的硬度有所回升。

图 5 所示为铁含量与合金抗拉强度之间的关

系, 图 6 所示为铁含量与合金室温冲击韧性之间的关系。由图 5 和 6 可以看出, 随着铁含量的增加, 合金的抗拉强度和冲击韧性逐渐降低。合金的强度和韧性与石墨的形态和数量密切相关, 合金中石墨

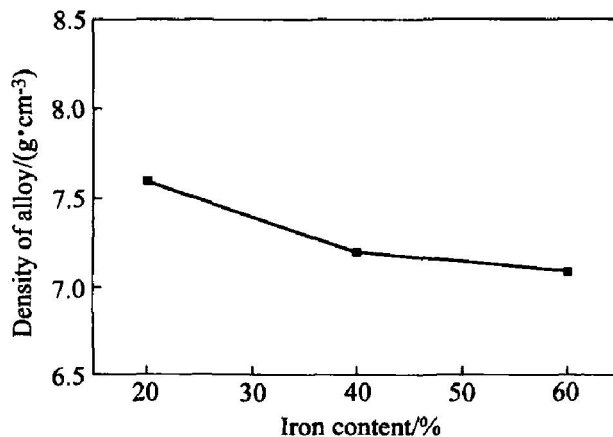


图3 铁含量与合金密度之间的关系

Fig. 3 Relationship between iron content and density

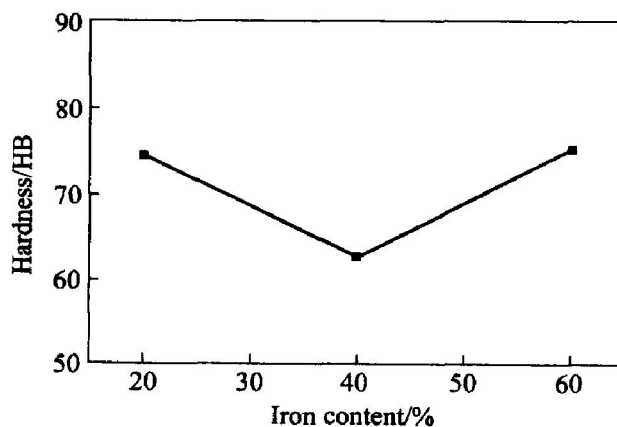


图4 铁含量与合金布氏硬度之间的关系

Fig. 4 Relationship between iron content and hardness

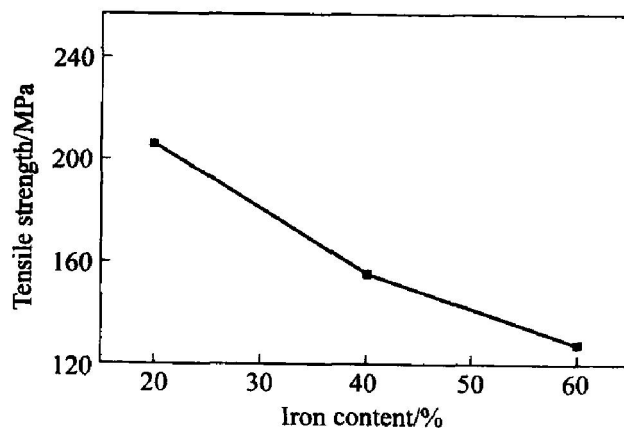


图5 铁含量与合金室温冲击韧性之间的关系

Fig. 5 Relationship between iron content and tensile strength

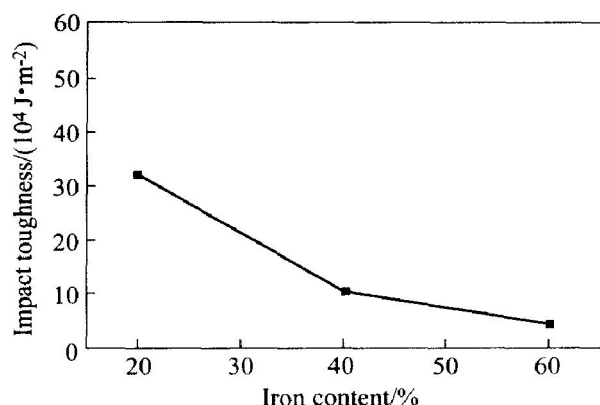


图6 铁含量与合金室温冲击韧性的关系

Fig. 6 Relationship between iron content and impact toughness

量随着铁含量的增加而增加,因而材料的强度和韧性降低,由于Ni-60Fe-3.5C-1Si合金中的石墨含量最高,所以其抗拉强度和冲击韧性最低。由石墨的生长形态可以发现,Ni-40Fe-3.5C-1Si和Ni-60Fe-3.5C-1Si的合金组织中均有许多细片状或粒状共晶石墨,这种细片状共晶石墨组织对合金基体将产生严重的割裂作用,进一步导致合金的强度和冲击韧性降低。

2.3 铁含量对合金的干摩擦磨损性能和油润滑摩擦磨损性能的影响

图7所示为镍-铁-石墨-硅合金与GCr15轴承钢之间的干摩擦磨损曲线,图8所示为镍-铁-石墨-硅合金与GCr15轴承钢之间的油润滑摩擦磨损曲线。由图7和8可以看出,经过磨合期以后,材料的摩擦因数趋于稳定,无论是在干摩擦磨损条件下还是在油润滑摩擦磨损条件下,Ni-60Fe-3.5C-1Si合金的摩擦因数均最小,其值分别为0.18和0.05,与其组织中的石墨含量最高的相对应;而Ni-20Fe-3.5C-1Si合金的摩擦因数相对较大,与其组织中的石墨含量较低的相对应。这表明组织中石墨含量增多有利于改善材料的润滑性能。Ni-60Fe-3.5C-1Si合金的摩擦因数比粉末冶金法制备的铁-青铜-石墨系合金的干摩擦因数和含油摩擦因数都小^[10],表明采用熔炼法制备的镍-铁-石墨-硅系合金具有优良的自润滑性能。图9所示为镍-铁-石墨-硅合金在干摩擦磨损和油润滑摩擦磨损条件下铁含量对磨损率的影响。比较图4和9可以看到,镍-铁-石墨-硅系合金的磨损率随着材料硬度的减小而增大,Ni-40Fe-3.5C-1Si合金的硬度最低,磨损率相对较大,而Ni-60Fe-3.5C-1Si合金的硬度值较高,

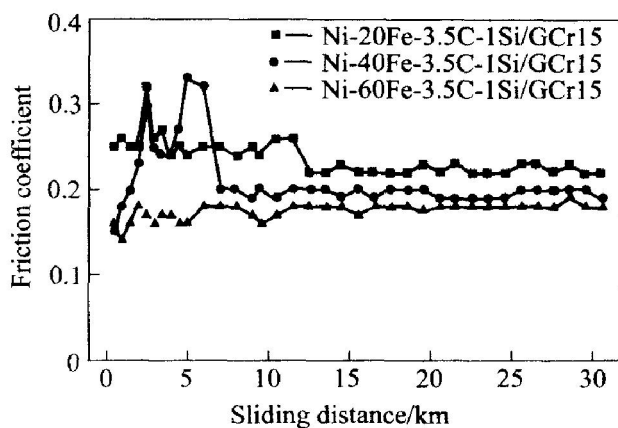


图7 镍-铁-石墨-硅合金与

GCr 轴承钢之间的干摩擦磨损曲线

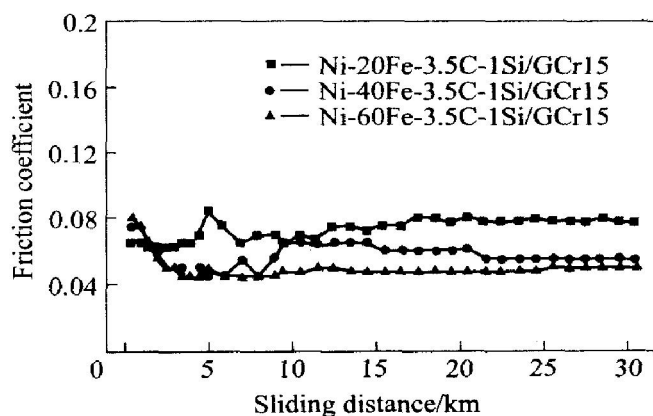
Fig. 7 Dry frictional curves of Ni-Fe-C-Si alloy against GCr15 bearing steel

图8 镍-铁-石墨-硅合金与GCr 轴承钢之间的油润滑摩擦磨损曲线

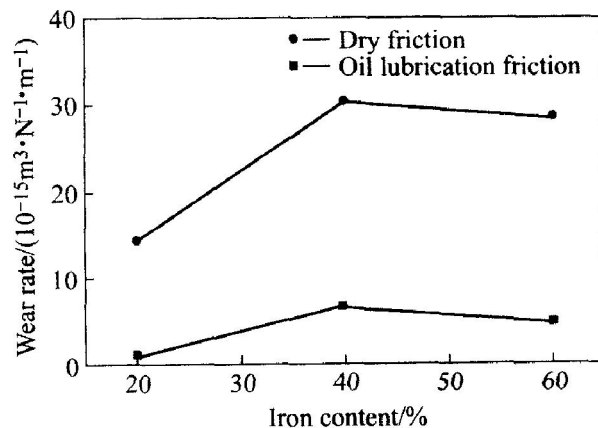
Fig. 8 Oil frictional curves of Ni-Fe-C-Si alloy against GCr15 bearing steel

图9 铁含量对合金在干摩擦和油润滑条件下的磨损率影响

Fig. 9 Effects of iron content on wear rate of alloy under dry and oil lubrication frictions

组织中的石墨含量相对较多,因而,其自润滑性能较好,磨损率较低。镍-铁-石墨-硅合金的油润滑摩擦性能优良,在含油的条件下,形成了一种复合润滑体系,石墨具有很强的吸油能力,能形成高效的胶体油石墨润滑剂。另外,由于细微的石墨颗粒嵌入摩擦面的凹坑中,使油膜不易破裂^[16],因此,在油润滑摩擦磨损条件下,材料具有良好的耐磨性。

3 结论

1) 采用熔炼法制备出镍-铁-石墨-硅固体自润滑材料,形成了石墨与固溶体两相组织,石墨分布均匀,且合金中无碳化物形成。

2) 随着铁含量的增加,合金中的石墨量相应增加,材料的自润滑性能相应提高,干摩擦系数和油润滑摩擦因数相应减小,材料的磨损率随着硬度值的增大而减小,其中 Ni-60Fe-3.5C-1Si 合金的干摩擦磨损性能和油润滑摩擦磨损性能均最好。

3) 随着铁含量的增加,镍-铁-石墨-硅合金的密度、抗拉强度和冲击韧性均下降,而合金的硬度先减小后增大。

REFERENCES

- [1] LU Jir-jun, YANG Sheng-rong, WANG Jing-bo, et al. Mechanical and tribological properties of Ni-based alloy/CeF₃/graphite high temperature self-lubricating composites[J]. Wear, 2001, 249(12): 1070 - 1076.
- [2] XIONG Dang-sheng. Lubrication behavior of Ni-Cr-based alloys containing MoS₂ at high temperature[J]. Wear, 2001, 251(1-12): 1094 - 1099.
- [3] 刘如铁, 李溪滨, 程时和. Ni-Cr-Mo-S 合金的自润滑机理[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(2): 470 - 474.
LIU Rutie, LI Xibin, CHENG Shirhe. Self-lubrication mechanism of Ni-Cr-Mo-S alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(2): 470 - 474.
- [4] 李溪滨, 龚雪冰, 刘如铁, 等. 添加 CaF₂ 的 Ni-Cr-Cu 基固体自润滑材料的研究[J]. 润滑与密封, 2003(1): 30 - 32.
LI Xibin, GONG Xuebing, LIU Rutie, et al. A study of Ni-Cr-Cu high temperature self-lubricating alloy added with CaF₂[J]. Lubrication Engineering, 2003(1): 30 - 32.
- [5] 刘如铁, 李溪滨. MoS₂ 对镍基自润滑材料摩擦学特性影响[J]. 粉末冶金技术, 2000, 18(1): 31 - 34.
LIU Rutie, LI Xibin. Effect of MoS₂ addition on the tribological characteristics of self-lubricating Ni-based material[J]. Powder Metallurgy Technology, 2000, 18(1): 31 - 34.
- [6] 熊党生. 添加稀土化合物对镍基自润滑合金机械及高温摩擦特性的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2002, 31(2): 144 - 147.
XIONG Dang-sheng. The effect of rare earth compounds on the mechanical and high-temperature tribological properties of Ni-based self-lubricating alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2002, 31(2): 144 - 147.
- [7] 刘如铁, 李溪滨, 苏春明, 等. 镍基高温自润滑材料[J]. 湖南有色金属, 1998, 14(3): 25 - 29.
LIU Rutie, LI Xibin, SU Chunming, et al. Ni-based high-temperature self-lubricating material[J]. Hunan Nonferrous Metals, 1998, 14(3): 25 - 29.
- [8] 吴运新, 汪复兴, 程荫芊. 热压工艺对 Ni-MoS₂ 自润滑复合材料组织与性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 1997, 5(1): 107 - 110.
WU Yunxin, WANG Furxing, CHENG Yin-qian. Influence of hot-pressing technologies on microstructures and properties of Ni-MoS₂ self-lubricating composites[J]. Material Science & Technology, 1997, 5(1): 107 - 110.
- [9] 熊党生. 氟化钨对镍基自润滑合金力学性能及高温摩擦学特性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(1): 470 - 474.
XIONG Dang-sheng. Effect of LaF₃ on mechanical and high-temperature tribological properties of Ni-based self-lubricating alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(1): 470 - 474.
- [10] 牛淑琴, 欧阳锦林. 铁-石墨系含油自润滑复合材料的研究与应用[J]. 固体润滑, 1990, 10(1): 15 - 21.
NIU Shu-qin, OUYANG Jin-lin. The study and application of oil-graphite composite materials[J]. Journal of Solid Lubrication, 1990, 10(1): 15 - 21.
- [11] 朱定一, 关翔锋, 陈丽娟, 等. 新型 Ni₃Al-石墨高温固体自润滑材料的制备及其性能[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(4): 528 - 533.
ZHU Ding-yi, GUAN Xiang-feng, CHEN Lirjuan, et al. Preparation and properties of high-temperature self-lubricating Ni₃Al/graphite alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(4): 528 - 533.
- [12] 朱定一, 关翔锋, 兑卫真, 等. Ni-石墨高温自润滑材料的熔炼制备及组织性能[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(5): 707 - 712.
ZHU Ding-yi, GUAN Xiang-feng, DUI Weizhen, et al. Preparation and structure property of high-temperature self-lubricating Ni-graphite alloy by melting method

- [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(5): 707-712.
- [13] WU Weirze, ZHU Zhen-ping, LIU Zhen-yu. A study of the explosion of Fe-C hybrid xerogels and the solid products[J]. Carbon, 2003, 41(2): 309-315.
- [14] 蒋克, 张根元. 钒、钛元素对 Fe-C 合金等温转变动力学和形成组织的影响[J]. 金属热处理, 2000(4): 21-24.
- JIANG Ke, ZHANG Gen-yuan. Influence of V and Ti on isothermal transformation kinetics and formed microstructure in Fe-C alloys[J]. Heat Treatment of Metals, 2000(4): 21-24.
- [15] 周继扬. 球状石墨的形核与孕育——球墨铸铁基础理论的最新发展(一)[J]. 现代铸铁, 2003(3): 8-12.
- ZHOU Jiyang. Nucleation of spheroidal graphite and inoculation recent development of the basic theory of spheroidal graphite cast iron (I) [J]. Modern Cast Iron, 2003(3): 8-12.
- [16] 宁莉萍, 王静波, 欧阳锦林, 等. 铜和石墨对铁基含油自润滑复合材料机械及摩擦学性能的影响[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(5): 335-339.
- NING Liping, WANG Jing-bo, OUYANG Jin-lin, et al. Effect of copper and graphite on the mechanical and tribological properties of Fe-based oil-containing self-lubricating composites[J]. Tribology, 2001, 21(5): 335-339.
- (编辑 李艳红)