

Mn 和 Ce 对 Fe-Ni-Mn-C-Si-Ce 系合金组织和性能的影响

卢 铃, 朱定一, 汪才良

(福州大学 材料科学与工程学院, 福州 350002)

摘 要: 采用熔炼法制备出新型高耐磨的 Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si 系固体自润滑材料, 研究稀土元素 Ce 对 Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si 系合金中石墨的球化作用及 Mn 含量对力学性能及摩擦磨损性能的影响。结果表明: 随着 Mn 含量的增加, 合金凝固组织中奥氏体的硬度逐渐增大, 特别是 Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si-0.75Ce 系合金在摩擦过程中的表面硬度大幅度提高, 呈现出高锰钢特有的表面加工硬化性质, 通过 TEM 可以观察到磨损表面生成孪晶型马氏体; 添加 0.75%(质量分数)的稀土 Ce 可以使结晶的石墨球化, 使抗拉强度和抗弯强度大幅度提高, 大约比未经球化处理的提高 3~5.8 倍; 稀土 Ce 的加入可以促进 $Fe_{1.1}Mn_{3.9}C_2$ 型碳化物的生成, 使材料的耐磨性进一步提高, 其中 Fe-20Ni-16Mn-3.5C-2.5Si-0.75Ce 合金的磨损率最低, 大约是 QT500 球墨铸铁的 1/13。

关键词: Fe-Ni-Mn-C-Si-Ce 合金; 高锰奥氏体; MnCe; 加工硬化; 摩擦; 磨损

中图分类号: TG 143.9

文献标识码: A

Effects of Mn and Ce additions on structures and properties of Fe-Ni-Mn-C-Si-Ce alloys

LU Ling, ZHU Ding-yi, WANG Cai-liang

(College of Materials Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si solid self-lubricating materials with property of high-wearing were prepared by melting method. The spheroidization effect of rare earth Ce on graphite and the effect of Mn addition on mechanical properties and tribological performances of Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si alloys were studied. The results show that the austenite hardness of solidifying structures increases as the manganese content increases. The surface hardness of Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si-0.75Ce alloy increases widely after being worn and it appears the work-hardening of surface as like the high manganese-containing steel. The type of compound twin martensite on surface can be observed by TEM. The spheroidization effect of 0.75%(in mass fraction)of rare earth cerium on the graphite during crystallization is effective. The spheroidized alloy has higher tensile strength and flexural strength which is about 3–5.8 times higher than those of the non-spheroidized alloy. With the addition of rare earth Ce, the second phase $Fe_{1.1}Mn_{3.9}C_2$, which makes the wear resisting property further increase, appears in matrix. Fe-20Ni-12Mn-3.5C-2.5Si -0.75Ce alloy has the lowest wear rate which is about 13 times lower than that of the spheroidal cast iron.

Key words: Fe-Ni-Mn-C-Si-Ce alloy; high manganese austenite; Mn; Ce; work-hardening; friction; wear

长期以来, 人们通过对铸铁中石墨的球化处理作了大量的研究工作, 获得了性能优良的球墨铸铁合金^[1-3]。石墨经球化处理后, 由于减弱了片状石墨尖

端对材料基体的割裂及应力集中效应, 使铸铁的韧性得到提高。从工业应用的角度来看, 进一步提高材料的耐磨性十分重要, 如目前的发动机活塞环广泛使用

球墨铸铁合金制造,但耐磨性仍需进一步提高。文献[4]报道了用熔炼法制备Fe含量为20%~60%(质量分数)的Ni-Fe-C-Si系合金,在该合金中加入组元Ni能够扩大奥氏体相区,提高了材料的耐腐蚀性和韧性,并且随着Fe含量的增加,合金的自润滑性能逐渐提高,材料的成本有所降低。文献[5]在上述研究的基础上用熔炼法制备不同Si含量的Fe-20Ni-3.5C固体自润滑合金,研究表明当Si含量为2.5%(质量分数)时,材料的干摩擦系数和磨损率随着合金硬度的提高而降低,其中Fe-20Ni-3.5C-2.5Si合金的摩擦系数最低,材料耐磨性有所提高。考虑到在同样是奥氏体基体的条件下,高锰奥氏体钢在受到摩擦或者冲击力时表面具有强烈的加工硬化特性,可以大幅度提高材料表面的硬度,而心部仍然保持良好韧性,广泛应用于坦克的履带,铲车、挖掘机等磨损部件上。为了获得一种既有高锰钢的耐磨性又有石墨的润滑特性的新型材料,本文作者在上述研究的基础上,在合金中加入组元Mn,以进行探索性研究。然而最初的研究结果表明,在普通凝固条件下,Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si系合金中的石墨均呈片状形貌,强度较低。为进一步改善石墨的形态和分布,本文作者还研究了添加稀土元素Ce对Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si系合金中石墨的球化作用以及对合金力学性能和摩擦磨损性能的影响。

1 实验

1.1 材料制备

采用生铁(含有4.1%的C,1.2%的Si,余为Fe)为基础原料,用纯度为99.8%的电解镍、99.8%的电解锰及99.8%的石墨粉作为添加的合金元素,用纯度为98%的稀土Ce作为球化剂。按质量分数分别配制Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si($x=4, 8, 12, 16$)和Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si-0.75Ce($x=4, 8, 12, 16$)共8种不同成分的合金。选用QT500球墨铸铁作为摩擦磨损性能对比试样。采用SP-30B型高频感应加热熔炼炉在空气环境中进行熔炼,熔炼温度约为1700℃。

1.2 组织观察与性能测试

用XJL-03型立式显微镜观察凝固组织,用Technai G2 F20型场发射透射电镜(FTEM)观察分析合金磨损后的表面微观形貌,用日本岛津XD-5A型X射线衍射仪对Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si系合金进行物相分析。用HX-1000型维氏显微硬度仪测定材料基体的显微硬度;用Instron Model 1185型万能材料试验机

测定材料的抗拉强度;用CMT6104型微机控制电子万能材料试验机测定材料的抗弯强度。在MM-200型磨损实验机上测试试样的干摩擦磨损性能,主轴转速为420 r/min,法向载荷 F 为49 N,摩擦磨损时间为1 h。

2 结果与讨论

2.1 Mn和Ce对凝固组织的影响

图1(a)、1(c)、1(e)和1(g)所示分别为Fe-20Ni-4Mn-3.5C-2.5Si合金、Fe-20Ni-8Mn-3.5C-2.5Si合金、Fe-20Ni-12Mn-3.5C-2.5Si合金、Fe-20Ni-16Mn-3.5C-2.5Si合金未加球化剂处理的凝固组织(以下图和表中未经球化剂处理的凝固组织均以N简略表示);图1(b)、1(d)、1(f)和1(h)所示分别为浇铸前用0.75%(质量分数)的稀土Ce进行球化处理后的凝固组织(以下图和表中经球化剂处理的凝固组织均以S简略表示)。从图1可以看到,未经球化处理的合金凝固组织由粗大的初生相片状石墨与细片状共晶石墨组成。实验发现,片状石墨的长度随着Mn含量的增加而增大。Mn是一种亲氧的元素,随着液态合金中Mn含量的增加,在熔炼过程中溶解于液态合金中O含量会逐渐提高,而溶解于液态金属中的O原子和S原子是促使石墨片状生长的重要因素^[6-10]。稀土Ce对Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si系合金中的石墨具有良好的球化作用。石墨经球化处理后,形态趋于球状或雪花状,降低了片状石墨的尖端应力集中效应。在Mn含量为12%时,凝固组织中的石墨面密度达到了相对高值,但总体来看,加入元素Ce后,凝固组织中的石墨面密度有所降低。这是因为稀土元素Ce是一种反石墨化元素,Ce的加入会促进碳化物的形成。从图1(a)、1(c)、1(e)、1(g)所示的凝固组织中可以看到,当不加稀土元素Ce时,除了Fe-20Ni-8Mn-3.5C-2.5Si合金外,其它3种合金中均无第二相生成;而添加Ce后,4种合金的凝固组织中都有白色第二相生成,见图1(b)、1(d)、1(f)、1(h)中的箭头B处所示。这些白色第二相分布在奥氏体枝晶间,呈点状及条状形态。

图2所示为Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si系4种合金的X射线衍射谱,图3所示为添加Ce后4种合金的X射线衍射谱。通过标定,这8种合金含有的两个共同物相是:面心立方的铁镍固溶体 γ (Fe, Ni)和石墨。在Fe-20Ni-8Mn-3.5C-2.5Si合金凝固组织中生成的第二相是 $Fe_{1.8}Mn_{1.2}C$ 型碳化物,见图1(c)中的箭头A处所示;而添加稀土元素Ce后,4种合金凝固组织中生

成的第二相均为 $\text{Fe}_{1.1}\text{Mn}_{3.9}\text{C}_2$ 型碳化物, 表明加入稀土元素 Ce 可以促进 $\text{Fe}_{1.1}\text{Mn}_{3.9}\text{C}_2$ 型碳化物的生成。

2.2 Mn 和 Ce 对力学性能的影响

$\text{Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si}$ 系合金未经球化处理与经过球化处理后奥氏体基体的显微硬度数据见表 1。从表 1 中可以看到, 当没有添加稀土元素 Ce 时, 随着 Mn 含量的增加奥氏体基体的硬度有所提高, 表明

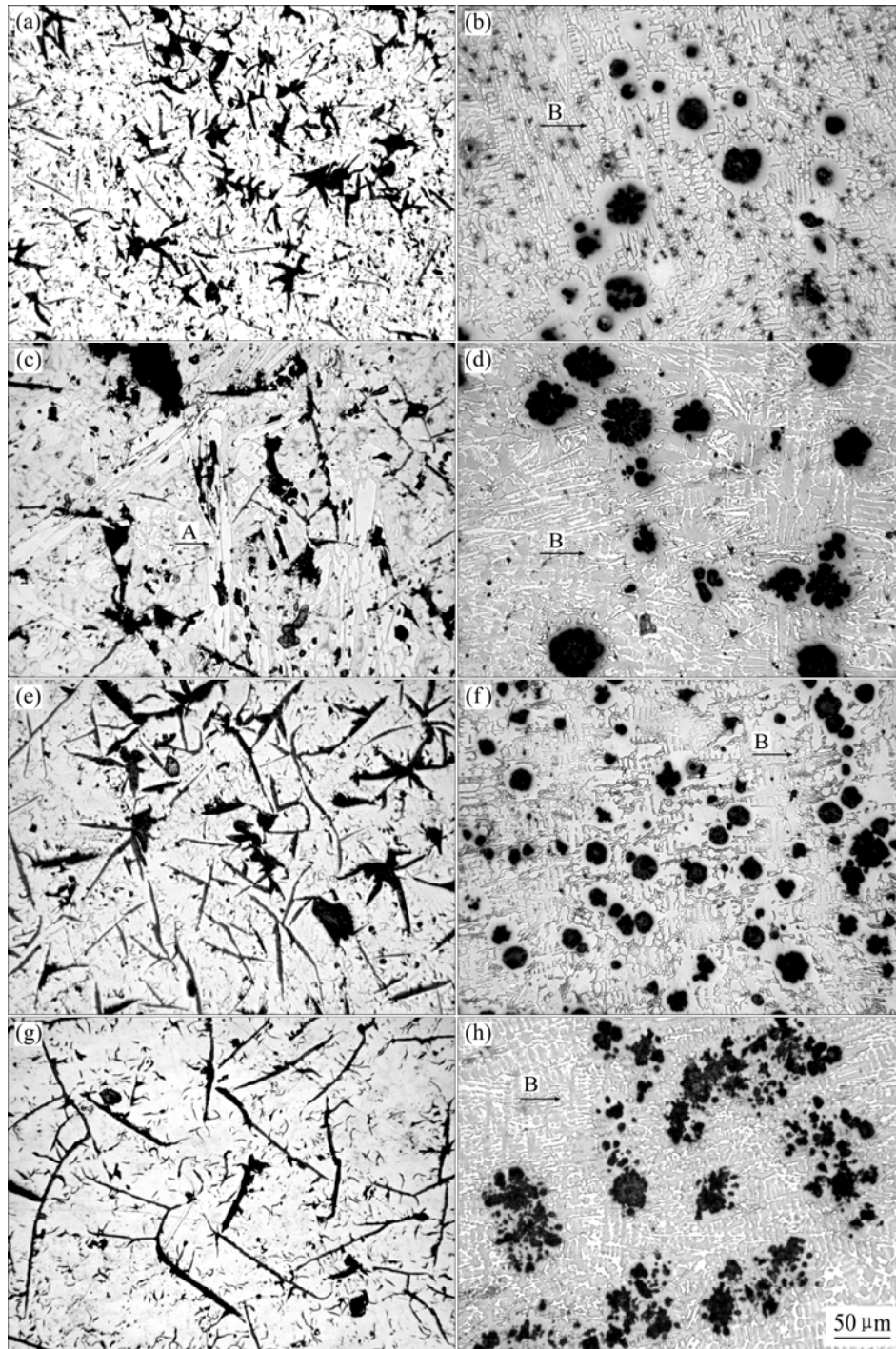


图 1 $\text{Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si}$ 系合金的凝固组织

Fig.1 Microstructures of $\text{Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si}$ alloys: (a) $\text{Fe-20Ni-4Mn-3.5C-2.5Si}$ alloy; (b) $\text{Fe-20Ni-4Mn-3.5C-2.5Si-0.75Ce}$ alloy; (c) $\text{Fe-20Ni-8Mn-3.5C-2.5Si}$ alloy; (d) $\text{Fe-20Ni-8Mn-3.5C-2.5Si-0.75Ce}$ alloy; (e) $\text{Fe-20Ni-12Mn-3.5C-2.5Si}$ alloy; (f) $\text{Fe-20Ni-12Mn-3.5C-2.5Si-0.75Ce}$ alloy; (g) $\text{Fe-20Ni-16Mn-3.5C-2.5Si}$ alloy; (h) $\text{Fe-20Ni-16Mn-3.5C-2.5Si-0.75Ce}$ alloy

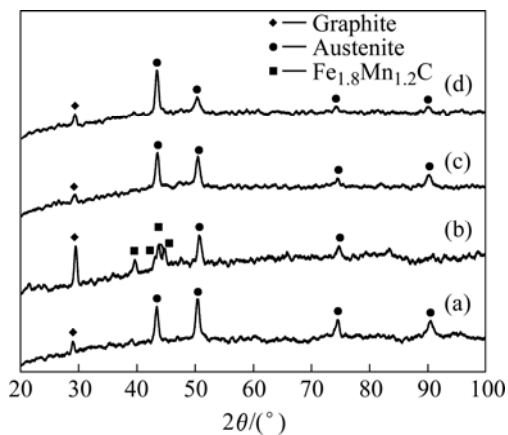


图2 Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si 系合金的 X 射线衍射谱
Fig.2 XRD patterns of Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si alloys: (a) Fe-20Ni-4Mn-3.5C-2.5Si alloy; (b) Fe-20Ni-8Mn-3.5C-2.5Si alloy; (c) Fe-20Ni-12Mn-3.5C-2.5Si alloy; (d) Fe-20Ni-16Mn-3.5C-2.5Si alloy

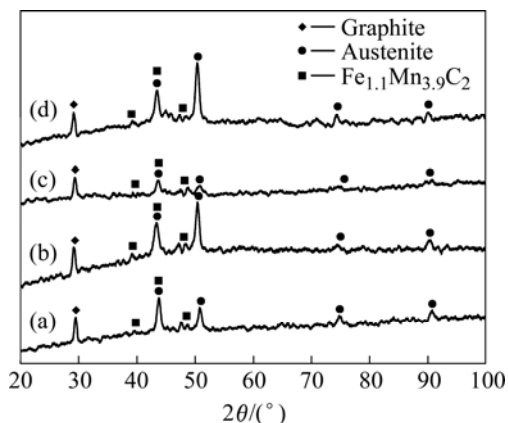


图3 Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si-0.75Ce 系合金的 X 射线衍射谱
Fig.3 XRD patterns of Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si-0.75Ce alloys: (a) Fe-20Ni-4Mn-3.5C-2.5Si-0.75Ce alloy; (b) Fe-20Ni-8Mn-3.5C-2.5Si-0.75Ce alloy; (c) Fe-20Ni-12Mn-3.5C-2.5Si-0.75Ce alloy; (d) Fe-20Ni-16Mn-3.5C-2.5Si-0.75Ce alloy

表1 Mn 含量及球化处理对合金硬度的影响

Table 1 Effects of Mn content and spheroidization on hardness of alloys

| Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si alloy | Hardness of austenite(HV) | | Hardness of second phase(HV) | |
|------------------------------|---------------------------|-------|------------------------------|-------|
| | N | S | N | S |
| x=4 | 242.4 | 271.0 | — | 486.9 |
| x=8 | 244.8 | 282.5 | 717.2 | 566.7 |
| x=12 | 252.8 | 313.8 | — | 570.5 |
| x=16 | 306.7 | 330.9 | — | 576.6 |

N—Without spheroidization; S—Spheroidization

随着 Mn 在奥氏体基体中固溶量增大, 固溶强化作用有所增强, 提高了基体的硬度。但从表 1 中的硬度数据可以看到, 仅靠提高 Mn 含量, 奥氏体硬度增幅并不大, 而加入稀土元素 Ce 后, 奥氏体基体的硬度进一步提高, 表明加入稀土元素 Ce 可以提高奥氏体基体硬度, 分析认为, 由于稀土元素 Ce 是反石墨化元素, Ce 的加入促进了 C 原子在奥氏体八面体间隙中的固溶量, 使奥氏体的硬度增大。从表 1 中还可以看到, 添加 Ce 后, 凝固组织中生成的 $Fe_{1.1}Mn_{3.9}C_2$ 型碳化物的硬度明显高于奥氏体的硬度, 从而使合金整体的硬度值大幅度提高, 这对提高材料的耐磨性具有重要作用。

图 4 所示为 Mn 含量及球化处理对合金抗拉强度的影响, 图 5 所示为 Mn 含量及球化处理对合金抗弯强度的影响。从图 4 和 5 可以看到, 合金的抗拉强度及抗弯强度的变化趋势基本一致, 随着 Mn 含量的增加, 强度逐渐提高, 在 Mn 含量为 8% 时达到相对高值; 实验发现在熔炼的几种合金中该成分合金的石墨含量相对最低, 减弱了石墨对基体的割裂作用, 降低了材料的脆性; Mn 含量继续增加时, 两者强度逐渐呈降低趋势。通过对比图 4 和 5 可以看到, 经球化处理后, Mn 含量为 16% 的合金抗拉强度降低幅度较大, 而抗弯强度的降幅较小。经分析认为, 在拉伸条件下, 裂纹扩展对凝固组织形态及组织中存在的缺陷更为敏感。实验数据也证实了这一点, 当 Mn 含量为 16% 时, 抗拉强度的数据比较分散, 数值波动较大, 平均值较低, 而抗弯强度的数据比较稳定; 而当 Mn 含量为 16% 时, 添加 0.75% 的稀土元素 Ce 已经不能使石墨完全球化。没有完全球化的石墨在拉伸条件下应力集中效应将增大, 裂纹更容易扩展。经过球化处理后, 合金的抗拉强度、抗弯强度大幅度提高, 大约比未经球化处理合金的强度提高了 3~5.8 倍, 表明稀土元素 Ce 的加入可以大幅度提高材料的强度。研究表明, 合金的强度和韧性与石墨的形态和数量密切相关, 细长片状石

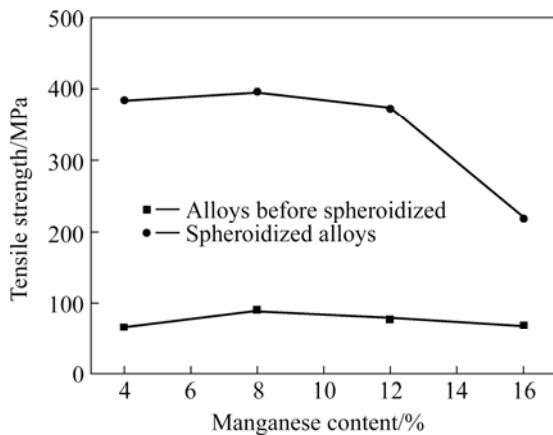


图 4 Mn 含量及球化处理对合金抗拉强度的影响
 Fig.4 Effects of Mn content and spheroidization on tensile strength of alloys

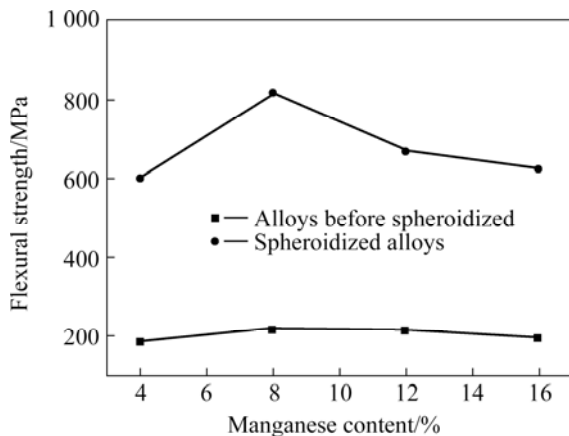


图 5 Mn 含量及球化处理对合金抗弯强度的影响
 Fig.5 Effects of Mn content and spheroidization on flexural strength of alloys

墨和大量的共晶石墨的尖端应力集中效应对基体的割裂作用大, 增大了材料的脆性, 导致合金的强度降低; 经球化处理合金的石墨形态大部分为球状或雪花状石

墨, 消除了片状石墨的尖端应力集中效应, 降低了材料的脆性, 强度随之提高。加入稀土元素 Ce 后, 由于固溶于奥氏体中的 C 原子数量增多, 奥氏体基体的硬度进一步提高, 见表 1 中数据, 这对提高该合金的强度也起到了重要作用。

2.3 Mn 和 Ce 对摩擦磨损性能的影响

图 6 所示为 Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si-0.75Ce 系合金与 GCr15 轴承钢之间的干摩擦磨损曲线。由图可见, 经过一段时间的磨合期后, 摩擦因数趋于稳定, 其中 Mn 含量为 12% 的合金摩擦因数较低, 保持在 0.30 左右, 这与该合金具有相对较高的石墨面密度相对应, 见图 1(f)中所示的凝固组织。当石墨在组织中分布比较均匀时, 石墨在磨损过程中能够在合金表面形成较致密的润滑膜, 降低材料的摩擦因数^[11]。表 2 列出了 Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si 系合金未经球化处理与经过球化处理后的摩擦磨损性能数据。从表 2 中的数据可以看到, 当 Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si 系合金未经球化

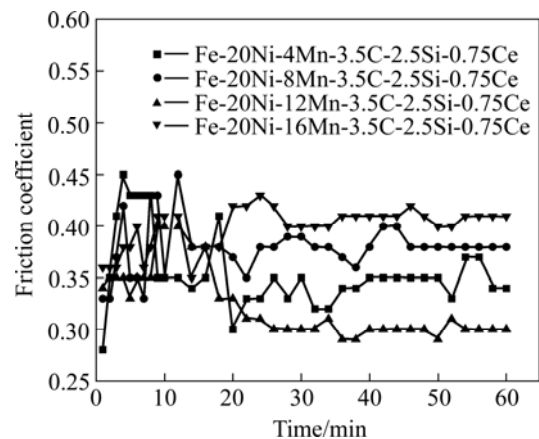


图 6 Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si-0.75Ce 系合金与 GCr15 轴承钢之间的干摩擦磨损曲线

Fig.6 Dry frictional curves of Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si-0.75Ce alloys against GCr15 bearing steel

表 2 Mn 含量及球化处理对合金摩擦磨损性能的影响

Table 2 Effects of Mn content and spheroidization on friction and wear properties of alloys

| Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si alloy | Dry friction coefficient | | Wear rate/(10 ⁻¹⁴ m ³ ·N ⁻¹ ·m ⁻¹) | |
|------------------------------|--------------------------|------|---|-------|
| | N | S | N | S |
| x=4 | 0.40 | 0.35 | 15.1 | 0.806 |
| x=8 | 0.43 | 0.38 | 0.339 | 0.689 |
| x=12 | 0.47 | 0.30 | 5.45 | 0.530 |
| x=16 | 0.50 | 0.41 | 3.79 | 0.272 |

N—Without spheroidization; S—Spheroidization

处理时,摩擦因数随着 Mn 含量的增加而增大,从图 1(a)、1(c)、1(e)、1(g)所示的凝固组织可以看到,随着 Mn 含量的增加,片状石墨的长度逐渐增大,石墨在组织中分布的均匀性相对降低,在磨损过程中不利于在接触表面形成完整的润滑膜,导致摩擦因数有所升高。经球化处理后的合金,摩擦因数有所降低。稀土元素 Ce 的加入提高了奥氏体基体的硬度,促进凝固组织中第二相 $Fe_{1.1}Mn_{3.9}C_2$ 型碳化物的生成,因而使材料的硬度值大幅度提高,从而降低了材料表面的粘着磨损。

表 2 中的磨损率数据表明,未经球化处理合金中, Mn 含量为 8% 的磨损率达到了相对低值。这是由于其他成分凝固组织中都没有第二相生成,而 Mn 含量为 8% 的第二相 $Fe_{1.8}Mn_{1.2}C$ 型碳化物的显微硬度很高达到了 HV717.2。当基体中奥氏体硬度变化不大时,高硬度的第二相将使磨损率大幅度降低。经 Ce 球化处理后,合金的磨损率大幅度降低,大约是未球化处理合金的 1/10~1/18(Mn 含量为 8% 的合金除外),磨损率呈现随着材料硬度的增大而减小的趋势。图 7 所示为经 Ce 球化处理后 Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si-0.75Ce 系合金磨损前后的表面显微硬度值。从图 7 中可以看到,磨损前奥氏体基体的硬度较低,最高为 HV330.9,第二相碳化物的平均硬度为 HV550;而磨损后的表面整体硬度大幅度提高(由于磨损后不能分辨表面的各相区,该硬度测的是表面组织的整体硬度),最高达到 HV806,呈现出高锰钢特有的表面加工硬化性质。关于高锰钢加工硬化的机理有很多种解释:如形变诱发马氏体相变硬化机理、孪晶硬化机理、位错硬化机理等^[12-18]。本实验通过 Technai G2 F20 场发射透射电镜研究了 Fe-20Ni-16Mn-3.5C-2.5Si-0.75Ce 合金磨损后

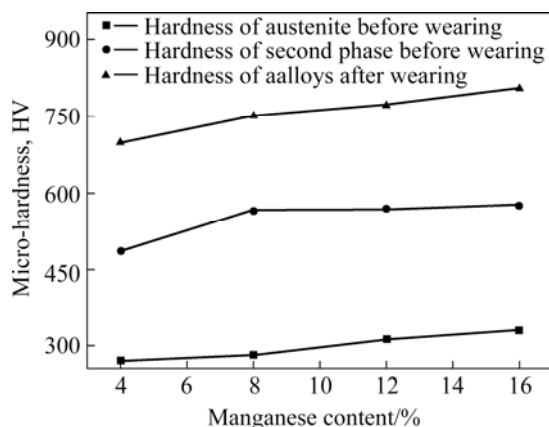


图 7 添加 Ce 的合金表面磨损前后的显微硬度

Fig.7 Curves of surface hardness of alloys vs Ce addition before and after wearing

的表面微观形貌,如图 8 所示。由图可见,除了在奥氏体基体上形成了高密度位错外,如图 8 中箭头 C 所示,还产生了大量形变诱发孪晶型马氏体,见图 8 中箭头 D 所示。这表明该合金系的表面加工硬化主要是形变诱发马氏体和高密度位错的综合作用。因此,添加稀土元素 Ce 后,合金中形成的碳化物以及摩擦磨损过程中产生的形变诱发孪晶型马氏体和高密度位错,是该合金的耐磨性显著提高的主要原因。从图 7 可以看到,经磨损后 Fe-20Ni-16Mn-3.5C-2.5Si-0.75Ce 合金的表面硬度最高,其磨损率最小。相同条件下进行的对比实验表明,该合金的磨损率约为 QT500 球墨铸铁($3.69 \times 10^{-14} m^3 \cdot N^{-1} \cdot m^{-1}$)的 1/13。这种新型高耐磨固体自润滑材料应该具有很好的应用前景。

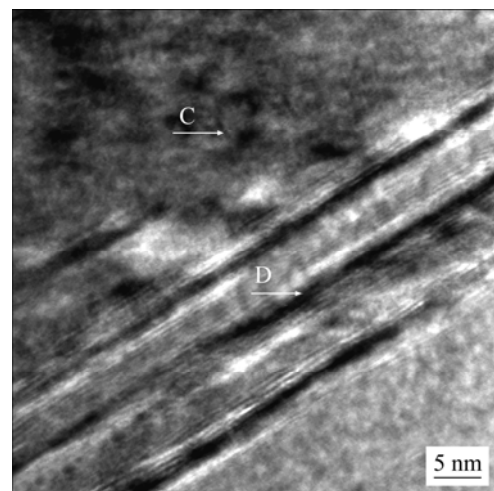


图 8 Fe-20Ni-16Mn-3.5C-2.5Si-0.75Ce 合金磨损表面的 TEM 像

Fig.8 TEM image of wearing surface of Fe-20Ni-16Mn-3.5C-2.5Si-0.75Ce alloy

3 结论

1) 随着 Mn 含量的增加,合金凝固组织中奥氏体的硬度逐渐增大,抗拉强度和抗弯强度随着 Mn 含量的增加先升高后降低,在 Mn 含量为 8% 时达到相对高值。

2) Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si-0.75Ce 系合金随着 Mn 含量的增加,摩擦过程中的表面硬度大幅度提高,呈现出高锰钢特有的表面加工硬化性质,在奥氏体基体的磨损表面上有形变诱发孪晶型马氏体和高密度位错生成。

3) 加入稀土元素 Ce,可以使 Fe-20Ni-xMn-3.5C-2.5Si 系合金凝固组织中的石墨球化,大幅度提

高了材料的抗拉强度和抗弯强度; 稀土元素 Ce 的加入促进了凝固组织中 $Fe_{1.1}Mn_{3.9}C_2$ 型碳化物的生成, 进一步提高了材料的耐磨性, 其中 Fe-20Ni-12Mn-3.5C-2.5Si-0.75Ce 合金的摩擦因数最低, 大约为 0.3; Fe-20Ni-16Mn-3.5C-2.5Si-0.75Ce 合金的磨损率最低, 大约是 QT500 球墨铸铁的 1/13。

REFERENCES

- [1] Hatate M, Shiota T, Takahashi N, et al. Influences of graphite shapes on wear characteristics of austempered cast iron[J]. *Wear*, 2001, 251: 885-889.
- [2] Double D D, Hellawell A. The nucleation and growth of graphite-the modification of cast iron[J]. *Acta Metall*, 1995, 43(6): 2435-2442.
- [3] Haque M M, Young J M. Production of spheroidal graphite aluminium cast iron and the factors affecting it[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, 55(3/4): 186-192.
- [4] 陈丽娟, 朱定一, 汤伟, 等. 镍-铁-石墨-硅自润滑材料及其性能[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(12): 2108-2114.
CHEN Li-juan, ZHU Ding-yi, TANG Wei, et al. Ni-Fe-C-Si self-lubricating material and its properties[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(12): 2108-2114.
- [5] 林登宜, 朱定一, 陈金栎. Si 含量对 Fe-20Ni-3.5C 自润滑材料组织与性能的影响[J]. *福州大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(5): 703-707.
LIN Deng-yi, ZHU Ding-yi, CHEN Jin-lu. The effect of Si addition on the microstructures and properties of Fe-20Ni-3.5C self-lubricating material[J]. *Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition*, 2006, 34(5): 703-707.
- [6] 朱定一, 关翔锋, 陈丽娟, 等. 过冷对石墨生长形态的影响[J]. *稀有金属*, 2005, 29(9): 156-161.
ZHU Ding-yi, GUAN Xiang-feng, CHEN Li-juan, et al. Influence of undercooling on growth morphology of graphite[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2005, 29(9): 156-161.
- [7] 朱定一, 关翔锋, 陈丽娟, 等. 新型 Ni_3Al /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 Li-juan, et al. Preparation and properties of high-temperature self-lubricating Ni_3Al /graphite alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(4): 528-533.
- [8] 朱定一, 关翔锋, 兑卫真, 等. 镍-石墨高温自润滑材料的熔炼制备及其组织性能[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(5): 707-712.
ZHU Ding-yi, GUAN Xiang-feng, DUI Wei-zhen, 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.
- [9] 朱定一, 陈丽娟. 新型 Ni-Cu-C 合金中石墨的球化处理及其性能[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(11): 1817-1821.
ZHU Ding-yi, CHEN Li-juan. Spheroidization of graphite and properties of new Ni-Cu-C alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(11): 1817-1821.
- [10] Double D D, Hellawell A. The nucleation and growth of graphite[J]. *Acta Metall Mater*, 1995, 43(6): 2435-2442.
- [11] 尹延国, 郑治祥, 马少波, 等. 温度对铜基自润滑材料减摩耐磨特性的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(11): 1856-1861.
YIN Yan-guo, ZHENG Zhi-xiang, MA Shao-bo, et al. Influence of temperature on friction and wear properties of Cu-matrix/graphite self-lubricating composite materials[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2004, 14(11): 1856-1861.
- [12] 李士同, 吕宇鹏, 朱瑞富, 等. 浅论高锰钢的加工硬化机制[J]. *兵器材料与科学工程*, 1999, 22(5): 61-65.
LI Shi-tong, LV Yu-peng, ZHU Rui-fu, et al. Work hardening mechanism aspects of high manganese steel[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 1999, 22(5): 61-65.
- [13] 吕宇鹏, 朱瑞富, 李士同, 等. 锰钢奥氏体组织与性能的价电子与价电子结构分析[J]. *钢铁研究学报*, 1999, (1): 21-24.
LÜ Yu-peng, ZHU Rui-fu, LI Shi-tong, et al. Valence electron structure analysis on microstructure and properties of austenite in manganese steels[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 1999(1): 21-24.
- [14] 王兆昌. 奥氏体锰钢的综合加工硬化机理[J]. *钢铁研究学报*, 1994(1): 27-32.
WANG Zhao-chang. Comprehensive mechanism of work hardening of austenitic manganese steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 1994(1): 27-32.
- [15] Alder P H. Strain hardening of Hadfield manganese steel[J]. *Metall Trans A*, 1986, A17: 1725-1730.
- [16] Roughavan K S. Nature of the work-hardening behavior in Hadfield manganese steel[J]. *Trans AIME*, 1969, 24(5): 1569-1573.
- [17] Drobnyak D J, Parr J G. Deformation substructure and strain hardening characteristics of metastable Fe-Mn austenite[J]. *Metall Trans*, 1970(1): 759-764.
- [18] 李树索, 陈希杰. 超高锰钢加工硬化及耐磨的研究[J]. *钢铁研究学报*, 1997(4): 28-31.
LI Shu-suo, CHEN Xi-jie. Work Hardening and wearability of superhigh manganese steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 1997(4): 28-31.

(编辑 何学锋)