DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3244

# Mg 对 35Cr2Ni2Mo 耐磨铸钢组织与性能的影响

杨　祎[1],张朋彦[1],董　陈[1],孙爱民[2],张　超[2],张　颢[2]
(1. 安徽工业大学 冶金工程学院,安徽 马鞍山 243032; 2. 马鞍山市海天重工科技发展有限公司,安徽 马鞍山 243131)

**摘　要**:在现代化装备制造业高速发展的同时,材料磨损所导致的资源消耗与经济损失日益显著。耐磨铸钢的研究与进步,不仅有助于提高生产效率、减少资源浪费和降低经济损失,更在推动科技进步和装备制造业发展方面发挥着积极作用。本文在 35Cr2Ni2Mo 铸钢中添加 Mg 元素,为新型高性能耐磨铸钢的推广应用提供了研究基础。采用金相显微镜、扫描电镜、透射电镜观察了钢材的显微组织,利用显微硬度计和拉伸试验机分别测定了钢材的硬度和力学性能,利用摩擦磨损试验机测定了钢材的耐磨性能。结果表明,添加 Mg 元素后,铸钢的组织依旧为板条状回火索氏体,碳化物尺寸更加细小。非金属夹杂物中小尺寸夹杂比例更多。强度、硬度上升,塑性下降,耐磨性能更佳。

**关键词**:耐磨铸钢;夹杂物;力学性能;磨损机理

**中图分类号**:TG142.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2023)11-1029-07

## Effect of Mg on the Microstructure and Properties of 35Cr2Ni2Mo Wear Resistance Cast Steel

YANG Yi[1], ZHANG Pengyan[1], DONG Chen[1], SUN Aimin[2], ZHANG Chao[2], ZHANG Hao[2]
(1. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China; 2. Maanshan Haitian Heavy Industry Technology Development Co., Ltd., Maanshan 243131, China)

**Abstract**: With the rapid development of the modern equipment manufacturing industry, resource consumption and economic losses caused by material wear are becoming increasingly significant. The research and progress of the wear-resistant cast steel not only helps to improve production efficiency, reduce resource waste and reduce economic losses, but also plays a positive role in promoting scientific and technological progress and the development of equipment manufacturing industry. In this paper, Mg is added to 35Cr2Ni2Mo cast steel, which provides the research basis for the popularization and application of new high performance wear resistant cast steel. The microstructure of the steel was observed by optical microscope, scanning electron microscope and transmission electron microscope. The hardness and mechanical properties of the steel were measured by a microhardness tester and tensile testing machine, and the wear resistance of steel was measured by friction and wear testing machine. The results show that after the addition of Mg, the microstructure of the cast steel remains lath tempered sorbite, with a finer carbide size. The proportion of non-metallic inclusions with small size is greater. The strength and hardness increase, the toughness decreases, and the wear resistance is better.

**Key words**: wear-resistant cast steel; inclusions; mechanical properties; wear mechanism

铸钢 35Cr2Ni2Mo 因具有高硬度、良好的耐磨性能和抗疲劳性能,在矿山、采掘等大型装备的零部件制造中得到了广泛应用。然而,随着大型机械的工作条件日趋苛刻,对于结构件的摩擦磨损及抗疲劳等性能也提出了更高的要求。因此,研发低成本长寿命高性能的耐磨铸钢件一直是机械制造领域不断追求的目标[1-4]。近年来,许多研究者致力于通过合金化、以铸代锻以及探索新型热处理工艺等方法,来提高耐磨铸钢的综合力学性能[5-8]。

由于铸钢的原始铸态组织对后续的成型及热处理组织具有遗传作用,因此,细化铸态组织是这类结构件生产的关键之一[9]。Korade 等[10]研究发现,密度

**收稿日期**:2023-10-11
**基金项目**:安徽省重点研发计划(202104a05020020)
**作者简介**:杨　祎,1993 年生,博士.研究方向为先进钢铁材料的制备与组织性能控制.Email: yy1247106@163.com
**通讯作者**:张朋彦,1972 年生,博士,副教授.研究方向为新一代钢铁材料开发及其组织性能调控.Email: zpy5102@163.com
**引用格式**:杨祎,张朋彦,董陈,等.Mg 对 35Cr2Ni2Mo 耐磨铸钢组织与性能的影响[J].铸造技术,2023,44(11):1029-1035
YANG Y, ZHANG P Y, DONG C, et al. Effect of Mg on the microstructure and properties of 35Cr2Ni2Mo wear resistance cast steel [J]. Foundry Technology, 2023, 44(11): 1029-1035

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

大的超细化第二相粒子能大幅度提高铸钢的硬度、耐磨性能以及抗疲劳性能。在熔炼和凝固过程中，采取一些控制手段，使得钢中大量的超细化第二相作为异质形核的核心，以此达到细化凝固铸态组织的目的[11-12]。但受限于我国目前的铸钢件生产工艺水平，始终不能取得较为满意的成果，对后续产品的综合性能产生了严重的制约。除此之外，夹杂物的存在也会影响铸钢的使用寿命。非金属夹杂物的尺寸、分布、体积分数、形态及化学成分已被认为是钢的裂纹扩展和耐磨性能的重要参数[13-15]。马幼平[16]通过在复相耐磨铸钢加入稀土硅钙镁进行复合变质处理，使钢中的夹杂物由非均匀分布的线条状变为均匀分布的细小复合型类球状，铸钢性能得到了有效提升。Silva[17]在非金属夹杂物对钢的组织和机械性能的影响中表明，非金属夹杂物通常以低或极低的体积分数出现，影响钢相变过程中的形核，在涉及韧性断裂、疲劳和腐蚀的过程中发挥着决定性作用。

在前期的工业生产中发现，不改变夹杂物的种类和数量，仅改变合金的加入时机，可达到一种类似于将传统工艺钢中粗大的夹杂物“破碎”细化的效果。此种工艺不仅可以得到大量微细化析出物，还可适当降低钢中贵重金属元素(如 Cr、Ni、Mo 等)的添加量。因此，本文在已有研究的基础上，不改变铸钢 35Cr2Ni2Mo 中其他元素的种类和含量，尽量减少添加贵金属元素 Cr、Ni 以及 Mo 的使用，在钢中加入 Mg 元素，分析了 Mg 对耐磨铸钢组织和性能的影响。

## 1 实验材料与方法

研究使用的铸钢 35Cr2Ni2Mo 及对照组 35Cr-2Ni2Mo-Mg 的实际化学成分如表 1 所示，对两种铸钢进行相同的热处理工艺。后续为方便讨论，将 35Cr2Ni2Mo 称为 1 号钢，35Cr2Ni2Mo-Mg 称为 2 号钢。

**表1 试样钢的化学成分**
**Tab.1 Chemical compositions of samples**
**(mass fraction/%)**

| 样品 | C | Mn | P | S | Si | Ni | Cr | Mo | Mg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.34 | 1.07 | 0.016 | 0.006 | 0.76 | 1.63 | 2.10 | 0.57 | - |
| 2 | 0.32 | 1.09 | 0.003 | 0.005 | 0.77 | 1.56 | 2.04 | 0.56 | 0.003 2 |

采用光学金相显微镜(OM, Nikon MA200)、透射电镜(TEM, JEM-2100)以及扫描电镜(SEM, TESCAN MIRA3)对样品的微观结构及夹杂物进行观察，并借助 Image J 软件对 SEM 图中的夹杂物进行尺寸和数量检测，选择最小识别尺寸为 1 μm，扫描面积为 36 $mm^2$。

硬度表征测试采用显微硬度计(HV-1000)，负载质量为 0.1 kg，加载时间为 15 s，对每个试样的不同部位取 10 个点，计算平均值。

拉伸性能测试采用 WDW-100G 微机控制高温电子万能试验机，在室温下进行准静态拉伸试验，拉伸速度为 2.00 mm/min。

耐磨性能测试在 MLG-130 干砂橡胶轮摩擦磨损试验机上进行，磨料选用 0.5~1.0 mm 石英砂，试验机频率设为 80 Hz，磨损时间设为 40 min，施加在试样上的载荷为 100 N，磨损完成后的试样放入超声波震荡仪中震荡 10 min，使磨损表面的磨屑完全掉落，然后用酒精喷洒吹干，防止氧化。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 微观组织与非金属夹杂

两种试验钢的典型微观组织如图 1 所示。由图 1 可知，经过热处理后，两种钢的组织为回火索氏体，其中铁素体呈板条状，碳化物弥散分布在铁素体板条间或晶粒内。回火期间，碳原子扩散到板条马氏体边界形成了碳化物，进一步阻止了铁素体的长大，这导致了一部分区域的回火索氏体仍呈现出马氏体位向。分布在板条铁素体边界处的碳化物主要有球形和短棒状两种。查阅文献可知两种碳化物分别为 $M_{23}C_6$ 和 $M_7C_3$[18-19]。使用 Image J 对两种钢中的碳化物尺寸进行测量，得到 1 号钢球形碳化物尺寸为 20~50 nm，短棒状碳化物尺寸在 50~200 nm；2 号钢球形碳化物尺寸相对于 1 号钢略有下降，为 20~45 nm，但短棒状碳化物尺寸依旧在 50~200 nm 范围内。

钢坯在铸造过程中，由于钢液易于与外部物质发生反应而形成夹杂物，如被大气氧化生成的氧化物以及与炉衬、烧包生成非金属夹杂。且在后续工艺中，这些夹杂很难被去除而遗留在钢液中，导致铸钢件的机械性能降低，局部硬度提高，机加工变得更加困难。因此，对夹杂物的种类、形貌、数量、大小的探究变得非常重要[20]。

热处理后的两种钢材中心部位的夹杂物如图 2 所示。由图可知，夹杂物主要有以下几种典型的形貌：球形夹杂物(图 2a, e)、规则的四边形夹杂物(图 2b)、条状夹杂物(图 2c, g)、三角形夹杂物(图 2d, h)及短杆状夹杂物(图 2f)。对两种钢不同形貌的夹杂物数量分别进行统计后发现，1 号钢黑色的圆形夹杂数量最多，四边形次之，长条状最少；2号钢圆形夹杂最多，短棒状次之，长条状和三角状最少。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

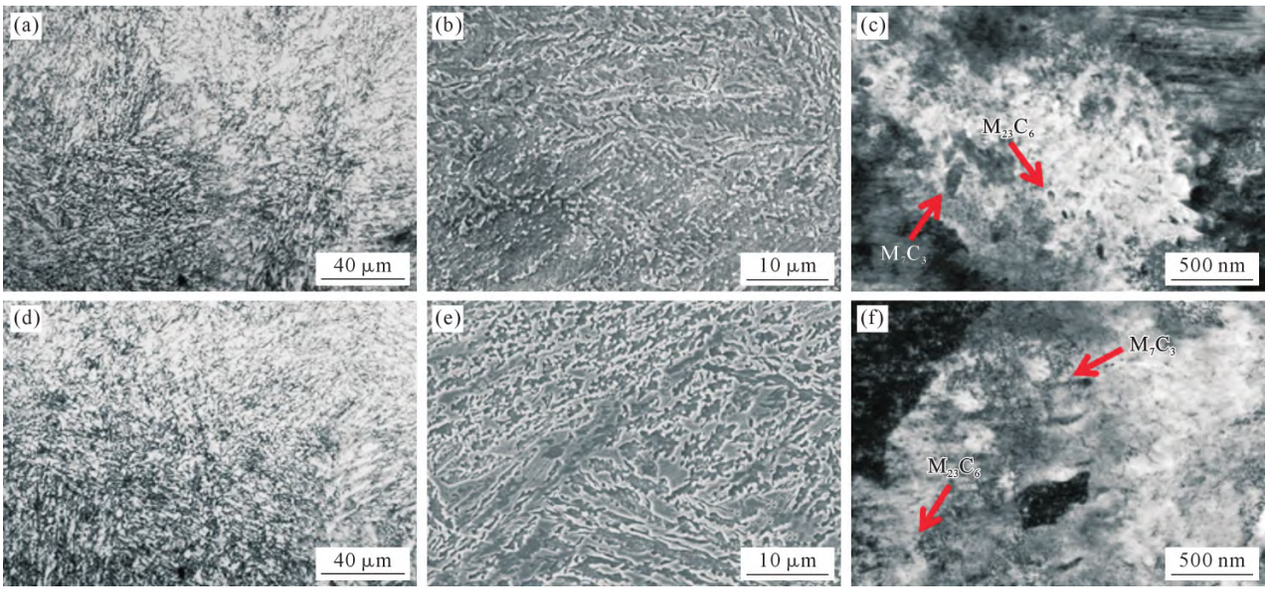


图 1　两种试验钢的典型微观组织：(a) 1 号 OM，(b) 1 号 SEM，(c) 1 号 TEM，(d) 2 号 OM，(e) 2 号 SEM，(f) 2 号 TEM

Fig.1　Typical microstructures of the samples: (a) OM of No.1 steel, (b) SEM of No.1 steel, (c) TEM of No.1 steel, (d) OM of No.2 steel, (e) SEM of No.2 steel, (f) TEM of No.2 steel

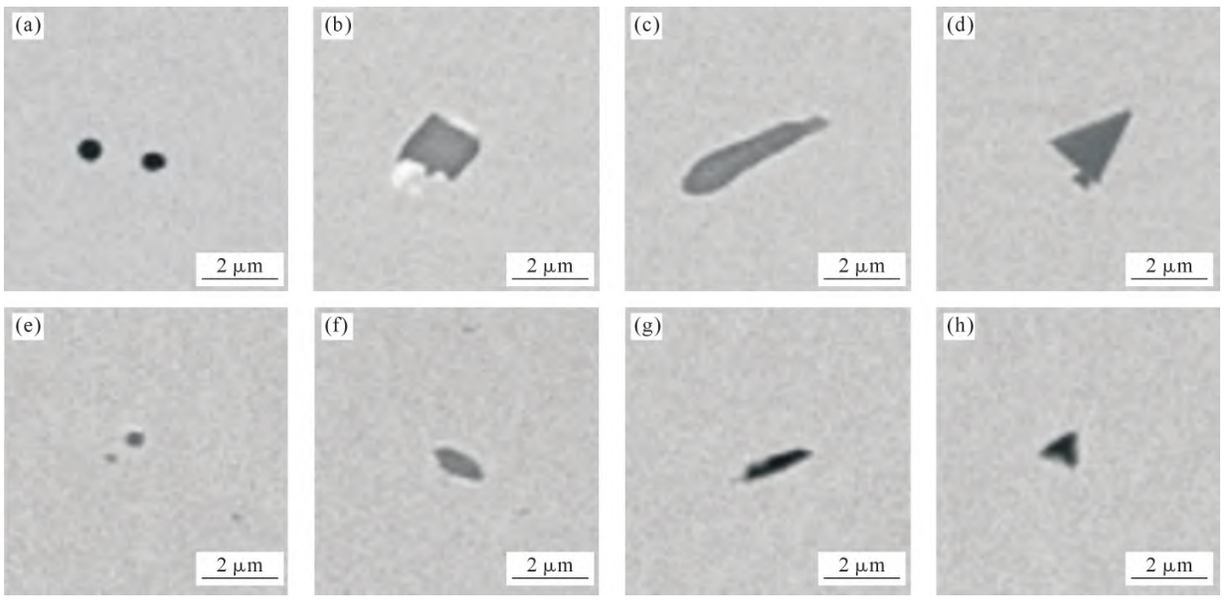


图 2　两种试验钢 SEM 下的夹杂物微观形貌：(a) 1 号球形，(b) 1 号四边形，(c) 1 号条形，(d) 1 号三角形，(e) 2 号球形，(f) 2 号短杆形，(g) 2 号条形，(h) 2 号三角形

Fig.2　Micromorphologies of inclusions in the samples under SEM: (a) spherical inclusion of No.1 steel, (b) quadrilateral inclusion of No.1 steel, (c) strip inclusion of No.1 steel, (d) triangular inclusion of No.1 steel, (e) spherical inclusion of No.2 steel, (f) short bar inclusion of No.2 steel, (g) strip inclusion of No.2 steel, (h) triangular inclusion of No.2 steel

表 2 统计了两种试验钢中不同尺寸范围的非金属夹杂物的数量。由表可知，在 1 号钢中，尺寸在 1~3 μm 范围内的夹杂物数量最多，占比为夹杂物总量的 35.45%；尺寸>10 μm 的夹杂物数量最少，占比 1.73%；钢中所有夹杂物的平均尺寸为 4.35 μm；其中尺寸≤5 μm 的夹杂物占比 82.52%。在 2 号钢中，尺寸<1 μm 的夹杂物数量最多，占总量的 69.33%；其次是 1~3 μm 的夹杂物占比 27.03%，5~10 μm 以及>10 μm 的夹杂物相对较少；2 号钢中夹杂物的平均尺寸为 1.78 μm，其中尺寸≤5 μm 的夹杂物占比为 98.55%。

**表2 试验钢的夹杂物尺寸**

**Tab.2 Inclusion sizes of the samples**

| 钢种 | 夹杂物尺寸/μm | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | ＜1 | 1~3 | 3~5 | 5~10 | ＞10 |
| 1 | 295 | 430 | 276 | 191 | 21 |
| 2 | 1 473 | 574 | 47 | 13 | 18 |

有研究指出，不论夹杂物成分和形貌如何，当夹杂物尺寸在 1 μm 以下时，不影响金属材料的宏观机械性能，但尺寸超过 5 μm 的非金属夹杂物容易成为微裂纹源，降低钢材的强韧性及耐磨性。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

结合表3统计的两种钢坯试样中非金属夹杂物类型及其数量结果可以看出，两种铸钢中存在的非金属夹杂物，主要包括氧化物夹杂、氧化复合型夹杂、硫化物夹杂、硫化复合型夹杂以及氮化复合型夹杂。

**表3 非金属夹杂物种类及数量**
**Tab.3 Types and quantities of non-metallic inclusions**

| 非金属夹杂物类型 | 数量/个 | |
|---|---|---|
| | 1号钢 | 2号钢 |
| MnS | 366 | 603 |
| MnS-oxide | 128 | 2 |
| TiAl-MnS | 59 | 96 |
| Oxides | 55 | 262 |
| TiN-Nb | 51 | 568 |
| TiS-MnS | 27 | 75 |
| Ti-MnS | 18 | 18 |
| TiN-Nb-Al | 6 | 1 |
| Al-Mg | 1 | 2 |
| 总数 | 711 | 1 627 |

硫化物主要包含MnS、TiS及复杂的氧化硫化物。当铸坯从高温状态开始降温时，钢液中的夹杂物以低熔点的FeS为主，这会导致钢材出现热脆现象，一般通过Mn的加入来置换Fe原子，形成MnS。在铸钢中，如果MnS以球状形态存在，那么在热加工过程中不易发生变形，这有助于减少材料的各向异性，对铸钢机械性能产生的危害相对较小。但如果是形成长条状或链状MnS，形成共晶或是沿晶界分布，在热加工过程中，会产生热脆和裂纹，导致钢的基体受损，从而降低其耐磨性能。

钢材中主要的氧化物夹杂包括$SiO_2$、$Al_2O_3$以及Ti的氧化物，这些氧化物通常会对钢材产生不利影响。特别是$Al_2O_3$夹杂，由于其硬而脆的特性，当受到外力作用时，会破碎成不规则的小颗粒[21]。其中一些尖锐的颗粒会划伤金属基体，导致材料中出现应力集中和裂纹，对钢的力学性能产生不利影响。此外，氧化物夹杂的存在还会使钢材表面出现结疤、不平整甚至裂纹等缺陷。

在钢中，常见的氮化物主要包括TiN和AlN。这些夹杂物的存在会增加钢的脆性，从而导致钢的脆性穿晶断裂。此外，钢中过饱和的N元素会与Fe发生反应，析出$Fe_2N$、$Fe_4N$，进而降低钢的韧性。为了解决这个问题，通常会在熔炼过程中加入Ti、V和Al元素，以固定N元素，消除时效倾向。

### 2.2 铸钢的力学性能

热处理后两种钢的力学性能对比如表4所示。2号钢的硬度均值要略高于1号钢。硬度值作为衡量材料耐磨性的重要指标，在忽略其他因素影响的情况下，硬度越高的材料，相应的耐磨损性能也就越优异。

**表4 试验钢的力学性能**
**Tab.4 Mechanical properties of the samples**

| 钢种 | 屈服强度/MPa | 抗拉强度/MPa | 伸长率/% | 屈强比 | 硬度(HRC) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 845 | 1 157 | 7.02 | 0.73 | 48.45 |
| 2 | 940 | 1 254 | 5.76 | 0.75 | 48.67 |

为了更好表征两种钢在室温下(25 ℃)的综合力学性能，对试验钢进行了室温拉伸试验。铸钢中加入Mg元素之后，抗拉强度、屈服强度都有不同程度上升，但是塑性下降。

两种试验钢的拉伸断口形貌如图3所示。由图3可知，两种铸钢的拉伸试样断口具有解理断裂特征。图3a~b中可见较高解理台阶，大韧窝周围分布着小尺寸韧窝和少量白色不规则撕裂棱。穿晶解理面、延性撕裂棱和韧窝这些典型的微观特征，表明1号钢属于韧脆混合断裂机制，其中微孔隙结合所形成的韧窝是断口表面的主要构成部分，解理断裂面较少。断裂以穿晶方式发生。对比之下，2号钢存在一些较大的解理面，相对平缓的解理台阶、河流状花样、较多白色不规则条纹状的撕裂棱以及一些尺寸较大、深浅不一的韧窝。

### 2.3 铸钢的耐磨性能

在相同载荷下，对不同的铸钢试样进行磨粒磨损试验，通过磨损减重及相对耐磨性对试验钢的耐磨损性能进行综合评估。重量磨损量的测量方法如下式所示：

$$X=M_0-M \tag{1}$$

式中，$X$指试样损失的质量，g；$M_0$是试样没磨损时的质量；$M$指经过磨损试验后试样的质量；磨损率$G$指磨损量与磨损时间$t$(min)的比值，通过下式计算获得：

$$G=X/t \tag{2}$$

相对耐磨性常被用作不同材料之间耐磨性的比较或者是不同工艺生产出来的材料耐磨损能力的对比，保证各种试验参数相同，把选定材料的磨损失重当做参照物，将其他材料在实验后的磨损失重和标准材料的失重相除，相对耐磨性$\varepsilon$通常指计算后获得的比值。$\varepsilon>1$表明试验材料具有良好的耐磨性。

表5为两种试验钢磨损前后各项数值的变化情况。在外加载荷为100 N时，经过40 min的磨损后，1号钢的磨损失重为3.249 8 g，2号钢的磨损失重为2.579 3 g；在不同时段，2号钢的磨损量均小于1号钢，且在短时间内两种钢的磨损量差值呈扩大趋势。结果表明在相同实验条件下，添加Mg元素的铸钢

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

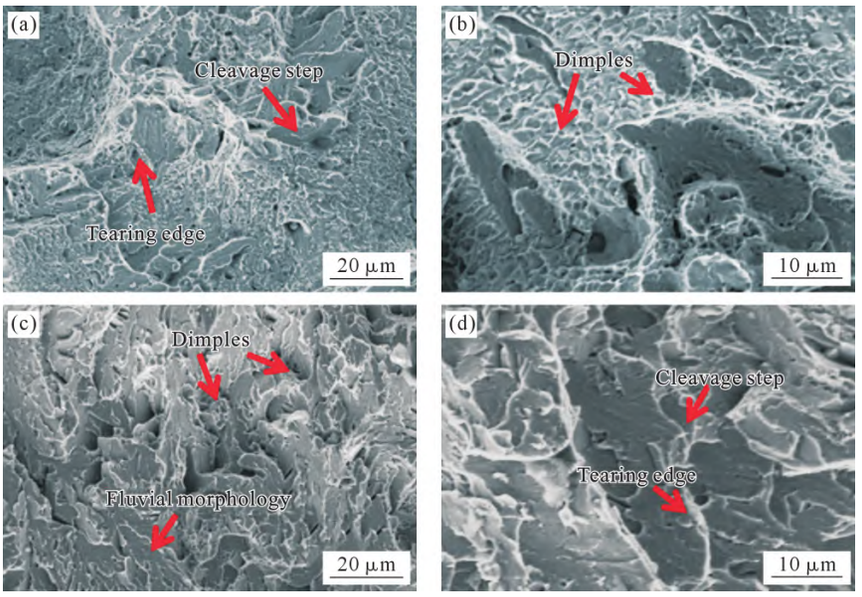


图 3　拉伸试样 SEM 下的断口微观形貌：(a~b) 1 号，(c~d) 2 号

Fig.3　Fracture morphology of tensile samples under SEM: (a~b) No.1 steel, (c~d) No.2 steel

**表5 外加载荷100 N时试样的损失失重**

**Tab.5 Loss of weight of the samples under 100 N applied load**

| 钢种 | 磨损量 /g | | | | 相对耐磨性 | 磨损率 /(g·min$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 10 min | 20 min | 30 min | 40 min | | |
| 1 | 0.622 4 | 1.308 2 | 2.279 4 | 3.249 8 | 1 | 0.081 |
| 2 | 0.474 8 | 1.028 4 | 1.808 4 | 2.579 3 | 1.26 | 0.064 |

耐磨性更佳。若用 1 号钢减去 2 号钢磨损量的差与 1 号钢的磨损量的比值来表示钢耐磨性的提升，则发现添加 Mg 元素后钢耐磨性提高了 20.6%。

图 4 显示了在 100 N 外加载荷下，经过 40 min 磨损后，1 号钢的 4 种表面形貌特征。通过观察可以发现，试样的磨损机制主要包括微切削、内嵌磨粒、犁沟和磨粒挤压造成的堆积。这些磨损机制的共同作用，导致铸钢表面的材料逐渐损失[22]。在图 4a 中，可以观察到短且不连续的犁沟，这是由于较硬的磨粒在铸钢表面划过时，产生的压力和摩擦力超过了材料的屈服强度，表面材料发生塑性变形，产生了划痕。图 4b 可以在犁沟末端观察到浪花状形貌，这是由于金属基体被推动及犁出造成了挤压堆积。图 4c 显示的河流状形貌是由相互接触的异摩擦体引发的疲劳裂纹和疲劳磨损所致。在长时间接触应力的作用下，磨损表面层产生剧烈的塑性变形，导致裂纹产生。这些迅速扩大的裂纹会使局部地区的材料呈片层状剥落。图 4d 中能够观察到大量较深的切削痕迹

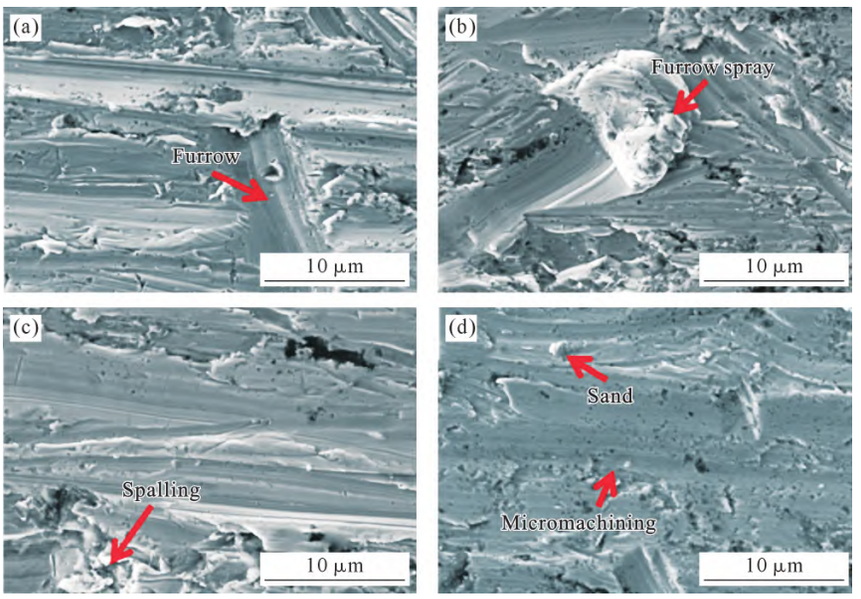


图 4　1 号钢 SEM 下磨损表面形貌特征：(a) 犁沟，(b) 犁沟浪花，(c) 剥落，(d) 砂粒和微切削

Fig.4　Morphologies of several typical wear surfaces of sample 1 under SEM: (a) furrow, (b) furrow spray, (c) spalling, (d) sand and micromachining

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

和微裂纹。磨损机理以微切削为主，同时伴有程度较深的疲劳损坏。2 号钢在 100 N 外加载荷下，经过 40 min 磨损后的表面形貌与 1 号钢相似(图 5)，但砂粒脱落形成的凹坑数量相对较少，犁沟深度也相对较浅，疲劳损伤程度较轻。

## 3 结论

(1)钢中组织为板条状回火索氏体。相比于 1 号铸钢，2 号铸钢的碳化物尺寸更为细小。1 号钢的平均夹杂物尺寸为 4.35 μm，其中≤5 μm 的夹杂物占比 82.52%；2 号钢中夹杂物的平均尺寸为 1.78 μm，≤5 μm 的夹杂物占比为 98.55%。

(2)添加 Mg 元素后，铸钢的硬度值从 48.45 HRC 上升到 48.67 HRC，抗拉强度从 1 157 MPa 上升到 1 254 MPa，屈服强度从 845 MPa 上升到 940 MPa，但伸长率从 7.02%下降到 5.76%。

(3)2 号钢的耐磨性要优于 1 号钢，外加载荷为 100 N 时，1、2 号钢的磨损机理主要是微切削，但 1 号钢伴有严重的疲劳破坏，2 号钢的疲劳破坏程度较轻。

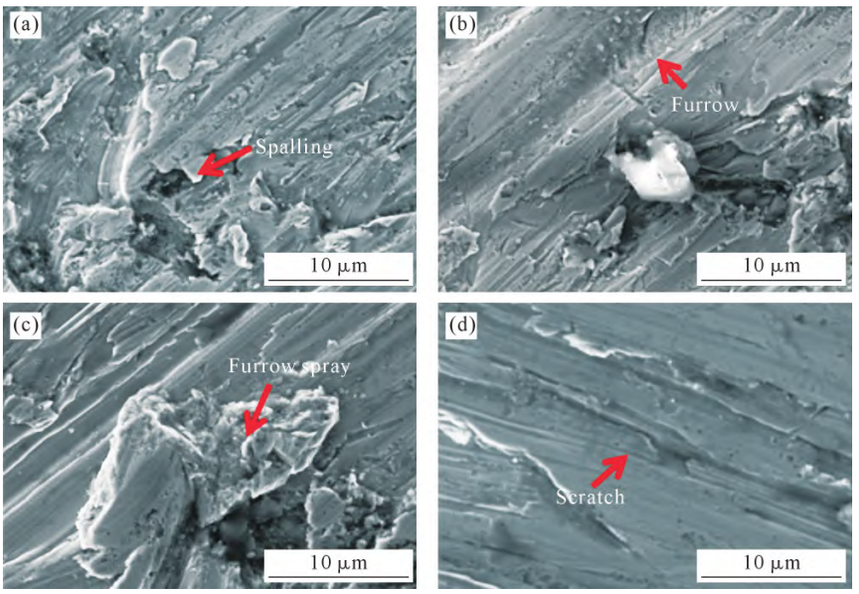


图 5 2 号钢 SEM 下磨损表面形貌特征：(a) 剥落，(b) 犁沟，(c) 犁沟浪花，(d) 划痕

Fig.5 Morphologies of several typical wear surfaces of sample 2 under SEM: (a) spalling, (b) furrow, (c) furrow spray, (d) scratch

**参考文献：**

[1] 陈德东，李卫. 低合金耐磨铸钢技术研究与应用[J]. 热加工工艺，2011, 40(11): 17-20, 25.
CHEN D D, LI W. Application and research of low alloy wear-resistant cast steel technology[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(11): 17-20, 25.

[2] DENG X T, WANG Z D, HAN Y, et al. Microstructure and abrasive wear behavior of medium carbon low alloy martensitic abrasion resistant steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2014, 21(1): 98-103.

[3] BOLOBOV V, CHUPIN S, BOCHKOV V, et al. The effect of finely divided martensite of austenitic high manganese steel on the wear resistance of the excavator buckets teeth[J]. Key Engineering Materials, 2020, 6178(1708): 3-9.

[4] 马文高，陈湘茹，翟启杰. 回火后冷却方式对铬钼耐磨铸钢力学性能和显微组织的影响[J]. 上海金属，2021, 43(2): 37-41.
MA W G, CHEN X R, ZHAI Q J. Effect of cooling method after tempering on mechanical properties and microstructure of wear-resistant cast chrome-molybdenum steel[J]. Shanghai Metals, 2021, 43(2): 37-41.

[5] HUANG Y, CHENG G G, LI S J, et al. Effect of cerium on the behavior of inclusions in H13 steel[J]. Steel Research International, 2018, 89(12): 1800371.

[6] 许婕，陈湘茹，刁晓刚，等. 热处理工艺对耐磨 Cr-Mo 铸钢组织和硬度的影响[J]. 上海金属，2017, 39(5): 27-31.
XU J, CHEN X R, DIAO X G, et al. Effect of heat treatment on microstructure and hardness of wear-resistant Cr-Mo cast steel[J]. Shanghai Metals, 2017, 39(5): 27-31.

[7] 张芳，李军平，彭军，等. Nb 微合金化对准贝氏体耐磨铸钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理，2020, 45(12): 205-211.
ZHANG F, LI J P, PENG J, et al. Effect of Nb microalloying on microstructure and properties of quasi-bainitic wear-resistant cast steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(12): 205-211.

[8] 张雅静，方胜民，王金宝，等. 淬火介质对耐磨铸钢组织和性能的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版)，2017, 38(5): 650-654.
ZHANG Y J, FANG S M, WANG J B, et al. Effect of quenching medium on microstructure and properties of wear-resistant casting steel[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2017, 38(5): 650-654.

[9] AN J Z, CAI Z Z, ZHU M Y. Effect of titanium content on the refinement of coarse columnar austenite grains during the solidification of peritectic steel[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2022, 29(12): 2172-2180.

[10] KORADE D N, RAMANA K V, JAGTAP K R. Study of effect of population density of carbides on surface roughness and wear rate of H21 tool steel[J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 19: 228-

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

232.

[11] 贾坤宁，王海东，姜秋月，等. 微钙钢中第二相粒子细化晶粒效果的研究[J]. 热加工工艺，2011, 40(4): 45-47, 50.
JIA K N, WANG H D, JIANG Q Y, et al. Effect of second phase particles on refinement of grains in micro-calcium steel[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(4): 45-47, 50.

[12] 张翠翠，秦森，毛磊. 外加入第二相颗粒对钢铁材料组织性能的影响[J]. 河北科技大学学报，2014, 35(2): 159-163.
ZHANG C C, QIN S, MAO L. Effects of the second phase particle addition on microstructure and properties of iron and steel material [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2014, 35(2): 159-163.

[13] 李言祥. 非金属夹杂物对等温淬火高硅铸钢力学性能的影响[J]. 铸造，2000, 49 (9): 525-528.
LI Y X. Effect of non-metallic inclusions on mechanical properties of austempered high silicon cast steel[J]. Foundry, 2000, 49(9): 525-528.

[14] XIE J B, HU T, ZHONG L M, et al. Bismuth existing in 1215MS steel affecting grain size and thermal expansion[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021, 30(11): 7943-7949.

[15] 万焱，尹宏，邬早勤. Q235B 钢中夹杂物与基体协调变形的工艺相关性研究[J]. 宽厚板，2017, 23(2): 22-25.
WAN Y, YIN H, WU Z Q. Study on process correlation of coordinate deformation between inclusion and matrix in Q235B steel[J]. Wide and Heavy Plate, 2017, 23(2): 22-25.

[16] 马幼平. 复合变质处理对铸态耐磨钢夹杂物形态和性能的影响[J]. 钢铁研究学报，2002, 14(4): 38-40.
MA Y P. Effect of compound modification on inclusion morphology and property of cast wear-resistant steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2002, 14(4): 38-40.

[17] SILVA A C E. The effects of non-metallic inclusions on properties relevant to the performance of steel in structural and mechanical applications[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(2): 2408-2422.

[18] 候韶凯，马幼平，杨蕾. 固态扩散条件下 C 在 $M_7C_3$ 与 $M_{23}C_6$ 碳化物转变中的作用[J]. 金属热处理，2019, 44(5): 62-66.
HOU S K, MA Y P, YANG L. Main controlling element of $M_7C_3$ and $M_{23}C_6$ carbides transformation in solid state diffusion[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(5): 62-66.

[19] YANG X, LIAO B, XIAO F R, et al. Ripening behavior of M23C6 carbides in P92 steel during aging at 800 ℃[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2017, 24(8): 858-864.

[20] 秦春节，夏明哲，屠立群. 夹杂物对易切削钢性能的影响机理研究[J]. 浙江工业大学学报，2015, 43(4): 412-415.
QIN C J, XIA M Z, TU L Q. Study on the effect of inclusion on properties of free-cutting steel[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2015, 43(4): 412-415.

[21] 王敏，包燕平，崔衡，等. IF 钢中 Al2O3-TiN 复合夹杂生成机理研究[J]. 钢铁研究学报，2010, 22(7): 29-32, 55.
WANG M, BAO Y P, CUI H, et al. Generation mechanism of $Al_2O_3$-TiN inclusion in IF steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2010, 22(7): 29-32, 55.

[22] 茅奕舒，崔向红，王树奇，等. 3Cr3Mo2V 铸钢和 3Cr13 钢磨损行为的研究[J]. 钢铁钒钛，2012, 33(5): 101-106
MAO Y S, CUI X H, WANG S Q, et al. Research on wear behavior of 3Cr3Mo2V cast steel and 3Cr13 steel[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2012, 33(5): 101-106.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net