

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20160830003

# 含碳量对Mn8Cr2Si钢显微组织及性能的影响

宋百隆<sup>1,2</sup>, 王玉江<sup>2</sup>, 张平<sup>3</sup>, 魏世丞<sup>2</sup>, 盛忠起<sup>1</sup>, 王亚子<sup>1</sup>

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 沈阳 110819; 2. 装甲兵工程学院 再制造技术重点实验室, 北京 100072; 3. 装甲兵工程学院 机械产品再制造国家工程研究中心, 北京 100072)

**摘要:** 研究了含碳量对Mn8Cr2Si钢显微组织、力学性能、耐磨性能和耐腐蚀性能的影响。利用光学显微镜(OM)对奥氏体晶粒的尺寸变化进行观察, 并利用扫描电子显微镜(SEM)分析冲击断面及磨损形貌。结果表明, 随含碳量的增加, 奥氏体晶粒逐渐细化, 但当含碳质量分数超过0.8%时, 晶粒开始粗化。由于奥氏体晶粒细化, 其晶界总面积增大, 应力集中降低, 抑制了裂纹的形成与扩展。因此, 奥氏体晶粒越细小, 其力学性能越好, 而力学性能的提升有助于提高其耐磨性能。分析发现, 奥氏体晶粒尺寸同样影响Mn8Cr2Si钢的耐腐蚀性能, 细化后的奥氏体晶粒能提高其耐腐蚀性能。当Mn8Cr2Si钢含碳质量分数为0.8%时, 晶粒尺寸可细化到143 μm, 综合力学性能和耐腐蚀性能优异。

**关键词:** Mn8Cr2Si钢; 晶粒尺寸; 力学性能; 显微组织; 耐腐蚀性能

中图分类号: TG113.25

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)01-0132-09

## Effects of Carbon Content on Microstructure and Properties of Mn8Cr2Si Steel

SONG Bai-long<sup>1,2</sup>, WANG Yu-jiang<sup>2</sup>, ZHANG Ping<sup>3</sup>, WEI Shi-cheng<sup>2</sup>, SHENG Zhong-qi<sup>1</sup>, WANG Ya-zi<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819; 2. Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072; 3. National Engineering Research Center for Mechanical Product Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

**Abstract:** The effects of carbon content on the microstructure, mechanical property, wear resistance and corrosion resistance of Mn8Cr2Si steel was investigated. The change of austenite grain size was observed by optical microscope (OM). The impact fracture and wear morphologies were analyzed by scanning electron microscopy (SEM). The results indicate that the austenite grain becomes refinement with the increase of carbon content. Nevertheless, when the carbon content is over 0.8%, the grain starts to be coarse. Due to the refinement of the austenite grain, the total area of grain boundaries increases and the stress concentration is reduced, which suppress the formation and propagation of cracks. Therefore, the finer the austenite grains, the better the mechanical property is, and the upgrade of mechanical property will help to improve the wear resistance of Mn8Cr2Si steel. It is found that the austenite grain size also affects the corrosion resistance of Mn8Cr2Si steel, and the corrosion resistance can be improved with the refinement of austenite grains. When the carbon content of Mn8Cr2Si steel is 0.8%, the grain size can be refined to be 143 μm, and the composite mechanical property and the corrosion resistance are excellent.

**Keywords:** Mn8Cr2Si steel; grain size; mechanical property; microstructure; corrosion resistance

收稿日期: 2016-08-30; 修回日期: 2016-12-04

网络出版日期: 2017-01-03 11:03; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20170103.1103.002.html>

通讯作者: 盛忠起(1972—), 男(汉), 副教授, 博士; 研究方向: 激光加工及再制造技术; E-mail: zhqsheng@mail.neu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(51222510); 中国工程院咨询研究项目(2015-09-XY-003, 2016-06-ZD-01)

**Fund:** Supported by National Natural Science Foundation of China(51222510) and Consulting and Research Program of Chinese Academy of Engineering(2015-09-XY-003, 2016-06-ZD-01)

引文格式: 宋百隆, 王玉江, 张平, 等. 含碳量对Mn8Cr2Si钢显微组织及性能的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(1): 132-140.

SONG B L, WANG Y J, ZHANG P, et al. Effects of carbon content on microstructure and properties of Mn8Cr2Si steel[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(1): 132-140.

## 0 引言

随着现代工业的高速发展, 奥氏体锰钢在机械、矿山、冶金、电力、建筑等诸多领域中得到广泛应用, 并发挥着不可替代的重要作用, 也为铸造生产商提供了巨大的经济效益<sup>[1-3]</sup>。与此同时, 材料的磨损与腐蚀问题逐渐成为制约经济发展和科技进步的绊脚石, 其设备复杂、数量多且大多服役于高温、高湿、重载及特定腐蚀环境中, 工况恶劣, 磨损与腐蚀造成了巨大的经济损失<sup>[4-5]</sup>。高锰钢作为传统的耐磨材料, 已得到广泛的应用。但在使用中发现, 高锰钢只有在强烈冲击条件下才能充分发挥耐磨性能, 而且其屈服强度低, 工件易于变形<sup>[6-7]</sup>。因此, 要扩大高锰钢的应用范围, 必须在原有基础上进行改性研究。

研究发现, 当奥氏体锰钢中Mn质量分数低于8%时, 冲击磨损条件下会诱发马氏体相变, 大幅度提高材料的加工硬化能力, 同时保持较高的冲击韧性, 不仅提高了非强烈冲击条件下的耐磨性, 而且降低了合金元素锰的含量, 具有良好的经济性<sup>[8-9]</sup>。丛菁华等研究发现, 当锰的质量分数从3%提高到9%时, 奥氏体锰钢中奥氏体含量逐渐增多, 但材料的抗拉强度及硬度逐渐降低<sup>[10]</sup>。对亚稳态奥氏体进行EPT(电脉冲处理)处理, 组织发生逆向转变和再结晶过程中, 脉冲电流加速新相形核的同时抑制了初生奥氏体的长大, 奥氏体晶粒得到细化, 其拉伸性能、断裂韧性和耐磨性都得到很大提高<sup>[11]</sup>。Cai等研究发现, TRIP效应的作用使奥氏体锰钢拥有良好的力学性能, 而且决定奥氏体稳定性最关键因素是晶粒尺寸<sup>[12]</sup>。奥氏体锰钢中的元素锰和碳, 一方面可固溶到奥氏体中起固溶强化作用; 另一方面, 适量的锰和碳可以扩大奥氏体相区, 使奥氏体稳定性降低, 从而更容易发生马氏体相变。因此, 研究含碳量对奥氏体锰钢性能的影响意义重大。

目前关于奥氏体锰钢的研究大多集中于加工硬化机制及提高材料耐磨性能方面, 却忽视了其耐腐蚀性能。为了进一步提高奥氏体锰钢的综合性能, 扩展其应用范围, 文中设计了4种不同含碳量的Mn8Cr2Si钢材料, 研究了Mn8Cr2Si钢的力学性能、耐腐蚀性能与含碳量的关系, 为后续的奥氏体锰钢成分设计提供试验和理论参考。

## 1 材料与方法

Mn8Cr2Si钢试样采用50 kg真空感应炉熔炼, 具体化学成分如表1所示。铸件试样尺寸为 $\Phi$  18mm的圆棒, 所有试样均从棒料上截取。首先将铸造好的试样在SX2-5-12NP箱式电阻炉中进行1 050 °C热处理, 保温2 h后出炉水冷至室温。金相试样尺寸为10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 6 mm, 试样抛光后用4%的硝酸酒精溶液腐蚀, 并用OLYMPUS光学显微镜观察金相试样的显微组织。

利用Image-pro-plus软件对试验样品的晶粒尺寸进行统计(每个试样样品选5张金相图片测量, 对其测量结果取平均值)。用Nova Nano SEM 650型场发射扫描电镜对Mn8Cr2Si钢冲击断面形貌和摩擦磨损形貌进行分析; 用D8 X射线衍射仪(XRD)对Mn8Cr2Si钢试样进行物相分析, 并依据曲线中奥氏体与马氏体衍射峰的积分强度, 计算马氏体的相对含量。用Buehler自动显微硬度计测量Mn8Cr2Si钢显微硬度, 加载时间为10 s, 载荷为300 g, 测10次取平均值。

表1 Mn8Cr2Si钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of Mn8Cr2Si steel (w/%)						
Element	C	Si	Mn	Cr	Mo	Fe
No. 1	0.7	0.9	8	1.9	0.4	Bal.
No. 2	0.75	0.9	8	1.9	0.4	Bal.
No. 3	0.8	0.9	8	1.9	0.4	Bal.
No. 4	0.85	0.9	8	1.9	0.4	Bal.

采用MTS-809电子万能材料试验机并按照GT/T228—2002标准进行拉伸测试, 拉伸试样直径 $\Phi$ 10 mm, 标距为60 mm, 拉伸速率为2 mm/min。采用SIEMENS-TD 400C冲击试验机按照GT/T3808—2002进行室温冲击测试, 试样为10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 55 mm的夏比V型缺口冲击试样。

磨粒磨损试验在MLD-10型动载磨粒磨损试验机进行, 上试样尺寸为10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 30 mm, 材料Mn8Cr2Si钢, 下试样为外径 $\Phi$ 50 mm、内径 $\Phi$ 30 mm的环形对磨试样, 材质GCr15轴承钢, 硬度60~63 HRC, 转速为200 r/min。为了模拟材料在中低冲击载荷时的磨损情况, 试验参数选择如下: 磨料为830~1 700  $\mu$ m(10~20目)的石英砂, 硬度1 050~1 250 HV, 流速控制为5 kg/h, 冲击功为3 J。试验环境为干燥且通风良好的室内。试验前超声清洗5 min后, 用万分之一精度的天平称重,

作为“原始重量”。冲击磨损30 min之后取下试样再次超声清洗并称重,试样的磨损失重等于“原始重量”减去磨损30 min后的重量。为减小试验误差,每种试样进行5次磨损试验,测量失重后取平均值,并定义磨损失重的倒数为材料的耐磨性( $\epsilon$ ),计算公式如下:

$$\epsilon = \frac{1}{\Delta G} \quad (1)$$

式中,  $\Delta G = G - G_0$ ,  $G_0$ 为试样磨损前重量, g;  $G$ 为试样磨损后的重量, g。

为研究其耐腐蚀性能,采用德国ZAHNER公司的IM6ex电化学工作站对Mn8Cr2Si钢进行耐腐蚀性测试,试样尺寸为12 mm×12 mm×6 mm。将12 mm×12 mm表面作为测试对象,试样背面与导

线连接后用石蜡进行封装。腐蚀介质为3.5%NaCl溶液,扫描速度为1 mV/s。试验过程在温度恒定的室内进行,测试温度为25 ℃,保持室内安静,以避免振动对试验结果造成不良影响,测试结果用CView-2软件进行拟合。

## 2 结果与分析

### 2.1 显微组织

图1为4种不同含碳量铸态Mn8Cr2Si钢的显微组织。如图1可见, Mn8Cr2Si钢的铸态组织为奥氏体+碳化物,且奥氏体晶粒粗大,其中碳化物分布于晶界和晶内,其冲击韧性较低,容易脆性断裂。为了消除碳化物,将Mn8Cr2Si钢加热到奥氏体区温度(1 050~1 100 ℃)进行水韧处理。

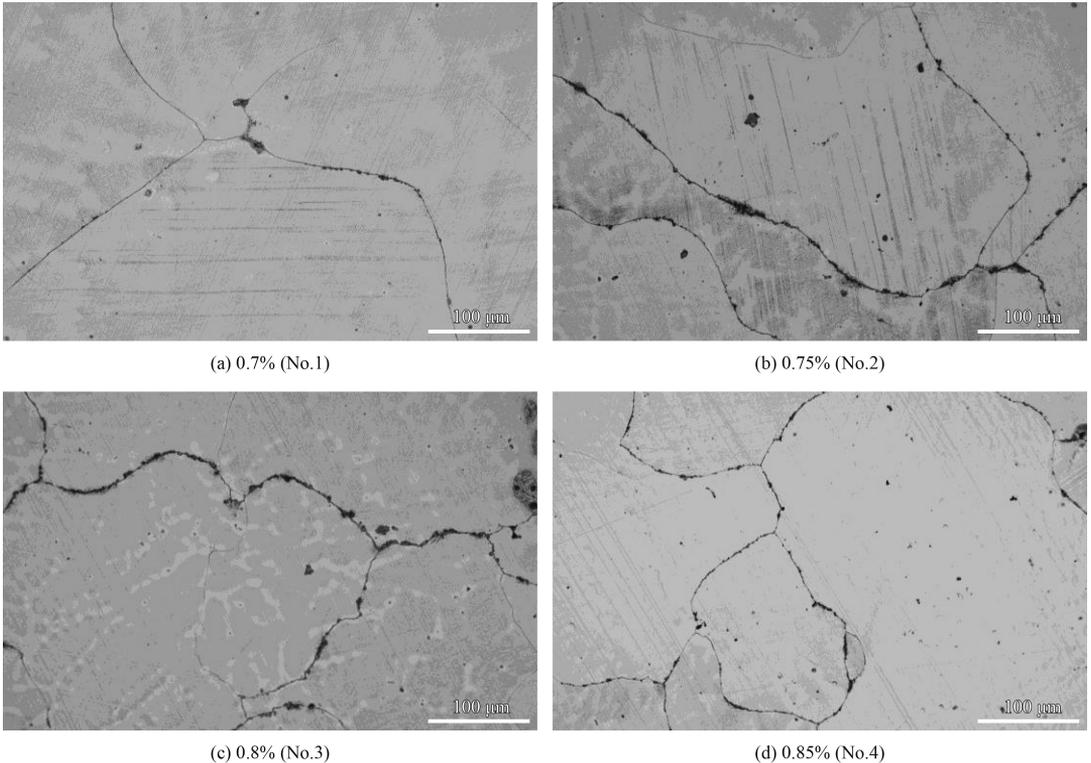


图1 不同含碳量下铸态Mn8Cr2Si钢的显微组织

Fig.1 Microstructure of as-cast Mn8Cr2Si steel with different carbon content

图2为4种不同含碳量水韧态Mn8Cr2Si钢的显微组织,经水韧处理后碳化物基本固溶到奥氏体中,得到单一奥氏体组织,由于加热过程中奥氏体分解,经重结晶后奥氏体晶粒细化。并且奥氏体晶界平直,晶界较窄,无渗碳体出现,晶界清晰干净,晶粒内有少量的球状碳化物存在。从图1可看出,随着含碳量的增加,晶粒尺寸明显减

少,依次为: 201、191、143和148 μm。当碳含量(质量分数)为0.8%时,其晶粒尺寸最小。但当碳含量超过0.8%时,晶粒尺寸呈现粗化趋势。这可能是因为:随着碳含量的增加,其第二相析出数量增多,在一定程度上有利于晶粒细化,但当碳含量超过0.8%时,会诱发过度的连续过冷效应,阻止了第二相的析出,故晶粒尺寸增大。

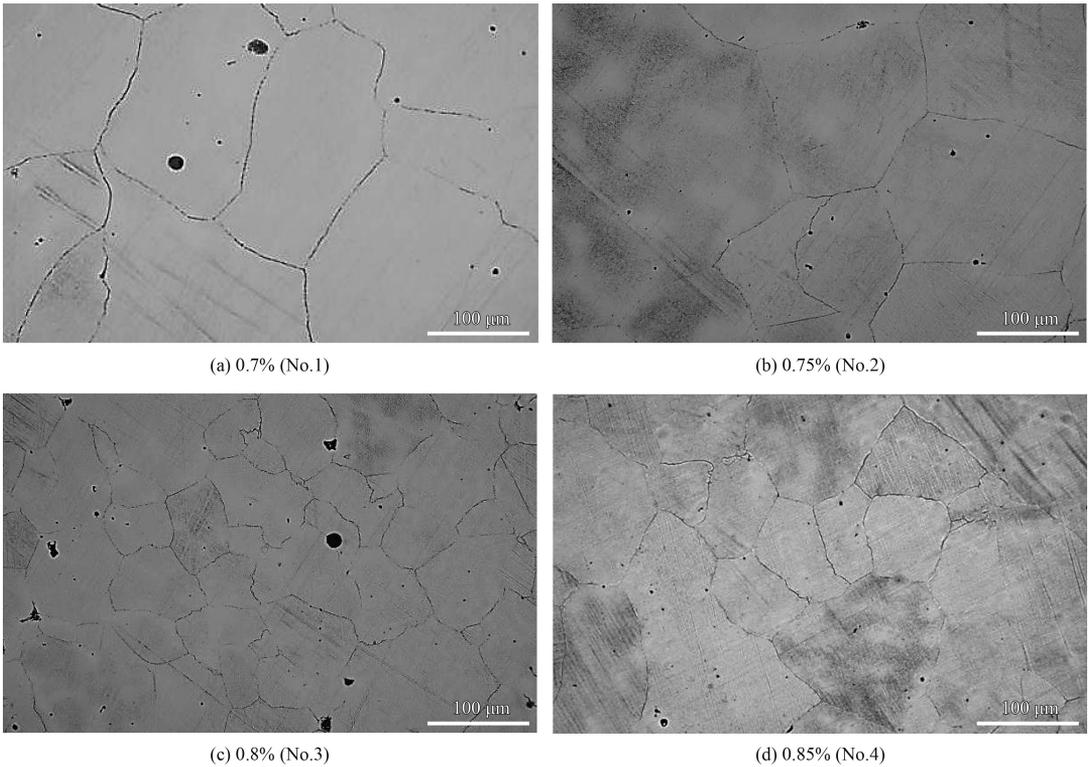


图2 不同含碳量下水韧态Mn8Cr2Si钢的显微组织

Fig.2 Microstructure of Mn8Cr2Si steel after water toughening with different carbon content

图3是不同含碳量Mn8Cr2Si钢水韧处理后的XRD谱图,从谱图中可以看出,Mn8Cr2Si钢水韧处理后主要是奥氏体物相峰,这也进一步证实Mn8Cr2Si钢水韧处理后得到单一奥氏体组织。由于碳化物数量较少,低于XRD检测值,在谱图中并没有检测出碳化物的物相峰。从谱图中还可以发现,随着含碳量的增加,(111)面的衍射峰强度逐渐增强。可能是由于含碳量增多促进(111)面的择优生长,使其峰强逐渐升高。

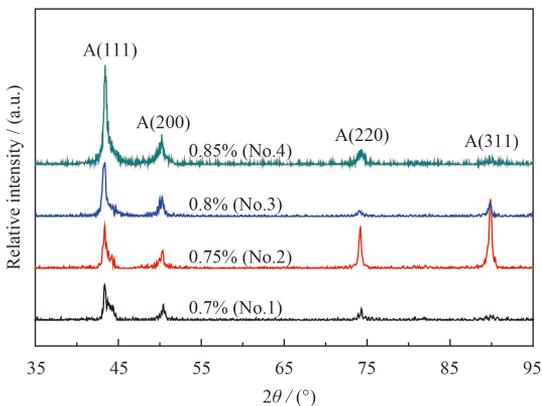


图3 Mn8Cr2Si钢试样的XRD谱图

Fig.3 XRD patterns of Mn8Cr2Si steel specimens

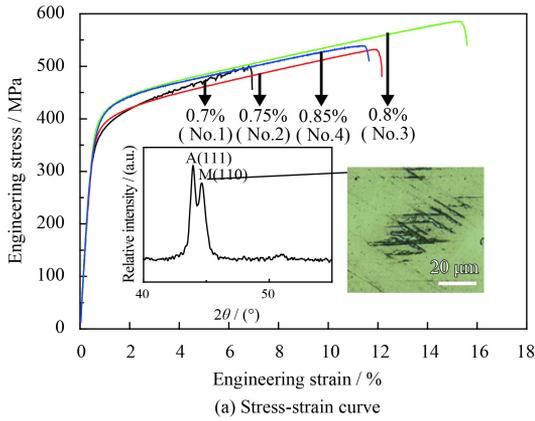
## 2.2 力学性能

Mn8Cr2Si钢试样的应力-应变曲线如图4(a)所示,从图中可以看出Mn8Cr2Si钢的屈服强度和抗拉强度变化较小,但断后延伸率变化较大。为更好地表示力学性能与含碳量的关系,从拉伸应力-应变曲线测得屈服强度、抗拉强度、断后延伸率后绘制曲线如图4(b)所示,从图中可以看出屈服强度、抗拉强度和断后延伸率随含碳量的增加先逐渐升高,当含碳质量分数为0.8%时,屈服强度达到最大值395 MPa,抗拉强度达到最大值585 MPa,断后延伸率达到最大值15.6%。但当含碳量继续增加时,其综合力学性能呈下降趋势。

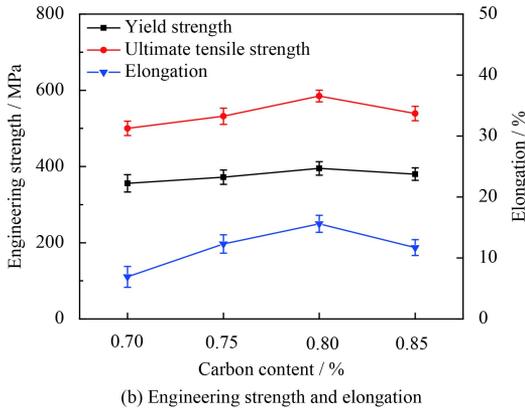
Hall和Petch研究发现,材料的屈服强度与晶粒尺寸存在密切关系,材料的晶粒细化,晶界总面积增大,减小了应力集中效应,推迟了裂纹的形成与扩展,从而提高了材料的屈服强度,并提出了著名的Hall-Petch公式<sup>[13]</sup>:

$$\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-1/2} \quad (2)$$

式中, $\sigma_y$ 是屈服强度,MPa; $\sigma_0$ 是晶格摩擦阻力(取100 MPa),K是常数(钢材取350 MPa), $d$ 是平均晶粒直径, $\mu\text{m}$ (其值见表2)。低碳钢材料屈服



(a) Stress-strain curve



(b) Engineering strength and elongation

图4 Mn8Cr2Si钢试样的力学性能

Fig.4 Mechanical properties of Mn8Cr2Si steel specimens

表2 Mn8Cr2Si钢试样晶粒尺寸与弹性模量

Table 2 Grain size and elastic modulus of Mn8Cr2Si steel specimens

Carbon content / %	Grain size / μm	Elastic modulus / MPa
0.7	201	70 216
0.75	191	70 475
0.8	143	71 808
0.85	148	74 374

强度与晶粒尺寸的关系如图5所示。

根据式(2)计算晶粒细化对屈服强度的影响, 4种试样的屈服强度分别为124.7、125.2、129.3和128.9 MPa。可以看出, 计算出的屈服强度与实际测得的屈服强度并不相符, 这说明除了细晶强化外还存在其他强化方式。在试样断口附近截取一段制备金相试样进行观察, 发现拉伸断裂后断口附近出现大量类似针状马氏体组织特征, 图4(a)中的插图为3号试样的试验结果, 其余试样试验结果相同。为进一步对针状组织进行确定, 对其表面进行XRD分析, 发现试样拉伸后与拉伸前相对比出现了马氏体物相峰, 可以推断针状组织为马氏体组织。由于拉伸过程中应变的作用, 能

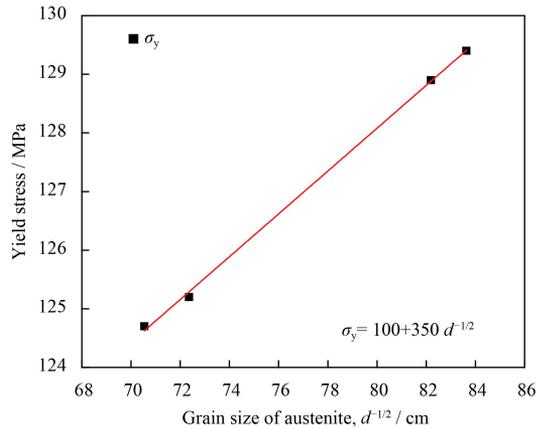


图5 低碳钢屈服强度与晶粒尺寸的关系

Fig.5 Dependence of yield stress on grain size of mild steel

使亚稳态的奥氏体转变为马氏体, 从而提高了Mn8Cr2Si钢的综合力学性能。

图6是冲击韧性与晶粒尺寸随Mn8Cr2Si钢含碳量的变化曲线。从图中可以看出, 随含碳量的增加, 冲击韧性表现出先逐渐升高再减小的变化趋势, 当含碳质量分数为0.8%时冲击韧性最高达到107 J/cm<sup>2</sup>; 晶粒尺寸的变化趋势与冲击韧性的变化趋势相反, 晶粒越细小, 材料的冲击韧性越高。

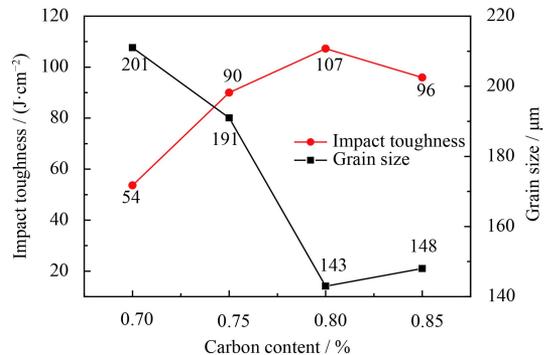


图6 Mn8Cr2Si钢试样的冲击韧性与晶粒尺寸

Fig.6 Impact toughness and grain size of Mn8Cr2Si steel specimens

材料在冲击断裂过程中包含两个阶段, 裂纹形成阶段和裂纹扩展阶段, 两者的综合作用最终使材料断裂。根据Zener-Stroh关于裂纹形成机制的位错塞积理论和Cottrell的裂纹扩展条件<sup>[14]</sup>:

$$\sigma_{\max} > \sigma_m = \left( \frac{E\gamma_s}{\alpha_0} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$\sigma_c = \frac{E\gamma_s}{k_y(1+\nu)\sqrt{d}} \quad (4)$$

式中,  $\sigma_{\max}$ 是裂纹形成功, GPa;  $\sigma_m$ 是断裂强

度, GPa;  $E$ 是弹性模量, GPa;  $\gamma_s$ 是表面能, J/m<sup>2</sup>;  $\alpha_0$ 是晶面间距, m;  $\sigma_c$ 是裂纹扩展功, GPa;  $k_y$ 是常数,  $\nu$ 是泊松比,  $d$ 是平均晶粒尺寸, m。通过式(3)(4)可知, 增大弹性模量可以在一定程度上增大裂纹形成功和裂纹扩展功, 从而提高材料的冲击韧性。而细化晶粒尺寸则可以增加裂纹扩展功, 也能提高材料的冲击韧性。Mn8Cr2Si钢试样的晶粒尺寸与弹性模量如表2所示, 结合图4可知其大小变化对冲击韧性的影响与理论分析一致。

图7是Mn8Cr2Si钢冲击断口形貌, 1号试样断口形貌属于准解理断口, 其典型特征是断口河流花样和撕裂边缘较明显, 并且有粗大的二次裂纹产生。结合图6的结果可知其断裂方式属于脆性断裂, 其韧性较差。2号、3号、4号试样断口形貌相似, 典型特征是有大小数量不同的韧窝花样, 韧窝深度较浅, 且韧窝底部较干净未见明显的夹杂物。3号、4号试样韧窝数量明显较多, 其断裂方式属于韧性断裂, 韧性较好。

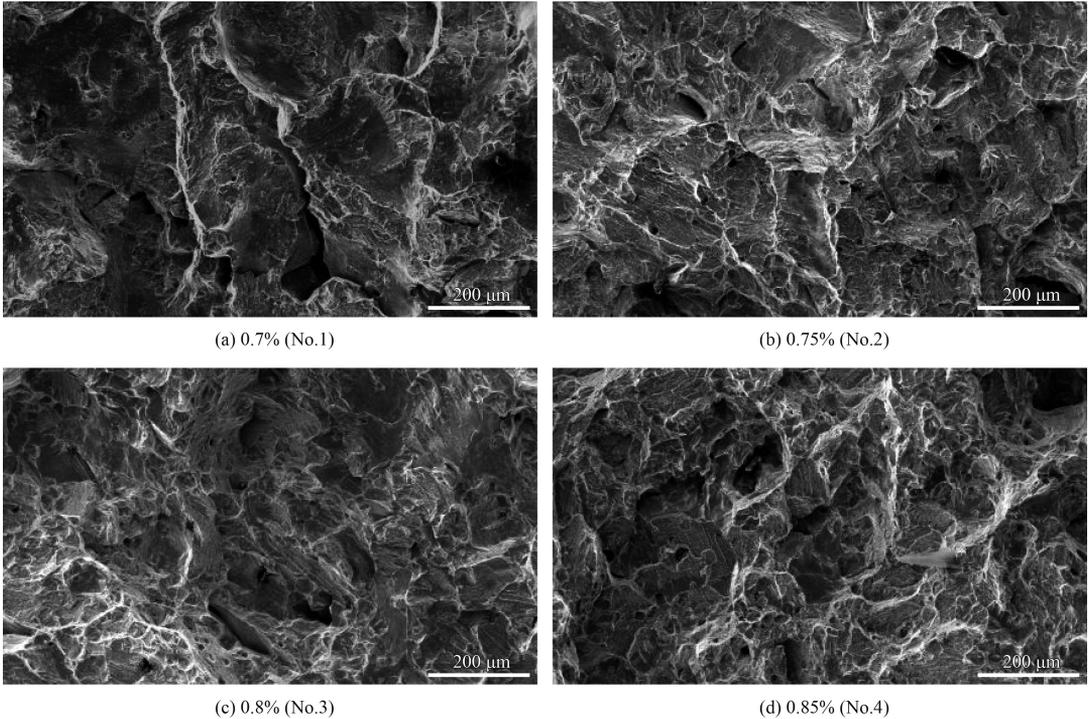


图7 不同含碳量下Mn8Cr2Si钢的冲击断口形貌

Fig.7 Impact fracture morphologies of Mn8Cr2Si steel with different carbon content

### 2.3 耐磨性能

图8是Mn8Cr2Si钢试样耐磨性变化曲线, 可以看出, Mn8Cr2Si钢随含碳量的增加磨损失重逐渐减少, 当含碳质量分数为0.8%时耐磨性最好, 此时含碳量继续增加耐磨性能则出现了略微下降。通过对比拉伸强度、冲击韧性随含碳量的变化趋势, 耐磨性能与力学性能的变化趋势几乎保持一致, 力学性能的优劣直接影响Mn8Cr2Si钢的耐磨性能。因此, 提高Mn8Cr2Si钢磨粒磨损性能的重要措施就是进一步提高其综合力学性能。

图9是对冲击磨损试样横截面加工硬化层显微硬度的测量, 基体显微硬度随含碳量变化不明显, 约为285 HV<sub>0.3</sub>。不同Mn8Cr2Si钢试样在相同冲击

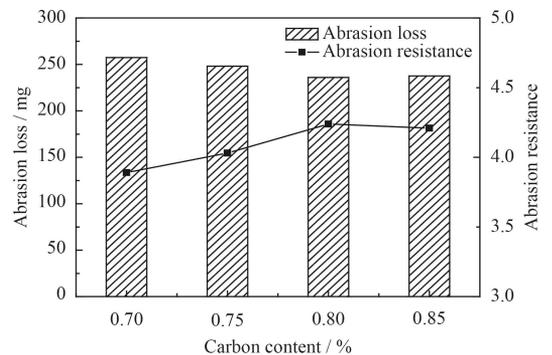


图8 Mn8Cr2Si钢试样的磨损量和耐磨性

Fig.8 Abrasion loss and resistance of Mn8Cr2Si steel specimens

功磨损条件下, 其加工硬化层深度没有明显区别, 基本维持在距离承冲表面3 mm处。从图10中

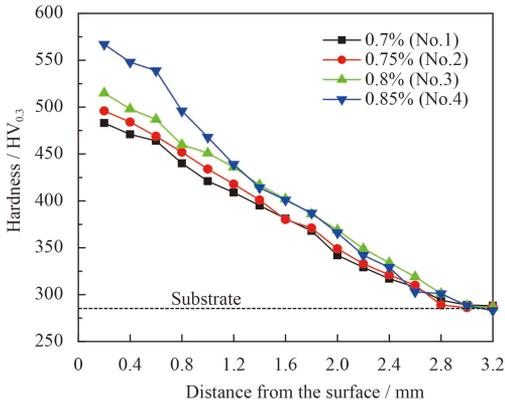


图9 Mn8Cr2Si钢试样的加工硬化

Fig.9 Work hardening of Mn8Cr2Si steel specimens

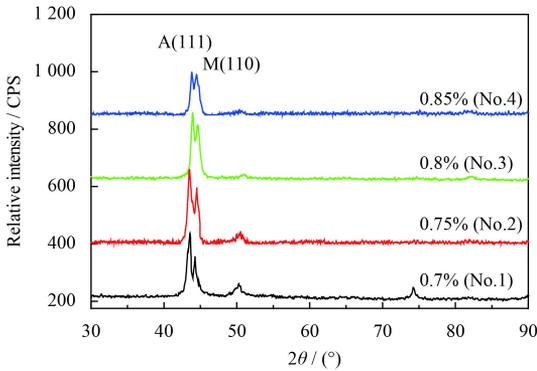
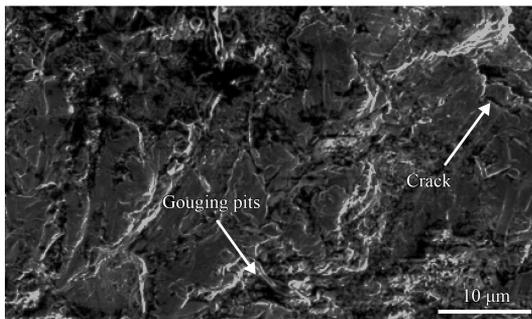


图10 Mn8Cr2Si钢试样冲击磨损表面的XRD图谱

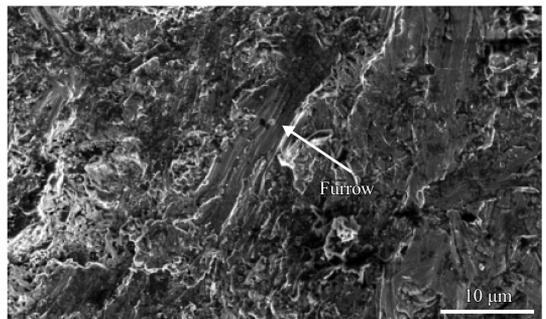
Fig.10 XRD patterns of Mn8Cr2Si steel after impacting wear test

可以看出, Mn8Cr2Si钢试样随着含碳量的增加, 承冲表面马氏体峰逐渐增强, 通过计算得马氏体体积分数分别为29.2%, 37.1%, 42.5%, 49.8%。因此, 随马氏体含量增加, 承冲表面加工硬化效果越好。材料表面加工硬化效果越好, 耐磨性能越优异, 但结合图8的结果可知, Mn8Cr2Si钢并非表面硬度越高, 耐磨性能越好, 其原因与Mn8Cr2Si钢试样的磨损机制有关。

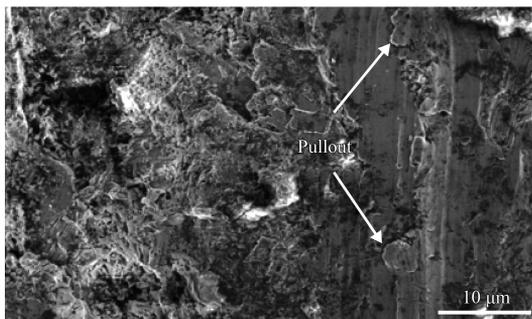
图11是Mn8Cr2Si钢试样冲击磨损后的磨损形貌, 可以看出, Mn8Cr2Si钢在冲击磨粒磨损时的磨损机制主要为塑变磨损与凿削磨损的复合。1号、2号试样在冲击磨损过程中, 由于硬化程度较低, 其犁削沟较深, 且1号试样由于磨粒的凿削造成了较多的显微裂纹, 在冲击过程中裂纹不断扩展, 最终使材料脱落形成大而深的凿削坑, 这也是1号试样失重最多的原因。3号试样塑变磨损造成的犁沟较浅, 经多次冲击硬化使材料表层脆性剥落, 这种剥落深度较浅, 属于凿削磨损与塑变磨损的复合, 材料耐磨性能最好。4号试样表面硬化程度高, 在冲击磨损过程中, 其塑性变形逐渐减少, 取而代之的是大面积的脆性剥落及凿削坑, 主要为凿削磨损。此时, 材料进入失稳磨损阶段, 耐磨性能开始下降。因此, 4号试样虽然加



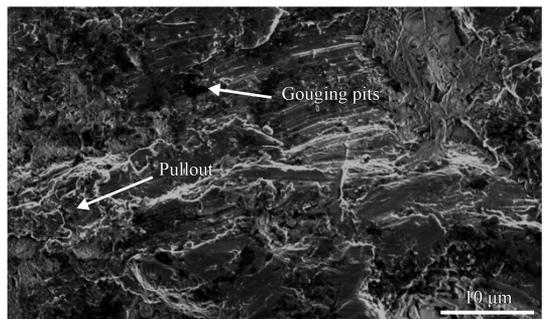
(a) 0.7% (No.1)



(b) 0.75% (No.2)



(c) 0.8% (No.3)



(d) 0.85% (No.4)

图11 不同含碳量下Mn8Cr2Si钢试样的磨粒磨损形貌

Fig.11 Abrasive wear morphologies of Mn8Cr2Si steel specimens with different carbon content

工硬化效果好, 但其耐磨性能比3号差。

## 2.4 耐腐蚀性能

Mn8Cr2Si钢水韧处理后的组织为单一奥氏体相, 因而具有一定的耐腐蚀性, 但实际铸造过程中可能产生一些夹杂物, 同时水韧处理不彻底可能使碳化物在晶界及晶内聚集, 会形成原电池而使Mn8Cr2Si钢试样加速腐蚀。并且Mn8Cr2Si钢中锰元素的热力学稳定性较差, 不易形成腐蚀产物及致密钝化膜阻碍腐蚀。因此, 针对Mn8Cr2Si钢试样的耐腐蚀性能进行测试, 其不同含碳量试样动电位极化曲线如图12所示。

极化曲线经拟合后的电化学参数如表3所示。随含碳量的增加, Mn8Cr2Si钢试样的自腐蚀电位逐渐增大, 当含碳质量分数为0.8%时, 自腐蚀电位达到最大值-0.201 01 V。此时, 含碳量继续增加则自腐蚀电位略微下降。自腐蚀电位越高, 说明此时腐蚀更难进行, 材料的耐腐蚀性能好。含碳质量分数为0.7%和0.75%时, 自腐蚀电流密度保持同一数量级, 含碳质量分数0.8%和0.85%时, 自腐蚀电流密度提高了一个数量级, 耐腐蚀性明显提升。结合表2中的晶粒尺寸可以发现, 奥氏体晶粒越细小, 其耐腐蚀性越优。经分析认为,

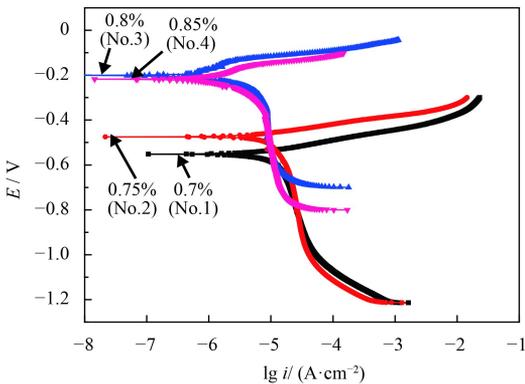


图12 Mn8Cr2Si钢试样的动电位极化曲线

Fig.12 Potentiodynamic polarization curves of Mn8Cr2Si steel specimens

表3 动电位极化曲线数值拟合

Table 3 Fitted results of potentiodynamic polarization curves

Carbon content / %	$E_{\text{corr}} / \text{V}$	$I_{\text{corr}} / (\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$R_p / (\Omega \cdot \text{cm}^{-2})$
0.7	-0.553 96	1.598 8E-5	1 631.7
0.75	-0.475 66	1.614 2E-5	1 616.1
0.8	-0.201 01	1.674 7E-6	15 577
0.85	-0.217 48	2.226 1E-6	11 719

Mn8Cr2Si钢腐蚀时呈现出钝化特性, 奥氏体晶粒的细化, 使活性原子数目明显增多, 有利于Mn8Cr2Si钢表面形成钝化膜, 提高其钝化性能, 阻止腐蚀进一步进行, 提高了材料的耐蚀性能。其次, 可能由于成分的变化, 当含碳质量分数为0.8%时, Mn8Cr2Si钢成分优化效果好, 使奥氏体晶界净化, 有效控制了夹杂物的大小和数量, 减少了腐蚀源, 材料耐腐蚀性能提高。

## 3 结论

(1) Mn8Cr2Si钢在含碳质量分数为0.7%~0.85%时, 其晶粒尺寸呈现先增大后减小的变化趋势, 当含碳质量分数为0.8%时, 晶粒尺寸最小, 为143  $\mu\text{m}$ 。

(2) 奥氏体晶粒的细化, 使晶界总面积增大, 减弱了应力集中, 抑制了裂纹的形成与扩展, 使其综合力学性能提高, 从而使Mn8Cr2Si钢耐磨粒磨损性能提高。

(3) 晶粒尺寸不仅影响Mn8Cr2Si钢的力学性能, 而且影响其耐腐蚀性能。由于Mn8Cr2Si钢腐蚀过程中的钝化特性, 晶粒的细化有利于表面钝化膜的形成, 从而进一步提高其耐腐蚀性能。

## 参考文献

- [1] ULLRICH C, ECKNER R, KRÜGER L, et al. Interplay of microstructure defects in austenitic steel with medium stacking fault energy[J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 649(1): 390-399.
- [2] MOGHADDAM E G, VARAHRAM N, DAVAMI P. On the comparison of microstructural characteristics and mechanical properties of high-vanadium austenitic manganese steels with the Hadfield steel[J]. Materials Science & Engineering A, 2012, 532(3): 260-266.
- [3] LEE C Y, JEONG J, HAN J, et al. Coupled strengthening in a medium manganese lightweight steel with an inhomogeneously grained structure of austenite[J]. Acta Materialia, 2015, 84: 1-8.
- [4] 徐滨士, 谭俊, 陈建敏. 表面工程领域科学技术发展[J]. 中国表面工程, 2011, 24(2): 1-12.  
XU B S, TAN J, CHEN J M. Science and technology development of surface engineering[J]. China Surface Engineering, 2011, 24(2): 1-12 (in Chinese).
- [5] SI H, XIONG R, SONG F, et al. Wear resistance of austenitic steel Fe-17Mn-6Si-0.3C with high silicon and high manganese[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2014, 27(2): 352-358.

- [6] DU X D, DING H F, WANG K, et al. Influence of impact energy on impact corrosion-abrasion of high manganese steel[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science), 2007, 22(3): 412-416.
- [7] 张福全, 邵飞杰, 周恬武. Mn13Cr2高锰钢冲击磨损机制的研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(12): 6-10.  
ZHANG F Q, SHAO F J, ZHOU D W. Research on impact wear mechanism of high manganese steel Mn13Cr2[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(12): 6-10 (in Chinese).
- [8] 孙荣民, 徐文欢, 王存宇, 等. 新型中锰马氏体高强度钢的耐磨性能[J]. 钢铁, 2012, 47(12): 64-70.  
SUN R M, XU W H, WANG C Y, et al. Wear resistant of new type medium manganese high strength martensite steel[J]. Iron and Steel, 2012, 47(12): 64-70 (in Chinese).
- [9] ZHAN W, CAO L Q, JUN H U, et al. Intercritical rolling induced ultrafine lamellar structure and enhanced mechanical properties of medium-Mn steel[J]. Journal of Iron & Steel Research International, 2014, 21(5): 551-558.
- [10] 丛菁华, 唐荻, 武会宾, 等. 锰对中锰耐磨钢组织形态及相变的影响[J]. 工程科学学报, 2016, 38(1): 64-70.  
CONG J H, TANG D, WU H B, et al. Effects of Mn on the microstructure morphology and phase transformation of medium manganese wear resistant steel[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(1): 64-70 (in Chinese).
- [11] ZHAO Y G, ZANG J T, TAN J, et al. Microstructure refinement and property improvement of metastable austenitic manganese steel induced by electropulsing[J]. Journal of Iron & Steel Research International, 2014, 21(7): 685-689.
- [12] CAI Z H, DING H, MISRA R D K, et al. Austenite stability and deformation behavior in a cold-rolled transformation-induced plasticity steel with medium manganese content[J]. Acta Materialia, 2015, 84: 229-236.
- [13] FRIEDMAN L H, CHRZAN D C. Scaling theory of the hall-petch relation for multilayers[J]. Physical Review Letters, 1998, 81(13): 2715-2718.
- [14] HAN Y, SHI J, XU L, et al. TiC precipitation induced effect on microstructure and mechanical properties in low carbon medium manganese steel[J]. Materials Science & Engineering A, 2011, 530(1): 643-651.

(责任编辑: 王文宇)