

# Ni 和 Mn 元素对等温淬火球墨铸铁组织、性能及低温冲击韧性的影响

张亚军<sup>1</sup>, 周张松<sup>1</sup>, 马金哲<sup>2</sup>, 李广龙<sup>2</sup>, 曲迎东<sup>2</sup>, 张伟<sup>2</sup>

(1. 江苏宏德特种部件股份有限公司, 江苏南通 226352;

2. 沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110870)

**摘要:** 研究了Ni (0~1.0%) 和Mn (0.1%~0.3%) 元素添加量对等温淬火球墨铸铁 (ADI) 显微组织和力学性能的影响。结果表明: 随着Ni、Mn元素含量的增加, ADI中石墨球平均尺寸减小, 球化率先提高后降低, ADI基体组织中奥氏体相的体积分数占比增加。当Ni和Mn元素的添加量分别为0.7%和0.2%时, ADI的综合力学性能最佳, 其抗拉强度1 007 MPa, 伸长率9.2%, -40 °C时夏比冲击实验吸收功达到最大值6.1 J。

**关键词:** 等温淬火球墨铸铁; 奥氏体; 力学性能; 低温冲击韧性

**中图分类号:** TG143.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 01-0034-07

**DOI:** 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0006

## 作者简介:

张亚军 (1985-), 男, 工程师, 本科, 主要研究方向为球墨铸铁。电话: 18306286558, E-mail: zyj@sian-casting.com

## 通信作者:

张伟, 男, 副教授, 博士, 硕士生导师。电话: 17702474801, E-mail: zwei@sut.edu.cn

## 基金项目:

辽宁省高校基本科研项目 (LJ212410142112)。

## 收稿日期:

2024-07-22 收到初稿,  
2025-09-08 收到修订稿。

## 引用格式:

张亚军, 周张松, 马金哲, 等. Ni 和 Mn 元素对等温淬火球墨铸铁组织、性能及低温冲击韧性的影响 [J]. 铸造, 2026, 75(1): 34-40.  
ZHANG Yajun, ZHOU Zhangsong, MA Jinzhe, et al. Effects of Ni and Mn elements on microstructure, properties and low temperature impact toughness of austempered ductile iron [J]. Foundry, 2026, 75(1): 34-40.

等温淬火球墨铸铁 (Austempered Ductile Iron, ADI) 是通过等温淬火处理获得的由贝氏体、残余奥氏体及针状铁素体基体组织组成的球墨铸铁<sup>[1]</sup>。特殊的微观结构为ADI提供了良好的综合力学性能, 使其具有与锻钢相当或更加优异的拉伸强度、延展性和断裂韧性, 同时具有相对较低的成本和设计灵活性<sup>[1-2]</sup>。因此, 作为一种重要的工程材料, ADI近年来逐渐被广泛应用于汽车工业、国防和土方机械等领域<sup>[3]</sup>。值得注意的是, 在-20~-2 °C的低温情况下, ADI中的高碳奥氏体开始向马氏体转变, 这使得其冲击韧性随温度的降低逐渐变差<sup>[4-5]</sup>, 在更低的温度下该材料甚至发生由韧性到脆性的断裂变化<sup>[6]</sup>。因此, 优化ADI材料的低温冲击性能是扩大其工程应用范围的主要途径之一。

合金化是优化材料组织和性能的一种重要技术手段, 如Cu、Ni、Mn、Cr和Mo等是常用于制备和调控ADI组织和性能的合金元素。其中, 0.8%及以下的Cu元素添加可以提高ADI的淬透性, 促使奥氏体含量提高<sup>[7]</sup>, 但该元素对低温环境下的高碳奥氏体向马氏体的转变阻碍作用有限<sup>[8]</sup>。Cr和Mo元素本身具有促进奥氏体低温稳定性的作用<sup>[8]</sup>, 但两者同样也是强烈的碳化物形成元素, 不利于低温高稳定性高碳奥氏体的形成, 碳化物的存在也进一步降低了ADI的低温塑韧性。研究表明, Ni在铁-碳合金中具有无限的固溶能力, 稳定地扩大奥氏体相区, 提高塑韧性, 使得ADI在低温下也能保持良好的冲击韧性<sup>[9]</sup>。Mn同样能够扩大奥氏体相区, 使C曲线向右移动, 并降低奥氏体的分解速度, 此外, Mn相比于Ni价格更为低廉, 因此是低温球铁中替代镍元素的最佳选择。需要注意的是, 锰是容易偏析的元素, 含量过高会导致ADI中出现碳化物, 降低塑韧性, 其含量应控制在适宜的范围<sup>[10]</sup>。

本研究探讨Ni和Mn元素的加入量对等温淬火球墨铸铁组织、性能和低温韧性的影响, 旨在获得室温性能优异且具有良好的低温冲击性能的ADI合金化成分, 为其在低温领域的应用奠定基础。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 球墨铸铁铸锭制备

以高纯生铁、废钢、锰铁及电解镍为炉料, 采用50 kg中频感应电炉进行熔炼。

熔炼过程中使用碳硅分析仪检测原铁液的C和Si含量,采用增碳剂和硅铁调整化学成分。利用冲入法进行包内球化及孕育处理,其中,球化剂为1.5%的稀土镁硅铁合金Elmag5800,孕育剂为1.2%高钙钡孕育剂Barinoc。首先将球化剂平铺在经过充分烘烤的堤坝式浇包反应室中,随后将孕育剂覆盖到球化剂表面,最后覆盖少量铁屑和珍珠岩覆盖剂。待铁液熔清及除渣后冲入浇包中,铁液出炉温度为 $(1500 \pm 10)^\circ\text{C}$ 。球化反应结束后使用除渣剂去除包内铁液表面浮渣,随之测温并将铁液浇注至预制的Y型树脂自硬砂型腔中。实际浇注温度为 $1380\sim 1400^\circ\text{C}$ ,凝固冷却后获得标准Y型球墨铸铁试块,其尺寸可参考文献<sup>[6]</sup>。采用全因子设计浇注铸锭12组,因子变量如下: Mn加入量(质量分数,下同)分别为0.1%、0.2%和0.3%; Ni加入量分别为0、0.4%、0.7%和1.0%,其他元素的控制范围: $(3.6 \pm 0.05)\% \text{C}$ 、 $(2.2 \pm 0.05)\% \text{Si}$ 、 $\text{P} < 0.03\%$ 、 $\text{S} < 0.02\%$ 。

## 1.2 等温淬火热处理

采用如图1所示工艺对铸锭进行等温淬火热处理,首先利用马弗炉将铸锭加热至 $(920 \pm 5)^\circ\text{C}$ 保温120 min,随后将铸锭快速转移至由亚硝酸钠和硝酸钾盐混和的 $(370 \pm 5)^\circ\text{C}$ 盐浴炉中等温淬火处理120 min。

## 1.3 试样加工及检测

热处理结束后在铸锭底部切取尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的金相试样、 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 55\text{ mm}$ 的V型冲击试样(GB/T 229—2020)以及尺寸如图2所示

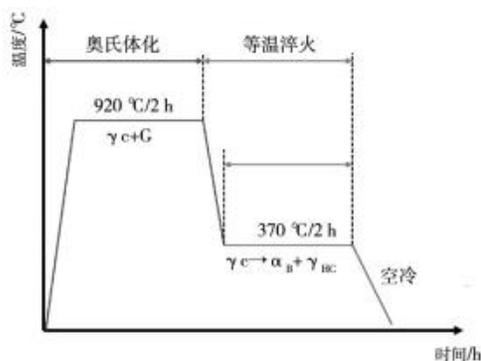


图1 等温淬火热处理工艺

Fig. 1 Heat treatment process of isothermal quenching

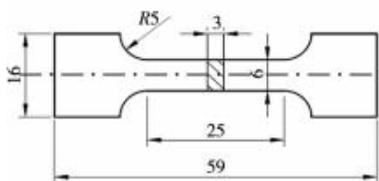


图2 拉伸试样尺寸

Fig. 2 Size of tensile specimen

的拉伸试样。利用X射线衍射仪(岛津XRD-7000)对打磨抛光后的金相试样的物相组成进行分析( $\text{Cu-K}\alpha$ 辐射,波长 $\lambda=1.54184\text{ nm}$ ),扫描范围为 $20^\circ\sim 90^\circ$ ,扫描速度为 $8^\circ \cdot \text{min}^{-1}$ ,步长为 $0.02^\circ$ ,功率为 $2.3\text{ kW}$ 。随后使用奥林巴斯光学显微镜(Olympus OLS4100)分析金相试样在腐蚀前的石墨特征。采用蔡司扫描电镜(Gemini SEM 300)对4%硝酸酒精腐蚀后的金相试样基体组织进行表征。采用通用试验机E45-305对拉伸试样进行力学性能测试,拉伸速率为 $1.5\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,每组分进行5次平行拉伸试验。采用MTS ZCJ100型示波冲击试验机对V形缺口冲击试样进行低温冲击试验。低温冲击试验前,将试样在设定温度下冷存15 min。冲击结束后利用钨灯丝扫描电镜(SEM S3400)对试样断口进行观察。

## 2 结果及讨论

### 2.1 ADI 中的石墨特征

图3所示为几组ADI的典型石墨金相组织,以及由12组试验结果绘制的石墨特征参数随Ni和Mn添加量变化的等高线图。表1所示为12组不同Ni和Mn含量ADI铸锭中的石墨特征参数。其中,各组铸锭的石墨球化率、石墨球平均直径和石墨颗粒数是由5组视场统计获得的平均值。各试样的石墨球化等级为3~4级,大小等级为6~7级。当Ni固定时,随着Mn含量的增加,石墨的球化率先略有增加后逐渐减少,石墨球平均直径略微减小。当Mn固定时,随着Ni添加量的增加,石墨的球化率同样先增加后减少,石墨球的尺寸明显减小、数量增加。对比结果表明,Ni对ADI中石墨的影响程度略大于Mn元素,这与Ni的石墨化作用有关,它可以提供表面活性位点,有助于碳原子在其周围结合和生长,对碳的石墨化和球化有促进作用<sup>[11]</sup>。0.2wt.%Mn-0.7wt.%Ni铸锭(以下采用0.2Mn-0.7Ni表示)中的石墨球化率达到试验成分中的最佳特征参数。

### 2.2 ADI 的基体组织

图4为腐蚀后不同Ni、Mn添加量ADI试样的基体组织SEM形貌,所有试样的基体组织均由针状铁素体和残余奥氏体组成,未发现明显的碳化物存在,表明Mn元素的添加量在合理的范围内。此外,增加Mn或Ni的含量导致基体中的奥氏体含量增加以及奥氏体块尺寸增大。Ni和Mn元素对奥氏体的稳定作用,以及对共析转变温度的降低作用,是促进ADI试样中块状奥氏体形成及其尺寸增大的主要原因<sup>[10]</sup>。此外,铁液凝固过程中Ni元素在石墨球附近共晶团中的反向偏聚,在一定程度上抵消了Mn元素的正偏聚,进而降低了ADI试样

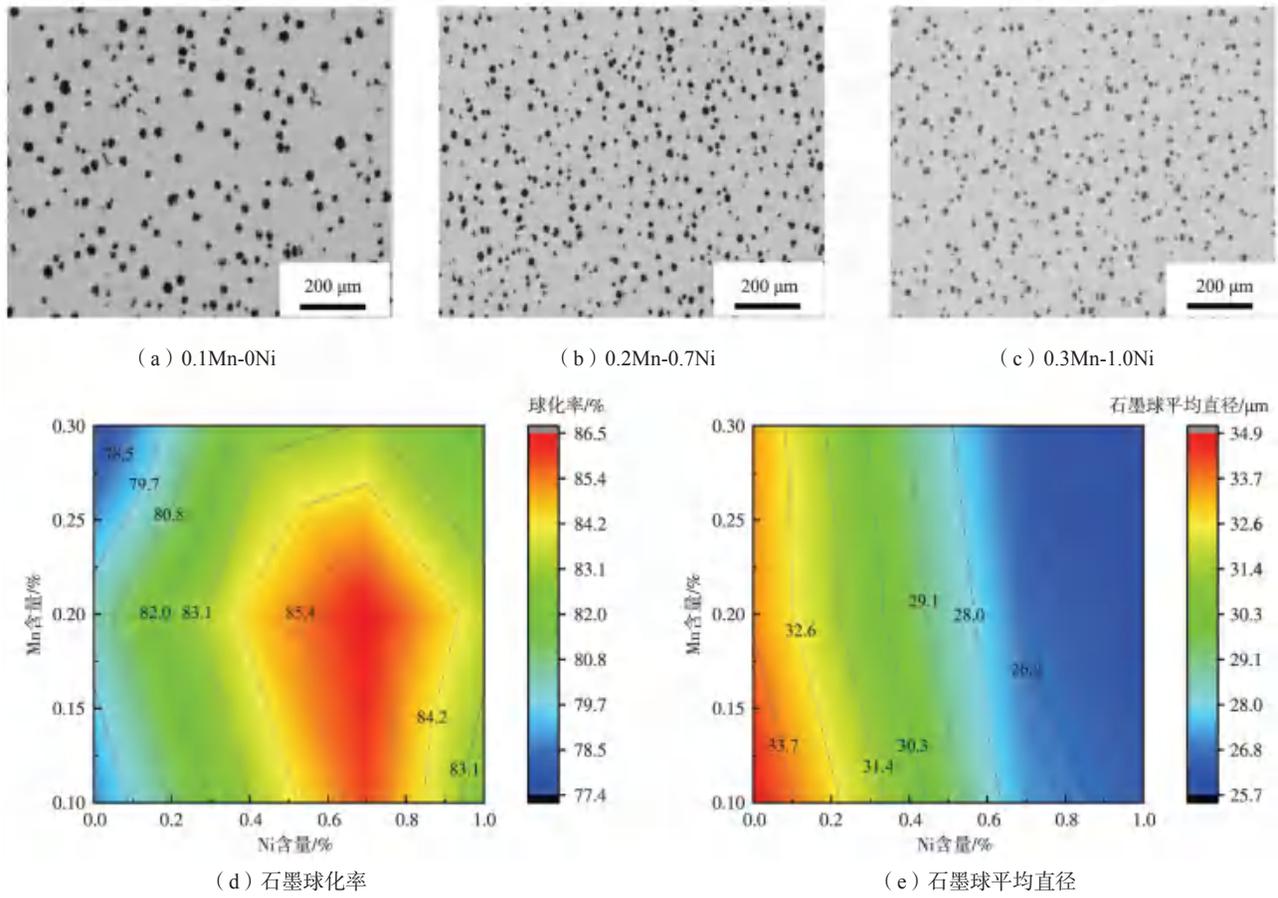


图3 Ni-Mn含量对ADI石墨球组织及特征参数的影响

Fig. 3 Effect of Ni-Mn contents on the microstructure and characteristic parameters of graphite spheres in ADI

表1 各组ADI铸锭中的石墨特征参数和基体组织中的奥氏体占比  
Tab. 1 The graphite characteristic parameters and the proportions of austenite in the matrix structure for each group of ADI ingots

项目	0Ni			0.4Ni			0.7Ni			1.0Ni		
	0.1Mn	0.2Mn	0.3Mn									
石墨球平均直径/μm	34.86	33.61	33.45	30.79	29.61	29.05	27.19	26.64	26.12	26.44	25.85	25.67
球化率/%	78.7	80.3	77.4	83.1	84.5	82.5	85.9	86.5	83.2	82.4	83.6	81.7
石墨颗粒数/(个·mm <sup>-2</sup> )	121	126	117	138	140	130	193	201	184	207	204	191
奥氏体占比/%	12.6	13.7	14.3	18.5	19.4	20.4	21.1	21.7	22.1	21.9	22.2	22.7

中碳化物的形成概率<sup>[12]</sup>。

图5为几组不同Ni、Mn添加量ADI试样的典型XRD图谱，可以看出铁素体(α相)峰和奥氏体(γ相)峰的存在，表明ADI基体由这两种相组成。α相和γ相的衍射峰相对强度与Ni、Mn的添加量存在一定关系，意味着合金元素对α和γ相的占比产生了一定的影响。利用下式对12组ADI试样中的奥氏体含量进行定量分析<sup>[13]</sup>：

$$V_{\gamma} = \frac{1}{1 + G \frac{I_{\alpha}}{I_{\gamma}}} \quad (1)$$

式中： $V_{\gamma}$ 为奥氏体相含量， $I_{\alpha}$ 与 $I_{\gamma}$ 分别为铁素体和奥氏

体对应衍射峰的强度积分， $G$ 表示奥氏体与铁素体两晶面对应的强度因子之比<sup>[13]</sup>。利用12组ADI试样的XRD图谱计算获得各试样中的奥氏体相对含量，结果列于表1中，根据计算结果绘制的等高线如图6所示。对于0.1Mn和0Ni添加量的ADI，奥氏体占比仅为12.6%。Mn和Ni含量的添加致使奥氏体含量增大，尤其是随着Ni添加量的增加，基体中奥氏体占比的变化趋势更为明显，这与SEM检测结果一致。当Mn、Ni添加量分别为0.3%和1.0%时，ADI中的奥氏体占比达到22.7%。

### 2.3 ADI的室温力学性能

图7所示为Ni、Mn添加量对ADI试样的室温抗拉

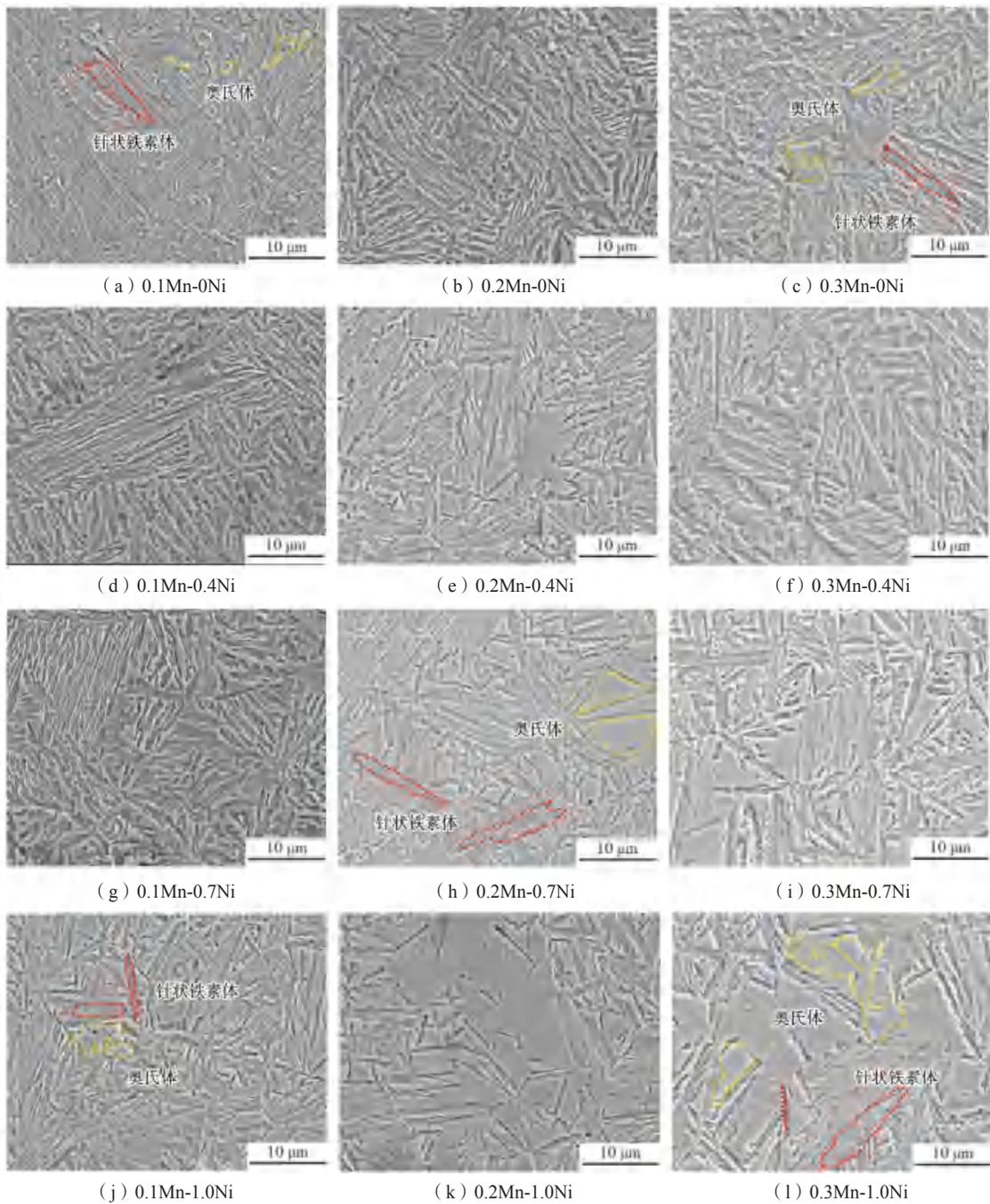


图4 不同Ni、Mn含量ADI试样的基体组织SEM图像

Fig. 4 SEM images of matrix structures of ADI samples with different Ni and Mn contents

强度 ( $\sigma_b$ ) 和伸长率 ( $\delta$ ) 的影响趋势。在相同Ni添加量的情况下, ADI的 $\sigma_b$ 和 $\delta$ 均在Mn含量为0.2%时达到最高。另外,  $\sigma_b$ 和 $\delta$ 均随着Ni含量的提高先增加, 当Ni含量为0.7%时达到峰值, 随后开始降低。0.2Mn-0.7Ni达到最佳的室温力学性能, 其 $\sigma_b$ 和 $\delta$ 分别为1 007 MPa和9.2%。

ADI的室温力学性能变化是由基体和石墨组织等多方面因素综合作用的结果。一方面, 随着Ni和Mn添加量的增加, 两者均固溶于基体组织中, 形成固溶强化效果。这种强化机制是由于Ni和Mn元素在基体相中

的固溶导致了晶格畸变, 阻碍位错的运动, 致使基体组织的强度逐渐升高。另一方面, 铸铁中的石墨也并非没有强度, 实际上它也具有一定的变形能力, 良好的球状形态能够显著减小铸铁变形时可能产生的应力集中现象, 避免异型石墨导致的微裂纹过早出现。当Ni、Mn含量分别超过0.7%和0.2%时, ADI中的石墨球化率开始下降以及块状奥氏体相的尺寸增加和占比增大使得ADI的抗拉强度开始降低。ADI伸长率的增加是由于Ni和Mn添加量增加造成基体组织中塑性相块状奥氏体占比增加以及石墨球化率提高的双重作用结果。

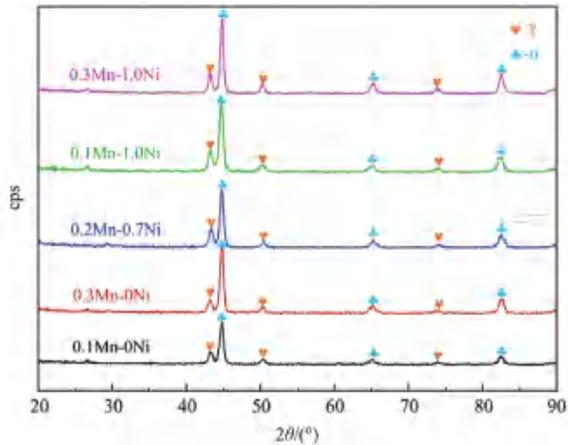


图5 不同合金化添加量ADI试样的XRD图谱

Fig. 5 XRD patterns of ADI samples with different alloying additions

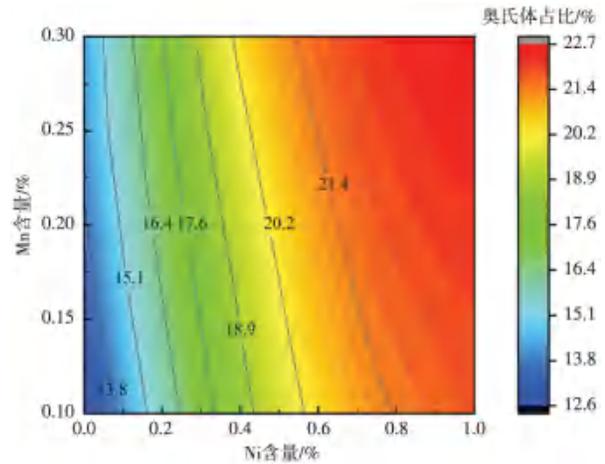


图6 Ni、Mn添加量对ADI中奥氏体占比的影响

Fig. 6 Effect of Ni and Mn addition on the proportion of austenite in ADI

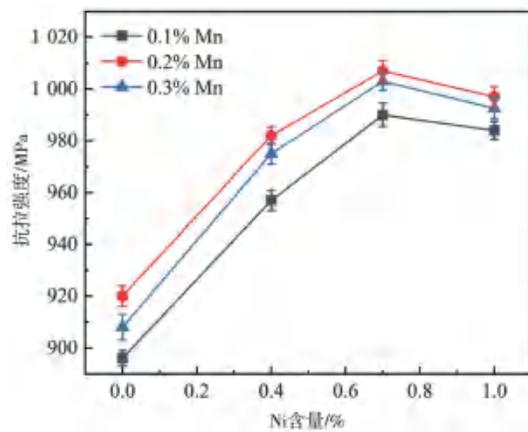
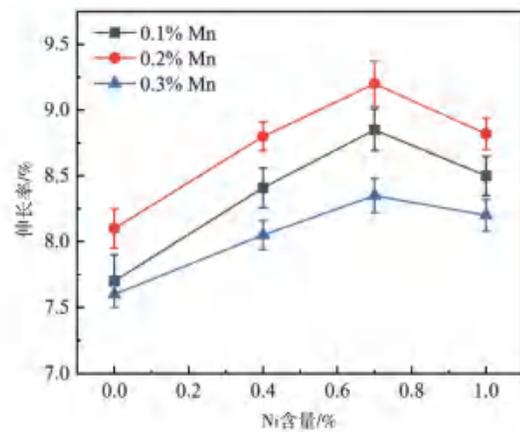
(a) 抗拉强度 $\sigma_0$ (b) 伸长率 $\delta$ 

图7 Ni、Mn添加量对ADI试样室温力学性能的影响

Fig. 7 Effect of Ni and Mn additions on the mechanical properties of ADI samples at room temperature

当Ni、Mn添加量过高时，块状奥氏体相尺寸过大以及球化率的减小则导致ADI的伸长率由峰值逐渐减小。

## 2.4 低温冲击韧性

根据前文所述，0.2Mn-0.7Ni含量的ADI具有最佳的石墨特征参数和室温力学性能，因此以该合金为研究对象，以0.1Mn-0Ni含量的ADI为对比成分，分析了两组ADI试样从室温至低温环境时的耐冲击性能。表2所示为两组合金（每组合金5个试样）在不同温度下的夏比冲击试验的冲击吸收功平均值。结果表明，在20~-40℃的降温过程中，两组ADI试样的冲击功均快速降低，在-40℃下的冲击功仅有室温条件下的60%左右，这可能与试样在低温槽中急速降温造成的应力集中或微裂纹以及在低温环境中部分奥氏体逐渐向马氏体转变有关<sup>[5]</sup>。在相同温度下，0.2Mn-0.7Ni的冲击功比

表2 不同温度下ADI试样的冲击功  
Tab. 2 Impact energies of ADI samples at different temperatures

检测温度/℃	冲击功/J	
	0.1Mn-0Ni	0.2Mn-0.7Ni
20	8.3	9.7
0	7.6	9.0
-20	6.2	7.7
-40	4.8	6.1

0.1Mn-0Ni高17%~27%，且温度越低，冲击功的相对增高率越大。

图8为0.1Mn-0Ni和0.2Mn-0.7Ni合金化ADI试样的冲击断口形貌。在室温20℃冲击时，两组试样断口中都存在着大量的韧窝，伴随有少量的撕裂棱及河流花

样, 表现为典型的韧性断裂形式。随着温度的降低, 冲击断口韧窝的数量逐渐减少, 解理断裂形貌特征愈发明显。 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 出现大量河流花样, 韧窝形貌几乎消失, 表现为典型的准解理断裂形式。这种断裂形式变化规律的主要原因是随着试验温度的降低, ADI材料原子扩散困难, 对裂纹的敏感性增加, 抵抗塑性变形的能力降低, 更容易形成脆性断裂<sup>[14]</sup>。对比两组成分的ADI,  $0.2\text{Mn}-0.7\text{Ni}$ 在低温时的韧窝和撕裂棱数量明显多于 $0.1\text{Mn}-0\text{Ni}$ , 而河流花样则相对较少, 表明在低温下 $0.2\text{Mn}-0.7\text{Ni}$ 试样的韧性优于 $0.1\text{Mn}-0\text{Ni}$ 试样, 这与

两组试样的冲击功对比结果一致。这一现象与Ni、Mn添加造成的ADI基体中奥氏体含量增加有关。在ADI中, 高碳奥氏体与针状铁素体相比具有更高的滑移能力, 材料变形时位错塞积和应力集中主要分布在基体中的铁素体中, 较多的奥氏体可以增加奥氏体与铁素体界面对铁素体中位错的吸收能力, 进而降低铁素体在变形时产生的位错塞积和应力集中, 其结果则是ADI抵抗冲击断裂的能力提高。此外, 石墨的球化率提升和平均直径降低了也降低了试样中的应力集中, 有利于提升冲击韧性。

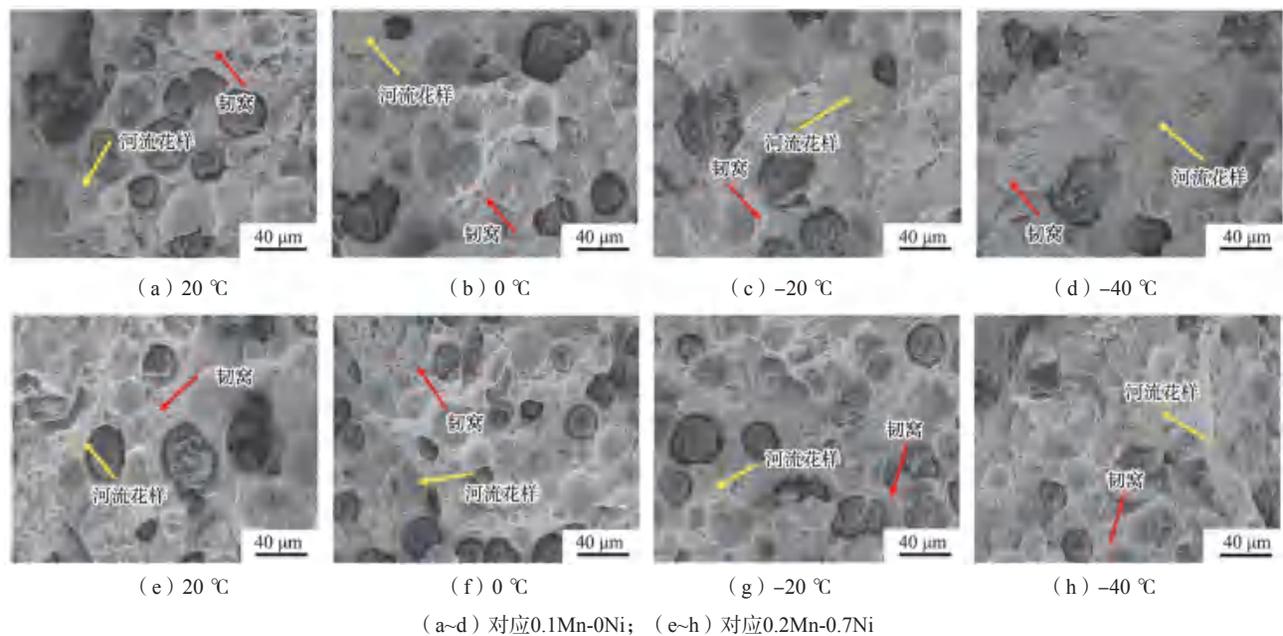


图8 ADI试样在不同温度下的冲击断口形貌  
Fig. 8 The impact fracture morphologies of ADI samples at different temperatures

### 3 结论

(1) Ni、Mn元素的添加可以在一定程度上提高ADI中石墨的球化率, 减小石墨球尺寸, 增加石墨球数量, 提升基体中块状奥氏体的占比。在试验成分范围内,  $0.2\text{Mn}-0.7\text{Ni}$ 添加量ADI的石墨球化率达到最高,  $0.3\text{Mn}-1.0\text{Ni}$ 添加量ADI的石墨球尺寸最小, 奥氏体含量达到最大值22.7%。

(2)  $0.2\text{Mn}-0.7\text{Ni}$ 添加量的ADI具有突出的力学

性能, 室温抗拉强度和伸长率分别达到1 007 MPa和9.2%。过量的Ni、Mn元素添加将导致石墨球化率降低, 块状奥氏体尺寸过度粗化, 从而使得抗拉强度和伸长率减小。

(3) Ni、Mn元素的添加可以提升ADI的低温冲击性能,  $0.2\text{Mn}-0.7\text{Ni}$ 添加量的ADI在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的冲击功为6.1 J, 比不含镍ADI ( $0.1\text{Mn}-0\text{Ni}$ ) 的吸收功高27%。低温冲击韧性的提高得益于ADI中奥氏体含量的增加。

#### 参考文献:

- [1] ALVES V C C, BARACHO L L D A, CÉSIO T A D S, et al. Correlation between microstructure and mechanical properties of austempered ductile irons [J]. Materials Science Forum, 2018, 925: 203-209.
- [2] ZHANG J, ZHANG N, ZHANG M, et al. Microstructure and mechanical properties of austempered ductile iron with different strength grades [J]. Materials Letters, 2014, 119: 47-50.
- [3] PANNEERSELVAM S, PUTATUNDA S K, GUNDLACH R, et al. Influence of intercritical austempering on the microstructure and mechanical properties of austempered ductile cast iron (ADI) [J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 694: 72-80.
- [4] 龚文邦, 刘金城, 向纲玉, 等. 等温淬火球墨铸铁 (ADI) 理论、生产技术及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.

- [5] 龚文邦, 杨振阳, 刘金城, 等. 等温淬火球墨铸铁 (ADI) 的低温性能与环境脆性 [J]. 铸造, 2022, 71 (6): 741-745.
- [6] 郑言彪, 李志华, 张军. ADI900材料的低温性能研究 [J]. 铸造, 2015, 64 (12): 1222-1225.
- [7] AMRAN Y, KATSMAN A, SCHAAF P, et al. Influence of copper addition and temperature on the kinetics of austempering in ductile iron [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2010, 41: 1052-1058.
- [8] 姜越, 尹钟大, 朱景川. 合金元素对马氏体时效不锈钢Ms温度影响的定量分析 [J]. 特殊钢, 2003 (6): 9-12.
- [9] TOKUNAGA T, KIM Y J, EA H. Effect of nickel content on microstructural evolution in austempered solution-strengthened ferritic ductile cast iron [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28 (7): 4034-4040.
- [10] BENAM S A. Effect of alloying elements on austempered ductile iron (ADI) properties and its process: review [J]. China Foundry, 2015, 12 (1): 54-70.
- [11] 李静, 赵靖宇, 杨勇. 镍对球墨铸铁组织及性能的影响 [J]. 铸造, 2016, 65 (9): 903-906.
- [12] YU S K, LOPER C R. The effect of molybdenum, copper and nickel on the pearlitic and martensitic hardenability of ductile cast irons [J]. AFS Transaction, 1988, 96: 811-821.
- [13] WANG C Y, SHI J, CAO W Q, et al. Characterization of microstructure obtained by quenching and partitioning process in low alloy martensitic steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527: 3442-3449.
- [14] HAYATI A F. The effect of cryogenic treatment on hardness, toughness, and tribological properties of austempered ductile iron with different nickel contents [J]. International Journal of Metalcasting, 2022, 16 (3): 1442-1454.

---

## Effects of Ni and Mn Elements on Microstructure, Properties and Low Temperature Impact Toughness of Austempered Ductile Iron

ZHANG Ya-jun<sup>1</sup>, ZHOU Zhang-song<sup>1</sup>, MA Jin-zhe<sup>2</sup>, LI Guang-long<sup>2</sup>, QU Ying-dong<sup>2</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Hongde Special Parts Co., Ltd., Nantong 226352, Jiangsu, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China)

### Abstract:

In this work, the effects of Ni(0-1.0%) and Mn(0.1%-0.3%) content on the microstructure and mechanical properties of austempered ductile iron (ADI) were studied. The results show that with the increase of Ni and Mn contents, the average size of graphite spheres in ADI decreases, the spheroidization increases first and then decreases, and the volume fraction of austenite phase in ADI matrix increases. When the addition amounts of Ni and Mn elements are 0.7% and 0.2%, respectively, the comprehensive mechanical property of ADI is the best. The tensile strength is 1 007 MPa, the elongation is 9.2%, and the Charpy impact test absorption energy reaches a maximum of 6.1 J at -40 °C.

### Key words:

austempered ductile iron; austenite; mechanical properties; low temperature impact toughness