

# 奥氏体球墨铸铁超低温冲击断裂行为研究

张新宁<sup>1</sup>, 姜珂<sup>2</sup>

(1. 辽宁石油化工大学机械工程学院, 辽宁抚顺 113001; 2. 沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110870)

**摘要:** 以奥氏体球墨铸铁为研究对象, 研究其低温冲击的断裂行为。首先研究奥氏体球墨铸铁在冲击断裂过程中裂纹形成及裂纹扩展功等各部分能量随温度的变化规律; 奥氏体球墨铸铁在20~ -196℃温度范围内冲击吸收功呈先上升后下降的趋势, 裂纹的亚稳扩展能量是决定低温冲击性能的主要因素。其次研究奥氏体球墨铸铁低温延性断裂行为的微观机理, 采用SEM断口分析方法系统研究不同温度下奥氏体球墨铸铁延性断裂的裂纹萌生、扩展过程及随温度演变规律。

**关键词:** 奥氏体球墨铸铁; 低温冲击韧性; 断口特征

**中图分类号:** TG143.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2017) 12-1326-04

## Study on Impact Fracture Behavior of Austenitic Ductile Iron Under Ultra-Low Temperature

ZHANG Xin-ning<sup>1</sup>, JIANG Ke<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, Liaoning, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China)

**Abstract:** The ductile fracture mechanism of austenitic ductile iron under ultra-low temperature impact load was studied. The fracture behavior with temperature of austenitic ductile iron under impact load was studied. The energy of crack formation and crack propagation during the impact fracture were determined by the impact experiment. The impact absorption energy increase firstly and then decline in the trend with the decreasing of temperature, the metastable propagation energy is the main factor on low-temperature impact property. The microscopic mechanism of ductile fracture behavior at ultra-low temperature of austenitic ductile iron was also studied. Crack initiation and propagation of ductile fracture at different temperatures were analyzed by using in-situ fracture metallographic observation method.

**Key words:** austenitic ductile iron; low temperature impact toughness; fracture characteristics

奥氏体球墨铸铁以其独特的相结构和优异的物理化学和力学性能, 如组织稳定性、抗低温冲击性、耐腐蚀性、耐疲劳性等性能, 在LNG清洁能源储运设备、核乏燃料储运容器和海洋平台高端铸件等领域均具有不可估量的潜力<sup>[1-3]</sup>。另外, 此类设备往往会在超低温环境下反复使用, 一旦发生失效断裂必然与其所承受的载荷及环境温度密切相关。例如LNG用BOG低温往复压缩机缸体的工作环境温度需要低于-162℃, 最低达-196℃; 而铸造残余应力、开停工、工作压力波动等动态冲击载荷因素都有可能会导致发生断裂失效<sup>[4-7]</sup>。为保证这些可能承受动载荷关键构件的安全可靠, 需要在设计中预防构件在冲击载荷下的起裂和扩展, 因此, 研究金属材料动态断裂行为的重要意义是不言而喻的, 针对此类超低温材料的断裂失效研究, 对提高关键装备安全性以及优化材料性能都具有重要指导意义<sup>[8-10]</sup>。

## 1 材料制备及试验方法

采用中频感应电炉熔炼电解镍、生铁和废钢等原

材料, 采用冲入法进行球化处理, 球化剂为镍镁合金, 通过光谱分析和化学分析确定球墨铸铁的各元素含量, 最终获得合格的奥氏体球墨铸铁。奥氏体球墨铸铁材料所在的低温储运设备领域涉及材料动态断裂的性能评估。示波冲击试验是最早被采用的评价材料动态断裂韧性的试验方法, 试验操作方便且费用不高, 因此, 本文对奥氏体球墨铸铁V型缺口试样进行系列温度冲击试验, 冲击试验按照GB/T229-2007金属材料夏比摆锤冲击试验方法, 利用RKP450示波冲击试验机测得不同温度下的特征曲线, 由载荷-位移曲线数据得出冲击试样在裂纹形核及裂纹扩展过程中吸收的能量。

## 2 试验结果

奥氏体球墨铸铁在不同温度下冲击载荷与能量分布如表1。分析表明, 材料的屈服载荷 $F_{0.2}$ 随温度降低呈增大的趋势, 相应的裂纹萌生能量 $E_i$ 也表现为同样的趋势, 而冲击裂纹失稳扩展能量 $E_{1p}$ 随温度降低。但 $E_i$

**基金项目:** 辽宁省教育厅项目 (L2016007)。收稿日期: 2017-06-04收到初稿, 2017-08-04收到修订稿。

**作者简介:** 张新宁 (1987-), 女, 讲师, 主要从事球墨铸铁材料的研究工作。E-mail: 13840109889@163.com

与 $E_{up}$ 的能量较小,且二者总和 $E_{add}$ 随温度的降低变化不大,对总冲击吸收功 $E_t$ 的影响有限。因此,低温冲击性能主要取决于冲击裂纹在亚稳扩展中的能量 $E_{mp}$ 。奥氏体球墨铸铁在20~-196℃温度范围内,冲击吸收功呈先上升后下降的趋势,从能量角度而言,由表1中的分析结果表明,裂纹的亚稳扩展能量是决定低温冲击性能的主要因素。

图1是高镍奥氏体球墨铸铁低温冲击极值(-80℃)前后的示波冲击动态载荷-位移对比曲线。曲线上最高点代表最大动态载荷,左侧最高点代表屈服载荷。结合表1中的参数,在某一温度下所对应的屈服载荷位移点做横坐标的垂线,与图中载荷曲线的交点即为该温度下的裂纹启裂处。随着温度降低,屈服载荷升高,屈服位移增大,裂纹形成所需要的能量就越大。图1a显示,在低温冲击值达到-80℃的极值前,示波冲击动态载荷-位移曲线中会出现若干个动态载荷峰值,并且曲线的趋势也十分相似,这表明存在相同韧性断裂机理的低温冲击断裂过程;然而,当温度下降至-80℃以下时(图1b),随着温度的下降,动态载荷最大峰值出现显著上升,高载荷能量峰数量却显著下降,并且承受高载荷的位移也出现明显的减小,这说明此时的低温冲击断裂过程发生了变化,而最大载荷峰值的波动主要反应了裂纹扩展能的大小,结合表1中的参数,能够得出的结论是冲击性能主要取决于裂纹的亚稳扩展。这与传统球墨铸铁材料

冲击吸收功随温度变化曲线明显不同,因此,对奥氏体球墨铸铁进行了系统的断口分析。

表1 奥氏体球墨铸铁在不同温度下示波冲击载荷与能量分布  
Table 1 Impact load and energy distribution of austenitic ductile iron at different temperatures

温度/℃	$(F_{gy}/dgy)/(kN \cdot mm^{-2})$	$E_t/J$	$E_{mp}/J$	$E_{up}/J$	$E_{add}/J$	$E_t/J$
20	2.86/0.43	1.21	22.48	1.67	2.88	25.28
-20	3.03/0.41	1.25	23.37	1.72	2.97	26.34
-60	3.01/0.47	1.32	23.65	1.66	2.98	26.63
-80	3.26/0.43	1.47	23.96	1.58	3.05	27.01
-100	3.53/0.43	1.59	22.27	1.43	3.02	25.29
-140	4.03/0.44	1.84	21.47	1.21	3.05	24.52
-196	5.46/0.50	2.14	20.29	0.94	3.08	23.37

### 3 断口分析

断口分析是研究裂纹萌生和扩展的必要手段,除了传统的断口观察分析,本文采用如下方法:首先将奥氏体球墨铸铁冲击试样V型缺口的两个侧面进行磨抛腐蚀后,选取V型缺口附近的典型区域在显微镜下观察并进行拍照保存,然后进行不同温度条件下的缺口冲击试验,获取冲击断裂后断口附近的显微组织照片,通过石墨球形貌特征来获取冲击前后同一区域的显微组织照片,从而实现对球墨铸铁裂纹扩展、瞬时断裂过程与微观组织交互作用的系统分析。图2为奥氏体球墨铸铁室温冲击前后断口附近原位组织对比照片,

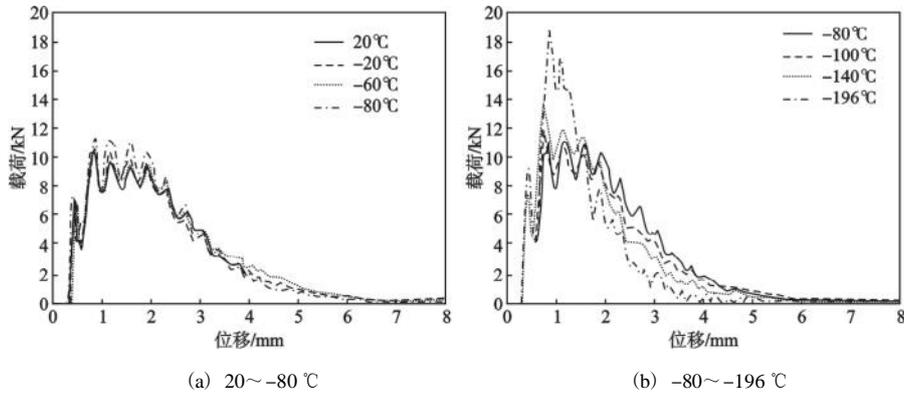


图1 不同温度下动态冲击载荷-位移曲线

Fig. 1 Curves of dynamic impact load and deflection at different temperatures

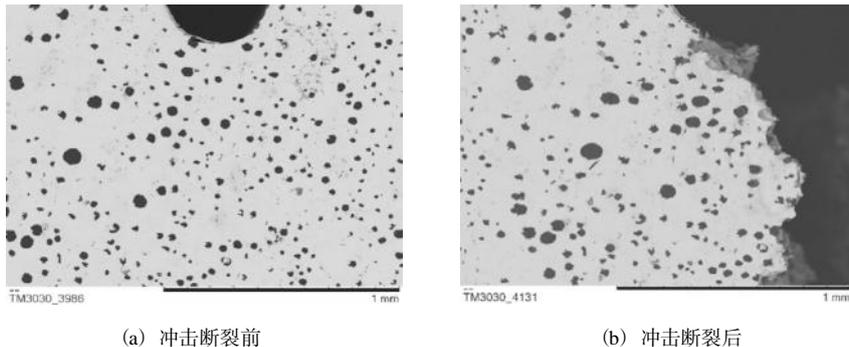


图2 冲击断裂前后V型缺口附近断口(-80℃)

Fig. 2 Microstructure nearby fracture before and after impact at -80℃

由图中可观察到石墨球之间的铁素体基体发生了剧烈的塑性变形,在冲击断裂后,石墨球与基体发生解体现象。

对各个低温断口进行X-Ray衍射图谱分析,结果如图3所示,并未发现面心立方转变为体心立方现象,不同温度下断口中石墨和基体的塑性变形大致相同,并未发现明显区别,具体变形量与温度之间的关系有待进一步研究。

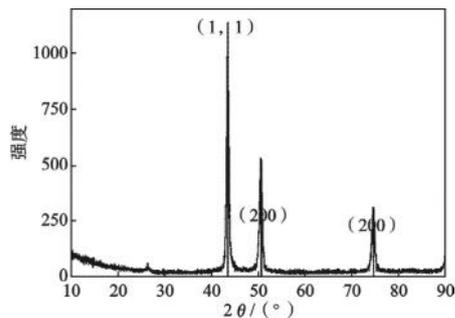


图3 -80 °C下断口X-Ray衍射图谱

Fig. 3 The X-Ray of diffraction pattern of sample fracture at -80 °C

分析表明,各个温度下奥氏体球墨铸铁的断裂模式均为韧性断裂,其具体的断裂机制也基本相同。图4为-20 °C下奥氏体球墨铸铁冲击断口形貌。图中韧窝状凹陷为等轴状或椭圆形,韧窝形貌是由于变形过程中显微孔洞在石墨球处形成所致,孔洞的数量随着变形量的增大而不断增多,孔洞发生长大、聚集并相互连接最终造成断裂,导致在石墨球与基体界面处萌生显微孔洞并以孔洞萌生聚合的方式发生延性断裂。

另外,在-80 °C下,在断口中发现基体开裂现象,由于这种基体的开裂现象可能导致裂纹的亚稳扩展能量的变化。图5中的石墨球之间存在着裂纹将两个石墨球连通,当基体裂纹扩展过程中遇到这种石墨-基体界面已开裂的孔洞时裂纹发生明显钝化。因此,石墨与

基体界面开裂后所产生的孔洞能够起到钝化裂纹和降低裂纹扩展速率的作用。

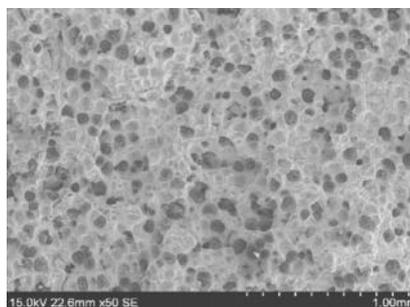


图4 奥氏体球墨铸铁断口 (-20 °C)

Fig. 4 Impact fracture of austenitic ductile iron (-20 °C)

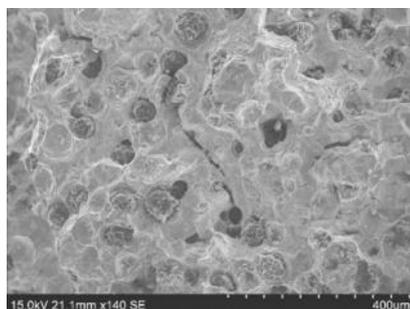
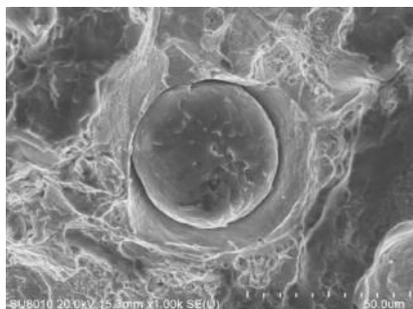


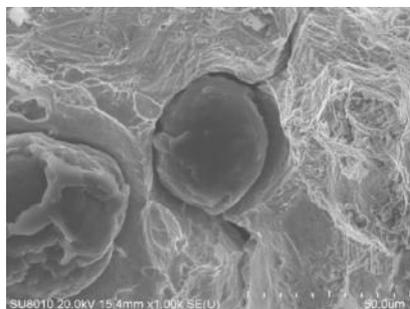
图5 奥氏体球墨铸铁断口 (-80 °C)

Fig. 5 Impact fracture of austenitic ductile iron (-80 °C)

此外,在韧性断裂过程中,石墨球对裂纹萌生及扩展起着重要作用。图6a显示了一个以石墨球为中心的典型韧窝结构特征,可见韧窝周围的奥氏体基体发生很大程度的塑性变形构成韧窝边缘。分析表明,球墨铸铁中韧窝的形成与石墨球的存在密不可分,石墨球作为韧窝形成的必不可少的核心与韧窝一一对应。此外,球墨铸铁裂纹萌生与石墨球的圆整度相关,由图6b可知,在一些形状不规则的石墨周围基体中出现一些明显的裂纹,因此,可以认为这些不规则石墨的尖角处在低温冲击过程中起到裂纹源作用。



(a) 圆整石墨球



(b) 非圆整石墨球

图6 石墨球及周围断口形貌 (-80 °C)

Fig. 6 The graphite and surrounding matrix on impact fracture (-80 °C)

## 4 结论

奥氏体球墨铸铁在-80 °C前后,冲击值呈现先上升后下降的趋势。低温冲击性能主要取决于冲击裂纹

在亚稳扩展中的能量 $E_{mp}$ 。奥氏体球墨铸铁在低温下冲击断裂方式为韧性断裂,在-80 °C温度下,冲击断口基体中发现开裂现象,不规则石墨的尖角处在低温冲击过程中起到裂纹源作用。

**参考文献:**

- [1] 张海红, 胡晓明, 程久欢. LNG低温管道材料研究 [J]. 化工科技市场, 2010, 33 (2): 32-34.
- [2] 叶忠志, 张园星. 液化天然气BOG压缩机选型分析 [J]. 石油与化工设备, 2016, 16: 61-63.
- [3] Qizhou C, Bokang W. Recent development of ductile cast iron production technology in China [J]. China Foundry, 2008, 5 (2): 82-91.
- [4] 高顺, 程凤军, 史朝龙, 等. 高镍奥氏体球墨铸铁涡壳的开发 [J]. 铸造, 2013, 62 (4): 287-291.
- [5] 金永锡, 范仲嘉. 高镍奥氏体球墨铸铁涡轮增压器壳体材质及工艺研究 [J]. 铸造, 2005, 54 (5): 494-500.
- alloying elements to vary carbon equivalent of austenitic ductile cast iron: microstructure and mechanical properties [J]. Mater. Sci. Eng. A, 2009, 504: 81-89.
- [7] Maarof Mohd. Rashidi, Mohd. Hasbullah Idris. Effect of inoculation on microstructure, mechanical and corrosion properties of high manganese ductile Ni-resist alloy [J]. Mater. Des., 2013, 51: 861-869.
- [8] 宫少涛, 孙良, 熊庆人, 等. 不同热处理状态国产9Ni钢的超低温断裂韧性 [J]. 机械工程材料, 2013, 37 (2): 71-77.
- [9] 翟建勇. 不同冲击性能低温容器用9Ni钢的微观研究 [J]. 冶金分析, 2015, 35 (6): 19-25.
- [10] 袁志忠, 戴起勋, 程晓农, 等. 高氮奥氏体钢的CVN低温冲击断裂研究 [J]. 江苏大学学报, 2004, 25 (3): 247-251.

(编辑: 刘冬梅, [ldm@foundryworld.com](mailto:ldm@foundryworld.com))

(选自《铸造》2017年第12期)