

SiMoV 蠕墨铸铁高温变形行为研究

董 鹏^{1, 2}, 肖恭林^{1, 2}, 杨志刚^{1, 2}, 徐小辉^{1, 2}, 陈 坤^{1, 2}

(1. 常州朗锐铸造有限公司 江苏省轨道交通关键零部件工程技术中心, 江苏常州 213164;

2. 中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司, 江苏常州 213011)

摘要: 通过光学显微镜、扫描电镜、高温力学性能测试等试验方法, 研究了SiMoV蠕墨铸铁在500~800 ℃温度范围内的高温变形行为。结果表明, 随着温度的升高, 应力应变曲线中的屈服阶段应变范围并未发生明显的增长改变, 而缩颈阶段至断裂过程的应变区间长度明显增加, 材料出现软化现象。同时, 抗拉强度和屈服强度随温度升高急剧下降, 800 ℃下屈服强度和抗拉强度相较500 ℃降幅度高达740%和935%。而延伸却呈现相反趋势, 增长479%。裂纹起源为蠕虫状石墨尖端, 其高温强度的下降除了受铁素体基体组织特性影响, 也与高温下蠕虫状石墨的氧化形成二次裂纹扩展存在关联性。

关键词: SiMoV蠕墨铸铁; 应力应变曲线; 高温力学性能; 裂纹扩展

蠕墨铸铁因其石墨形态是介于片状和球状中间的一种蠕虫状石墨, 兼具有优良的铸造性能、导热性能和力学性能, 广泛地应用于汽车发动机缸体、缸盖, 排气系统的排气歧管以及涡轮增压系统涡轮壳的生产制造^[1]。随着排放标准的提高, 为提高汽车用燃料的燃烧率和尾气的净化率, 使得涡轮增压系统和排气系统中的气体温度越来越高, 导致材料的冷热疲劳应力增大, 普通的蠕墨铸铁材料出现开裂等失效现象, 具有优良耐高温性能的中高硅钼耐热蠕墨铁应运而生。先前的有关中高硅钼耐热蠕墨铁的研究主要集中于其生产工艺控制、成分设计以及上限温度对硅钼蠕墨铸铁的抗热疲劳性能研究^[2-5], 而对于硅钼蠕墨铸铁的高温变形行为研究较少。为此, 作者着重开展了SiMoV蠕墨铸铁在500 ℃以上的高温变形行为研究, 揭示其高温状态下组织和性能的演变规律, 为硅钼蠕墨铸铁在高温载荷下实现良好的服役状态提供理论依据。

1 试验方法

试验所用SiMoV蠕墨铸铁材料化学成分如表1所示。熔炼过程中采用Q10铸造生铁、低合金废钢、硅铁、钼铁、钒铁等合金在100 kg中频感应炉内熔化, 升温至1 530~1 550 ℃, 静置3 min后将铁液冲入至含蠕化剂、孕育剂(75SiFe)和覆盖剂的蠕化包内进行蠕化反应。待蠕化反应完成后浇入Y型试块砂型中, Y型试块尺寸如图1所示。

表1 SiMoV蠕墨铸铁材料化学成分

Table 1 Chemical composition of SiMoV vermicular graphite cast iron material $w_B/\%$

C	Si	Mn	P	S	Mo	V	RE	Mg	Ti
3.18	4.62	0.27	0.028	0.018	0.86	0.29	0.033	0.014	0.03

在Y型试块底部位置截取金相试样和高温性能试验试样。金相检测时, 采用OLYMPUS金相显微镜观察铸态组织, 采用DT2000金相分析软件测量铸态组织的蠕化率和碳化物含量, 使用剑桥仪器S360型扫描电镜及配套的能谱仪对碳化物进行形

作者简介:

董 鹏(1988-), 男, 硕士, 研究方向为铸铁材料设计和工艺开发。E-mail: dongpengwork@126.com

中图分类号: TG143.49

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

09-1248-06

收稿日期:

2023-09-11 收到初稿,

2023-11-27 收到修订稿。

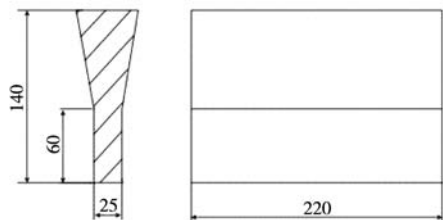


图1 Y型试块尺寸

Fig. 1 Dimensions of Y-shaped test block

貌观察和化学成分定性分析。高温强度测定时,将试验试样加工成如图2所示尺寸规格,并在500℃、600℃、700℃和800℃下测定高温强度指标。采用万能试验机测试试样高温性能,配备加热电阻炉,试验拉伸速率为1 mm/min,电阻炉温差范围为 $\pm 5^\circ\text{C}$,将试样加热至试验温度,保温30 min后进行试验。高温拉伸试验结束后,先对不同温度下的试样断口形貌进行扫描电镜分析,而后用线切割方式纵向切开拉伸试样断口,制成金相,使用OLYMPUS金相显微镜观察高温拉伸后组织形貌,研究不同温度下的裂纹扩展方式。

2 试验结果

2.1 SiMoV 蠕墨铸铁金相组织

SiMoV蠕墨铸铁的金相组织如图3所示。从金相照

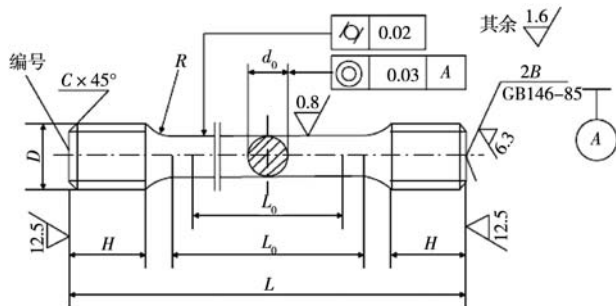
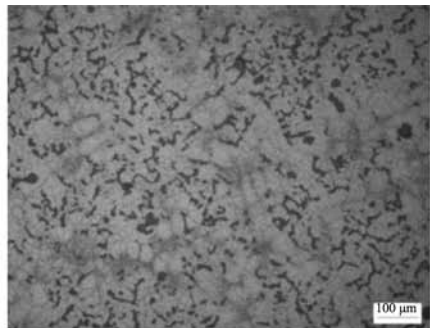


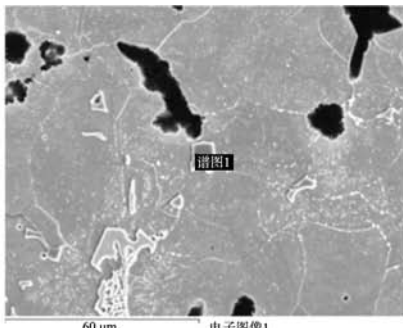
图2 高温拉伸试样尺寸

Fig. 2 Dimensions of high-temperature tensile specimen

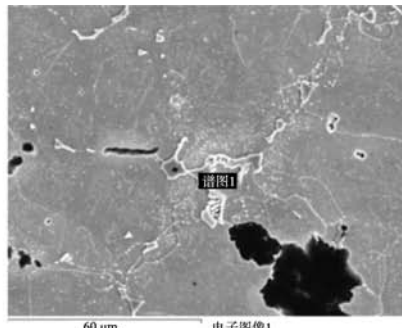
片可以看出, SiMoV蠕墨铸铁的石墨以蠕虫状形态为主,蠕化率在80%以上。基体组织以铁素体为主,碳化物含量在5%左右。SEM照片显示,铁素体晶界处分布着块状和鱼骨状碳化物。通过对不同形貌的碳化物EDS能谱分析得知(图4),块状和鱼骨状碳化物主要成分为Mo、V和C,属于为Mo、V复合类碳化物。由于Mo、V等合金元素与C有较强的亲和力,在凝固过程中通过微观偏析富集于晶界等最后凝固区域,在形成晶界碳化物^[4]。该类碳化物性质稳定,在高温下不发生相变,可增强晶界高温结合力,使材料具有良好的高温变形抵抗力。



(a) 金相组织OM像



(b) 块状碳化物SEM形貌



(c) 鱼骨状碳化物SEM形貌

图3 SiMoV蠕墨铸铁的显微组织OM像和碳化物SEM形貌

Fig. 3 Microscopic OM image and carbide SEM morphologies of SiMoV vermicular graphite cast iron

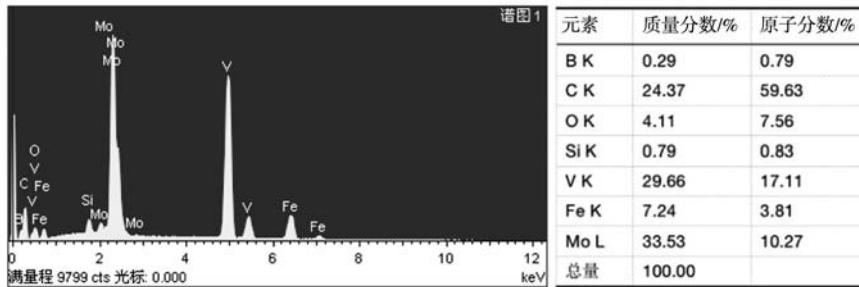


图4 碳化物EDS能谱分析结果

Fig. 4 EDS spectrum analysis results of carbides

2.2 SiMoV 蠕墨铸铁高温变形行为

2.2.1 高温拉伸曲线

图5为SiMoV蠕墨铸铁在500~800℃不同温度下的拉伸应力应变曲线。从图中可以看出,不同温度下的应力应变曲线表现不同的应力应变特性。在500℃试验温度, SiMoV蠕墨铸铁的应力应变曲线存在弹性变形阶段、屈服阶段,而后应力急速上升达到峰值,达到缩颈断裂阶段,且缩颈断裂阶段应变区间较短,材料表现出较差的韧性。当温度达到600℃及以上时, SiMoV蠕墨铸铁的应力应变曲线仍以弹性变形阶段、屈服阶段和缩颈阶段为主,屈服阶段应变范围并未发生明显的增长改变,仅是屈服强度值显著下降,表明温度的上升仅仅是影响了屈服强度,对于屈服阶段的应变范围影响较小。而应力应变缩颈阶段则出现明显的差异,温度越高,曲线峰值所对应的应力越小,且缩颈阶段至断裂过程的应变区间长度明显增加,材料的韧性明显增加。不同温度应力应变曲线的变化趋势表明,高温状态下, SiMoV蠕墨铸铁的强度指标会显著下降,韧性显著增强,材料出现高温软化现象。

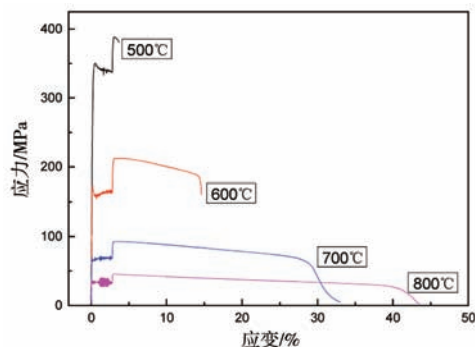
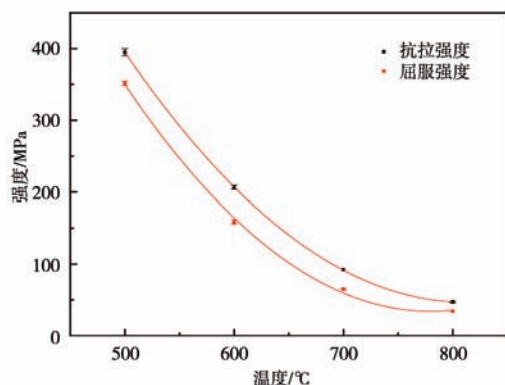


图5 SiMoV蠕墨铸铁在不同温度下的应力应变曲线

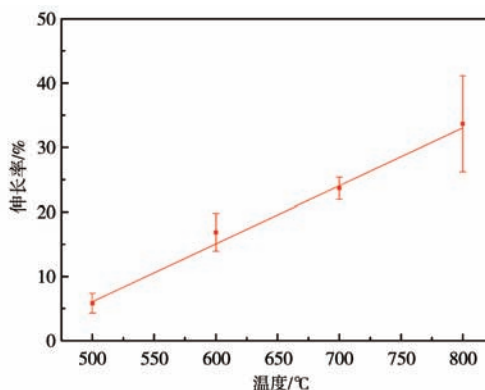
Fig. 5 Stress-strain curves of SiMoV vermicular graphite cast irons at different temperatures

2.2.2 高温强度变化规律

SiMoV蠕墨铸铁在500~800℃的高温力学性能变化趋势如图6所示。从图中可以看出,随着温度的升高, SiMoV蠕墨铸铁的抗拉强度和屈服强度呈指数趋势剧烈下降,其抗拉强度和屈服强度分别由500℃时的395 MPa和352 MPa下降至800℃时的47 MPa和



(a) 抗拉强度和屈服强度



(b) 断后伸长率

图6 SiMoV蠕墨铸铁高温拉伸性能随温度的变化曲线

Fig. 6 Temperature dependent curves of high-temperature tensile properties of SiMoV vermicular graphite cast irons

34 MPa, 下降幅度高达740%和935%; SiMoV蠕墨铸铁的伸长率则随着试验温度的提高而逐步提升,其断后伸长率由500℃时5.8%提高至800℃时的33.6%,伸长率增加479%,表明其高温下具有更优良的延展性。

2.2.3 高温断口分析

图7为SiMoV蠕墨铸铁在500~800℃范围内不同温度下的拉伸断口微观形貌。从图中可以看出,500℃试验温度下的拉伸断口出现面积较大的解理平台,裂纹沿晶界扩展,呈现河流状断口形貌,等轴状韧窝数量极少,表明SiMoV蠕墨铸铁在500℃下依然以脆性断裂为主。对比600℃及以上试验温度下的拉伸断口可以发现,断口出现了明显的撕裂岭和等轴状的韧窝,且

随着温度升高韧窝的数量进一步增加。撕裂岭和韧窝的出现表明,随着温度的提高, SiMoV蠕墨铸铁的断裂特性由脆性断裂方式转变为韧性断裂方式,材料的塑性变形能力增强。同时,随着温度升高,断口处出现了高温氧化痕迹,从图8的能谱分析结果可以看出,在800℃的断口处发现了铁碳团絮状氧化物的存在, SiMoV蠕墨铸铁高温强度的下降与其高温氧化也存在一定的关联。

2.2.4 裂纹扩展特性分析

为分析SiMoV蠕墨铸铁在500~800℃范围内拉伸过程中的裂纹起源和扩展特性,对断口位置进行了金相分析,具体如图9和图10所示。从图9中800℃拉伸断口

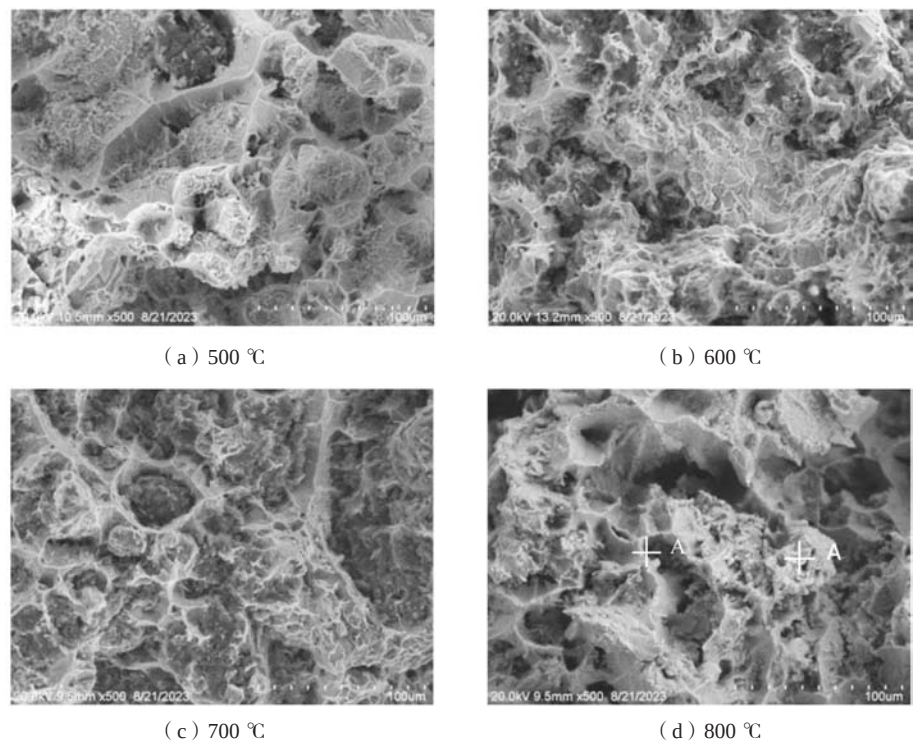


图7 SiMoV蠕墨铸铁在不同温度下的拉伸断口形貌

Fig. 7 Tensile fracture morphologies of SiMoV vermicular graphite cast irons at different temperatures

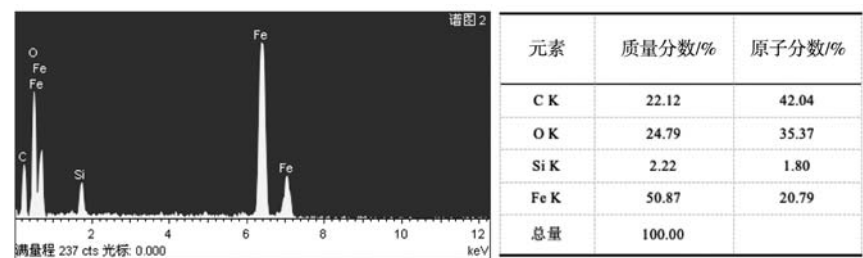


图8 800 °C下的拉伸断口A点能谱分析结果

Fig. 8 EDS spectrum analysis results of point A in the tensile fracture of sample at 800 °C

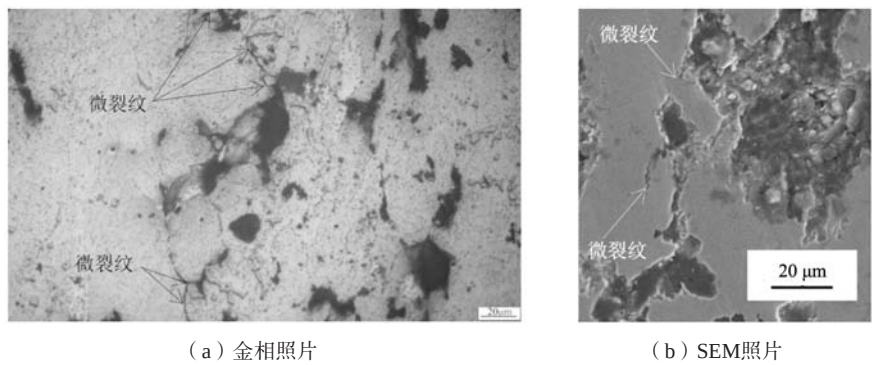


图9 SiMoV蠕墨铸铁800 °C拉伸断口5 mm附近区裂纹形貌

Fig. 9 Crack morphologies near 5 mm of the tensile fracture surfaces of SiMoV vermicular graphite cast iron at 800 °C

5 mm附近区域的金相图和SEM图中可以看出，微裂纹的起源为蠕虫状石墨尖端。裂纹的扩展路径有两条，一是沿着条状碳化物与铁素体的晶界位置扩展，二是沿着铁素体晶界位置扩展，裂纹呈现明显晶界扩展的

特性。
进一步对图10中不同温度下拉伸断口的横截面金相进行分析发现，不同温度下的拉伸裂纹扩展呈现不同的形貌特征。500 °C下裂纹扩展以主裂纹扩展为主，

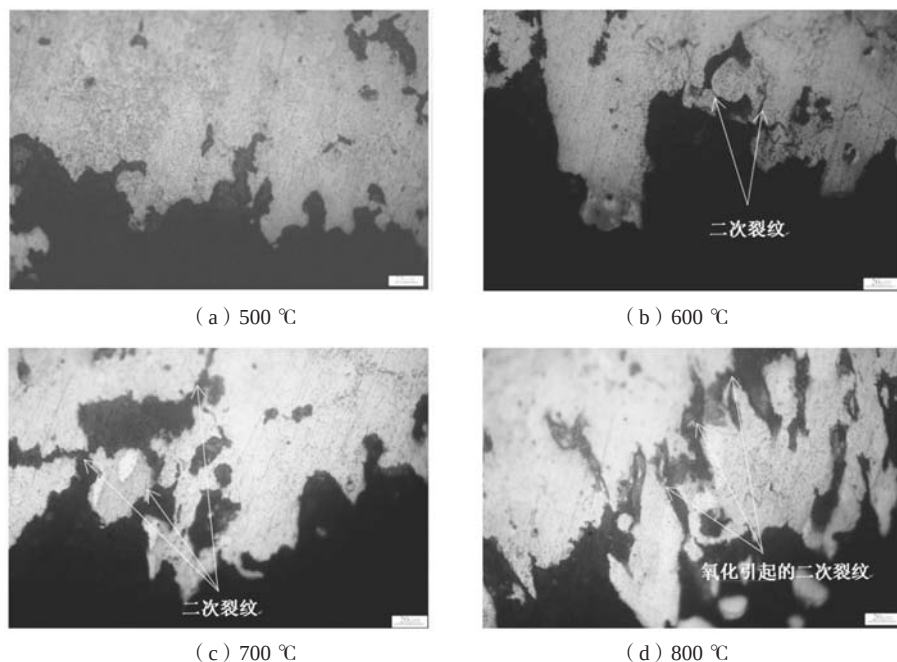


图10 不同温度下SiMoV蠕墨铸铁拉伸断口裂纹扩展形貌

Fig. 10 Morphologies of tensile fracture crack propagations in SiMoV vermicular graphite cast irons at different temperatures

很少出现二次裂纹的生成和扩展；600 °C下裂纹扩展特性发生变化，除了主裂纹的扩展特征以外，还出现了沿蠕虫状石墨的二次裂纹生成和扩展；700 °C下裂纹二次裂纹的扩展特征更加明显，二次裂纹向基体组织中逐步延伸，形成连续扩展特性；800 °C下的除了呈现二次裂纹的扩展特性，蠕虫状石墨间形成了氧化通道痕迹，进一步促进了二次裂纹的扩展，呈现出氧化辅助裂纹扩展的特性。

3 分析和讨论

SiMoV蠕墨铸铁的高温拉伸性能作为材料高温设计依据指标之一，决定了材料的高温服役上限。从试验结果可以看出，SiMoV蠕墨铸铁高温强度随着温度的升高而大幅下降，在700 °C以上时抗拉强度下降至50 MPa以下，出现明显的高温软化现象。强度下降的原因之一是SiMoV蠕墨铸铁主要基体组织为铁素体，而铁素体为体心立方结构。高温状态下体心立方结构稳定性不足，易出现晶界滑移等现象，在提高材料塑性的同时，使其强度急剧下降。同时，当温度超出700 °C后，铁素体相出现向奥氏体相的转变趋势，相变引起的内应力进一步降低了铁素体型耐热铸铁的高温强度，导致800 °C及以上温度时强度仅40 MPa左右。

另外，根据断口的裂纹扩展特性可知，高温拉伸过程中SiMoV蠕墨铸铁裂纹的生成源为蠕虫状石墨尖端，其机理在于：①石墨与基体间变形不协同，导致界面产生应力，引起裂纹源；②石墨、基体不同的热

物理性产生温度梯度，导致界面处产生热应力，进而引发裂纹的产生^[6]。随着试验温度的升高，蠕虫状石墨尖端的裂纹源增多，在主裂纹扩展路径上逐渐产生二次裂纹并扩展。在高温状态下，SiMoV蠕墨铸铁在蠕虫状石墨处发生氧化，由于蠕虫状石墨具有一定的三维联通性，氧离子借助蠕虫状石墨空间联通性，出现内氧化，促进了裂纹在材料基体的扩展。在以上因素的综合作用下，SiMoV蠕墨铸铁的高温强度进一步下降。

4 结论

(1) SiMoV蠕墨铸铁在500~800 °C温度范围下的应力应变曲线存在弹性变形阶段、屈服阶段和缩颈断裂阶段。随着温度的升高，屈服阶段应变范围并未发生明显的增长改变，而缩颈阶段至断裂过程的应变区间长度明显增加，材料出现软化现象。

(2) SiMoV蠕墨铸铁的抗拉强度和屈服强度随温度升高而大幅下降，800 °C下屈服强度和抗拉强度相较500 °C降幅度高达740%和935%。而伸长率却呈现相反趋势，增长479%，断裂形式由沿晶脆性断裂转变为等轴状韧窝的韧性断裂方式。

(3) SiMoV蠕墨铸铁500~800 °C温度范围下拉伸断裂的裂纹起源为蠕虫状石墨尖端，其高温强度的下降，除了与其铁素体基体组织特性存在关联性外，高温下蠕虫状石墨的氧化促进二次裂纹扩展也起到了助推作用。

参考文献:

- [1] 王有清, 胡飞, 施华武, 等. 蠕墨铸铁在气缸体铸件上的应用与发展 [J]. 现代铸铁, 2010 (6): 23-26.
- [2] 金永锡. 中硅钼耐热蠕墨铸铁排气歧管材质和工艺探讨 [J]. 铸造, 2005, 63 (12): 1238-1244.
- [3] 曾圣湖, 魏结练, 武炳煊. GJV SiMo4.5-0.6蠕墨铸铁排气管的生产工艺 [J]. 铸造, 2008, 57 (2): 160-162.
- [4] 陶栋, 李建平, 杨忠, 等. 合金元素Mo对蠕墨铸铁高温强度的影响 [J]. 铸造, 2018, 67 (4): 302-307.
- [5] 陈丹, 秦先锋, 闫明辉, 等. 上限温度对高SiMo蠕墨铸铁抗热疲劳性能的影响 [J]. 铸造, 2018, 67 (6): 521-525.
- [6] 武岳, 李建平, 杨忠, 等. 含有Cu、Mo、Sn的高强度蠕墨铸铁的蠕变行为 [J]. 材料研究学报, 2019, 33 (1): 43-52.

Research on the Elevated Deform Behavior of SiMoV Vermicular Graphite Cast Iron

DONG Peng^{1,2}, XIAO Gong-lin^{1,2}, YANG Zhi-gang^{1,2}, XU Xiao-hui^{1,2}, CHEN Kun^{1,2}

(1. ChangZhou LeadRun Casting Co., Ltd., Jiangsu Provincial Engineering Research Center for Casting Technology of Key Parts for Rail Transit, Changzhou 213164, Jiangsu, China; 2. CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China)

Abstract:

The elevated deformation behavior of SiMoV vermicular graphite cast iron in the temperature range of 500 °C to 800 °C was studied through experimental methods of optical microscopy, scanning electron microscopy, and high-temperature mechanical properties testing. The results indicate that the strain range in the yield stage of the stress-strain curve does not show significant growth or change, while the length of the strain interval from the necking stage to the fracture process significantly increases, with the increasing of the temperature, leading to softening of the material. Meanwhile, the tensile strength and yield strength sharply decrease with increasing temperature, with a decrease of 740% and 935% in yield strength and tensile strength at 800 °C compared to 500 °C. However, the extension shows the opposite trend, increasing by 479%. The origin of the crack is the tip of vermicular graphite, and the decrease of high-temperature strength is not only affected by the microstructure characteristics of the ferrite matrix, but also related to the oxidation of vermicular graphite at high temperature, leading to forming of secondary crack propagation.

Key words:

SiMoV vermicular graphite cast iron; stress-strain curve; high temperature mechanical properties; crack propagation