DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.11.004

# 蠕化率对蠕墨铸铁热疲劳行为的影响

熊毕伟[1],李　远[2],王　刚[3],王延荣[1],朱永国[3],刘玉婷[1],刘梦鸽[2]
(1.中国北方发动机研究所,天津 北辰 300400;2.西安工业大学 材料与化工学院,陕西 西安 710021;3 山东大柴缸体缸盖股份有限公司,山东 莱阳 265200)

**摘　要**:采用V型缺口试样,通过对试样反复加热冷却,研究了不同蠕化率(55%、70%、90%)对蠕墨铸铁热疲劳行为的影响。结果表明,随着蠕化率的增加,蠕墨铸铁的抗热疲劳性能先升高后降低,当蠕化率为70%时,蠕墨铸铁抗热疲劳性能最佳。不同蠕化率,蠕墨铸铁的裂纹萌生和扩展机制具有显著差异。当蠕化率90%时,在V型缺口裂纹萌生明显,主裂纹沿着蠕虫状石墨生成二次裂纹,最后V型缺口凹陷成崩塌趋势;而蠕化率70%和55%时,V型缺口附近裂纹明显减少,仅在球状石墨尖端部位和基体组织产生少量微小裂纹,且裂纹没有明显扩展,产生裂纹倾向低,V型缺口凹陷未形成崩塌。

**关键词**:蠕墨铸铁;裂纹;蠕化率;热循环

**中图分类号**:TG249　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)11-1149-04

## Effects of Vermicularizing Rate on Thermal Fatigue Behavior of Vermicular Graphite Iron

XIONG Biwei[1], LI Yuan[2], WANG Gang[3], WANG Yanrong[1], ZHU Yongguo[3], LIU Yuting[1], LIU Mengge[2]
(1. Institute of China North Engine, Tianjin 037000, China; 2. School of Materials and Chemical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 3. Shandong Dachai Cylinder Block & Cylinder Head Co., Ltd., LaiYang 265200, China)

**Abstract**: The influence of different vermicularizing rates (55%, 70%, 90%) on thermal fatigue behavior of vermicular graphite cast iron was studied by heating and cooling and V-notched sample. The results show that the thermal fatigue resistance of vermicular graphite cast iron increases first and then decreases with the increase of vermicular graphite. When the vermicularizing rate is 70%, the thermal fatigue resistance of vermicular graphite cast iron is the best. The mechanism of crack initiation and propagation of vermicular graphite cast iron is significantly different with different vermicularizing rates. When the vermicularizing rate is 90%, the V-notched crack is obviously initiated, and the main crack generated a secondary crack along the vermicular graphite. Finally, the V-notched form a collapse trend. However, when the creep rate is 70% and 55%, the cracks near the V-notched are significantly reduced, and only a small number of tiny cracks are generated in the tip of the spheroidal graphite and the matrix, and the cracks do not expand significantly, with a low tendency to generate cracks, and the V-notched depression does not form collapse.

**Key words**: vermicular graphite iron; crack; vermicularizing rate; thermal cycle

蠕墨铸铁石墨形貌介于片状石墨和球状石墨之间,兼有灰铸铁和球墨铸铁的性能,同时具有良好的耐热疲劳性能,较高的弹性模量和抗变形能力,应用于生产汽车发动机缸盖、刹车鼓和玻璃模具等对热疲劳性能有要求的铸件[1-3]。近年来,学者们[4-6]认为合金元素、材料表面缺陷等对灰铸铁材料热疲劳性能有较大影响;用模拟的方法研究了单侧楔形缺口试样的热疲劳寿命;但对不同蠕化率的蠕墨铸铁热疲劳行为影响机理研究较少。针对该问题,本试验选取蠕化率55%、70%、90%3种蠕化率的材料通过对比分析蠕墨铸铁在25~400 ℃循环温度下的试验,研究了微观组织、a-N曲线图、裂纹萌生及扩展机制。

## 1　试验材料及方法

试验所采用材料的化学成分见表1。采用GGW-

表1　蠕墨铸铁化学成分 $w$(%)
Tab.1 Chemical composition of the vermicular graphite cast iron

| C | Si | Mn | P | S | Cu | Sn |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 3.6~4.0 | 2.0~2.2 | 0.3~0.5 | ≤0.07 | ≤0.03 | 0.4~0.6 | 0.02~0.03 |

收稿日期:2019-09-02
基金项目:陕西省创新人才推进计划-科技创新团队项目(2017KCT-05);陕西省重点科技项目(2018ZDM-GY-137)
作者简介:熊毕伟(1981-),湖北天门人,副研究员.主要从事柴油机结构件的设计.电话:15320021655

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

0.012 中频感应熔炼炉进行熔炼。蠕化孕育温度为 1 420~ 1 450 ℃，采用 Mg-RE 蠕化剂（加入量 0.42%、0.48%和 0.54%）和 75SiFe（加入量 0.6%）包底冲入法处理后，浇入砂型铸造成 Y 型试块。

热疲劳试样带有预制缺口，如图 1。缺口长 1.5±0.1 mm，由钼丝线切割加工成型，试样末端预制直径为 6 mm 的孔将试样用螺丝固定在仪器丝杆末端的夹具上面保证每组试样加热、入水位置一致。试验所用的仪器为壳型高温变形仪，型号为 RKB，进行加热或者停止加热的操作，当输入至控制系统的加热时间到达，控制系统就会开启升降机构的电动机，将试样移至炉下方的水槽中进行冷却，升降距离通过丝杆旁边的电磁传感器的位置进行控制。试验加热温度为 400 ℃，加入时间 155 s；冷却温度为 25 ℃，冷却时间为 5 s；循环次数分别为 500、1 000、2 000、3 000、4 000 次。采用 Nicon300 型金相显微镜和 Quanta-400F 型场发射电子显微镜观测热疲劳试样的表面组织形貌及裂纹扩展路径。

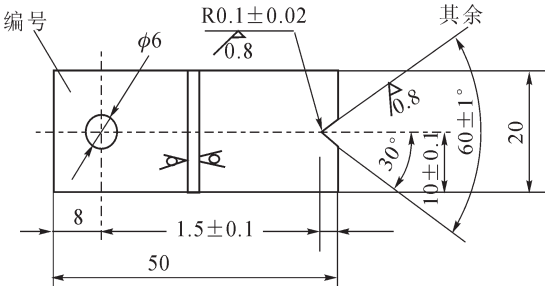



图 1 热疲劳试样的形状及尺寸
Fig.1 Shape and size of thermal fatigue sample

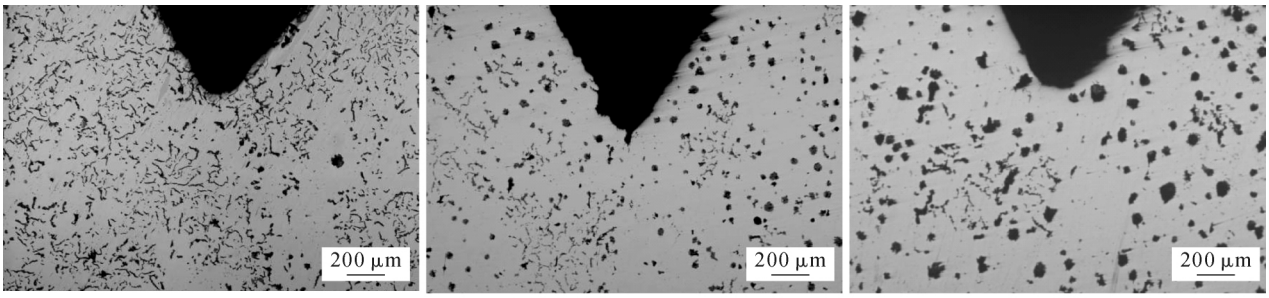
## 2 试验结果与讨论

### 2.1 不同蠕化率的微观组织分析

图 2 为不同蠕化剂加入量试样的石墨形貌。可以看出，随着蠕化剂加入量增加，石墨形貌由蠕虫状石墨转变为蠕虫状 + 球状石墨。蠕化剂加入量为 0.42%、0.48%和 0.54%，依据蠕墨铸铁金相检验国家标准（GB/T26656-2011），测定蠕化率为 90%、70%和 55%。图 2(a)中石墨分布较为均匀，均为蠕虫状，其性能接近于灰铸铁；图 2(c)石墨以球状石墨为主，性能接近球墨铸铁；图 2(b)为蠕虫状 + 球状石墨，性能介于图 2(a)和(b)两者之间。

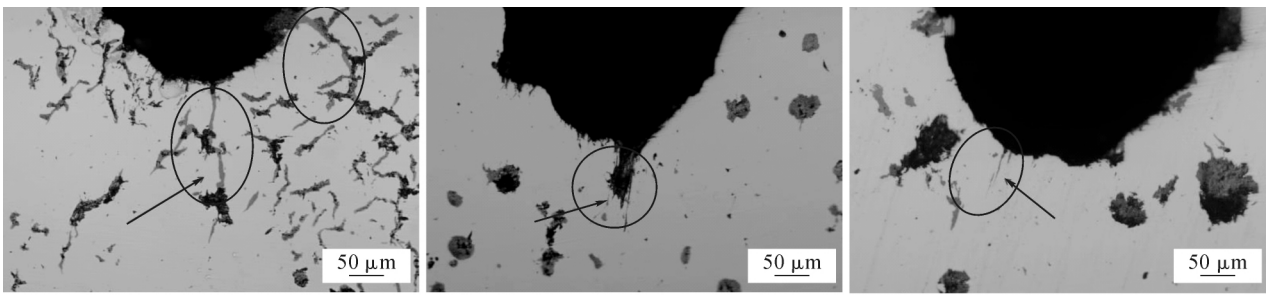
### 2.2 蠕化率对热疲劳裂纹的影响

图 3 为热循环 2 000 次不同蠕化剂加入量的石墨形貌。可以看出，交变热应力 2 000 次循环条件下，蠕化率越高产生裂纹的倾向越大。V 型缺口处应力集中，导致缺口附近出现不同程度的变形，缺口附近出现球状凹陷[7]。图 3(a)蠕化率为 90%，V 型缺口附近圆形区域内箭头位置产生明显的主裂纹，裂纹沿着蠕虫状石墨开裂，蠕虫状石墨尖端应力集中明显，为裂纹的扩展提供能量，生成二次裂纹，V 型缺口凹陷成崩塌趋势；图(b)和(c)V 型缺口球状凹陷变形量大，已吸收大部分能量，导致缺口附近裂纹明显减少，仅在球状石墨尖端部位和基体组织产生少量微小裂纹，且裂纹没有明显扩展，产生裂纹倾向




(a)0.42%　(b)Ru0.48%　(c)Ru0.54%

图 2 不同蠕化剂加入量试样石墨形貌（热循环 0 次）
Fig.2 Graphite morphology of samples with different content of vermicularizing agents




(a)0.42%　(b)Ru0.48%　(c)Ru0.54%

图 3 不同蠕化剂加入量试样石墨形貌（热循环 2 000 次）
Fig.3 Graphite morphology of samples with different content of vermicularizing agents

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

低，V 型缺口凹陷未形成崩塌。

图 4 为热循环 3 000 次 V 型缺口试样扫描微区组织形貌。可以看出：蠕化率为 90%，微裂纹起源于石墨弯曲和尖端，裂纹萌生较多且沿着石墨扩展明显，石墨之间也产生次生裂纹，导致主裂纹更易于与微裂纹发生桥接；蠕化率为 55%，裂纹起源与热应力垂直方向[8]，裂纹萌生少，裂纹沿着晶界扩展至石墨周边，造成石墨与基体剥落，促进裂纹进一步扩展。影响材料热疲劳性能的因素较多，可用公式(1)表示：

$$\mathrm{RSF}=f\left(\frac{\delta,\lambda,\rho,\sigma_{\mathrm{b}}}{E,\alpha,\Delta T,K}\right) \tag{1}$$

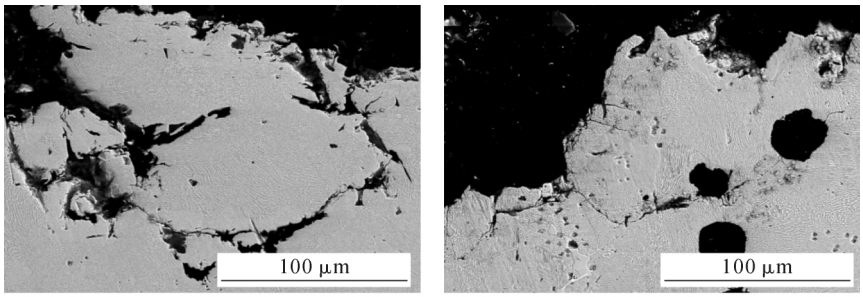
式中，RSF 指抗热疲劳的能力、$\sigma_{\mathrm{b}}$ 指抗拉强度、$\delta$ 指伸长率、$\lambda$ 指导热率、$\rho$ 指密度、$E$ 指弹性模量、$\alpha$ 指热膨胀系数、$\Delta T$ 指热循环温度差、$K$ 指应力集中因子。

结合图 4 看出，石墨力学性能低，组织松软且脆弱，相当于基体的微裂纹，蠕化率 90%V 型缺口附近蠕虫状石墨数量高于蠕化率 55%附近的石墨数量，且蠕虫状石墨尖端效应明显，导致材料局部抗拉强度、伸长率下降，材料的热疲劳性能明显降低，为裂纹的萌生及扩展创造了条件。

### 2.3　蠕墨铸铁热疲劳曲线及机理

图 5 是试样在 25~400 ℃的温度下热循环次数与裂纹长度曲线。可以看出，蠕化率 70%的蠕墨铸铁的抗热疲劳性能最好，蠕化率 55%的热疲劳抗性较差，蠕化率 90%试样的热疲劳抗性最差。蠕化率 55%试样的 a-N 曲线可以分为两个阶段：随着热循环次数的增加，热疲劳裂纹的扩展速率先增大后减小。热疲劳裂纹萌生后，da/dN 随着裂纹长度的增加而减速递增；裂纹扩展到一定长度时，da/dN 达到最大值，随后 da/dN 逐步下降。由于试样在热循环过程中热疲劳裂纹附近处产生较大的热应力，热疲劳裂纹的扩展释放应力，当热疲劳裂纹扩展到一定的长度后热应力减少，从而热疲劳裂纹扩展速率下降。蠕化率 70%试样的 a-N 曲线则比较平缓，裂纹扩展速率很慢，裂纹长度很小。蠕化率 90%试样的 a-N 曲线也分为两个阶段，第一阶段裂纹扩展速率较小，随着裂纹萌生，试样中大量的蠕虫状石墨结构变得松散，基体中的热应力和石墨中的热应力导致各自发生膨胀，二者的膨胀系数不同导致试样的裂纹更快的扩展，裂纹扩展速率增加。

图 6 为裂纹萌生和扩展机理示意图。可以看出，在热疲劳试验中，试样不承受外力的作用，其热疲劳失效完全是循环热应力反复作用的结果。加热时，试样表面温度升高产生热膨胀的倾向，由于温差的原因，试样表层的热膨胀受到内部温度较低部分的约束，使试样表层出现压应力。冷却时，试样在极短的时间内从上限温度下降至下限温度，试样表层与内部在瞬间内形成极大的温度差，试样表层由于温度骤然降低而收缩，试样内部则仍处于高温膨胀状态，试样表层的收缩因受到内部高温膨胀部分的约束瞬




(a)蠕化率90%　　(b)蠕化率55%

图 4 V 型缺口试样扫描电镜微区组织形貌（热循环 3 500 次）

Fig.4 Microstructure morphology of V-notched specimen

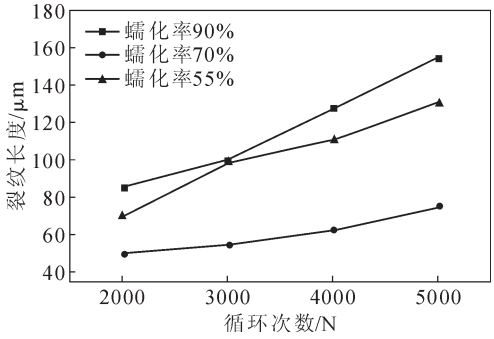



图 5 热循环次数–裂纹长度曲线（a-N 曲线）

Fig.5 Thermal cycle number-crack length curves

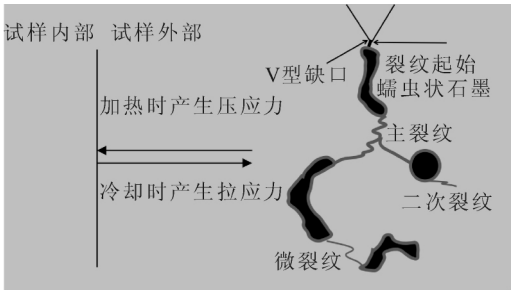



图 6 蠕墨铸铁的裂纹萌生扩展机理

Fig.6 Schematic diagram of crack initiation and propagation mechanism of vermicular graphite cast iron

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

间产生极大的拉应力。热疲劳裂纹将首先在V型缺口缺陷(如气孔、收缩、缩松、夹渣和微裂纹等)处萌生。热疲劳裂纹萌生后,随着冷热循环次数的增加,蠕虫状石墨会形成一到二条主裂纹,裂纹沿着基体和石墨继续扩展会萌生大量微裂纹,最终导致材料失效。

## 3 结论

(1)蠕化剂加入量为0.42%、0.48%和0.54%,蠕化率为90%、70%和55%,石墨形貌由蠕虫状石墨转变为蠕虫状+球状石墨;蠕化率越高,产生裂纹的倾向越大。

(2)循环热应力2 000次,蠕化率90%,萌生明显的主裂纹,裂纹沿着蠕虫状石墨开裂,蠕虫状石墨尖端应力集中明显,为裂纹的扩展提供能量,生成二次裂纹,V型缺口凹陷成崩塌趋势;蠕化率70%和55%,V型缺口球状凹陷变形量大,已吸收大部分能量,导致缺口附近裂纹明显减少,仅在球状石墨尖端部位和基体组织产生少量微小裂纹,且裂纹没有明显扩展,产生裂纹倾向低,V型缺口凹陷未形成崩塌。

(3)蠕化率70%的蠕墨铸铁的抗热疲劳性能最好,蠕化率55%的热疲劳抗性较差,蠕化率90%试样的热疲劳抗性最差。

**参考文献:**

[1] 李远,杨忠,朱永国,等.静置时间对蠕墨铸铁凝固参数与石墨衰退的影响[J].铸造,2018,67(12):1095-1098.

[2] 陶栋,李建平,杨忠,等.珠光体含量对蠕墨铸铁高温力学性能和热物理性能的影响[J].材料热处理学报,2018,39(06):83-90.

[3] Yue Wu;Jianping Li;Zhong Yang;Yongchun Guo;Zhijun Ma;Minxian Liang;Tong Yang;Dong Tao.Creep behavior accompanying oxidation of compacted graphite cast iron [J].Materials Science and Engineering: A.2018:174-181.

[4] M Moonesan, AH Raouf, F Madah, et al. Effect of alloying elements on thermal shock resistance of gray cast iron[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2012, 520(4) : 226-231.

[5] X Tong, H Zhou, L Ren, et al. Thermal fatigue characteristics of gray cast iron with non-smooth surface treated by laser alloying of Cr powder [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202 (12) : 2527-2534.

[6] A Ktari, N Haddar, A Koster, ML Toure. Numerical computation of thermal fatigue crack growth of cast iron[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2011, 34(7) : 498-509.

[7] 陈丹,吴素珍,吴令宪,等.热疲劳上限温度对球墨铸铁抗热疲劳性能的影响[J].铸造,2017,66(12):1322-1325.

[8] 汤晓华,陈强,张伟明,等.蠕墨铸铁的低周疲劳裂纹扩展速率[J].清华大学学报,2004,44(11):1460-1463.

(上接第1143页)

tensile properties of cast Al-$Mg_2Si$ metal matrix composite [J]. Mater Sci Eng A, 2008, 490 (1-2): 250-257.

[7] Emamy M, Khorshidi R, Honarbakhsh Raouf A. The influence of pure Na on the microstructure and tensile properties of Al-Mg2Si metal matrix composite [J]. Mater Sci Eng A, 2011, 528 (13-14): 4337-4342.

[8] Farahany S, Ourdjini A, Idris M H, et al. Effect of bismuth on microstructure of unmodified and Sr-modified Al-7Si-0.4Mg alloys [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2011, 21(7): 1455-1464.

[9] Farahany S, Ghandvar H, Nordin N A, et al. Effect of primary and eutectic $Mg_2Si$ crystal modifications on the mechanical properties and sliding wear behaviour of an Al-20$Mg_2Si$-2Cu-xBi composite [J]. J Maters Sci Technol, 2016, 32(11): 1083-1097.

[10] X F Wu, Z Wang, G A Zhang, et al. Effect of Bi modification treatment on microstructure, tensile properties, and fracture behavior of cast Al-$Mg_2Si$ metal matrix composite [J]. China Foundry, 2013,1 (10):18-23.

[11] X F Wu, Y Wang, K Y Wang, et al. Enhanced mechanical properties of hypoeutectic Al-10$Mg_2Si$ cast alloys by Bi addition[J]. J. Alloys and Comp, 2018, 767:163-172.

## 《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共8章:1、铸铁件均衡凝固与有限补缩;2、铸铁件冒口补缩设计及应用;3、压边浇冒口系统;4、浇注系统大孔出流理论与设计;5、铸件均衡凝固工艺;6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺;7、浇注系统当冒口补缩设计方法;8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书320页,特快专递邮购价226元。

邮购咨询:李巧凤029-83222071,技术咨询:13609155628

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