

铸铁中最大石墨尺寸估计与疲劳强度预测

李永德, 张馨予, 王 薇, 朱雪彤, 毛振宁

(河北工程大学 材料科学与工程学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 利用 SEV 极值统计方法预测不同体积的铸铁中最大石墨尺寸, 进而预测疲劳强度。研究结果表明, 随着母体体积的增大, 预测的最大石墨尺寸增大, 而疲劳强度降低。

关键词: 铸铁; 石墨; 极值统计分布; 疲劳强度

中图分类号: TG143

文献标志码: A

Prediction of the maximum graphite size and fatigue strength in cast iron

LI Yongde, ZHANG Xinyu, WANG Wei, ZHU Xuotong, MAO Zhenning

(Heibei University of Engineering, College of Materials Science and Engineering, Hebei Handan, 056038, China)

Abstract: The maximum graphite size in cast irons with different volumes was predicted by the method of statistics of extreme value(SEV), and the fatigue strength was further predicted by utilizing the result of SEV. It is shown from this study that with increasing the predicted volume the sizes of the maximum graphite increase, while the fatigue strength decrease.

Key words: cast irons, graphite, statistics of extreme value, fatigue strength

近些年来, 由于能源枯竭, 环境恶化等多种因素, 促使了可再生能源和清洁能源的发展, 其中风力发电作为最具前景的现代新型能源, 发展迅猛。大型风力发电机中轮毂、底座、轴承座等球墨铸铁件由于恶劣工作条件的限制, 必须具有良好的力学性能和机械物理性能^[1-2]。铸铁中石墨尺寸大小对铸件的性能有着重要的影响, 因此, 对石墨尺寸预测有助于估计铸铁材料的力学性能。Murakami^[3]应用统计极值 (SEV), Atkinson 等^[4]用广义 Pareto 分布 (GPD) 统计分析了一定体积洁净钢中的最大夹杂物的尺寸, 这两种方法已经被证明是有效的, 且比传统方法更方便。本文利用 SEV 方法研究了几类不同铸铁材料中的石墨尺寸分布规律, 验证了铸铁中石墨尺寸服从 SEV 分布, 且对最大石墨尺寸进行了估计, 并预测了疲劳强度。利用本工作得到的实验结果能够简单便捷地预测铸铁材料中的最大石墨尺寸, 进而评估其疲劳性能, 便于选择具有优秀疲劳性能的铸铁材料以满足工程实践, 特别是风力发电设备

的需要。因此, 该研究对于工程实际应用具有重要的实际意义和指导意义。

1 实验材料及实验方法

实验材料为从市场上购置的 4 种不同的铸铁样品, 分别标号为 A(可锻铸铁, 退火态)、B(球墨铸铁, 铸态)、C(蠕墨铸铁, 铸态) 及 D(球墨铸铁, 退火态)。按照 GB/T 13298-2015 磨、抛、刻蚀样品, 并用 OLYMPUS 金相显微镜观察石墨形态并测量石墨尺寸, 分析其分布规律并且预测最大石墨尺寸 (石墨球 / 蠕虫状石墨 / 团絮状石墨)。最常用的缺陷统计方法主要有 SEV 和 GPD 两种方法。

1.1 统计极值 (SEV) 方法

统计极值理论即当采集的数据点服从指数规律分布, 其极大 (小) 值分布就以 Gumbel 分布^[5]为极限分布:

收稿日期: 2017-10-31

特约专稿

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51101094); 河北省科技计划项目 (13211035); 河北省高等学校科学技术研究重点项目 (ZD2015045)

作者简介: 李永德 (1981-), 男, 河北沧州人, 博士, 高级工程师, 从事疲劳断裂与失效分析方面的研究。

$$F_x(x, \lambda, \delta) = \exp\{-\exp[-(x-\lambda)/\delta]\} \quad (1)$$

式中, λ 和 δ 分别代表位置和尺寸参数, 均服从指数分布。

铸铁中最大石墨的分布可以近似地认为是指数分布 (或者是 Weibull 分布^[6]), 因此通过 Gumbel 分布^[5] 就可以预测出铸铁中最大石墨的尺寸。

在该方法中, 从试样中选取 n 个视场, 定义 S_0 为标准视场面积, 在每个视场中测量最大石墨球的面积, 并计算最大石墨球面积的平方根 $\sqrt{\text{area}_{\max}}$, 对所得结果按照升序排列, 根据 Gumbel 分布^[5] 理论分析所得数据。累积分布函数 $F_j(\%)$ 和简约变量 $y_j (j=1, \dots, n)$ 可以通过以下公式计算:

$$y_j = -\ln\{-\ln[j/(n+1)]\} \quad (2)$$

$$F_j = j \times 100/(n+1) \quad (3)$$

由以上数据可以作出关于最大石墨尺寸 ($\sqrt{\text{area}_{\max}}$) 和 y_j 的函数关系即:

$$\sqrt{\text{area}_{\max}} = a \cdot y + b \quad (4)$$

为了估算体积为 V 的铸铁中最大夹杂物尺寸, 定义

$$T = V/V_0 \quad (5)$$

T 定义为回归周期, V 为所要预测的铸铁的体积, V_0 为标准视场体积。

回归周期 T 与累积分布函数 F 有如下关系:

$$F = (T-1)/T \times 100\% \quad (6)$$

计算标准视场体积 V_0 :

$$V_0 = h \cdot S_0 \quad (7)$$

式中 h 表示视场的厚度, 可由 $\sqrt{\text{area}_{\max}}$ 的平均值得到:

$$h = \left(\sum \sqrt{\text{area}_{\max, j}} \right) / n \quad (8)$$

由式 (5) 至 (8) 可以计算得到 F , 代入式 (3) 和 (2) 中可以得到简约变量, 进而根据式 (4) 预测最大石墨尺寸。

1.2 广义 Pareto 分布 (GPD) 方法

该方法适用于对超过某一门槛值的典型数据进行统计分析。通常假定材料中存在一临界缺陷尺寸, 即门槛值, GPD 方法用于分析大于该临界值的缺陷 (夹杂物、石墨等) 尺寸的分布情况, 该方法更适用于洁净钢中的最大夹杂物尺寸估算^[4]。本文主要应用 SEV 方法, GPD 方法的详细介绍见文献 [4]。

1.3 疲劳强度估计

铸铁中的缺陷主要为石墨, 因此, 石墨 (形

态、尺寸、分布等) 对其疲劳性能有重要影响^[7], Murakami 等人^[3] 根据断裂力学推导了疲劳强度公式, 即

$$\sigma_w = K(HV+120)/\sqrt{\text{area}}^{1/6} \quad (9)$$

式中, σ_w 为试样的疲劳强度, 单位为 MPa; K 为比例系数, 对于不同萌生位置的裂纹源, K 值不同 (内部开裂: $K=1.56$; 表面起裂: $K=1.43$; 亚表面开裂: $K=1.41$); HV 为试样的维氏硬度, 单位为 $\text{kg} \cdot \text{f}/\text{mm}^2$; $\sqrt{\text{area}}$ 为缺陷尺寸, 单位为 μm 。在本文中, 将利用该公式预测铸铁材料的疲劳强度。

2 实验结果

2.1 最大石墨球特征尺寸估计

本工作利用 SEV 极值统计方法, 将处理后的铸铁试样 A、B、C 及 D 在 OLYMPUS 显微镜下分别放大 200、400、400、400 倍观察其金相组织, 同时 n 分别取 40、39、40、40。其中每个视场的面积 S_0 均为 0.45 mm^2 。试样的典型视场中金相组织图像如图 1—图 4 所示。可见, 图 1 中的石墨形状为团絮状, 图 2 和图 4 中的石墨形状均为球状, 图 3 中主要为蠕虫状石墨。根据 GB-T9441-2009 检视试样的石墨大小, 四种试样的石墨大小评级均为 3 级。

由于石墨形状的差异, 对于铸铁试样 A、B、D, 需测量视场中最大石墨的面积, 试样 C 则测量蠕虫状石墨的长度。在处理铸铁试样 A、B、D 视场中最大面积时, 当某两个石墨间距小于其中较小石墨尺寸时, 则认为这两个石墨等同于一个石墨^[5], 即测量这两个石墨形成的面积。如图 5 中曲线包围的两

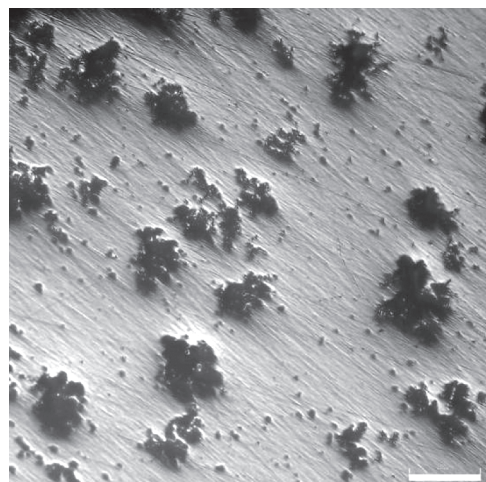


图 1 试样 A 金相组织

Fig.1 Metallographic structure of specimen A

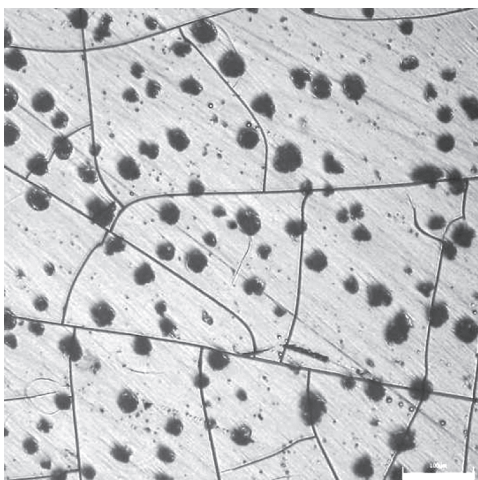


图2 试样B金相组织

Fig.2 Metallographic structure of specimen B

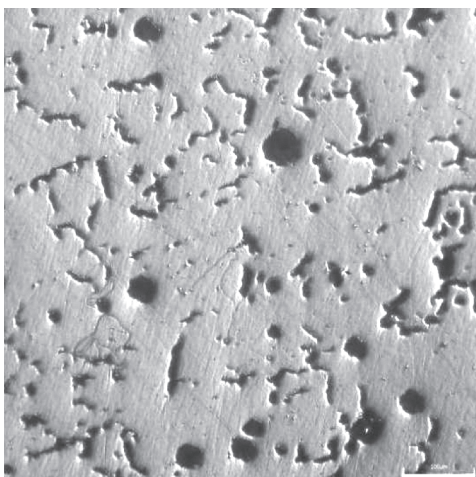


图3 试样C铸铁金相组织

Fig.3 Metallographic structure of specimen C

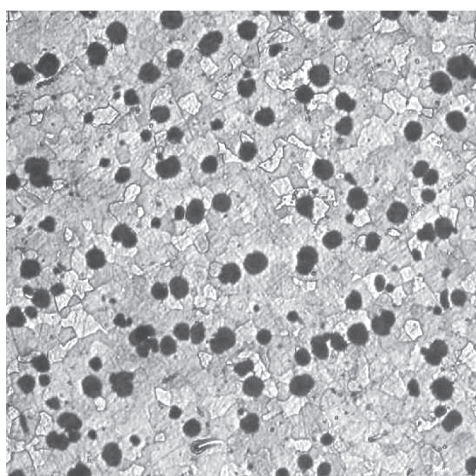


图4 试样D铸铁金相组织

Fig.4 Metallographic structure of specimen D

个团絮状石墨可以近似等效为一个石墨。对于这种具有不规则外形的等效石墨的尺寸，可以沿着石墨的外围边缘尽量用圆滑的轮廓线将其包围起来，遇

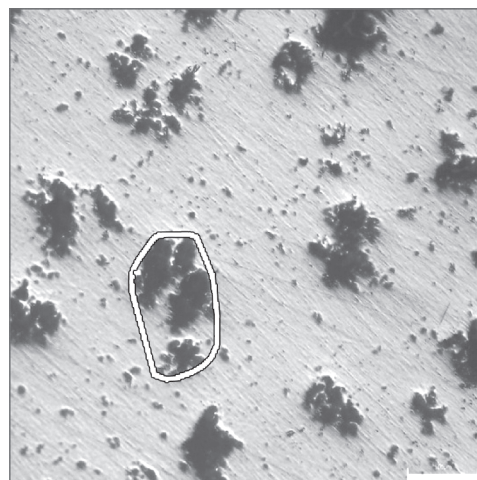


图5 试样A典型视场中最大石墨尺寸测量

Fig.5 Measuring the maximum graphite size in specimen A

到石墨之间有凹陷的部分，切忌使用内凹的轮廓线。

根据上述方法，测量试样A、B、C、D视场中最大石墨尺寸，利用式(2)及(3)可得到统计极值的参数值。表1中为铸铁试样C的数据。

根据所得数据作出极值统计概率图，图6—图9分别为A、B、C、D铸铁样品中最大石墨尺寸($\sqrt{\text{area}_{\max}}$)与简约变量(y_j)之间的关系。

图中所显示的直线即为简约变量 y_j 和最大石墨球尺寸 $\sqrt{\text{area}_{\max}}$ 之间的极值统计分布曲线。可见，图中数据点与极值统计分布直线存在较好的依存关系。表明，铸铁中的石墨尺寸服从极值统计分布，几种铸铁样品的极值统计分布关系如下：

$$\sqrt{\text{area}_{\max}} = 25.09y + 128.31 \quad (\text{样品 A}) \quad (10)$$

$$\sqrt{\text{area}_{\max}} = 11.45y + 65.53 \quad (\text{样品 B}) \quad (11)$$

$$\sqrt{\text{area}_{\max}} = 47.73y + 204.35 \quad (\text{样品 C}) \quad (12)$$

$$\sqrt{\text{area}_{\max}} = 10.5y + 77.35 \quad (\text{样品 D}) \quad (13)$$

根据式(5)计算得到回归周期 T ，用其可以预测对应该回归周期的最大石墨尺寸。图6—图9中的直线方程是按最小二乘法^[8]计算的。计算方法如下：

$$\sum \sqrt{\text{area}_{\max, j}} = \sqrt{\text{area}_{\max, 1}} + \sqrt{\text{area}_{\max, 2}} + \dots + \sqrt{\text{area}_{\max, 40}} \quad (14)$$

$$\sum y_j = y_1 + y_2 + \dots + y_j + \dots + y_{40} \quad (15)$$

$$\sum (y_j)^2 = (y_1)^2 + (y_2)^2 + \dots + (y_j)^2 + \dots + (y_{40})^2 \quad (16)$$

$$\sum (y_j \sqrt{\text{area}_{\max, j}}) = (y_1 \sqrt{\text{area}_{\max, 1}}) + (y_2 \sqrt{\text{area}_{\max, 2}}) + \dots + (y_{40} \sqrt{\text{area}_{\max, 40}}) \quad (17)$$

利用上述四式的结果即可计算式(4)中的系数 a 、 b ：

表 1 铸铁试样 C 中的石墨尺寸统计
Tab.1 Statistics of graphite size in specimen C

序号	$F_j / \%$	y_j	$\sqrt{\text{area}_{\max}} / \mu\text{m}$	视场编号
1	2.439 024 39	-1.311 994 235	148.827 292 1	5
2	4.878 048 78	-1.105 397 512	173.347 548	28
3	7.317 073 171	-0.961 248 716	174.840 085 3	6
4	9.756 097 561	-0.844 699 218	176.759 061 8	1
5	12.195 121 95	-0.743 904 054	179.530 916 8	2
6	14.634 146 34	-0.653 268 802	187.206 823	29
7	17.073 170 73	-0.569 657 723	188.272 921 1	14
8	19.512 195 12	-0.491 110 874	188.272 921 1	40
9	21.951 219 51	-0.416 304 476	189.978 678	4
10	24.390 243 9	-0.344 289 441	190.831 556 5	31
11	26.829 268 29	-0.274 351 205	192.324 093 8	12
12	29.268 292 68	-0.205 928 553	196.588 486 1	39
13	31.707 317 07	-0.138 563 58	197.867 803 8	15
14	34.146 341 46	-0.071 869 152	197.867 803 8	30
15	36.585 365 85	-0.005 506 676	198.081 023 5	19
16	39.024 390 24	0.060 829 839	203.411 513 9	10
17	41.463 414 63	0.127 425 815	204.264 392 3	13
18	43.902 439 02	0.194 555 719	208.102 345 4	18
19	46.341 463 41	0.262 491 259	209.808 102 3	22
20	48.780 487 8	0.331 508 864	213.859 275 1	7
21	51.219 512 2	0.401 897 038	215.991 471 2	37
22	53.658 536 59	0.473 964 08	217.057 569 3	36
23	56.097 560 98	0.548 046 729	219.402 985 1	8
24	58.536 585 37	0.624 520 335	223.240 938 2	11
25	60.975 609 76	0.703 811 358	225.373 134 3	21
26	63.414 634 15	0.786 413 288	233.049 040 5	17
27	65.853 658 54	0.872 907 538	241.151 385 9	9
28	68.292 682 93	0.963 991 654	244.136 460 6	24
29	70.731 707 32	1.060 518 45	245.202 558 6	32
30	73.170 731 71	1.163 551 898	252.452 025 6	23
31	75.609 756 1	1.274 449 411	252.665 245 2	38
32	78.048 780 49	1.394 987 381	254.584 221 7	27
33	80.487 804 88	1.527 560 71	258.422 174 8	16
34	82.926 829 27	1.675 516 06	265.458 422 2	25
35	85.365 853 66	1.843 743 495	289.125 799 6	26
36	87.804 878 05	2.039 812 233	294.669 509 6	35
37	90.243 902 44	2.276 389 668	307.675 906 2	33
38	92.682 926 83	2.577 207 39	326.439 232 4	20
39	95.121 951 22	2.995 523 884	344.776 119 4	34
40	97.560 975 61	3.701 251 165	394.029 850 7	3

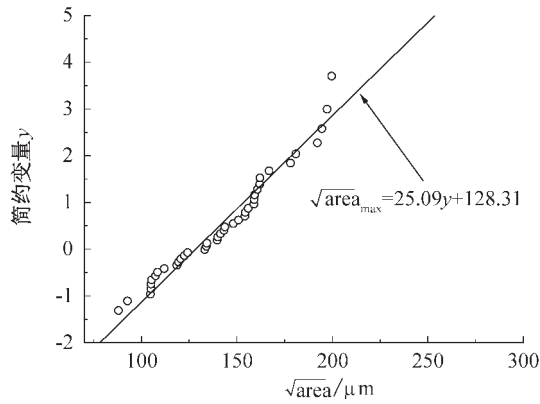


图6 试样A中石墨极值统计分布图

Fig.6 Extreme statistical distribution of graphite in sample A

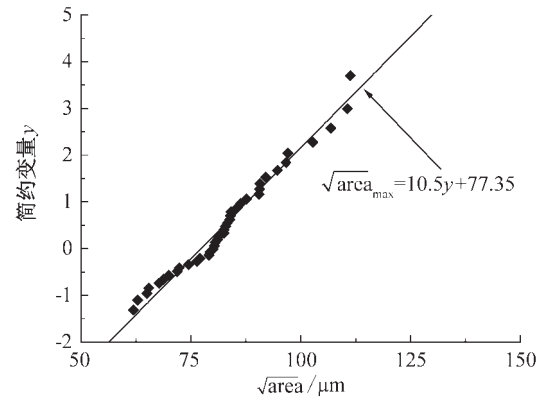


图9 试样D中石墨极值统计分布图

Fig.9 Extreme statistical distribution of graphite in sample D

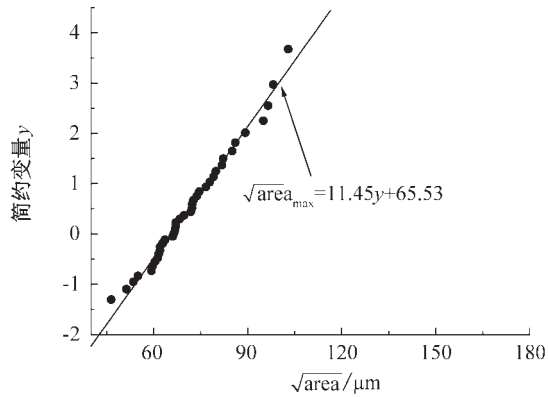


图7 试样B中石墨极值统计分布图

Fig.7 Extreme statistical distribution of graphite in sample B

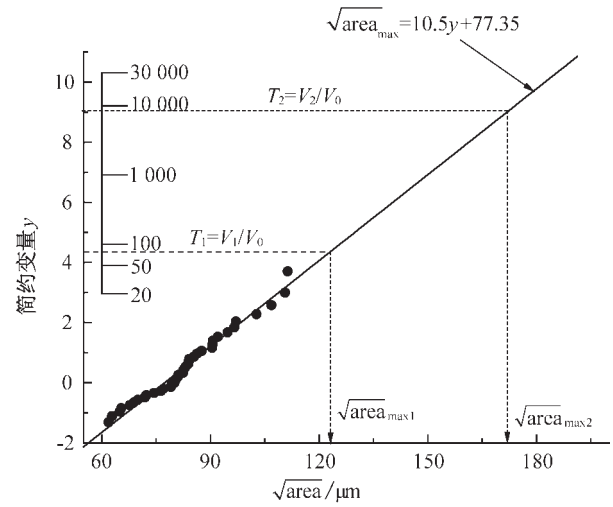


图10 预测最大石墨尺寸示意图

Fig.10 Schematic plot of the maximum predicted graphite size

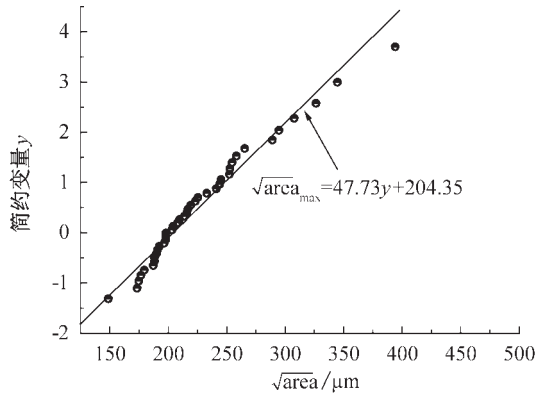


图8 试样C石墨极值统计分布图

Fig.8 Extreme statistical distribution of graphite in sample C

$$a = \frac{\left\{ n \cdot \sum (y_j \sqrt{\text{area}_{\max, j}}) - \sum y_j \sum \sqrt{\text{area}_{\max, j}} \right\}}{\left\{ n \cdot \sum (y_j)^2 - (\sum y_j)^2 \right\}} \quad (18)$$

$$b = \left\{ \sum \sqrt{\text{area}_{\max, j}} - a \cdot \sum y_j \right\} / n \quad (19)$$

2.2 预测更大体积中的石墨球尺寸

利用上述几种样品的极值统计分布规律可以预测更大体积中的石墨尺寸。假设实际构件受力体积为 V ，根据式 (7) 和 (8) 计算标准视场的体积

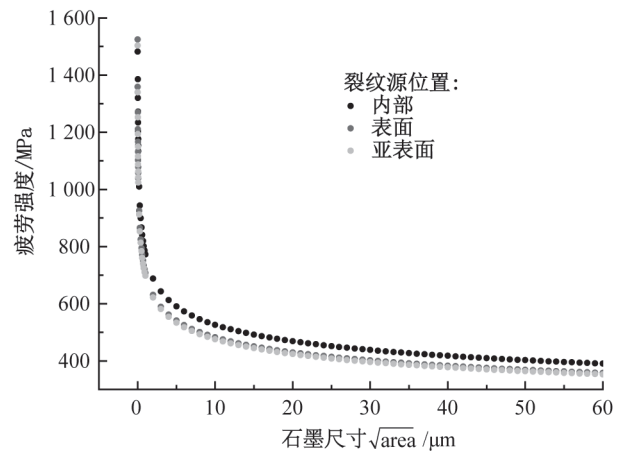


图11 疲劳强度随石墨尺寸的变化规律

Fig.11 Variation of fatigue strength with the graphite size

$V_0(\text{mm}^3)$ ，本实验中标准视场面积 S_0 为 0.45 mm^2 ，则 V_0 分别为 0.14 、 0.07 、 0.2 、 0.083 mm^3 。根据不同的回归周期 $T(T=V/V_0)$ 和极值统计分布规律，可以预测不同体积中的最大石墨尺寸。图10为铸铁试

样D中根据不同的回归周期预测最大石墨尺寸的示意图。可见,通过SEV极值统计方法能够预测出不同体积下铸铁中最大石墨尺寸,并作为铸铁生产过程中控制石墨尺寸的依据。

2.3 疲劳极限预测

对于高周疲劳,铸铁材料的裂纹通常从石墨处萌生,作为裂纹源的石墨尺寸决定着铸铁材料的疲劳性能。将上述步骤预测得到的铸铁试样中的石墨的最大尺寸($\sqrt{\text{area}_{\max}}$)代入式(9)中,即可预测其疲劳强度,疲劳强度随石墨尺寸的变化规律示意图见图11。可见,对于三种裂纹源位置(内部、表面和亚表面),疲劳强度均随着石墨尺寸的增加而降低,其中亚表面石墨对应的疲劳强度最小。本工作对承受循环载荷铸铁构件的疲劳强度估计和寿命预测具有重要的现实意义和指导意义^[9]。

3 结论

铸铁材料中的石墨尺寸服从极值统计分布规律,根据极值统计分布可预测材料中的最大石墨尺寸进而预测该材料的疲劳强度。随着母体体积的增大,铸铁中石墨尺寸随之增大,而疲劳强度降低。

参考文献:

- [1] 郝石坚.现代球墨铸铁[M].北京:煤炭工业出版社,1989.
- [2] 彭建中,刘玲霞.大型风电球墨铸铁件的超声波检测技术[J].中国学术期刊电子杂志,2010(7):539-546.
- [3] YOSHIMICHI Murakami.National Institute of Advanced Industrial Science and Technology[J].Japanese Journal of Applied Physics,1994(5):99-313.
- [4] ATKINSON H V.Microstructure and Mechanical Properties of 7005 Aluminum Alloy Components Formed by Thixoforming [J].American Studies Journal,2003:48-457.
- [5] GUMEL E J.Statistics of Extremes[M].New York:Columbia University Press,1957.
- [6] 张秀芝.Weibull分布参数估计方法及其应用[J].气象学报,1996,54(1):108-116.
- [7] MILLER K J.Fatigue FractEng Mater Struct[M].Microscopy Research and Technique,1999.
- [8] YUKITAKA Murakami.Metal Fatigue: Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions[M].AmaterdamElsevier,2002.
- [9] 张继明,张建锋,杨振国,等.高强度中最大夹杂物的尺寸估计与疲劳强度预测[J].金属学报,2004,40(8):846-850.

(责任编辑 王利君)

(上接第98页)报,2001,22(1):72-77.

- [8] 冯其红,陈存良,王森,等.岔河集油田井间动态连通性研究[J].科学技术与工程,2013,13(9):2326-2330.
- [9] 王晓芬,袁克峰,王忠生,等.岔河集油田开发调整的主要做法与成效[J].海洋石油,2003,23(3):63-68.
- [10] 薛培华.河流点坝相储层模式概论[M].北京:石油工业出版社,1991:112-115.
- [11] 马世忠,王一博,崔义,等.油气区水下分流河道内部建筑结构模式的建立[J].大庆石油学院学报,

2006,30(5):1-3.

- [12] 徐慧,林承焰,雷光伦,等.水下分流河道单砂体剩余油分布规律与挖潜对策[J].中国石油大学学报:自然科学版,2013,37(2):14-20.
- [13] 林承焰,余成林,董春梅,等.老油田剩余油分布—水下分流河道岔道口剩余油富集[J].石油学报,2011,32(5):829-834.
- [14] 肖洪伟.喇萨杏油田水下分流河道砂体剩余油分布研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2008,30(3):167-170.

(责任编辑 王利君)