

球墨铸铁中球化率和石墨大小的数字评定

朱钱兵, 张覃轶

一、概述

球墨铸铁被广泛用来制作一些韧性要求高且形状复杂的工件。随着球墨铸铁应用范围的扩大, 其金相检验也更加严格。球墨铸铁金相组织典型特征是在其基体上分布着球状石墨, 其形态、大小等对球墨铸铁的性能有重要的影响。准确测定石墨的球化率及大小, 是对球墨铸铁组织性能进行评定的基本要求。

对于球墨铸铁的球化率和大小的评级, 往往采用目测金相组织图片与国家标准图谱相对照的方式来确定其球化级别和石墨大小级别。显然这种方式不仅评判速度慢, 而且评定结果易受主观因素的影响而不够准确。近年来, 随着计算机技术的不断发展, 有些学者利用专业的软件对金相图片进行分析、测量, 提出了一些有效的评定方法, 这些方法能测量出球墨铸铁的球化率和石墨的大小级别。但是, 由于试验的样本偏少, 重复操作性较差, 所得出的试验结果精度不足。此外, 这些研究只是对球化效果和石墨大小级别进行定性判断, 无法提供球化级别与球化率之间、石墨大小等级与实际石墨长度之间的定量关系。本研究的

目的是通过对标准金相图片的数字处理和统计, 探索球化率与球化级别之间的关系, 以及实际石墨长度与石墨大小级别的关系, 建立起定量评价标准, 提高对球墨铸铁组织、性能进行评定的效率。

二、试验数据分析

1. 试验图像

本次球墨铸铁中石墨大小及球化率定量分析的图片采用GB/T 9441—2009《球墨铸铁金相检验》中的标准图样, 如图1、图2所示。

2. 试验方法

本试验用到的分析软件

Image-Pro Plus (IPP), 辅助软件Adobe Photoshop CS6 (PS)。IPP是功能强大的图像处理、增强和分析软件, 具有非常丰富的测量和定制功能, 并允许用户自行编写针对特定应用的宏和插件。本试验主要用到了IPP软件的调节对比度、滤镜处理, 测量等功能。

3. 试验过程

(1) 石墨球化率测量 通过扫描仪获得待测的金相图片(见图1), 用PS中的橡皮功能擦掉被视场边界切割的石墨, 然后进行下一步操作。

本次试验主要利用IPP的“Count/Size”功能统计出石墨

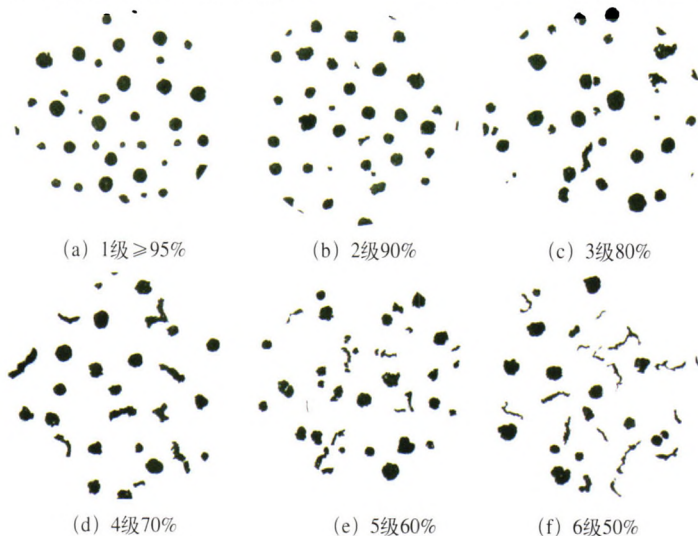


图1 球墨铸铁球化分级图谱

总数，以及球状与团状石墨数。操作过程以图1c为例：首先将图1c增强，以便于提取石墨球，增强后的效果如图3所示。调出“Count/Size”菜单，在“Select Measurements”菜单中选择直径，直径的起始值设定为整个视场宽度的2%，以排除印刷过程中残留污点的干扰。在图3中，整个视场的宽度为430个像素，故起始值设定为9，A点将不被统计，E点刚好被统计。接着选择“Automatic Dark Objects”，然后单击“Count”。软件便会自动统计直径大于或等于9个像素的黑色石墨颗粒的个数，得到石墨总数为29个。

球化率测量需要确定在被统计的石墨中球状石墨所占的比例。观察图3可以发现，半径比在2.5以下的石墨比较接近球状，以B、C、D三点为例，只有C点将被统计。所以在“Select Measurements”中添加“Radius Ratio”（半径比）选项，并将终止值设为2.5，进行第二次统计，最后得到视场中球状石墨总数为24个，其球化率为 $24/29=82.76\%$ 。

(2) 石墨实际长度测量 针对图2石墨大小分级图谱，利用IPP的“Count/Size”功能测量其石墨长度，操作过程以图2c为例：用相同方式对图2c进行增强。为测量石墨的实际长度，首先需确定比例尺。由图片来源可知视场直径为70mm，放大倍数为100倍。从“测量”菜单中选择“校准”次级菜单中的“空间”选项，新建一个比例尺，将标尺两端对准视场直径两端，标尺长度设为70mm即可。然后在“Count/Size”的

“Select Measurements”菜单中选择最大直径和最大半径，选择“Automatic Dark Objects”，单击“Count”。靠的比较近的石墨球需要手动分离。最后单击“View”中的“Statistics”，在表中可以看到最大石墨球的半径为4.127511mm，然后将“Select Measurements”菜单中直径的起始值设为4.127511mm，再次测量得到该图片平均石墨长度为6.4145679mm。因为该图片是放大了100倍，所以石墨的实际平均长度是0.0641mm。

三、试验结果与讨论

1. 石墨球化分级结果与讨论

对图1标准图谱中球化率的

统计结果见表1。

从表1数据对比来看，1、2、3、5级图谱中，计算球化率与理论球化率吻合度较高，4级和6级有一定的误差，但误差在可接受的范围内。产生误差的主要原因在于样本数偏少，标准图谱仅为一个定性评价标准。

为建立起计算球化率 H 与球化率级别之间的关系，定义计算球化率级别 Z 为：

$$Z = 11 - 10H$$

计算结果列于表1中的第六列。为保证精度，计算结果保留小数点后1位有效数字。对比表1中 Z_1 和 Z 计算结果可以发现，计算球化率级别与理论值相符，且精度可以得到提高。

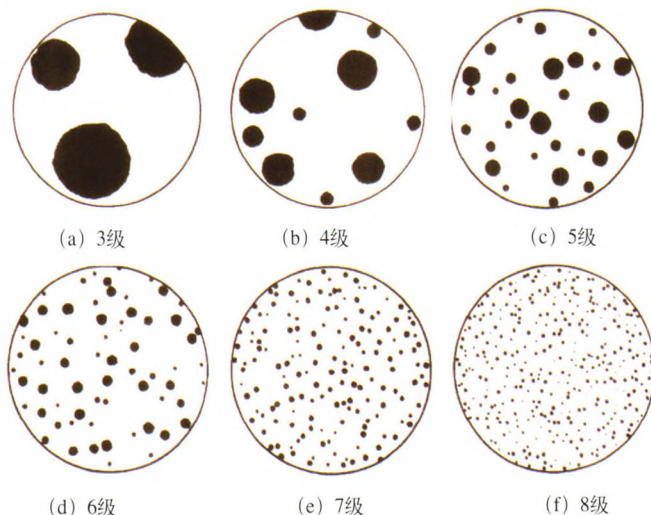


图2 球墨铸铁石墨大小分级图谱 (100×)

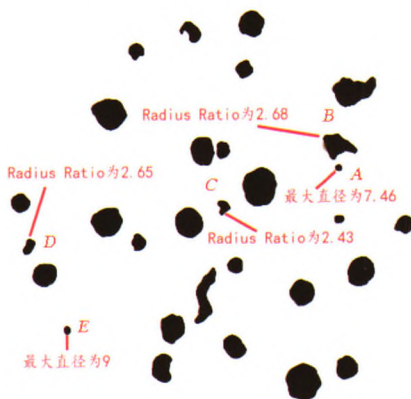


图3 石墨球化率测量示意

2. 石墨大小分级结果与讨论

图2中球墨铸铁石墨大小分级图谱的统计结果见表2。

从表2数据看，标准图谱中所测量的石墨长度基本都落在了石墨长度标准值范围内，只有3级图谱有少许误差，其原因在于图2a中的有效石墨球颗粒只有2个，样本数目太少，误差就大。

根据石墨长度的测量值，根据石墨长度标准值范围先判断其石墨大小级别 S_i ，再根据不同级别石墨长度标准值得下限(R_{mini})和上限(R_{maxi})计算其级别 T_i :

$$T_i = S_i + \frac{R_{maxi} - X_i}{R_{maxi} - R_{mini}}$$

石墨大小为8级时，由于其标准值中无下限值，故在计算时约定，凡是测量长度 $\leq 0.015\text{mm}$ 的图谱一律评定为8级。

四、数字评定方法的应用

为验证上述数字评定方法的实用性，本文选取了刘继雄等发表的球墨铸铁组织照片（见图4）进行了测量，分别用数字评定方法和对照法对同一份样品金相图片的球化等级和石墨大小级别进行了评价，结果见表3。表中各个对照法所列出的等级为原文作者给出，这里列出来用于对比。

由表3的数据来看，数字评定法计算出来的级别不但能与实际很好地吻合，并且更精确，这可以很好地评价那些球化级别和石墨大小级别介于两个等级之间的情况，不仅比传统的对照法方便实用，而且还提高了精确度。

五、 结语

本研究采用IPP图像处理软件对球墨铸铁球化分级图谱和石墨大小分级图谱进行了分析，通过选择合适的测量项目及设置合理的过滤条件，完成了对球化率和石墨大小的定量测量，并推导了定量测量结果与各自等级之间

的数学关系，所得出的定量评价等级不但精度高，还可以克服传统比对法存在的重复性差、不够客观等缺点。通过对实际金相图片的验证，说明本方法不但能与实际结果很好地吻合，并且其评级精度可以提高1位有效数字，具有一定推广价值。

表1 球化分级图谱的球化率统计结果

球化率级别 Z_i /级	理论球化率 (%)	石墨总数 G_i /个	球状石墨总数 G_z /个	计算球化率 H (%)	计算球化率级别 Z /级
1	≥ 95	34	34	100.00	1.0
2	90	31	29	93.55	1.6
3	80	29	24	82.76	2.7
4	70	27	18	66.67	4.3
5	60	40	25	62.50	4.8
6	50	34	15	44.12	6.6

表2 石墨大小测量计算结果

石墨大小级别 S_i /级	石墨长度标准值 ($R_{mini} \sim R_{maxi}$) /mm	石墨平均测量长度 X_i /mm	石墨大小计算级别 T_i /级
3	$>0.25 \sim 0.5$	0.2343	4.1
4	$>0.12 \sim 0.25$	0.1202	5.0
5	$>0.06 \sim 0.12$	0.0641	5.9
6	$>0.03 \sim 0.06$	0.0358	6.8
7	$>0.015 \sim 0.03$	0.0182	7.8
8	≤ 0.015	0.0134	8.0

表3 验证照片中球化率和石墨大小的计算结果

项目		图4a	图4b	图4c
计算石墨球化率 H (%)		90.0	100.0	96.88
石墨球化级别/级	对照法	2	1	1
	数字评定法	2.0	1.0	1.3
石墨平均测量长度 X_i /mm		0.0396	0.0549	0.0741
石墨大小级别/级	对照法	6	6	5
	数字评定法	6.7	6.2	5.8

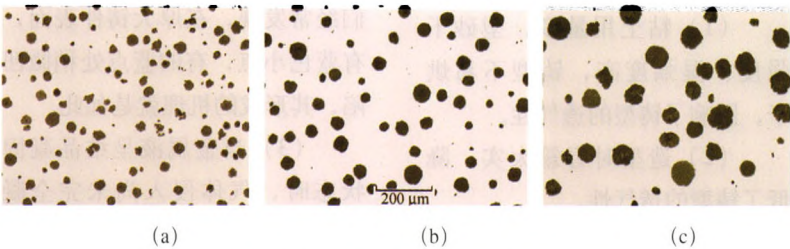


图4 用于验证的球墨铸铁组织照片

作者简介：朱钱兵、张覃轶，武汉理工大学材料科学与工程学院。

MW 20140420