DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.05.022

ISO 945-4 铸铁显微组织 球墨铸铁球化率评定方法解读

王泽华[1],张　欣[1],钱坤才[2],陈凯敏[2],朱家辉[3],张　寅[3]

(1.河海大学 力学与材料学院,江苏 南京 211100; 2.中车戚墅堰机车车辆工艺研究所有限公司,江苏 常州 213011; 3.全国铸造标准化技术委员会,辽宁 沈阳 110022)

摘　要:球墨铸铁是一种重要的工程材料,球化率是评定球墨铸铁质量的关键指标。本文综述了国内外主要标准的球墨铸铁球化率定义及相应的评定方法,指出了这些标准中对球化率评定方法存在的差异和问题。"ISO 945-4 铸铁显微组织 球墨铸铁球化率评定方法"是由我国牵头负责制定的国际标准,该标准规定了目测法和图像法评定球墨铸铁球化率。本文介绍 ISO 945-4: 2019 主要内容,包括标准的术语和名称解释、试样制备、评定方法、检验结果表示等,重点对球形石墨颗粒的定义及其测定方法、球化率的定义及其测定方法、球化率评定相关临界值的确定等进行了解读。本文还介绍了球墨铸铁单位面积石墨颗粒数定义的修正以及球墨铸铁单位面积石墨颗粒数评定方法、表示方法。

关键词:球墨铸铁;球化率;标准化

中图分类号: TG255　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)05-0501-07

Interpretation of ISO 945-4: Microstructure of Cast Irons-Part 4: Test Method for Evaluating Nodularity in Spheroidal Graphite Cast Irons

WANG Zehua[1], ZHANG Xin[1], QIAN Kuncai[2], CHEN Kaimin[2], ZHU Jiahui[3], ZHANG Yin[3]

(1. School of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, China; 3. National Technical Committee on Foundry Standardization, Shenyang 110022, China)

Abstract: Nodular cast iron was an important engineering materials, and the spheroidization rate is the key index to evaluate the quality of nodular cast iron. The definition of spheroidization of nodular cast iron and its evaluation methods in the main standards at home and abroad were reviewed. "ISO 945-4 Microstructure of cast iron, Method for evaluating nodular rate of nodular cast iron" was an international standard that our country takes the lead in setting, the standard provides for the evaluation of spheroidization of nodular cast iron by visual and image methods. The main contents of ISO 945-4: 2019 were introduced, including the standard terminology and name interpretation, sample preparation, evaluation method, inspection result expression, etc., especially the definition and determination method of spherical graphite particle, the definition and determination method of spheroidization rate, and the determination of critical value related to evaluation of spheroidization rate. The revision of the definition of graphite particle number per unit area of nodular cast iron and the evaluation and representation of graphite particle number per unit area of nodular cast iron were also introduced.

Key words: spheriodal graphite cast iron; spheroidization rate; standardization

球墨铸铁是重要的工程材料之一,2017 年全球球墨铸铁产量达 2 643 万 t 以上,其中我国的产量是 1 375 万 t[1],2018 年我国球墨铸铁件的产量是 1 415 万 t[2]。球化率是评定球墨铸铁质量的重要指标,为此国际标准化国际组织、欧盟、以及主要工业国对球墨铸铁的球化率均作出了定义,并提出了相应的评定方法[3-8]。但这些标准规定的球墨铸铁球化率的评定方法存在较大的差异,见表 1[3-8]。

目前球墨铸铁球化率的评定方法可分为两类:计数法[3-6]和面积法[7,8]。计数法是指定义球化率为球墨铸铁中Ⅵ型石墨和Ⅴ型石墨颗粒所占总石墨颗粒的百分比。《ISO 1083 球墨铸铁分类》[3]、《EN 1663 球墨铸铁》[4]、《GB/T9441-2009 球墨铸铁金相检验》[5]以及《JSI G5502 球墨铸铁》[6]规定计算法测定球化率;面积法是指定义球化率为球墨铸铁中Ⅵ型石墨和Ⅴ型石墨颗粒面积所占总石墨颗粒面积的百分比。《ASTM E2567-14 球墨铸铁球化率和石墨数量图像方法》[7]和《ISO 16112 蠕墨铸铁分类》[8]规定面积法测定球化率。

收稿日期:2020-03-19

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助(2018B45914)

作者简介:王泽华(1960-),江苏常州人,教授.研究方向:铸造工艺、铸造合金以及铸造技术标准化研究.

电话:025-83786046, E-mail:zhwang@hhu.edu.cn

表 1 国内外标准中球化率计算公式
Tab.1 Calculation formula for evaluating nodularity in different standards

方法	标准号	计算公式
颗粒计数法	ISO 1083 EN1563 GB/T9441 -2009 JIS G5502	$\frac{\sum N_{VI}+\sum N_{V}}{\sum N_{all}}$
颗粒面积法	ASTM2567-2014	$\frac{\sum A_{VI}+\sum A_{V}}{\sum A_{all}}$
	ISO 16112	$\frac{\sum A_{VI}+0.5\times\sum A_{V+IV}}{\sum A_{all}}$

注：表中脚注Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ是指石墨颗粒形态；脚注数字是指石墨颗粒的圆整度。

不管是计数法还是面积法测定球化率，一个共性问题是，什么形态的石墨属于Ⅵ型石墨和Ⅴ型石墨。目前的石墨颗粒形态分类是依据《ISO 945-1 铸铁显微组织—石墨目测分类法》[9]的示意图，可操作性差，评定结果人为因素大。即使《GB/T9441-2009 球墨铸铁金相检验》[5]和美国铸造协会(AFS)基于《ASTM A247-2006 铸铁石墨形态评定方法》还制定了球墨铸铁显微组织图[10,11]也存在明显的差异。为此制定了“ISO 945-4 铸铁显微组织 球墨铸铁球化率评定方法”[12]。

1 标准主要内容

本标准规定了目测法和图像法评定球墨铸铁球化率的方法。因为现有很多企业使用对比标准图片的目测法评定球墨铸铁球化率，同时很多企业也图像法，且图像法的应用越来越普及。另外，考虑到球墨铸铁金相检测方便，本标准还提供了单位面积石墨颗粒数的评定和石墨颗粒大小表示方法。

1.1 名词定义

1.1.1 最大佛雷德直径

颗粒轮廓上最大的两点距离，如图 1 中的 l m。

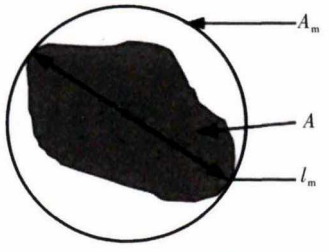


图 1 石墨颗粒及佛雷德圆示意图
Fig.1 Illustration of graphite particle and its Feret circle

1.1.2 圆整度 ρ

用石墨颗粒面积与该颗粒最大佛雷德圆面积的比值表示石墨颗粒的圆整度，由公式(1)计算获得：

$$\rho=A/A_m=4A/\pi\cdot l_m^2 \quad (1)$$

式中，A 为石墨颗粒面积；A_m 为石墨颗粒佛雷德圆面积；l_m 为石墨颗粒最大佛雷德直径。A、A_m、l_m 见图1。

1.1.3 球形石墨

ISO 945-1 中规定的Ⅵ型和Ⅴ型石墨颗粒，或圆整度系数≥0.6 的石墨颗粒。这一定义遵循传统的描述，增加了球形石墨颗粒的定量描述，增强了可操作性，满足了计算机图像分析要求。

1.1.4 球化率

铸铁中球形石墨的比例，通常以%表示。

1.1.5 球墨铸铁

一种以铁、硅、碳为基体的铸造合金，其碳主要以球形石墨形式存在。

1.1.6 石墨颗粒数

用石墨颗粒数(graphite particle count)取代球形石墨颗粒数(nodular count)，因为，实际评定石墨球颗粒数时，根本没有区分球形石墨和非球形石墨。用图像法可以区分球形石墨和非球形石墨，但用目测法是做不到的。

1.2 球化率评定方法

1.2.1 目测法

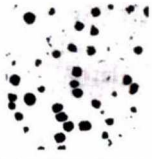
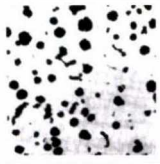
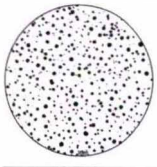
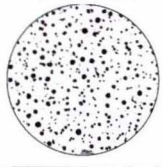
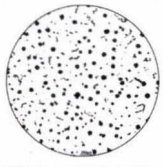
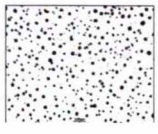
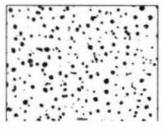
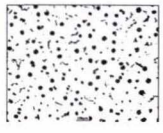
目测法，也称图片对比法。通过比较试样金相组织与标准图片，确定石墨球化率级别。目测法的基础是标准照片。表 2 列出了我国 GB/T 9441-2009[5]以及美国铸造协会(AFS)的球墨铸铁球化率评级图[11]，但两者存在较大的差异，这是由于以前没有严格的球形石墨定义。

针对现有球化率评定参照图片存在的问题，ISO 945-4 标准附录 A 提供了球化率为 50%~95%的标准图片。ISO 945-4 标准参照图片作了两方面的改进。①严格按照球形石墨定义和石墨颗粒数学模型、球化率计算公式(2)制作标准图片；②扩大评定视场，增大评估结果的稳定性。标准图片由原来的 ϕ70 mm，增大到 ϕ120 mm，实际视场由 ϕ0.7 mm 扩大到 ϕ1.2 mm。并根据现有金相显微镜的实际视场，增加了矩形图片，见表 2。

目测法评定球墨铸铁球化率对检验设备要求简单，操作方便，国际上普遍采用。但目测法评定球墨铸铁球化率时，存在人为因素。相对于目测法，图像法可以较好地避免人为因素的影响。随着计算机科学技术的发展和普及，用图像法测定球化率的方法的应用也日益普遍。

表 2 不同标准球墨铸铁球化率评级图对比

Tab.2 Reference images for rating nodularity of spheriodal graphite iron in different standards

GB/T 9441-2009			
	球化率 2 级（≥90%）	球化率 3 级（≥80%）	球化率 4 级（≥70%）
AFS			
	球化率 90%	球化率 80%	球化率 70%
ISO 945-4			
			
	球化率 90%	球化率 80%	球化率 70%

1.2.2 图像法

什么形态的石墨颗粒可以称为球状石墨，这是图像法评定球化率时遇到的一个基本问题。《ISO 945-1 铸铁显微组织—石墨目测分类法》只是规定Ⅵ型石墨和Ⅴ型石墨为球状石墨，并给出了Ⅵ型石墨和Ⅴ型石墨的示意图，这样的规定对于图像法来说是无法操作的。图像法必须对Ⅵ型石墨和Ⅴ型石墨有明确的数字化模型。

目前常用的定量描述不规则颗粒形态的特征参数有：颗粒密度和圆整度。GB/T 9441-1988 采用前者 [13]；ISO/RT 945-2 和 ASTM 2567 标准采用后者[7,14]。石墨颗粒密度是指石墨颗粒面积与石墨颗粒的外接圆面积的比值；圆整度是指石墨颗粒面积与石墨颗粒的最大佛雷德圆面积之比值，是常用的描述不规则颗粒形态的参数。目前市场上的球化率分析软件均采用圆整度描述石墨颗粒形态。

图像法评估球墨铸铁的球化率是必须建立在球化率数学计算公式上的，由表 1 可知，现有不同标准中的球化率计算公式是不一样的，因此其计算结果也不一致，严格来说没有可比性。《ISO 945-4 铸铁显微组织 球墨铸铁球化率评定方法》的评定结果与《GB/T 9441-2009 球墨铸铁金相检验》检验结果相比，当球化率高于 90%时，其波动值一般为 -4%~3%；当球化率为 80%~90%时，其波动一般为 -3%~5%。球化率越低，其差异越大。

1.2.3 视场的选择

评定视场的选择对评定结果会产生重大的影响。对于球化率评定的视场选择，ISO 945-4 与我国的 GB/T9441 有很大的差别。GB/T9441 规定选择 3 个球化率最差的视场评定球化率；而 ISO 945-4 规定，随机选取视场数量不得少于 5 个，且其石墨颗粒数量不得少于 500 颗。选择最差的视场评定球化率不具有代表性，应该是随机选择视场较为合理；适当增加评定视场数量，有利于提高评定结果的稳定性。ISO 945-4 同时规定了评定视场的数量和石墨颗粒数量是基于同时考虑到薄壁件和厚大断面铸件。对于薄壁件，石墨颗粒细小，5 个视场的石墨颗粒数量将会超过 500 颗；对于厚大断面铸件，由于石墨颗粒粗大，数量少，必须测定较多的视场，才能达到 500 颗石墨的要求。

同时 ISO 945-4 明确了当视场中，大部分石墨颗粒小于 10 μm 或大于 120 μm 时，可以改变视场的放大倍数，使之达到最合适的观察评定效果。单个视场中，石墨颗粒数量不得少于 20 颗。

1.3 球化率计算

1.3.1 计算公式

《ISO 945-4 球墨铸铁球化率评定方法》规定球化率 p_{nod} 为圆整度系数大于等于 0.6 的石墨颗粒面积除以所有形态石墨颗粒的面积，计算公式(2)。

$$p_{nod}=\frac{A_{VI}+A_{V}}{A_{all}} \tag{2}$$

式中，p_{nod} 为球化率，%；A_{VI} 为Ⅵ型石墨颗粒的面积；A_V 为Ⅴ型石墨颗粒的面积；A_{all} 为所有石墨颗粒的面积；最大佛雷德直径小于临界尺寸的石墨颗粒面积不计。

1.3.2 颗粒圆整度计算

颗粒面积和最大佛雷德圆直径都是通过统计计算图像像素确定的，像素大小、对金相照片的扫描方式和图像的数据处理方法等直接影响计算不规则颗粒圆整度结果。在计算石墨颗粒圆整度时，一定要注意图像的分辨率(像素)，ISO 945-4 标准参照 ISO/TR 945-2 的规定，图像的分辨率（像素)必须≤1 μm。分辨率(像素)越高，石墨颗粒面积、最大佛雷德圆直径和圆整度计算结果越精确。

1.3.3 球形石墨颗粒圆整度极限

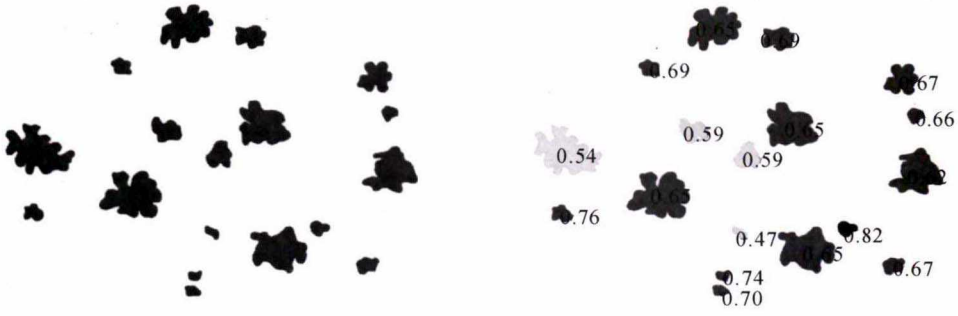
不管是计数法还是面积法评定球化率，球形石墨颗粒圆整度极限是关键。对于相同的金相组织，圆整度极限越高，意味着金相组织中球形石墨颗粒数越少，球形石墨颗粒的面积就越小，计算得出的球化率就越低；反之，球形石墨颗粒的圆整度极限越低，计算得出的球化率就越高。

图 3 和图 4 是《ISO 945-1 铸铁显微组织—石墨目测分类法》中的Ⅴ型石墨颗粒和 AFS 球化率评级图中球化率为 100%的参照图及其二值化图像。ISO 945-1 的Ⅴ型石墨示意图(见图 3a)中 18 个石墨颗粒，其中 4 颗石墨颗粒的圆整度小于 0.6，最小的为 0.47，见图 3(b)；图 4(a)中有 116 个石墨颗粒，其中 12 颗石墨颗粒的圆整度小于 0.6，最小的为 0.45，见图 4(b)。

将圆整度为 0.45 的石墨颗粒定义为是球形石墨似乎说不过去了。随着技术进步，球墨铸铁的生产水平已取得大幅度提高，尽管新标准要与原标准衔接，但新标准对球化率的评定要求应适当提高。采用计数法分别以 0.5 和 0.6 作为球形石墨颗粒圆整度临界值和采用面积法以 0.6 为球形石墨颗粒圆整度临界值计算球化率，其计算结果差异值见图 5。图 5 的横坐标 A 是以 0.5 为球形石墨颗粒圆整度临界值采用计数法计算的球化率。可以看到，采用面积法以 0.6 为临界值时的计算结果 B 与采用计数法以 0.5 临界值时的计算结果 A 比较接近。经大量验证试验，采用面积法、球形石墨颗粒圆整度定为 0.6 是合适的。

1.3.4 最小石墨颗粒尺寸

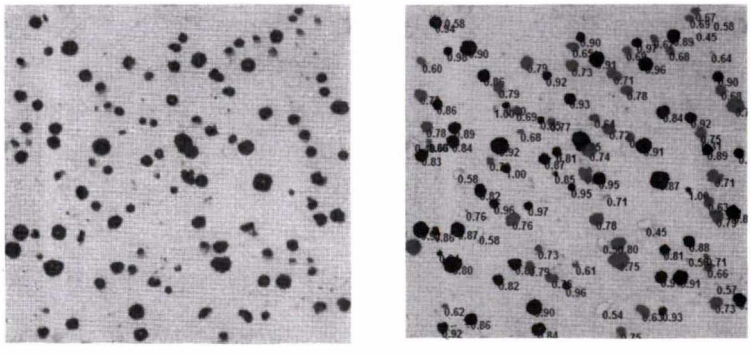
原有相关标准对最小石墨颗粒尺寸均作了明确的规定，但其规定的极限值是不同的。《GB/T 9441-2009 球墨铸铁金相检验》规定的颗粒最小尺寸是 20 um [5]，《ISO 16112 蠕墨铸铁分类》、《ASTM E2567-14 球墨铸铁球化率和石墨数量图像方法》、《JIS G5505 蠕墨铸铁件》规定最小石墨颗粒尺寸为 10 um [7,8,15]，《ISO/TR 945-2 铸铁显微组织——石墨



(a)V形石墨　　(b)二值化图像

图 3 ISO 945-1 定义的Ⅴ形石墨及其二值化图像

Fig.3 ISO 945-1--Form Ⅴ Graphite particles and its binary image



(a)　　(b)

图 4 ASF 评级球化率 100%图片及其二值化图像

Fig.4 AFS rating chart— nodularity100% and its binary image

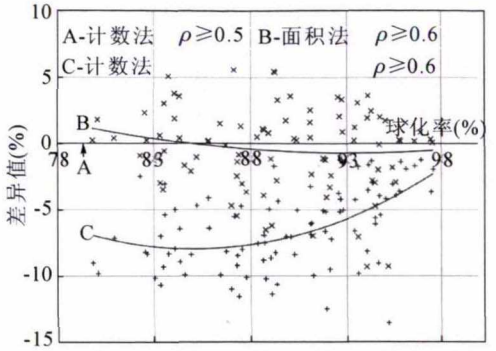


图 5 圆整度临界值和计算方法对球化率计算结果的影响
Fig.5 The influence of roundness critical value and calculation method on the calculation result of spherification rate

图像分类法》规定的最小颗粒尺寸是 5 um [14]。

最小颗粒尺寸极限将直接影响球化率计算结果，影响程度的大小取决于球化率评定方法。采用颗粒计数法时，最小颗粒尺寸极限对计算结果影响很大。因为，大小颗粒对球化率的权重是相等的；采用面积法时，大小颗粒对计算结果的权重是不同的，石墨颗粒小，对结果的影响小。表 3 是采用计数法和面积法对同一组金相照片（编号为 A-J），分别计算最小颗粒尺寸界限为 5~20 μm 时的球化率，结果见表 3，可以看出采用计数法时，球化率计算结果的最大差异达 8.1%，10 组数据的平均差异达 4.2%；采用面积法时，球化率计算结果的最大差异达 3.3%，10 组数据的平均差异达 1.1%。小颗粒石墨面积占总石墨颗粒面积的比重小，对计算结果影响较小。

ISO 945-4 标准规定一般最小石墨颗粒极限为 10 μm。但对于厚大断面球墨铸铁试样或薄壁快速凝固试样，其最小颗粒尺寸极限可以适当调整。

1.3.5 视场边界上石墨颗粒的处理

ISO 945-4 明确规定，在评定球化率时，应除去与视场边界相切的石墨颗粒。这是因为不能正确判别与视场边界相切的石墨颗粒的形态（也无法测量其圆整度），因此必须将其面积排除在球化率计算公式（2）之外。

1.3.6 相邻石墨颗粒处理

采用计算机图像识别形态时，涉及到图像的分辨率（像素），分辨率越高，图像识别越精确。当两颗石墨颗粒相邻太近时，如图像分辨率不足够高的话，就可能将两颗石墨合二为一，影响石墨颗粒圆整度计算结果，进而影响球化率计算结果。因此，用图像法测定球化率时，对相邻石墨颗粒应进行人为干预，确保圆整度计算结果正确。

2 石墨颗粒大小等级及其分布

2.1 石墨颗粒大小分级

对石墨颗粒大小的分级 ISO 945-4 完全参照 ISO 945-1 的规定，见表 4[9]。表 4 的级别及对应的尺寸与我国 GB/T 9441-2009 完全相同[5]，但判别规则有很大的差异。GB/T 9441-2009 规定“计算直径大于最大石墨球半径的石墨颗粒直径的平均值”[5]，对应表 4 确定石墨颗粒的级别。而 ISO 945-1 的规定是视场中石墨颗粒大小与表 4 对应的尺寸确定石墨颗粒大小等级。由于金相试样剖面位置的不同，二维视场看到的石墨颗粒最大尺寸一般要小于实际石墨颗粒的最大尺寸。因此，允许有少量小于相应等级尺寸的小颗粒石墨[9]。

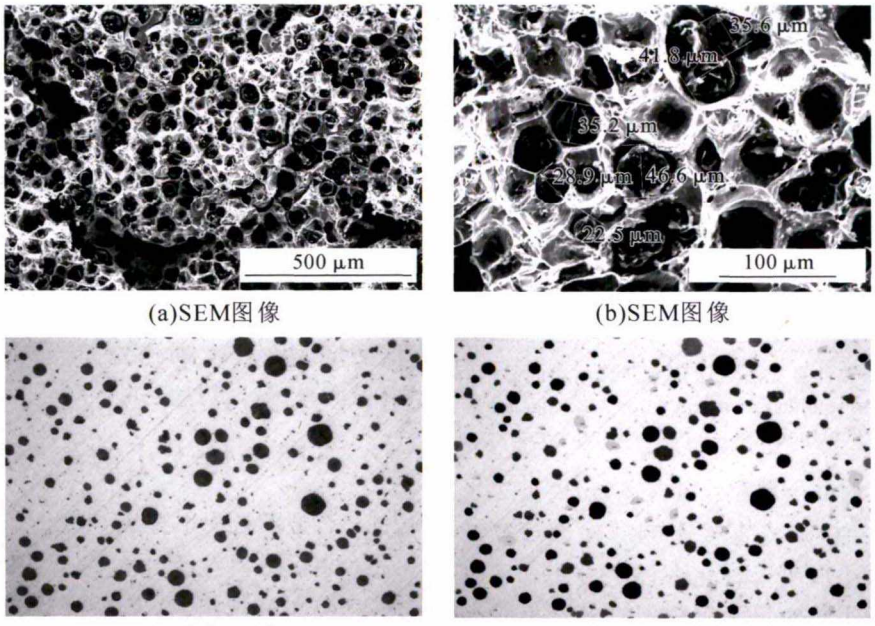
2.2 石墨颗粒分布及表示方法

二维金相看到的石墨颗粒最大尺寸不一定是石墨颗粒的实际最大尺寸，且一般要小于石墨颗粒的实际最大尺寸。有些学者认为，球墨铸铁中石墨颗粒的大小是非常一致的，并建议用二维金相看到的最大石墨颗粒尺寸表示石墨颗粒大小等级[16]。

图 6 是随意抽取的一个球墨铸铁拉伸试样断口的扫描电镜图像和断口处的金相照片。从图 6(a)和

表3 不同最小颗粒尺寸界限对应的球化率计算结果(%)
Tab.3 Influence of size limitation on calculating results of nodularity

图序	计数法					面积法				
	最小颗粒尺寸界限				最大波动	最小颗粒尺寸界限				最大波动
	5 μm	10 μm	15 μm	20 μm		5 μm	10 μm	15 μm	20 μm	
A	41.4	38.8	37.9	37.1	4.3	50.3	50.1	50.0	49.6	0.7
B	51.4	51.4	50.3	46.7	4.8	55.1	55.0	54.7	53.7	1.4
C	57.8	54.4	53.2	49.7	8.1	60.2	60.1	59.8	59.0	1.3
D	54.8	54.0	56.4	58.6	4.6	65.1	65.0	65.3	65.7	0.6
E	62.1	62.2	61.5	60.9	1.3	70.0	70.0	69.8	69.4	0.6
F	67.8	69.5	72.6	71.0	4.9	75.0	75.0	75.2	74.6	0.6
G	81.9	82.0	81.8	77.8	4.3	80.1	80.0	79.4	76.8	3.3
H	82.2	81.7	82.8	82.9	1.2	85.1	85.1	85.2	85.1	0.1
I	87.2	90.1	90.1	90.1	2.9	89.9	90.1	89.9	89.2	0.9
J	90.3	93.8	95.8	96.0	5.7	94.9	95.1	95.4	95.1	0.5



(a)SEM图像 (b)SEM图像

(c)金相照片 (d)二值化图像

图 6 球墨铸铁石墨颗粒尺寸分布

Fig.6 Size distribution of graphite particles in spheroidal graphite iron

表4 石墨颗粒尺寸分级表

Tab.4 Dimensions of graphite particle for size grades

级别	100 倍视场下的石墨颗粒尺寸 /mm	实际石墨颗粒尺寸 /mm
3	25 to<50	0.25 to<0.5
4	12 to<25	0.12 to<0.25
5	6 to<12	0.06 to<0.12
6	3 to<6	0.03 to<0.06
7	1.5 to<3	0.015 to<0.03
8	<1.5	<0.015

图 6(b)断口的扫描电镜图像基本上可以反映石墨颗粒的三维最大尺寸，从图像上可以清晰地看到大部分石墨颗粒尺寸为 6 级和 7 级，还有少量的 5 级和 8 级石墨颗粒。所以，球墨铸铁中石墨颗粒的大小往往是不一致的。同一断口处的金相照片及其二值化图像见图 6(c)和图 6(d)，金相照片中 8 颗石墨为 5 级、93 颗石墨为 6 级、118 颗石墨为 7 级、24 颗石墨为 8 级。对比图 6 的扫描电镜图像和二维金相图像反映的石墨颗粒分布规律，可以认为：球墨铸铁中石墨颗粒的大小并非是一致的，往往是跨级的，甚至跨多个级别。

因此在评定石墨颗粒大小等级时，石墨颗粒大小可以是同一级别，也可以是跨级的。另外由于二维金相视场看到的石墨颗粒最大尺寸一般要小于实际石墨颗粒的最大尺寸。因此，允许有少量小于相应等级尺寸石墨颗粒。

3 石墨颗粒数

在评定球墨铸铁单位面积石墨颗粒数时通常简称“石墨颗粒数”，实际评定“石墨颗粒数”时，根本没有区分球形石墨和非球形石墨；欲要区分球形石墨颗粒和非球形石墨颗粒，用计算机图像分析是可行的，但用目测法是不可行的。所以我们评定的所谓“石墨球数”实际上是“石墨颗粒数”，其中包括球形石墨和非球形颗粒石墨。因此，ISO 945-4:2019 标准的名词术语中，就用“石墨颗粒数”(graphite particle count)取代球形“石墨球数”(nodular count)。

球墨铸铁单位面积的石墨颗粒数与最小石墨颗粒尺寸极限密切相关，众所周知，规定的最小石墨颗粒尺寸越小，“石墨颗粒数”就越多。一般情况下，规定的最小石墨颗粒尺寸为 10 μm，特殊需要可以规定为 5 μm。ISO 945-4: 2019 标准给出了最小石墨颗粒尺寸为 10 μm 和 5 μm 的两组参照图，如图 7。表 6 是最小石墨颗粒尺寸为 10 μm 和 5 μm 时，ISO 945-4: 2019 标准参照图的“石墨颗粒数”。一般球墨铸铁成分选择在共晶附近，同类基体的球墨铸铁凝固析出的石墨数量是非常接近的。石墨颗粒越小，单位面积颗粒数量就越多。由表 5 可见，“石墨颗粒数”就越多，最小石墨颗粒尺寸对“石墨颗粒数”的影响就越大。如最小颗粒尺寸 10 μm 为 200 颗，对应的最小颗粒尺寸为 5 μm 为 230 颗；最小颗粒尺寸 10 μm 为 1 000 颗，对应的最小颗粒尺寸为 5 μm 为 2 188 颗。

4 结束语

球化率是评定球墨铸铁质量的重要指标，“ISO 945-4 铸铁显微组织 第四部分：球墨铸铁球化率评定方法”规范了采用目测法和图像法评定球墨铸铁

表5 ISO 945-4: 2019参照图的"石墨颗粒数"
Tab.5 ISO 945-4: 2019 refer to figure "graphite particle number"

ISO 945-4 参照图号	最小颗粒尺寸	
	≥10 μm	≥5 μm
图 B.1(a)	25	31
图 B.1(b)	50	64
图 B.1(c)	100	116
图 B.1(d)	150	165
图 B.1(e)	200	230
图 B.1(f)	300	350
图 B.1(g)	400	480
图 B.1(i)	600	684
图 B.1(j)	800	1 155
图 B.1(k)	1 000	2 188

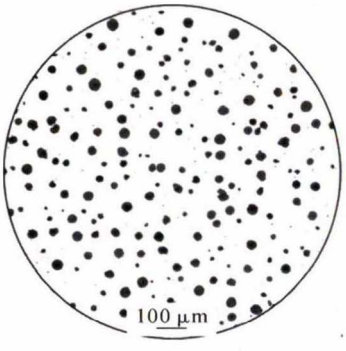


图 7 最小颗粒尺寸 10 μm 和 5 μm 对应的石墨颗粒数为 200 颗 /mm² 和 230 颗 /mm²
Fig.7 The minimum particle sizes of 10 μm and 5 μm correspond to the number of graphite particles of 200 /mm² and 230 /mm²

球化率。该标准定义石墨颗粒圆整度≥0.6 的石墨颗粒为球形石墨，建立了球化石墨颗粒的数学模型，并规定球形石墨颗粒面积百分数为球化率；该标准对视场的选择、视场边界上石墨颗粒以及相邻石墨颗粒的处理都作了明确确定，减少了人为因素，结果稳定性好，评定结果与原有球化率评定方法保持良好的延续性和一致性。

ISO 945-4 标准提出了用石墨颗粒数的概念，取代传统的石墨球数，使其更符合实际；ISO 945-4 标准参照 ISO 945-1 标准规定了石墨颗粒大小等级，与 GB/T 9441-2009 标准相同，但评定规则有很大的差异。ISO 945-4 标准提供了一组球化率评定参照图（50%~95%球化率）和一组石墨颗粒数评定参照图（最小颗粒尺寸≥10 μm 为 25~1 000 颗 /mm²；最小颗粒尺寸≥5 μm 为 31~2 188 颗 /mm²）。

参考文献：

[1] A modern casting staff report, Worldwide casting production grew by 5.3% during a busy 2017 [J]. Morden Casting, Dec. 2018: 23-26.

[2] 2018 年中国铸件产量数据发布，https://new.qq.com/omn/20190315/20190315A0YPX600.

[3] ISO 1083:2004, Spheroidal graphite cast irons-Classification [S]. Switzerland: ISO copyright office, 2004.

[4] EN 1563: 2011 Founding- Spheroidal graphite cast irons [S]. The British Standards Institute, 2012.

[5] GB/T 9441-2009, 球墨铸铁金相检验[S].

[6] JIS G 5502, Spheroidal graphite cast irons [S]. The Japanese Standards Association, Tokyo, 2001.

[7] ASTM E2567-14, Standard test method for determining nodularity and nodule count in ductile iron using image analysis [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2015.

[8] ISO 16112-2006, Compacted (vermicular) graphite cast iron- Classification [S]. Switzerland: ISO copyright office, 2006.

[9] ISO 945-1:2019, Microstructure of cast irons-Part 1: Graphite classification by visual analysis[S]. Switzerland: ISO copyright office, 2019.

[10] ASTM A247-06, Standard test method for evaluating the microstructure of graphite in iron castings [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2006.

[11] Ductile iron microstructure rating chart [S]. Schaumburg: AFS cast iron division quality control committee, 2010.

[12] ISO 945-4:2019, Microstructure of cast irons-Part 4: Test method for evaluating nodularity in spheroidal graphite cast irons [S]. Switzerland: ISO copyright office, 2019.

[13] GB/T 9441-1988, 球墨铸铁金相检验[S].

[14] ISO/TR 945-2:2011, Graphite classification by image analysis [S]. Switzerland: ISO copyright office, 2011.

[15] JIS G5505:2013, Compacted (vermicular) graphite cast irons [S]. Tokyo: Japanese Standards Association, 2013.

[16] Alexandra Velichko, Christian Holzapfel, Frank Mucklich. 3D characterization of graphite morphologies in cast iron [J]. Advanced engineering materials, 2007, 9 (1-2): 39-45.

精铸用
石英砂、石英粉、铝矾土、高铝砂

灵寿县德泰矿产品有限公司是一家专业从事非金属矿物的生产厂家，设备先进，技术力量雄厚。

让客户满意是我们的宗旨

化学成分

石英砂	石英粉	铝矾土	高铝砂
SiO_2≥98.7%	SiO_2≥98.7%	Al_2O_3≥55%	Al_2O_3≥52%

地　址：河北省灵寿县洞里工业区
电　话：0311-82617801(传真)，15175156717
联系人：刘喜亮