

GB/T 9441—2021《球墨铸铁金相检验》 标准解读

王泽华, 张 欣, 郭道成

(河海大学力学与材料学院, 江苏南京 211100)

摘要: 球墨铸铁的球化率、珠光体含量、磷共晶含量和碳化物含量是球墨铸铁的重要质量指标, 针对2009版《球墨铸铁金相检验》国家标准中存在的问题, 新修订了GB/T 9441—2021《球墨铸铁金相检验》标准。本文介绍新修订的GB/T 9441—2021标准的主要内容, 包括标准的术语和定义、球化率计算以及球化率、珠光体、磷共晶和碳化物等显微组织的评定; 对球形石墨颗粒的定义及其计算模型、球化率的定义及其计算公式的确定等进行了解读。本文总结归纳了2021版与2009版《球墨铸铁金相检验》国家标准的主要差异。

关键词: 球墨铸铁; 金相; GB/T 9441; 标准化

球墨铸铁具有优异的综合力学性能、良好的铸造性能和切削加工性能, 已广泛应用于大型柴油机机体、高铁齿轮箱和轴箱、地铁构架、风电轮毂和底座、重型燃气轮机壳体等^[1-6]。2020年全球球墨铸铁产量达2 360万吨以上^[7], 其中我国的产量是1 530万吨^[8]。随着对球墨铸铁技术指标要求的不断提高以及现代化检测技术的发展, 球墨铸铁标准应不断进行修改和完善, 使标准能更好地指导和服务于产品生产和检验。

1 GB/T 9441—2009标准存在的主要问题

1.1 球化率评定方法不统一

球化率是球墨铸铁质量的重要指标, 国际标准化组织、欧盟、以及主要工业国都制定了球墨铸铁球化率的评定方法^[9-16], 并认定ISO 945-1中示意的V形和VI形石墨^[17]为球形石墨, 定义球化率为铸铁中球形石墨的比例, 但各标准规定的球墨铸铁球化率计算方法不一致。目前球墨铸铁球化率的评定方法可分为两类: 石墨颗粒计数法, 即球化率等于球墨铸铁中VI形和V形石墨颗粒所占总石墨颗粒数的百分比; 面积法, 即球化率等于球墨铸铁中VI形和V形石墨颗粒面积所占总石墨颗粒面积的百分比。虽然国际上有统一的球化率定义, 但定义中没有明确计算方法, 也没有明确球形石墨形态的特征参数。这导致不同标准在球化率的评定上存在较大的差异。

1.2 球形石墨定义不明确

自20世纪70年代以来, 石墨颗粒形态分类一直是依据ISO 945-1《铸铁显微组织 石墨目测分类法》^[17]的示意图, 一些标准规定VI形石墨和V形石墨为球形石墨^[9-13]。由于实际石墨颗粒形态各异, 仅凭形态示意图难以把握评定球形石墨的标准, 因此评定结果经常因人而异, 人为因素较大。即使我国依此制定的GB/T 9441—2009《球墨铸铁金相检验》^[12]和美国铸造协会(AFS)的ASTM A247-2006《铸铁石墨形态评定方法》^[18]和球墨铸铁显微组织图^[19]之间, 也存在明显的差

作者简介:

王泽华(1960-), 男, 教授, 硕士, 主要从事铸造工艺、铸造合金以及铸造技术标准化研究工作。电话: 025-83786046, E-mail: zhwang@hhu.edu.cn

中图分类号: TG143.5
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2023)03-0333-09

收稿日期:

2022-04-24 收到初稿,
2022-06-05 收到修订稿。

异, 见图1。不管是计数法还是面积法评定球化率, 首先必须解决评定球形石墨的问题。

1.3 石墨颗粒大小等级评定与国际标准不一致

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”^[12], 对应表1确定石

墨颗粒的级别, 而ISO 945-1的规定视场中石墨颗粒大小与表1对应的尺寸确定石墨颗粒大小等级^[17], 虽然两者都是按照表1的分级标准, 但两者存在明显差异。前者是直径大于最大石墨球半径的石墨颗粒直径的平均值, 显然, 前者的计算结果将小于后者。

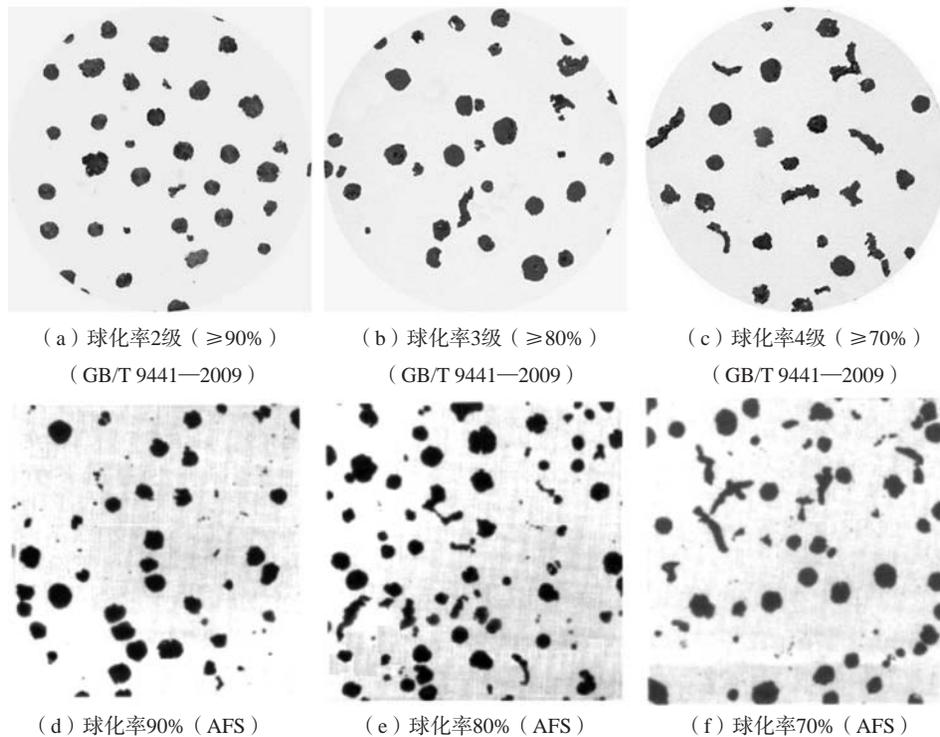


图1 GB/T 9441—2009 (a) (b) (c)与AFS (d) (e) (f)标准中球墨铸铁球化率评级图对比

Fig. 1 Comparison of the nodularity rating chart of the spheroidal graphite cast iron in GB/T 9441—2009 (a) (b) (c) and in AFS standards (d) (e) (f)

表1 石墨颗粒尺寸分级表

Table 1 Classification of dimensions of the graphite particles

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

1.4 视场选择不够合理

ISO 1083: 2018《球墨铸铁分类》^[9]、EN 1663: 2018《球墨铸铁》^[11]、JIS G5502: 2001《球墨铸铁》^[13]、ISO 945-4《铸铁显微组织 第4部分 球墨铸铁球化率评定方法》^[14]、ASTM E2567-14《球墨铸铁球

化率和石墨数量图像方法》^[15]等标准都是规定随机选择视场评定球化率, 而GB/T9441—2009《球墨铸铁金相检验》^[12]规定选择3个球化率最差视场评定球化率。事实上, 球墨铸铁的力学性能与随机选择视场的评定结果有较好的关联性, 而与最差视场的评定结果的关联性较差。因此选择3个球化率最差视场作为球化率评定结果是不合理的。另外, GB/T9441—2009《球墨铸铁金相检验》^[12]标准规定的检验视场直径为0.7 mm, 视场小, 评级图也太小, 不管是球化率评定, 还是珠光体、铁素体、磷共晶、碳化物等基体组织的评定, 评级图与实际金相比差异大, 评定结果易产生波动。

2 GB/T 9441—2021标准主要内容

本标准规定了球墨铸铁的球化率计算、金相试样制备、检验规则、检验项目和评级图、结果表示和检验报告。本标准适用于评定铸态、正火态、退火态球

墨铸铁的金相组织。

球化率是球墨铸铁的关键技术指标之一，明确球墨铸铁石墨颗粒形态定义是评定球化率的基础。因此，本标准建立了石墨颗粒形态的数值模型，定义了球形颗粒石墨的圆整度计算公式和临界值，规定了球墨铸铁球化率、石墨颗粒大小分布、单位面积石墨颗粒数量以及珠光体、碳化物、磷共晶含量等质量指标的评定方法，并提供了相应的评级参照图。

2.1 标准术语和定义

(1) 圆整度 ρ 。圆整度 ρ 定义为石墨颗粒面积与该颗粒最大弗雷德圆面积的比值，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 为石墨颗粒弗雷德圆面积； l_m 为石墨颗粒最大弗雷德直径。 A 、 A_m 、 l_m 见图2。

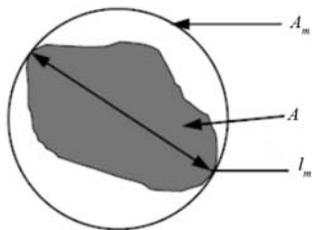


图2 石墨颗粒及弗雷德圆示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the graphite particle and its Feret circle

球墨铸铁的石墨颗粒并非完全是球形，其中很多呈不规则形态，描述不规则颗粒形态的方式有多种，常用的定量描述参数有形状系数、形状指数、密度系数等。金相是二维平面图像，金相检验看到的石墨颗粒形态是真实石墨颗粒的截面，因此只能用二维图像来描述石墨颗粒的圆整度。常用石墨颗粒圆整度的表示方有外切圆法（即颗粒面积除以外切圆面积）和最大弗雷德圆法（即颗粒面积除以最大弗雷德圆面积）。相对于外切圆法，最大弗雷德圆法易于实现计算机图像分析处理。为此，本标准采用石墨颗粒面积与该颗粒最大弗雷德圆面积的比值来衡量石墨颗粒的圆整度。

(2) 最大弗雷德直径。石墨颗粒截面轮廓线上两点之间的最大距离，如图2中的 l_m 。

(3) 球形石墨。ISO 945-1中规定的VI型和V形石墨颗粒，或圆整度 ≥ 0.6 的石墨颗粒。这个球形石墨的定义既遵循了传统的定性描述，又做了定量描述，这对球形石墨颗粒的认定具有更好的操作性，为实现计算机图像分析奠定了基础。

(4) 球化率。球形石墨颗粒面积占石墨颗粒总面

积的百分数。

(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。较以前的定义“一种以铁、碳为基体的铸造合金，其碳主要以球形石墨形式存在”增加了元素“硅”，因为，不仅普通球墨铸铁含有较高的“硅”，一般为2.0%~2.8%（质量分数），中硅球墨铸铁、高硅球墨铸铁含有更多的“硅”，甚至高于“碳”的含量。

(6) 石墨颗粒数。用石墨颗粒数（graphite particle count）取代原标准中的球形石墨颗粒数（nodular count），因为，实际目视评定石墨球颗粒数时，不区分球形石墨和非球形石墨，而是直接用评级图对比石墨颗粒数。

2.2 球化率计算

2.2.1 计算公式

球化率规定为圆整度 ≥ 0.6 的石墨颗粒的面积除以所有形态石墨颗粒的面积，见计算公式(2)，计算结果取整数。

$$p_{\text{nod}} = \frac{A_{V\text{I}} + A_{V\text{II}}}{A_{\text{all}}} \quad (2)$$

式中： p_{nod} 为球化率，%； $A_{V\text{I}} + A_{V\text{II}}$ 为VI形和V形石墨颗粒的面积，或圆整度 ≥ 0.6 的石墨颗粒的面积； A_{all} 为所有石墨颗粒的面积；与视场边界相切割的石墨颗粒和最大弗雷德直径小于临界尺寸的石墨颗粒面积不计。

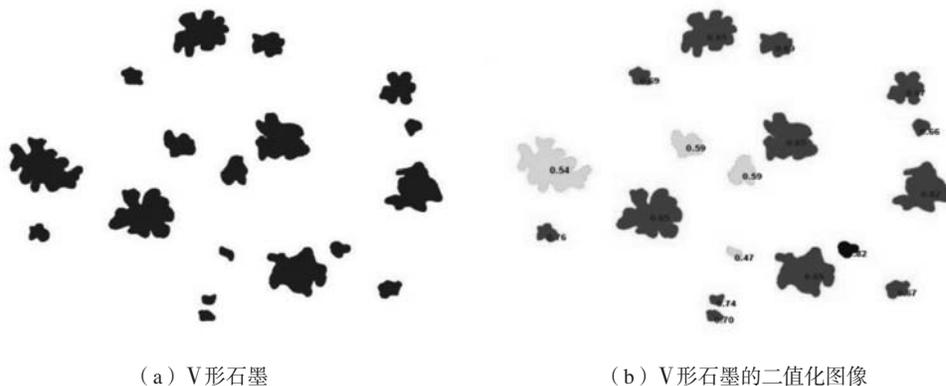
2.2.2 图像分辨率

颗粒面积和最大弗雷德圆直径都是通过统计图像像数确定，像数尺寸、对金相照片的扫描方式以及图像的数据处理方法等直接影响计算结果。在计算石墨颗粒圆整度时，采用高的分辨率，有利于提高计算结果精度。标准要求分辨率（像素） $\leq 1 \mu\text{m}$ 。分辨率（像数）越高，计算结果越精确。

2.2.3 球形石墨颗粒圆整度临界值

临界值是人为确定的，对于同一金相组织，圆整度临界值越大，意味着金相组织中球形石墨越少，计算得出的球化率就越低；反之，计算得出的球化率就越高。因此，球形石墨颗粒圆整度临界值的大小直接影响球化率的计算结果。

为了确定球形石墨颗粒圆整度的临界值，对ISO 945-1《铸铁显微组织—石墨目测分类法》中的V形石墨颗粒^[17]和AFS球化率评级图中球化率为100%的评级图^[19]进行了分析，见图3和图4。ISO 945-1的V形石墨示意图（见图3a）中有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3b；AFS的

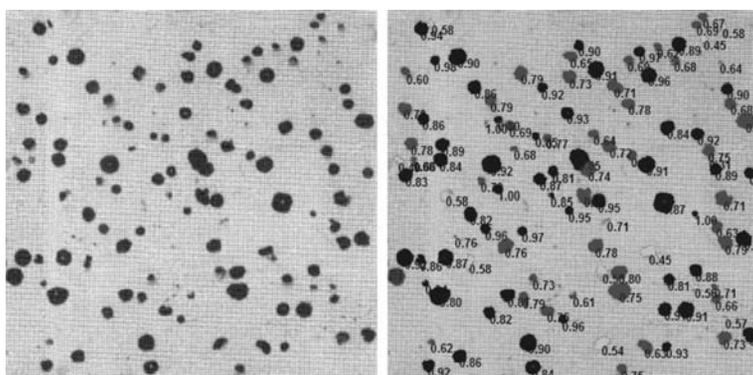


(a) V形石墨

(b) V形石墨的二值化图像

图3 ISO 945-1定义的V形石墨及其二值化图像

Fig. 3 Form V graphite particles of ISO 945-1 and their binary images



(a) 100%球化率评级图

(b) 100%球化率的二值化图像

图4 ASF评级球化率100%评级图及其二值化图像

Fig. 4 AFS rating chart nodularity 100% and its binary image

100%球化率评级图4a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4b。

为了加深对石墨颗粒圆整度的印象，图5提供了一些典型石墨颗粒的圆整度，其中有圆整度为0.44和0.48的石墨颗粒，可见将圆整度为0.45的石墨颗粒认定是球形石墨似乎说不过去。由于球墨铸铁生产技术水平已经大幅度提高，尽管考虑到新旧标准的衔接，但新标准对球形石墨的定义应适当提高。

为此，采用计数法和面积法，以0.5和0.6作为圆整度临界值计算同一视场的球化率，结果见图6^[20]。图6的横坐标A是以圆整度临界值为0.5，采用计数法计算的球化率；B和C是以圆整度临界值为0.6，分别采用计数法和面积法计算的球化率。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。

2.2.4 最小石墨颗粒尺寸

最小石墨颗粒尺寸直接影响球化率计算结果，当采用计数法时，最小石墨颗粒尺寸对计算结果影响很大。因为，大小颗粒对球化率评定结果的影响权重是相等的；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。

GB/T 9441—2009《球墨铸铁金相检验》规定的颗粒最小尺寸是20 μm ^[12]，ISO 16112《蠕墨铸铁分类》^[16]、ASTM E2567-14《球墨铸铁球化率和石墨数量图像方

(a) 圆整度 ρ 0.57(b) 圆整度 ρ 0.53(c) 圆整度 ρ 0.48(d) 圆整度 ρ 0.44(e) 圆整度 ρ 0.40

图5 典型石墨颗粒及其圆整度值

Fig. 5 Roundness values of typical graphite particles

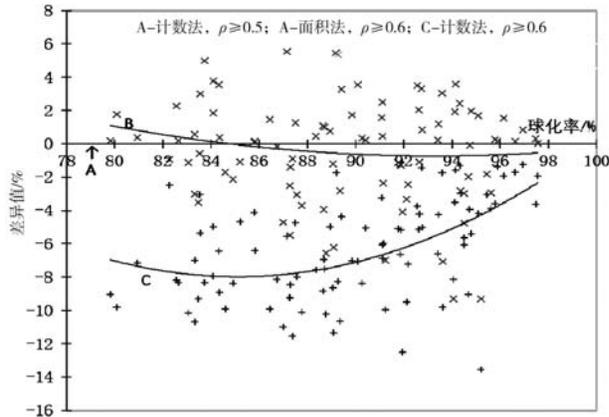


图6 圆整度临界值和计算方法对球化率计算结果的影响
Fig. 6 The influences of critical value of roundness and calculation method on the calculation result of the spheroidization rate

法》^[15]、JIS G5505《蠕墨铸铁件》^[13]规定最小石墨颗粒尺寸为10 μm，ISO/TR 945-2《铸铁显微组织 第2部分—石墨图像分类法》规定的最小颗粒尺寸是5 μm^[21]。

新修订的GB/T 9441—2021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。

2.3 球化率的评定

2.3.1 球化率等级

根据球化率由高到低，新修订标准对球化率等级的划分与GB/T 9441—2009相同，从50%~95%分6个级别，见表2。

2.3.2 目测比较法

目测比较法，也称评级图比对法。通过比较试样金相组织与评级图，确定石墨球化率级别。目测比较法评定球墨铸铁球化率对检验设备要求简单，操作方便，国内外普遍采用。

目测比较法的基础是标准评级图，GB/T 9441—2021标准提供了球化率为50%~95%的评级图，如图7，不同级别球化率的标准评级图见GB/T 9441—2021图E.1。与2009版评级图相比，新修订的评级图作了两方面的改进：①严格按照球形石墨定义和石墨颗粒数学模型、球化率计算公式的计算结果制作评级图；②扩大评定视场，有利于提高评估结果的稳定性。评级图由原来的Φ70 mm，增大到Φ120 mm，实际视场由

表2 球墨铸铁球化等级

Table 2 Grade of the nodularity of the spheroidal graphite cast iron

球化等级	评定球化率/%	评级图的球化率/%
1级	≥95	95
2级	90~94	90
3级	80~89	85
		80
4级	70~79	75
		70
5级	60~69	65
		60
6级	50~59	55
		50

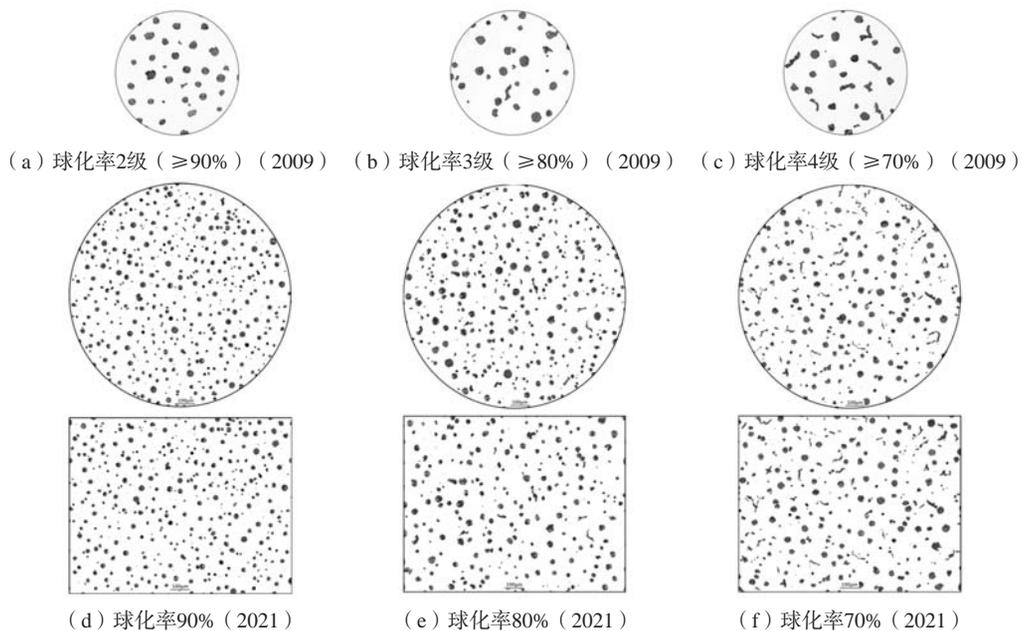


图7 不同版本GB/T 9441标准球墨铸铁球化率评级图对比

Fig. 7 Reference images for the rating nodularity of the spheroidal graphite cast iron in different version of GB/T 9441

$\Phi 0.7$ mm扩大到 $\Phi 1.2$ mm。并根据现有金相显微组织评定的实际需要,增加了矩形评级图。图7是按比例复制的2009版和2021版GB/T 9441提供的评级图,每个检验视场面积扩大近3倍。

2.3.3 图像分析法

目测比较法评定球墨铸铁球化率时存在较大的人为因素,而图像分析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,图像分析法的应用日益普遍。

什么形态的石墨颗粒为球状石墨,这是图像分析法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》示意的VI形石墨和V形石墨为球状石墨,这对于图像分析法来说是无法操作的,图像分析法应有VI形石墨和V形石墨的数值模型。

本标准采用石墨颗粒面积与该颗粒最大弗雷德圆面积的比值来衡量石墨颗粒的圆整度。首先由图像分析软件按式(1)计算检验视场中每颗石墨颗粒的圆整度和最大弗雷德直径,去除小于临界尺寸的石墨颗粒和圆整度 <0.6 的石墨颗粒,然后按式(2)计算视场中圆整度 ≥ 0.6 的石墨颗粒的面积与大于临界尺寸的所有石墨颗粒的面积 A_{all} 的比值,即球化率(%)。

采用图像分析法评定球化率时,还应注意:①除去与检验视场边界相切割的石墨颗粒,因为不能正确判别与视场边界相切割石墨颗粒的形态;②当两颗石墨颗粒相邻太近时,计算机生成图像易将其混为一体,应对相近石墨颗粒采取人为分离措施,以确保石墨颗粒圆整度和检验视场球化率计算结果的准确。

2.3.4 视场的选择

评定视场的选择对评定结果会产生较大的影响。新修订GB/T 9441与ISO 945-4:2019一致,采用随机选择检验视场,而不是2009版GB/T9441规定的选择3个球化率最差视场评定球化率;而且随机选取视场数量不

得少于5个,其石墨颗粒数量不得少于500颗。

选择最差的视场不具有代表性,随机选择视场更为合理;适当增加评定视场数量,增加检验石墨颗粒数量,有利于提高评定结果的稳定性。新版标准同时规定了评定视场的数量和石墨颗粒数量是基于薄壁件和厚大断面铸件。对于薄壁件,石墨颗粒细小,不需要5个视场的石墨颗粒数量就会超过500颗,这时也必须检验5个及以上视场;对于厚大断面铸件,由于石墨颗粒粗大,单个视场中石墨颗粒少,必须测定较多的视场,满足最少检验500颗石墨的要求。

2.3.5 评定结果的一致性

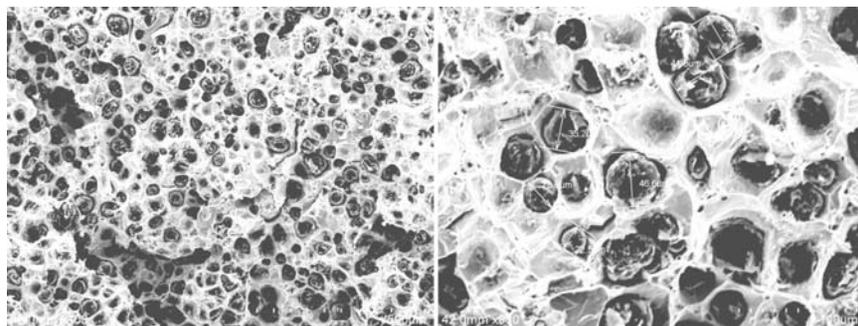
GB/T 9441—2021的球化率评级图引用ISO 945-4标准的评级图^[14],都经图像分析法计算确认,并经国际标准化组织送ISO/TC25成员国实验室认证,为了保证目测比较法和图像分析法评定结果的一致性,在评定球化率时,还必须注意:

(1)采用目测比较法时,尽量使视场中石墨颗粒的大小与评级图一致。一般取视场的放大倍数为100倍,但当视场中大部分石墨颗粒小于 $10\ \mu\text{m}$ 时,应适当提高放大倍数;当视场中大部分石墨颗粒大于 $120\ \mu\text{m}$ 时,应适当降低放大倍数,使之达到最合适的观察评定效果。

(2)采用的图像分析软件必须严格执行本标准规定的石墨颗粒数学模型和球化率计算公式,图像分辨率(像素) $\leq 1\ \mu\text{m}$ 。另外,由于目前市场上的软件形式多样,建议以GB/T 9441—2021的球化率参照图为标准,对图像分析软件进行标定。

2.4 石墨颗粒大小等级评定

图8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^[20],图中可以清楚地看到,石墨颗粒的三维最大尺寸,图中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。因此得出结论,球墨铸铁中



(a) SEM图像(100×)

(b) SEM图像(350×)

图8 球墨铸铁石墨颗粒尺寸分布

Fig. 8 Size distributions of the graphite particles in the spheroidal graphite cast iron

石墨颗粒的大小并非是均匀一致的，而且往往是跨级的，甚至跨多个级别。

石墨颗粒大小分级评定时，应根据实测石墨颗粒尺寸按表1分级，石墨颗粒大小分布可能是同一级别，也可能是跨级分布，因此评定结果可能是一个级别，也可能是跨级的。这一点与2009版GB/T 9441不同，按GB/T 9441—2009规定的“计算直径大于最大石墨球半径的石墨颗粒直径的平均值”^[12]，石墨颗粒大小级别只能一个，而且小于新修订标准。

众所周知，二维金相看到的石墨颗粒是实际石墨颗粒的一个截面，不一定是石墨颗粒的实际最大尺寸，实际上一般是小于石墨颗粒的最大尺寸，甚至石墨颗粒的小截面。因此，在石墨颗粒大小评级时，允许跨级别评定，允许有少量小于相应等级尺寸的小颗粒石墨。

2.5 石墨颗粒数评定

单位面积石墨颗粒数（简称“石墨颗粒数”）按公式（3）计算。

$$n = \frac{n_1 + \frac{n_2}{2}}{A_f} \quad (3)$$

式中： n 为石墨颗粒数，个/ mm^2 ； n_1 为完全落在视场内的石墨颗粒数量，个； n_2 为被视场边界所切割的石墨颗粒数量，个； A_f 为检测视场的面积， mm^2 。

采用目测比较法评定石墨颗粒数时，一般不区分球形石墨和非球形石墨，因此2009版中评定的“石墨球数”实际上是“石墨颗粒数”。石墨颗粒数多少与规定的临界尺寸密切相关，国内外标准规定的石墨颗粒临界尺寸有 $5\ \mu\text{m}$ ^[21]、 $10\ \mu\text{m}$ ^[15-16, 20-22]和 $20\ \mu\text{m}$ ^[12]，新标准提供了以 $10\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \mu\text{m}$ 为临界尺寸的石墨颗粒数评级图，如图9所示， $\geq 10\ \mu\text{m}$ 的石墨为150颗/ mm^2 ，

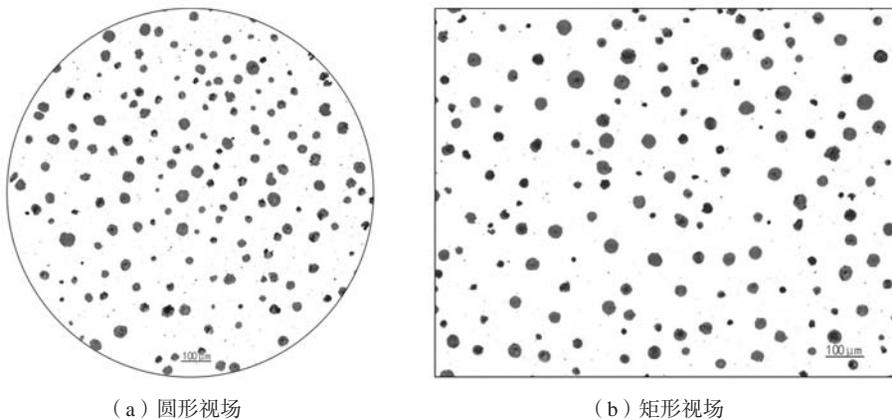


图9 最小颗粒尺寸 $10\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \mu\text{m}$ 对应的石墨颗粒数为150颗/ mm^2 和165颗/ mm^2

Fig. 9 The minimum particle sizes of $10\ \mu\text{m}$ and $5\ \mu\text{m}$ corresponding to 150 and 165 graphite particles per mm^2

$\geq 5\ \mu\text{m}$ 的石墨是165颗/ mm^2 。标准给出了一组标准参照图，当以 $10\ \mu\text{m}$ 为临界尺寸时，石墨颗粒数从25颗/ mm^2 到1 000颗/ mm^2 ；当以 $5\ \mu\text{m}$ 为临界尺寸时，石墨颗粒数从31颗/ mm^2 增加到2 188颗/ mm^2 。

2.6 珠光体含量评定

一般球墨铸铁基体中珠光体含量越高，球墨铸铁的强度、硬度越高，另外，珠光体含量越高，球墨铸铁的塑性和热稳定下降，因此，珠光体含量是球墨铸铁的重要检验指标。根据珠光体含量多少，从5%~95%分12个级别，每个级别的珠光体含量及采用的评级图的珠光体含量见表3，不同级别珠光体含量的评级图见GB/T 9441—2021图H.1。

评定珠光体含量时，不考虑石墨所占比例，即珠光体+铁素体+碳化物+磷共晶=100%。随机最少选取5个视场，放大倍数100倍。可根据石墨颗粒大小，调整

表3 珠光体含量分级

Table 3 Classifications of the pearlite content in the spheroidal graphite cast iron

级别	评定珠光体含量/%	评级图的珠光体含量/%
珠95	> 90	95
珠85	> 80~90	85
珠75	> 70~80	75
珠65	> 60~70	65
珠55	> 50~60	55
珠45	> 40~50	45
珠35	> 30~40	35
珠25	≈25	25
珠20	≈20	20
珠15	≈15	15
珠10	≈10	10
珠5	≈5	5

放大倍数,使石墨颗粒大小与评级图接近,取所有视场测定结果的平均值,取整数。

在珠光体含量评定方面,新修订标准规定“随机最少选取5个视场”,替代2009版标准规定的代表性视场;评级视场从 $\Phi 0.7$ mm扩大到 $\Phi 1.2$ mm,观测视场扩大近3倍;新版标准规定可以调整放大倍数,用一组评级图取代2009版标准的2组评级图。

2.7 磷共晶含量

磷共晶硬度高、脆性大,磷共晶分布在晶界区域,使铸铁强度和塑性下降,硬度提高。另外,磷共晶熔点低,使铸件热裂倾向增加。所以,对于一般球墨铸铁而言,磷是有害元素,磷含量低,磷共晶含量应严格控制。根据一般球墨铸铁对磷共晶的要求,GB/T 9441—2021给出了6个级别的磷共晶含量,分别为0.5%、1.0%、1.5%、2.0%、2.5%和3.0%,评级图见GB/T 9441—2021附录的图I.1。

评定磷共晶含量时,不考虑石墨所占比例,即珠光体+铁素体+碳化物+磷共晶=100%。观察整个受检面,以磷共晶含量最多的视场为受检视场,按照图I.1评级图评定磷共晶含量。

2.8 碳化物含量

碳化物硬度高、脆性大,使铸铁强度和塑性下降,硬度提高,耐磨性能提高,切削性能变差。对于一般球墨铸铁而言,碳化物含量是控制指标。GB/T 9441—2021定义了5个级别的碳化物含量,分别为1%、2%、3%、5%和10%,相应的评级图见GB/T 9441—2021图J.1。

评定碳化物含量时,同样不考虑石墨所占比例,即珠光体+铁素体+碳化物+磷共晶=100%。观察整个受检面,以碳化物含量最多的视场为受检视场,按照图J.1评定碳化物含量。

3 2021版GB/T 9441和2009版的差异

新修订的2021版GB/T 9441标准与2009版相比,除结构调整和编辑性改动外,技术内容变化主要有:

- (1)增加了最大弗雷德直径、颗粒圆整度、球形石墨颗粒和石墨颗粒数等术语;
- (2)增加了铸件本体取样规定;
- (3)增加了石墨颗粒圆整度计算模型和球化率计算公式;
- (4)更改了球化率分级、评定方法和球化率评级图;
- (5)更改了石墨颗粒大小评级方法和评级图;
- (6)增加了石墨颗粒数评定方法和评级图;
- (7)修改了珠光体含量评定规则和评级图,删除了分散分布的铁素体数量分级;
- (8)修改了磷共晶含量和碳化物含量评级图。

4 结语

球墨铸铁金相检验标准是球墨铸铁生产、产品质量检验和质量控制的基本依据,针对GB/T 9441—2009标准存在的不足,在尽可能保证新老标准评定结果具有良好一致性的前提下,GB/T 9441—2021标准定义了球形石墨颗粒的数学模型和球化率的计算方法,规定了球墨铸铁球化率、石墨颗粒大小、单位面积石墨颗粒数以及珠光体含量、磷共晶含量和碳化物含量等级及其检验方法,对检验视场的选择、视场大小、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的规定,减少了人为因素,提高评定结果的稳定性。但在使用计算机图像分析法评定球化率时,首先要对软件进行标定,规范计算方法和参数设定值,以确保评定结果的准确性。

参考文献:

- [1] 王泽华,梅婉,蔡有伟,等. 缩松对铁素体球墨铸铁QT400-18L力学性能和断裂机理的影响[J]. 铸造, 2021, 70(8): 906-914.
- [2] 卫东海,李克锐,李增利,等. 轨道交通用低温高韧性球墨铸铁件制造技术研究[J]. 铸造, 2020, 69(4): 342-348.
- [3] 丁建中,马敬仲,曾艺成,等. 低温铁素体球墨铸铁的特性及质量稳定性研究[J]. 铸造, 2015, 64(3): 193-200.
- [4] 陈玉芳,王星,唐光伟. 7 MW风电底座生产的关键控制技术[J]. 铸造, 2017, 66(10): 1108-1111.
- [5] 王泽华,李树中,刘泉深,等. 等温淬火球铁在我国铁道车辆耐磨件上的应用[J]. 铸造, 2003, 52(7): 466-471.
- [6] 吴铁明. 重型燃气轮机球墨铸铁件的研制与质量控制[J]. 铸造工程, 2019(6): 20-24.
- [7] 全球铸件产量报告[EB/OL]. https://www.sohu.com/a/510995455_121123700.
- [8] 2020年度中国铸件产量统计数据[J]. 铸造, 2021, 70(6): 759-760.
- [9] Spheroidal graphite cast irons-classification: ISO 1083: 2018[S]. Switzerland: ISO Copyright Office, 2018.
- [10] Founding-ausferritic spheroidal graphite cast irons-classification: ISO 17804: 2020[S]. Switzerland: ISO Copyright Office, 2020.
- [11] Founding-spheroidal graphite cast irons: EN 1563: 2018[S]. The British Standards Institute, 2018.

- [12] 球墨铸铁金相检验: GB/T 9441—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [13] Spheroidal graphite cast irons: JIS G 5502-2001 [S]. The Japanese Standards Association, Tokyo, 2001.
- [14] Microstructure of cast irons-part 4: test method for evaluating nodularity in spheroidal graphite cast irons: ISO 945-4: 2019 [S]. Switzerland: ISO Copyright Office, 2019.
- [15] Standard test method for determining nodularity and nodule count in ductile iron using image analysis: ASTM E2567-14 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2015.
- [16] Compacted (vermicular) graphite cast iron- classification: ISO 16112: 2017 [S]. Switzerland: ISO Copyright Office, 2017.
- [17] Microstructure of cast irons-part 1: graphite classification by visual analysis: ISO 945-1: 2019 [S]. Switzerland: ISO Copyright Office, 2019.
- [18] Standard test method for evaluating the microstructure of graphite in iron castings: ASTM A247-06 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2006.
- [19] Ductile iron microstructure rating chart [S]. Schaumburg: AFS Cast Iron Division Quality Control Committee, 2010.
- [20] 王泽华, 张欣, 钱坤才, 等. ISO 945-4铸铁显微组织球墨铸铁球化率评定方法解读 [J]. 铸造技术, 2020, 41 (5): 501-507.
- [21] Microstructure of cast irons-part 2: graphite classification by image analysis: ISO/TR 945-2: 2011 [S]. Switzerland: ISO Copyright Office, 2011.
- [22] Compacted (vermicular) graphite cast irons: JIS G5505: 2020 [S]. Tokyo: Japanese Standards Association, 2013.

Interpretation of GB/T 9441—2021“Metallographic Test Method for Spheroidal Graphite Cast Iron”

WANG Ze-hua, ZHANG Xin, GUO Dao-cheng

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu, China)

Abstract:

The mechanical properties of spheroidal graphite cast iron have a good relationship with its microstructure. The level of nodularity and the content of pearlite, phosphor eutectic, carbide are the recognized quality indicators of the spheroidal graphite cast iron. But there are some shortages existed in GB/T 9441—2009 Metallographic Test Method for Spheroidal Graphite Cast Iron. A newly revised standard was published. The main content of the revised standard was introduced in the paper, including technical items and definitions, expression of nodularity, and the evaluating method of nodularity, and the level of pearlite, phosphor eutectic, carbide in the spheroidal graphite cast iron. The definition for the spheroidal graphite particle and its numerical model, and nodularity calculating formula was explained in detail. And the technical difference between the two versions was collected and compared with each other.

Key words:

spheroidal graphite cast iron; metallographic test; GB/T 9441; standardization