

GB/T 26656—2023《蠕墨铸铁金相检验》 标准解读

李平平¹, 邓 晗¹, 朱家辉^{2, 3}, 王 群¹, 张 寅²

- (1. 中车戚墅堰机车车辆工艺研究所股份有限公司, 江苏常州 213011;
2. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 高端装备铸造技术全国重点实验室, 辽宁沈阳 110022;
3. 全国铸造标准化技术委员会, 辽宁沈阳 110022)

摘要: 蠕化率、珠光体含量、磷共晶含量和碳化物含量是蠕墨铸铁的重要技术指标, 针对2011版《蠕墨铸铁金相检验》国家标准中存在的问题, 以及铸铁相关国家标准的统一性问题, 新修订了GB/T 26656《蠕墨铸铁金相检验》标准。本文归纳了2023版和2011版《蠕墨铸铁金相检验》国家标准的主要差异, 介绍了新标准的主要内容, 包括术语和定义、蠕化率计算以及蠕化率等级、珠光体含量、磷共晶含量和碳化物含量等显微组织的评定; 对新、旧标准球(团)状石墨和团絮状石墨界限值的改变导致蠕化率计算结果的变化进行了对比验证, 并尝试统计了蠕虫状石墨和片状石墨的圆整度界限值。

关键词: 蠕墨铸铁; 金相检验; GB/T 26656; 标准化

蠕墨铸铁是介于灰铸铁和球墨铸铁之间的一种材料, 以其石墨形态而得名。在二维形态中, 大部分石墨彼此孤立, 两侧不甚平整、端部圆钝, 形似蠕虫, 因此被称为“蠕虫状石墨”。在三维形态中, 蠕虫状石墨与基体相伴而生呈网孔分布形成共晶团, 共晶团内蠕虫状石墨呈分枝、螺旋生长而又联系在一起, 侧面呈层叠状形态。蠕墨铸铁的强度性能和韧性略低于球墨铸铁, 比灰铸铁高, 其导热性、减震性等比灰铸铁略差, 但优于球墨铸铁^[1-3]。因此, 鉴于其优良的综合性能, 蠕墨铸铁被广泛应用于发动机、气缸、制动等耐热疲劳的领域^[4-8]。

上述蠕墨铸铁的各项性能与石墨形态和珠光体、磷共晶、碳化物等显微组织息息相关, 2011版《蠕墨铸铁金相检验》国家标准在过去10余年间也对蠕墨铸铁件行业提供了可靠的参照依据, 期间也衍生了超声波检测蠕化率等较为先进的操作方法^[9-11]。

近年来, 随着ISO 945—4: 2019^[12]和GB/T 9441—2021^[13]的正式颁布, 对标准中的术语和定义、界限值、显微组织、检测方法等进行了明确。为了构建国内统一的铸铁标准体系, 使标准能更好地指导和服务于产品生产和检验, 以中车戚墅堰所为主要起草单位修订的GB/T 26656—2023《蠕墨铸铁金相检验》标准于2023年5月23日正式实施。本文总结归纳了2023版和2011版《蠕墨铸铁金相检验》国家标准的主要差异, 指出计算机定量评级将是铸铁石墨仲裁检验的唯一可行路径, 拟定下次标准修订时正式将AI智能分析纳入标准范围。

1 GB/T 26656—2023和GB/T 26656—2011标准的技术差异

新修订的GB/T 26656—2023标准与2011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) 增加了最大弗雷德圆直径和颗粒圆整度等术语;

作者简介:

李平平(1987-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事金属结构件的失效分析和金相检验工作。E-mail: lpp86101c@163.com

中图分类号: TG143.49

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)

09-1290-11

收稿日期:

2024-10-08 收到初稿,

2024-11-06 收到修订稿。

(2) 更改了蠕墨铸铁中球状石墨颗粒圆整度界限值;

(3) 更改了蠕化率计算公式;

(4) 更改了珠光体含量评定时(珠光体+铁素体=100%)的概念;

(5) 更改了磷共晶含量等级;

(6) 统一了蠕化率分级、珠光体含量、磷共晶含量和碳化物含量等表格的表述方式;

(7) 修改了蠕化率分级、珠光体含量、磷共晶含量和碳化物含量等系列图谱;

(8) 增加了蠕虫状石墨的二维和三维形态图;

(9) 修改了典型石墨颗粒及其圆整度值;

(10) 尝试给出了蠕虫状石墨和片状石墨颗粒的圆整度界限值。

本次修订标准主要源于国内相关铸铁标准的统一性和2011版标准的局限性,现举例如下。

1.1 球状石墨界限值不统一

ISO 16112: 2017《紧密石墨铸铁(蠕墨铸铁)分类》^[14]规定了球化率按面积法计算的公式:

$$\text{Percent nodularity} = \frac{\sum A_{\text{nodules}} + 0.5 \times \sum A_{\text{intermediates}}}{\sum A_{\text{all particles}}} \times 100 \quad (1)$$

式中: A_{nodules} 为(最大中心长度 $\geq 10 \mu\text{m}$)球状石墨颗粒的面积(圆形系数 $\text{RSF} > 0.625$); $A_{\text{intermediates}}$ 为(最大中心长度 $\geq 10 \mu\text{m}$)中间过渡状石墨颗粒的面积(圆形系数 RSF 为 $0.525 \sim 0.625$); $A_{\text{all particles}}$ 为(最大中心长度 $\geq 10 \mu\text{m}$)所有石墨颗粒的面积。

GB/T 26656—2011《蠕墨铸铁金相检验》规定了蠕化率按面积法计算的公式:

$$\text{蠕化率} = \frac{\sum A_{\text{蠕虫状石墨}} + 0.5 \sum A_{\text{团、团絮状石墨}}}{\sum A_{\text{每个石墨}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $A_{\text{蠕虫状石墨}}$ 为蠕虫状石墨颗粒的面积(圆形系数 $\text{RSF} < 0.525$); $A_{\text{团、团絮状石墨}}$ 为团、团絮状石墨颗粒的面积(圆形系数 RSF 为 $0.525 \sim 0.625$); $A_{\text{每个石墨}}$ 为每个石墨颗粒(最大中心长度 $\geq 10 \mu\text{m}$)的面积。

可见GB/T 26656—2011沿用了ISO 16112的计算公式形式,不同的是,后者通过球化率表达蠕化效果,而前者直接用蠕化率表达,结果更为直观。

ISO 945-1^[15]中规定的6种石墨类型见图1, ISO 16112中规定蠕墨铸铁中的石墨类型包括3类:球状石墨(VI型)、中间状石墨(IV型和V型)、蠕虫状石墨(III型),且标准规定了中间状石墨的范围($0.525 \sim 0.625$)。

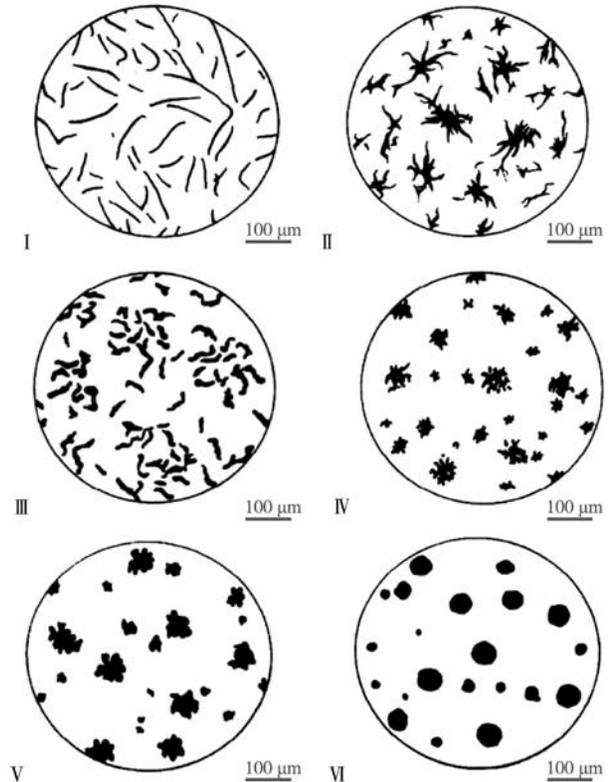


图1 ISO 945—1中规定的石墨形态
Fig. 1 Graphite morphologies specified in ISO 945—1

最新出版的ISO 945—4: 2019《铸铁金相组织 第4部分 球墨铸铁球化率评定方法》和GB/T 9441—2021《球墨铸铁金相检验》规定了球化率按面积法计算的公式:

$$P_{\text{nod}} = \frac{A_{\text{VI}} + A_{\text{V}}}{A_{\text{all}}} \quad (3)$$

式中: $A_{\text{VI}} + A_{\text{V}}$ 为圆整度 $\rho \geq 0.6$ 的石墨颗粒的面积; A_{all} 为石墨颗粒的总面积。

GB/T 26655—2022《蠕墨铸铁件》也将圆整度系数为 $0.600 \sim 1.000$ 的石墨定为球状石墨,将圆整度系数为 $0.525 \sim 0.600$ 的石墨定为团絮状石墨。

可见ISO 945—4: 2019、GB/T 9441—2021、GB/T 26655—2022^[16]等现行的3个最新标准均采用了圆整度概念,并统一将圆整度 $\rho \geq 0.6$ 的石墨颗粒定为球状石墨,这与上述 0.625 为界限是不同的。

1.2 珠光体含量计算方式理解差异

蠕墨铸铁基体组织以珠光体和铁素体为主,珠光体含量越高,对应的强度等级越高。在评定珠光体含量时,不考虑石墨所占比例。GB/T 26656—2011规定在评定珠光体含量时,珠光体+铁素体=100%,即忽略了磷共晶和碳化物所占的比例,这经常导致在检测过

程中由于供需双方对标准理解的差异而产生不必要的争论。

1.3 图谱形式的合理性

GB/T 26656—2011正文中涉及蠕化率分级、珠光体含量、磷共晶含量、碳化物含量等4套图谱，有些采用方形图片，有些采用圆形图片，但都没有标尺。

一般在光学显微镜拍照时，原始图片为方形图片，不仅方便排版，而且易于裁剪，但标准对方形图片的长宽比并未作具体要求，而圆形图片则可通过直径这个唯一参数表示视场面积。无论选用何种形式的图片，既要考虑可操作性，又要前后统一，建议同一个标准选用一种形状的图谱。

另外，GB/T 26656—2011标准中所有图片均未添加标尺，以图2为例，不同标尺下所测蠕化率相当，但在实际检测过程中，采用图像分析仪评定时进行标尺标定是必要前提，尤其在去除碎点石墨时，标准规定小于10 μm的石墨颗粒将被去除，这在2011版标准中石墨颗粒尺寸细小的情况下，将会对评判结果造成较大影响。

1.4 组织含量表示方法不统一

以蠕化率分级和珠光体含量分级为例，二者在上下限的表述方面不统一，例如：蠕95表示蠕虫状

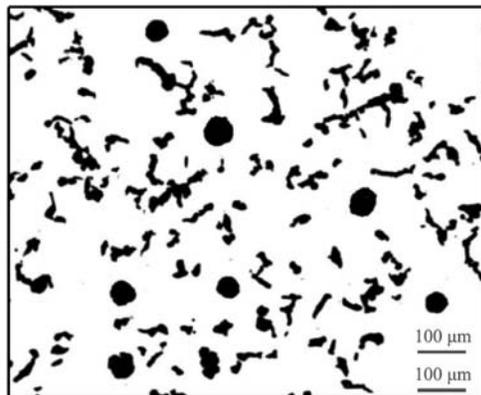


图2 标尺对蠕化率计算结果的影响

Fig. 2 Effect of the scale on the vermicularity calculation result

石墨含量大于等于95%（包括95%），蠕90表示蠕虫状石墨含量大于等于90%，小于95%（包括90%，不包括95%）；珠95表示珠光体含量大于90%（不包括90%），珠85表示珠光体含量大于80%，小于等于90%（不包括80%，包括90%）。蠕95在GB/T 26656—2011（旧标准）中表示蠕化率级别，在GB/T 26656—2023（新标准）中则表示名称。

因此，本次标准修订旨在解决相关铸铁标准中石墨的界限值统一，生产或仲裁过程中基体组织的差异性理解，标准中图片及各类组织含量表示方法的不统一等问题。

表1 蠕化率分级
Tab. 1 Vermicularity grading

2023版				2011版		
级别	名称	蠕化率/%	参照图谱	蠕化率级别	蠕虫状石墨量/%	参照图谱
1	蠕95	>95	图1 (a)	蠕95	≥95	图1 (a)
2	蠕90	>90~95	图1 (b)	蠕90	90	图1 (b)
3	蠕85	>85~90	图1 (c)	蠕85	85	图1 (c)
4	蠕80	>80~85	图1 (d)	蠕80	80	图1 (d)
5	蠕70	>70~80	图1 (e)	蠕70	70	图1 (e)
6	蠕60	>60~70	图1 (f)	蠕60	60	图1 (f)
7	蠕50	>50~60	图1 (g)	蠕50	50	图1 (g)
8	蠕40	>40~50	图1 (h)	蠕40	40	图1 (h)

2 GB/T 26656—2023标准的主要内容

本标准规定了蠕墨铸铁金相试样的制备、检验项目和评级。适用于砂型铸造蠕墨铸铁的石墨形态判断，以及蠕化率、珠光体、磷共晶和碳化物数量与分级的评定。

2.1 标准术语和定义

(1) 最大弗雷德圆直径。石墨颗粒外缘轮廓上任意两点之间的最大直线距离，如图3中 l_m 。

(2) 颗粒圆整度。石墨颗粒面积除以该石墨颗粒最大弗雷德圆直径的圆面积。由公式(4)计算获得：

$$\rho = \frac{A}{A_m} = \frac{4 \times A}{\pi l_m^2} \quad (4)$$

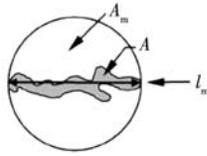


图3 石墨颗粒及弗雷德圆示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a graphite particle and Fred circle

式中： ρ 为颗粒圆整度； A_m 为直径为 l_m 的圆的面积， mm^2 ； A 为分析研究的石墨颗粒面积， mm^2 ； l_m 为分析研究的石墨颗粒外缘轮廓上任意两点之间的最大直线距离， mm 。

2.2 蠕化率计算公式

2011版标准采用公式(2)计算蠕化率，但正如前述所说，ISO 945—4: 2019、GB/T 9441—2021、GB/T 26655—2022将圆整度 $\rho \geq 0.6$ 的石墨颗粒定义为球状石墨，因此，为了与最新版国际标准和国家标准统一，2023版标准中也将中间状石墨与球状石墨的界限调整为了0.6，而中间状石墨的下限0.525保持不变。另外，公式(3)中明确大于等于0.6的石墨类型为V型和VI型，故公式(2)中间状石墨(团状、团絮状)也应更改为团絮状。综合考虑，2023版标准蠕化率计算采用公式(5)：

$$\rho_v = \frac{\sum A_v + 0.5 \times \sum A_f}{\sum A_{\text{all}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中： ρ_v 为蠕化率，面积百分数%； A_v 为蠕虫状石墨颗粒($l_m \geq 10 \mu\text{m}$ ，圆整度 $\rho < 0.525$)的面积， mm^2 ； A_f 为团絮状石墨颗粒($l_m \geq 10 \mu\text{m}$ ，圆整度 ρ 为0.525~0.600)的面积， mm^2 ； A_{all} 为石墨颗粒($l_m \geq 10 \mu\text{m}$)的总面积， mm^2 。

2.3 蠕化率分级

根据蠕化率由高到低，2023版标准对蠕化率的划分与2011版标准相同，从40%~100%分8个级别，新、旧标准蠕化率分级见表1。新版标准增加了级别数，将2011版蠕化率级别更名为名称，对蠕化率上下限均作了明确的要求，表述更加清晰。另外，新版标准蠕化率分级评定参照图谱进行了更换，一方面增加了标尺，另一方面蠕虫状石墨的形态更加明显，而2011版蠕化率分级图中石墨尺寸偏小，形似“碎点状”，不能较好地参照。

2.4 显微组织含量

2.4.1 珠光体含量

2023版标准在评定珠光体含量时，不考虑石墨所占比例，但考虑磷共晶和碳化物所占比例，即珠光体+铁素体+磷共晶+碳化物=100%，对比2011版标准有较大的改变。

根据珠光体含量由高到低，2023版标准对珠光体含量的划分与2011版标准相同，从0~100%分10个级别，新、旧标准珠光体含量分级见表2。新版标准增加了级别数，将2011版珠光体数量的表述形式进行了简化。另外，同1.4中所述，2011版在名称方面是不统一的，例如表1中蠕95~蠕40表示蠕化率级别，而表2中珠95~珠5表示名称，新版标准珠光体含量分级评定参照图谱进行了更换，一方面增加了标尺，另一方面将圆形图片更改为方形图片。

2.4.2 磷共晶含量

磷共晶硬度高、脆性大，分布在枝晶偏析区域，使铸铁强度和塑性下降，同时由于熔点低使得铸件热裂倾向增加^[17]。为了保证铸件具有良好的冲击性能，

表2 珠光体含量分级
Tab. 2 Pearlite content grading

2023版				2011版		
级别	名称	珠光体含量/%	参照图谱	名称	珠光体含量/%	参照图谱
1	珠95	>90	图2 (a)	珠95	>90	图2 (a)
2	珠85	>80~90	图2 (b)	珠85	>80~90	图2 (b)
3	珠75	>70~80	图2 (c)	珠75	>70~80	图2 (c)
4	珠65	>60~70	图2 (d)	珠65	>60~70	图2 (d)
5	珠55	>50~60	图2 (e)	珠55	>50~60	图2 (e)
6	珠45	>40~50	图2 (f)	珠45	>40~50	图2 (f)
7	珠35	>30~40	图2 (g)	珠35	>30~40	图2 (g)
8	珠25	>20~30	图2 (h)	珠25	>20~30	图2 (h)
9	珠15	>10~20	图2 (i)	珠15	>10~20	图2 (i)
10	珠5	≤ 10	图2 (j)	珠5	≤ 10	图2 (j)

磷含量需要控制得很低^[18]。根据磷共晶含量由高到低，2023版标准在2011版标准的基础上将磷共晶含量由5级增加至6级，新、旧标准磷共晶含量分级见表3。新版标准增加了磷4的级别和图谱，将圆形图片替换为

方形图片，同时对各级别含量进行了明确。例如当磷含量为0.2%时，新版标准直接评定为1级（即磷0.5），而2011版标准则有歧义。尤其当磷含量为4%时，旧版标准的局限性更加突出。

表3 磷共晶含量分级
Tab. 3 Phosphorus eutectic content grading

2023版				2011版		
级别	名称	磷共晶含量/%	参照图谱	名称	磷共晶数量/%	参照图谱
1	磷0.5	≤0.5	图3 (a)	磷0.5	≈0.5	图3 (a)
2	磷1	>0.5~1	图3 (b)	磷1	≈1	图3 (b)
3	磷2	>1~2	图3 (c)	磷2	≈2	图3 (c)
4	磷3	>2~3	图3 (d)	磷3	≈3	图3 (d)
5	磷4	>3~4	图3 (e)	磷5	≈5	图3 (e)
6	磷5	>4~5	图3 (f)	/	/	/

2.4.3 碳化物含量

碳化物作为铸铁中最常见的硬相，硬度高、脆性大，亦使铸铁强度和塑性下降，切削性能变差。评定碳化物含量时，同样不考虑石墨所占比例，观察整个受检面，以碳化物最多的视场为受检视场。根据碳化

物含量由高到低，2023版标准对碳化物含量的划分与2011版标准相同，从0~10%分6个级别，新、旧标准碳化物含量分级见表4。新版标准将圆形图片替换为方形图片，同时对各级别含量进行了明确。

表4 碳化物含量分级
Tab. 4 Carbide content grading

2023版				2011版		
级别	名称	碳化物数量/%	图号	名称	碳化物数量/%	图号
1	碳1	≤1	图4 (a)	碳1	≈1	图4 (a)
2	碳2	>1~2	图4 (b)	碳2	≈2	图4 (b)
3	碳3	>2~3	图4 (c)	碳3	≈3	图4 (c)
4	碳5	>3~5	图4 (d)	碳5	≈5	图4 (d)
5	碳7	>5~7	图4 (e)	碳7	≈7	图4 (e)
6	碳10	>7~10	图4 (f)	碳10	≈10	图4 (f)

2.5 蠕虫状石墨形态

2.5.1 二维形态

二维形态下蠕虫状石墨大部分彼此孤立、两侧不甚平整、端部圆钝。图4 (a) 为100倍下蠕虫状石墨二维形态，仅可观察到蠕虫的大体形态，至于两侧不平整的特征则需要更高倍数下观察（500倍），见图4 (b)。

另外，为了能在光学显微镜下通过二维图片更加清晰地观察石墨形态，可采用2%~4%或更高浓度比例的硝酸酒精溶液对试样抛光面进行较长时间的浸蚀，长时间的浸蚀将使表面基体“溶解”，再用自来水或酒精将“溶解”的基体高压冲洗去除，石墨则保留下

来，图5显示在深度浸蚀状态下石墨的形态特征更加明显。

2.5.2 三维形态

蠕墨铸铁断口试样深浸蚀后，在扫描电子显微镜下可观察到蠕虫状石墨的三维形态，2023版标准对蠕虫状石墨共晶团、分枝、端部、侧面等图谱进行了补充完善，能更加清晰地表达其形态特征。图6显示蠕虫状石墨与基体相伴而生并呈网孔分布，共晶团有大有小但尺寸较为接近。该特征根据共晶团大小一般在较低放大倍数下观察，建议25~100倍。图7显示共晶团内蠕虫状石墨呈分枝生长而又联系在一起。该特征针对

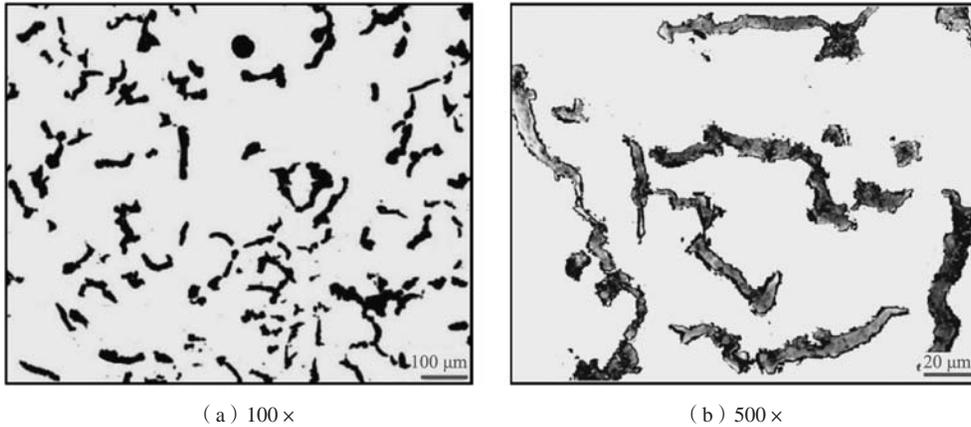


图4 蠕虫状石墨二维形态 (正常浸蚀)

Fig. 4 Two-dimensional morphologies of compacted graphite graphites (normal erosion)

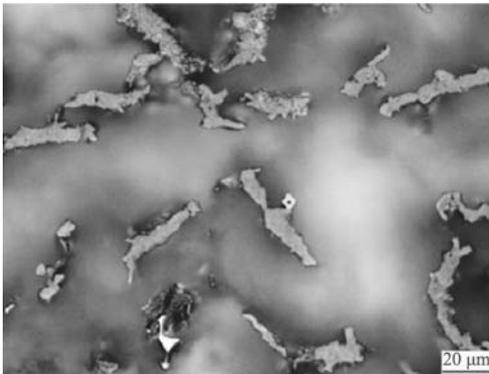


图5 蠕虫状石墨二维形态 (深度浸蚀)

Fig. 5 Two-dimensional morphology of compacted graphite graphite (excessive erosion)

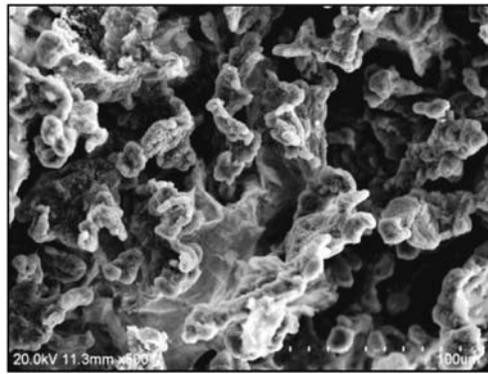


图7 蠕虫状石墨部分分枝

Fig. 7 Part of compacted graphite branches

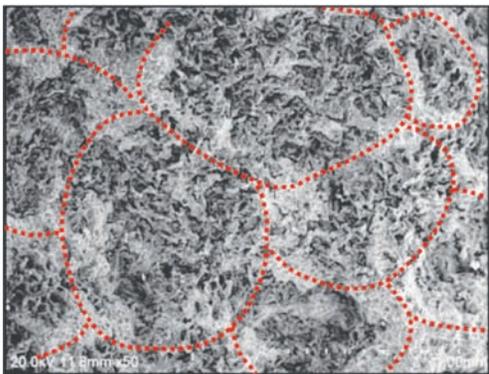


图6 蠕虫状石墨共晶团

Fig. 6 Compacted graphite eutectic clusters

一个共晶团内的石墨形态在中等放大倍数下观察，建议200~1 000倍。图8显示蠕虫状石墨分枝端部，2 000倍下基本能观察到螺旋状整体形貌特征，3 000倍下则仅能观察到端部局部区域形貌。图9显示蠕虫状石墨分枝侧面，1 000倍下基本能观察到层叠状整体形貌特

征，2 000倍数下则仅能观察到侧面局部区域形貌。当然这与蠕虫状石墨颗粒的尺寸有关，通常建议单个石墨颗粒的观察倍数选用1 000~5 000倍为宜。

2.6 典型石墨颗粒及其圆整度值

2023版标准将典型石墨颗粒及其圆整度值一一对应，从0~1较为均匀地列出，见表5。

综上，2023版标准在术语和定义、蠕化率计算公式、基体组织范围、各类图表等诸多方面均进行了明确和系统的升级，更加适用于现阶段的蠕墨铸铁金相检验和仲裁，同时能更好地指导生产。

3 GB/T 26656—2023标准的验证分析

3.1 片状石墨与蠕虫状石墨圆整度界限值统计

为了明确片状石墨和蠕虫状石墨圆整度界限值，作者在生产过程中采集数千张图片数据集，并随机选取500个片状石墨颗粒和500个圆整度值相对较小的蠕虫状石墨颗粒，进行颗粒圆整度计算，以期找到片状

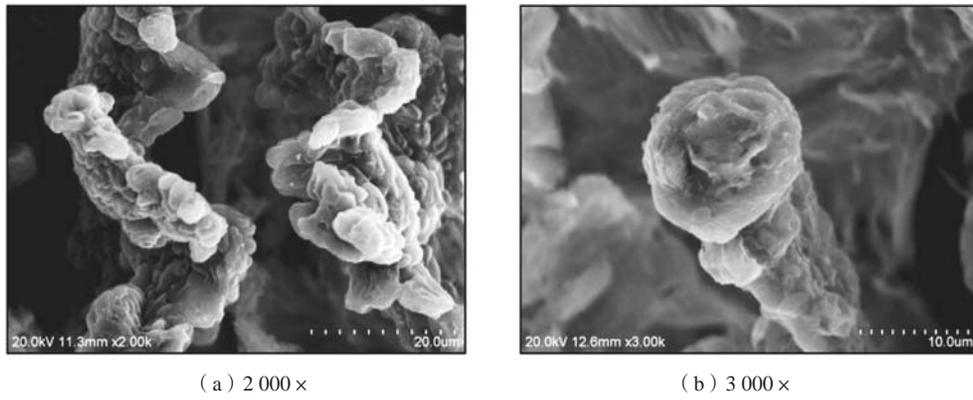


图8 蠕虫状石墨分枝端部
Fig. 8 Tips of compacted graphite branches

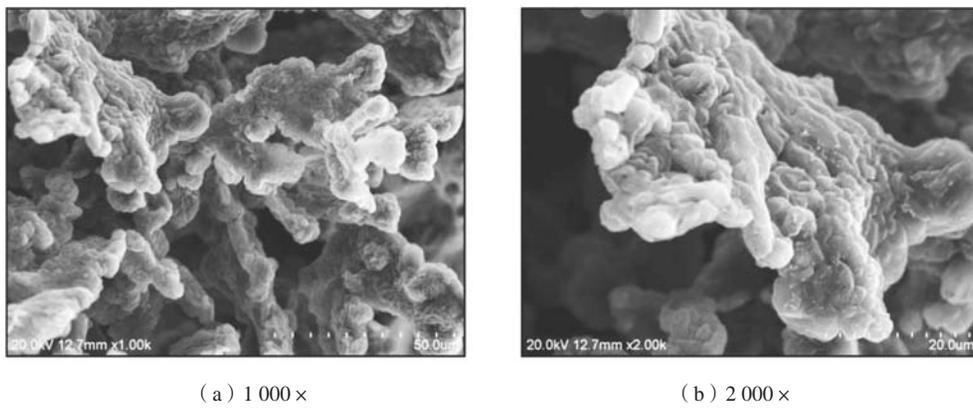


图9 蠕虫状石墨分枝侧面
Fig. 9 Sides of compacted graphite branches

表5 典型石墨颗粒及其圆整度值
Tab. 5 Typical graphite particles and their roundness values

石墨圆整度		各种形态的石墨及对应的球状修正系统				
<1.0	≥0.80	0.98	0.92	0.88	0.84	0.80
<0.80	≥0.60	0.76	0.72	0.68	0.64	0.60
<0.60	≥0.40	0.57	0.53	0.48	0.44	0.40
<0.40	≥0.20	0.39	0.33	0.30	0.27	0.20
<0.20		0.19	0.16	0.13	0.10	0.05

石墨和蠕虫状石墨之间的界限值，结果发现：①较为短小的片状石墨，圆整度一般在0.1~0.2，细长的片状石墨，圆整度一般在0.03~0.1；②蠕虫状石墨圆整度则

全部大于等于0.08。因此，经统计后将片状石墨和蠕虫状石墨之间的界限值设定为：<0.08。图10为部分片状石墨图，图11为部分蠕虫状石墨图。

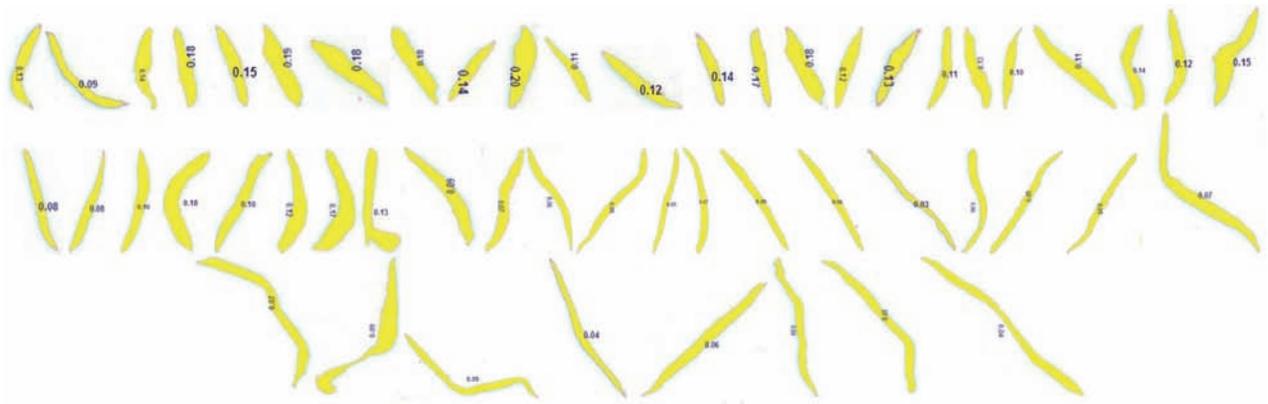


图10 部分片状石墨圆整度

Fig. 10 Roundnesses of some flake graphites

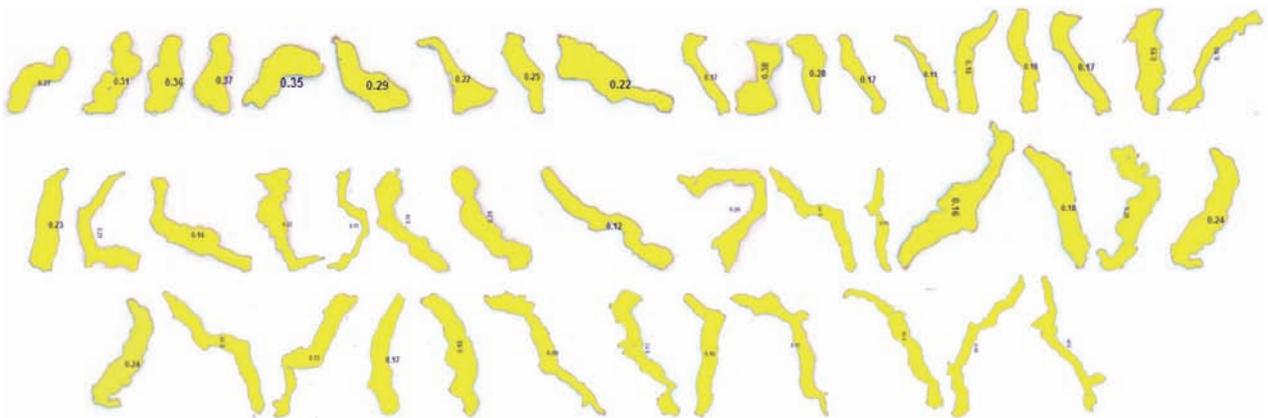


图11 部分蠕虫状石墨圆整度

Fig. 11 Roundnesses of some compacted graphites

3.2 蠕化率计算公式对比

标准修订过程中共提出3种公式设想：蠕化率 =

$$\frac{\sum A_{\text{蠕虫状石墨}} + 0.5 \sum A_{\text{团、团絮状石墨}}}{\sum A_{\text{每个石墨}}} \times 100\%, \text{ 式(1)};$$

$$\text{蠕化率} = \frac{\sum A_{\text{蠕虫状石墨}} + 0.5 \sum A_{\text{团、团絮状石墨}}}{\sum A_{\text{每个石墨}}} \times 100\%, \text{ 式(2)}$$

(2); $\rho_{\text{蠕}} = 1 - P_{\text{nod}}$, 式(3), 其中式(1)保留2011版标准格式; 式(2)与ISO 945—4: 2019、GB/T 9441—2021、GB/T 26655—2022保持统一, 一方面将球状石墨圆整度下限定为0.600, 另一方面将0.525~0.600中间状石墨定为团絮状石墨; 式(3)则是基于蠕墨铸铁标准中明确规定不允许存在片状石墨, 那么在只有

球状、团絮状和蠕虫状石墨的情况下, 是否可以考虑蠕化率=100%-球化率。同样, 作者在生产过程中采集数千张不同级别的蠕虫状石墨图片数据集, 并随机选取了670张, 图12为部分图片展示, 通过上述3种方式分别计算, 结果如图13和图14所示, 式(2)较式(1)进行了适当加严, 670张图片中约95.5%的图片蠕化率降低范围<1%, 约4.5%的图片蠕化率降低范围在1%~1.5%。式(3)和式(1)对比则出现了较大的差异, 670张图片中约88%的图片蠕化率提升范围在1%~4%, 不仅放松了蠕化率评级, 而且存在跨级别的风险。

这里需要说明的是, 上述式(3)与GB/T 26656—2011制定时采用的公式[蠕化率=(1-球化率)×100%]

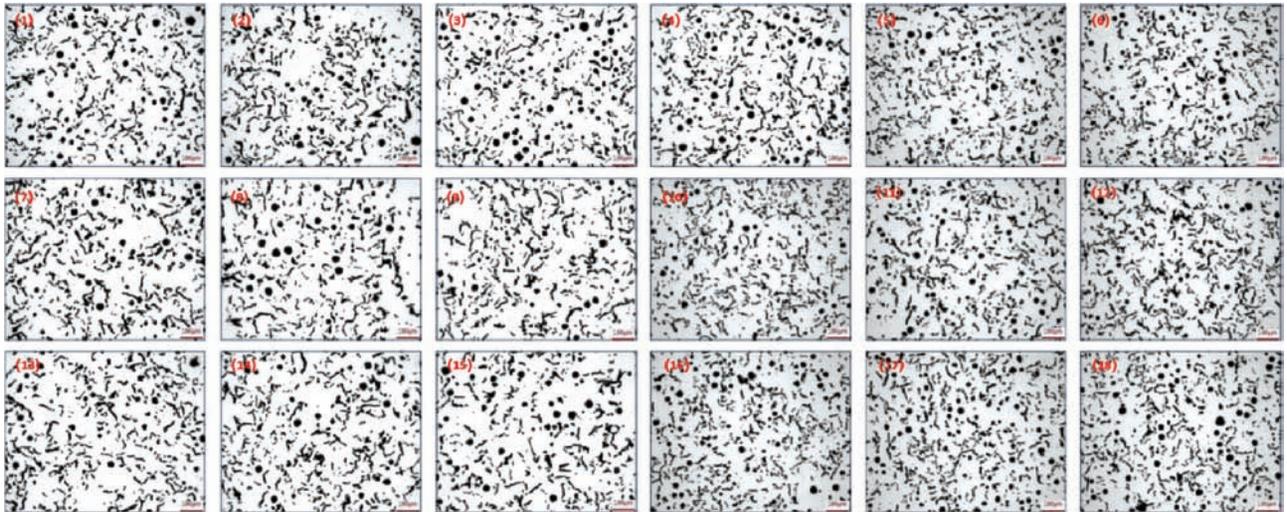


图12 部分蠕虫状石墨图片
Fig. 12 Part of compacted graphite images

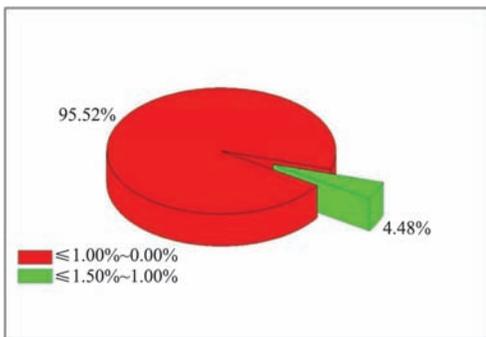


图13 式(2)较式(1)蠕化率下降结果统计图
Fig. 13 Statistical chart of the decrease results of vermicularities obtained by formula (2) comparing with formula (1)

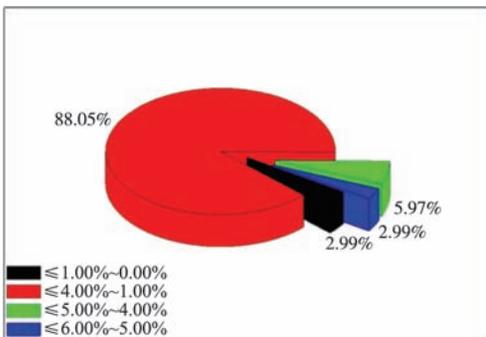


图14 式(3)较式(1)蠕化率上升结果统计图
Fig. 14 Statistical chart of the increase results of vermicularities obtained by formula (3) comparing with formula (1)

并不是一回事，前者球化率计算是基于球墨铸铁基础

$$\left(P_{nod} = \frac{A_W + A_V}{A_{all}} \right)$$
 式中， $A_W + A_V$ 为颗粒圆整度 $\rho \ge 0.6$ 的石墨颗粒的面积。后者球化率计算则是基于蠕墨铸铁基础，球化率 = $\frac{\sum A_{球状石墨} + 0.5 \sum A_{中间过渡状石墨}}{\sum A_{每个石墨}} \times 100\%$ ，式中考虑了中间过渡状石墨，更为科学合理。因此，式(3)计算结果明显放松了很多，不宜指导生产。

4 GB/T 26656—2023标准的应用

蠕墨铸铁金相检验中石墨不涉及大小和跨级别评定，输出结果仅为蠕化率。因此，蠕墨铸铁中石墨情况的检验较球墨铸铁和灰铸铁更为简单，尽管如此，通过传统的图谱比对法仍然为定性半定量的测定方法。总之，铸铁石墨情况的检验目前面临着公式多、视场多、类型多、级别多、人工难等几大问题，当遇到仲裁情况时，计算机定量评级可有效地辅助检测工程师进行级别判定。

作者团队结合新修订标准（GB/T 26656—2023、GB/T 7216—2023、GB/T 9441—2021）开发了一款多线程，低延迟、防阻塞、可移植性强的智能分析系统，图15为石墨评级简要流程，图16为蠕化率评级示例，输出结果唯一，计算速度秒级（小于1s），通



图15 石墨评级简要流程图
Fig. 15 Brief flow chart of graphite rating



(a) 石墨形态

(b) 评级结果

图16 蠕化率评级示例

Fig. 16 An example of vermicularity rating

过简单的操作流程即可实现精准的定量分析和图片的批量处理。新标准的顺利实施和智能分析系统的成功研发极大地提升了铸铁领域的检测效率和结果的精准性。

5 结语

蠕墨铸铁金相检验标准对蠕墨铸铁的生产、产品质量检验和质量控制具有重要意义，确保了产品的稳定性和可靠性。针对GB/T 26656—2011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，同时与现行国际和国家标准（ISO 945—4：2019、GB/T 9441—2021、GB/T 26655—2022）保持一致，GB/T 26656—2023标准将圆整度 $\rho \geq 0.6$ 的石墨颗粒定为球状石墨，对蠕化率计算公式进行了调整。明确了基体组织中珠光体+铁素体+磷共晶+碳化物=100%的概念，规定了检验视场的选择和视场大小。最后指出目前面临铸铁石墨公式多、视场多、类型多、级别多、人工难等几大问题，智能分析系统将作为新兴事物大幅提升检测效率和结果的精准性。

参考文献：

- [1] 李云玲, 钟振前. 蠕墨铸铁制动盘热疲劳裂纹分析 [J]. 物理测试, 2017, 35 (5): 44-46.
- [2] 张佳琦, 司乃潮, 刘光磊, 等. 蠕化率对蠕墨铸铁组织及热疲劳性能的影响 [J]. 材料导报, 2015, 29 (14): 111-115.
- [3] 任桂香, 晏德志, 江在坤, 等. 蠕化率对蠕墨铸铁热疲劳性能的影响 [J]. 现代铸铁, 2022 (4): 61-64.
- [4] 王峰, 班云峰. 蠕墨铸铁的性能特点和生产控制 [J]. 现代铸铁, 2020 (2): 19-24.
- [5] 张忠仇, 李克锐, 曾艺成. 我国蠕墨铸铁的现状与展望 [J]. 铸造, 2012, 61 (11): 1303-1307.
- [6] 林勇传, 黄健友, 谢正良, 等. 发动机特殊材质蠕墨铸铁RuT400的研发与应用 [J]. 内燃机工程, 2017, 38 (6): 86-91.
- [7] 李明, 刘庆义, 张行河, 等. 蠕墨铸铁在发动机铸件上的应用 [J]. 铸造设备研究, 2008 (5): 28-32.
- [8] 孙玉成, 孟迪, 姜爱龙, 等. 蠕墨铸铁性能及其在内燃机中应用的研究进展 [J]. 铸造技术, 2019, 40 (4): 417-422.
- [9] 王俊博, 石德全, 徐振宇, 等. 蠕墨铸铁超声检测影响因素的试验研究 [J]. 铸造, 2018, 67 (10): 898-902.
- [10] 张文杰. 超声波检测蠕墨铸铁制动毂蠕化率的研究 [J]. 现代铸铁, 2018 (3): 43-47.
- [11] 马文进, 阳龙. 蠕墨铸铁超声波蠕化率检测方法研究 [J]. 铸造技术, 2020, 41 (8): 771-772.
- [12] 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.
- [13] 球墨铸铁金相检验: GB/T 9441—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

- [14] Compacted (vermicular) graphite cast iron- classification: ISO 16112: 2017 [S]. Switzerland: ISO Copyright Office, 2017.
- [15] Microstructure of cast irons-part 1: graphite classification by visual analysis: ISO 945-1: 2019 [S]. Switzerland: ISO Copyright Office, 2019.
- [16] 蠕墨铸铁件: GB/T 26655—2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [17] 王泽华, 张欣, 郭道成. GB/T 9441—2021《球墨铸铁金相检验》标准解读 [J]. 铸造, 2023, 72 (3): 333–341.
- [18] 张寅. ISO 16112: 2017《蠕墨铸铁》标准解读 [J]. 铸造, 2018, 67 (7): 607–610.

Interpretation of GB/T 26656—2023 “Metallographic Test for Compacted (Vermicular) Graphite Cast Irons” Standard

LI Ping-ping¹, DENG Han¹, ZHU Jia-hui^{2,3}, WANG Qun¹, ZHANG Yin²

(1. CRRC Qishuyan Institute Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China; 2. Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., CAM, National Key Laboratory of Advanced Casting Technologies, Shenyang 110022, Liaoning, China; 3. National Technical Committee 54 on Foundry of Standardization Administration of China, Shenyang 110022, Liaoning, China)

Abstract:

Vermicularity, pearlite content, phosphorus eutectic content, and carbide content are important technical indicators of vermicular graphite cast iron. In response to the problems in the GB/T 26656—2011 “Metallographic test for compacted (vermicular) graphite cast irons” and the uniformity in relevant national standards for cast irons, the GB/T 26656 “Metallographic test for compacted (vermicular) graphite cast irons” was revised. This article summarized the main differences between 2023 version and 2011 version national standards of “Metallographic test for compacted (vermicular) graphite cast irons”, and introduced the main content of the new version, including terms and definitions, calculation of vermicularity, and evaluations of microstructures such as vermicularity grade, and the contents of pearlite, phosphorus eutectic, carbide, etc; the comparison verification was carried out for the variations of vermicularity calculation results caused by the changes in the limit values of spherical (agglomerated) graphite and quasi-spheroidal tempered carbon in the new and old standards, and attempted to calculate the roundness limit values of vermicular graphite and flake graphite.

Key words:

compacted (vermicular) graphite cast iron; metallographic test; GB/T 26656; standardization