铁矿石热裂指数的测定标准制定进展评述

马飞跃，丁 建
（重庆赛迪热工环保工程技术有限公司，重庆 401122）

摘要：块矿的热爆裂性能一般通过热裂指数来表征，其是高炉入炉原料的重要影响因素。为帮助研究及检测人员更好地测定铁矿石热裂指数，本文通过对比国内外关于铁矿石热裂指数测定标准的最新进展，对 ISO 8371 和 GB/T 10322.6 历次版本中存在的问题和主要修订内容进行分析和梳理，认为 GB/T 10322.6—2004 存在试样的制备过程繁琐、试验工艺设计不合理、试验结果的表示不严谨等主要问题。从试样制备过程、热裂试验过程（称量、加热、冷却、筛分）和试验结果表示三方面对历次标准的技术内容进行对比分析，按范围、原理、试样的制备、试验设备、试验步骤、结果表示等逐章节对 GB/T 10322.6—2022 进行解析，对 GB/T 10322.6—2022 提出编辑性和技术性修改建议。GB/T 10322.6—2022 应根据 ISO 8371：2024 适时修订，同时应解决 ISO 8371：2024 遗留的问题。该标准应增加设备规格描述，明确加热炉的尺寸和温度控制精度以及试验样盒的尺寸、厚度、材质；明确热裂试验装料步骤，如试样铺装层数、试验样盒装入数量等；明确热裂试验的加热温度和加热速率，优化热裂试验筛分步骤、热裂试验结果表示。

关键词：铁矿石；块矿；热裂指数；高炉
中图分类号：TF521 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764（2024）05－0009－08
doi：10.13403/j.sjqt.2024.05.069

Review on development of standards for determination of hot crack index of iron ore

MA Feiyue, DING Jian
(Chongqing CISDI Thermal & Environmental Engineering Co., Ltd., Chongqing 401122, Sichuan, China)

Abstract: The hot crack performance of lump ore is generally characterized by the hot crack index, which is an important influencing factor for the raw materials of blast furnace. In order to help researchers and inspectors better determine the hot crack index of iron ore, by comparing the latest progress of domestic and foreign standards for the determination of iron ore hot crack index, the problems and main revisions in the previous versions of ISO 8371 and GB/T 10322.6 are analyzed and sorted out, and it is believed that the main problems existing in GB/T 10322.6—2004 are: the preparation process of the sample is cumbersome, the test process design is unreasonable, and the expression of the test results is not rigorous. The technical content of the previous standards is compared and analyzed from such three aspects as sample preparation process, hot crack test process (weighing, heating, cooling, screening) and test result presentation, and GB/T 10322.6—2022 is analyzed chapter by chapter according to the scope, principle, sample preparation, test equipment, test steps, and result expression; the editorial and technical modification suggestions are put forward for GB/T 10322.6—2022. GB/T 10322.6—2022 should be revised in accordance with ISO 8371:2024 in due course, and the remaining issues of ISO 8371:2024 should be addressed. A description of equipment specifications of the standard should be added; the size and temperature control accuracy of the heating furnace, and the size, thickness and material of the test sample box are clarified; the charging steps of the hot crack test are clarified, such as the number of layers of sample paving, the number of test sample boxes, etc.; the heating temperature and heating rate of the hot crack test are clarified, and the screening steps

收稿日期：2023－10－27；**修回日期**：2023－12－25
作者简介：马飞跃（1984—），男，正高级工程师，从事钢铁企业原料检测工程设计和咨询工作。

of the hot crack test and the display of the hot crack test results are optimized.

Key words: iron ore; lump ore; hot crack index; blast furnace

高炉炼铁作为长流程钢铁冶炼不可或缺的工序，其减排、降碳需求值得关注[1]。炉料制备是炼铁工序碳排放的主要环节，而烧结工序是钢铁企业碳排放第二大户[2]。与烧结矿、球团矿等熟料相比，块矿作为高炉入炉料在降低成本及节能减排方面具有优势[3-4]，提高块矿入炉比例是优化高炉炉料结构的思路之一[5]。在成本方面优势明显，天然块矿不需要造块，节省了原料和能源消耗成本。在节能减排方面也有一定优势，块矿无需进行高温焙烧，没有造块过程中产生的污染物，可显著减少碳排放。某些企业基于块矿的热爆裂性能考虑对提高块矿入炉比例存在顾虑。因为热爆裂性能较差时，块矿会在高炉内产生较多粉末，且单一品种块矿的软化温度低、软熔区间大，配矿比例不当会导致炉内软熔带变厚，料柱透气性变差，影响高炉顺行。实际上，对块矿进行预脱水等措施可改善炉料的热爆裂性能[6]。

热裂指数(decrepitation index，DI)是表征块矿热爆裂性能优劣的一个重要指标。对于块矿的热爆裂行为和相关影响因素已有研究，但对于块矿热裂指数测定方法的标准溯源、演变和执行过程中存在的问题进行的研究较少。由于测定方法标准不同，国内研究人员探究块矿热爆裂机制时所采用的试验标准各不相同。2022 年以前，研究者[7-8]多依据 ISO 8371:1994 和 GB/T 10322.6—2004(等同采用 ISO 8371：1994)所述的样品制备工艺：采用 25.0 mm 和 20.0 mm 试验筛筛分，在(105 ± 5) ℃下烘干至少 12 h；在 25.0 mm 和 20.0 mm试验筛上再次筛分，以除去附着的细矿石粒，并在(105 ± 5) ℃下再次烘干 12 h。在加热环节采用热态装样，即先将试样盒与炉子一起升温至 700 ℃保温 20 min，然后取出样盒装入试样，再在700 ℃下加热 30 min。袁兵[9]采用的热裂试验方法与上述标准不同，试样质量为 1 000 g，试样粒度为 10.0 ~ 12.5 mm，保温时间为 1 h。也有研究者参考 ISO 8371:2007 进行试验，但试验参数与此标准不完全相同。吴艺鹏等[10]采取的试样量为(1 000 ± 1) g，加热炉的保温时间为 10 min，而 ISO 8371:2007 要求的试样量是 500 g(± 1 g)，保温时间为 20 min。易凌云等[11]、肖华荣[12]采用的是热态装样，而 ISO 8371:2007 已经将装样方式改为先空炉加热至 700 ℃保温 20 min，再将试样盒与试样一起装入炉中。上述各试验程序不同，导致针对类似的块矿品种如澳大利亚纽曼矿，测得的热裂指数差别很大，文献[7]测得的澳矿热裂指数为 4.93%，文献[8]为 1.10%，文献[9]为 5.17%，文献[10]为 16.8%，文献[11]和[12]为 13.62%。为更加客观地评价块矿热爆裂性能，祁成林等[13]引入了动态热裂指数的概念，其反应温度为 900 ℃，加热时间为 60 min，为热裂试验标准的修订提供了有参考性的数据。

对于采用 2022 年新发布实施的 GB/T 10322.6—2022 进行热裂试验，尚未见文献报道。试样粒度、升温速度、加热温度、加热时间等因素都会影响热裂指数，而现有国际标准和对应的国家标准关于热裂指数测定并未完全明确上述技术参数，造成采样困难。根据上述文献可知，由于试验方法精度差，导致试验结果的重现性差，不同试验之间数据的对比性差。因此，有必要对现存的国际标准、国家标准的各个版本进行对比和梳理，并对其中主要的技术参数进行分析，以提高热裂试验的操作性和效率。

1 国内外铁矿石热裂指数测定方法标准的最新进展

国内外关于铁矿石热裂指数测定的标准主要有国际标准(International Organization for Standardization，ISO)、英国标准学会系列标准(British Standard，BS)、日本工业标准(Japan Industrial Standards，JIS)、中华人民共和国国家标准(GB)和中华人民共和国出入境检验检疫行业标准(SN)等。

ISO 在 1994 年首次发布了关于铁矿石热裂指数的测定标准，其标准名为《铁矿石 热裂指数的测定》(ISO 8371:1994)，由国际标准化组织铁矿和直接还原铁分委员会物理试验组(ISO/TC102/

SC3）负责。其后，在 2007 年和 2015 年分别发布了第二版和第三版标准，对前一版本的标准进行修订。目前最新有效版本为第四版，即《高炉炉料用铁矿石 热裂指数的测定》（ISO 8371:2024）。

我国在 2004 年首次发布了铁矿石热裂指数测定的国家标准，其标准名为《铁矿石 热裂指数的测定方法》（GB/T 10322.6—2004），该标准是 GB/T 10322 系列标准的第 6 部分，由全国铁矿石与直接还原铁标准化技术委员会（SAC/TC317）负责。其后，在 2022 年发布了第二版，对前一版本的标准进行修订。目前其有效版本为《高炉炉料用铁矿石 热裂指数的测定》（GB/T 10322.6—2022）。

英国标准学会系列标准（BS）等同采用 ISO 系列标准，而我国出入境检验检疫行业标准（SN）直接引用 GB 系列标准，其技术内容完全一致，不再赘述。JIS 标准为新日铁标准 JIS/CJB—83038 LT，其只在国内极少数钢厂有使用，GB 未参考 JIS 的技术内容。下文主要针对 ISO 和 GB 历次标准进行分析。

2　历次标准存在的问题及主要修订内容

2.1　ISO 8371：1994 和 GB/T 10322.6—2004 存在的问题

GB/T 10322.6—2004 作为我国第一个关于铁矿石热裂指数的测定标准，等同采用 ISO 8371:1994，其在钢铁企业用户使用过程中，主要存在以下技术问题。

2.1.1　试样的制备过程繁琐，操作不便

按 GB/T 10322.6—2004 第 6 章的要求，需要分别用 25 mm 和 20 mm 的试验筛筛分试样，烘干 12 h 后，再次分别用 25 mm 和 20 mm 的试验筛筛分试样，并再次烘干 12 h。上述步骤并不能保证取得粒度和重量均合格的试样，且至少需要 24 h 的制样时间。这对于钢铁厂的生产检化验部门而言，不仅增加了劳动强度，而且拖长了试验周期。

2.1.2　试验工艺设计不尽合理

（1）称量环节。该环节仅要求称量 10 个试样，每个试样质量约为（500 ± 1）g，但没有给出称量的精度要求。由于块矿的粒度相对较大，无法保证称量至（500 ± 1）g，初始试样质量容易出现较大的偏差，造成最终的试验结果出现较大误差甚至错误。

（2）加热环节。首先要将试样盒加热至 700 ℃并保温 20 min。为了将试样装入试样盒，还需要将试样盒从炉内取出，手动打开盖子，装样并盖上盖子，然后放入炉中，这无疑增加了操作人员被灼伤的风险。

（3）冷却环节。仅要求冷却至室温，没有明确的温度值，导致等待时间过长，试验总周期加长。

（4）筛分环节。原文要求“测定并记录下 6.30、3.15 mm 和 0.50 mm 粒度矿石的质量（m_2）”，此处未明确指出是各粒级的筛上物还是筛下物，执行起来无法标准化。此外，3 个粒级的质量采用同一个变量符号（m_2）表示，易引起逻辑上的混乱，在第 8 章的计算公式中，又将 m_2 定义为“小于 6.30 mm 粒度矿石的质量”，前后矛盾。

2.1.3　试验结果的表示不严谨

如前所述，如将 m_2 定义为“小于 6.30 mm 粒度矿石的质量”，则热裂指数只需要用一个数值表示即可，而标准中所述“同时报告通过 3.15 mm 和 0.50 mm 筛的质量百分比”并无必要。

2.2　ISO 8371:2007 主要修订内容

针对上述问题，ISO 在 2007 年对该标准进行了修订并完全替代了第一版本。与 ISO 8371:1994 相比，ISO 8371:2007 在结构和技术上进行了重大调整和修订，如表 1 所示。

2.3　ISO 8371:2015 和 GB/T 10322.6—2022 主要修订内容

2015 年，ISO 对该标准再次进行了修订并完全替代了第二版本。与 ISO 8371:2007 相比，ISO 8371:2015 在结构和技术上进行了微调，如表 2 所示。

对于 ISO 8371:2007，GB 并没有对应等同采用版本。2022 年，我国发布了 GB/T 10322.6—2022，对 GB/T 10322.6—2004 进行替代更新，该版本等同采用 ISO 8371:2015。由于没有与 ISO 8371:2007 对应的第二版，国标 2022 版对 2004 版在结构和技术上进行了重大调整和修订，涵盖了 ISO8371:2007 和 ISO8371:2015 的历次修订内容，

表1 ISO 8371:2007 主要修订内容

Table 1 The main revised contents of ISO 8371:2007

修订类型	修订项目或章节	修订内容
编辑性修订	名称	将名称修改为“高炉炉料用铁矿石”,明确了适用范围
	目录、前言、引言	增加了目录、前言,完善了引言,表述更加规范
	章节框架	对正文章节框架进行重大调整,将第3章“定义”修改为“术语和定义”,将第5章与第6章顺序对调,将第5章“试样的制备”修改为“取样、制样和试验样的制备”,增加了第10章“校验”
技术修订	第1章	增加了适用范围“高炉炉料用铁矿石块矿”
	第2章	规范引用性文件中删除了ISO 3081、ISO 3083,增加了ISO 4701
	第4章、5.1节	增加了加热后冷却至室温的要求,明确了冷却温度值
	5.1节	修改了取样和制样要求
	5.2、6.5节	增加了试样的称量精度要求和称重装置的要求
	6.1节	增加了设备概述
	6.2、6.4节	修改了加热炉和试验筛的要求
	7.2节	修改了试样的装入和加热步骤
	第8章	修改了计算结果的表达方式,并定义了变量符号 m_3 和 m_4

表2 ISO 8371:2015 主要修订内容

Table 2 The main revised contents of ISO 8371:2015

修订类型	修订项目或章节	修订内容
编辑性修订	目录	增加了前言、引言索引,第5章、第7章增加了二级目录
	前言	修改了前言
	参考文献	增加了参考文献
技术修订	第2章	规范引用性文件中删除了ISO 4701
	7.3节	强调了手工筛分时要小心,删除了“按ISO 4701的要求”文字部分
	7.3节	增加了注1,可使用机械筛分
	7.3节	增加了注2,需多个实验室对比试验
	第8章	删除了“同时报告通过3.15 mm和500 μm筛的质量百分比”的要求

可参见表1、2。

2.4 ISO和GB热裂标准的主要技术内容对比

2.4.1 试样制备过程

按ISO 8371:1994和GB/T 10322.6—2004的要求,需要分别用25 mm和20 mm的试验筛筛分2次,烘干2次,耗时且耗力。在预烘干过程中,试样通常并不会发生裂解,其粒度变化不大,烘干后再用25.0 mm的筛子筛分意义不大。另外,根据块矿的水分含量,不需要强制要求每次烘干12 h,只要连续两次操作后干燥试样的质量变化在可接受的范围内即可视为恒重。

因此,在ISO 8371:2007、ISO 8371:2015和GB/T 10322.6—2022中,删除了再次使用25.0 mm筛子筛分的规定,对烘干时间不做强行规定,明确定义了连续两次操作后干燥试样的质量变化小于试样原始质量的0.05%即为恒重,可作为合格试样。另外,新标准也明确了加热后冷却至室温的要求,更加便于操作。

而在最新版的ISO 8371:2024中,烘干时间明确规定为24 h,新标准省略了烘干后的称量检查恒重环节。各版本标准关于热裂试样制备过程的对比如图1所示。

2.4.2 热裂试验过程

(1)称量环节。ISO 8371:1994和GB/T 10322.6—2004没有给出称量精度要求,ISO 8371:2007、ISO 8371:2015和GB/T 10322.6—2022明确了试样的称量精度应达到1 g,并且记录在样单中。ISO 8371:2024则要求称量精度达到0.1 g。

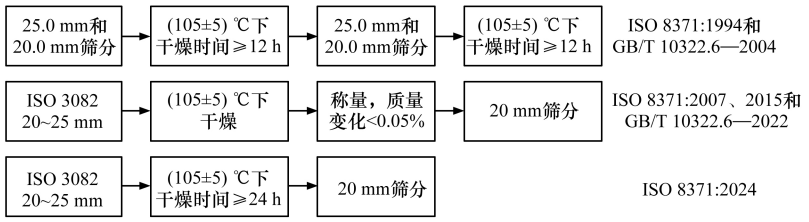


图 1　热裂试样制备过程对比

Fig. 1　Comparison of sample preparation process for decrepitation test

（2）加热环节。ISO 8371：1994 和 GB/T 10322.6—2004 要求先将试样盒放在炉中，与炉子一起升温、保温，造成再装入试样时操作不方便。ISO 8371：2007、ISO 8371：2015 和 GB/T 10322.6—2022 修订为将常温下的试样和试样盒一起装入炉子，再进行试验。这样不仅减少了人员被灼伤的风险，也不影响试验结果。

加热温度及保温时间是影响热裂指数的重要因素，为尽量真实地模拟高炉炉况，应保证试样的真实加热温度达到设定值，并且加热时间能保证热裂过程基本发生完毕。文献[11]研究了加热温度和加热时间对块矿热裂指数的影响：当加热温度上升至 425 ℃时，块矿开始发生热裂；当加热温度上升至 700 ℃时，赤铁矿成为块矿中的主要物相，形成新的孔洞。在维持加热温度 700 ℃不变的前提下，试样的热裂主要发生在加热的前 10 min 之内，此后继续延长加热时间，热裂指数变化幅度不大。可见现行标准要求的加热至 700 ℃、保温 30 min 是合理的。但之前标准并没有明确描述 700 ℃是炉温还是试样盒的温度，也未规定如何测量此温度。ISO 8371：2024 则明确要求试样中心的温度必须达到(700 ± 10) ℃。

另外，加热速率也是影响热裂指数的重要因素，同等试验条件下，加热速率越快，试样的热裂指数越高。但之前标准仅要求“快速加热到 700 ℃”，并未明确加热速率，这不利于试验时间的数据对比。ISO 8371：2024 则明确要求试样中心的温度必须在(30 ± 3) min 时间内达到设定值，对加热速率进行了约定。

（3）冷却环节：ISO 8371：1994 和 GB/T 10322.6—2004 仅要求冷却至室温，没有明确的温度值，ISO 8371：2007、ISO 8371：2015、ISO 8371：2024 和 GB/T 10322.6—2022 则明确要求试样冷却至 50 ℃以下。

（4）筛分环节：历次标准在筛分环节均将 6.30 mm 作为主要筛网尺寸，但 ISO 8371 的 1994 版、2007 版和 2015 版以及 GB/T 10322.6 的 2004 版和 2022 版均要求同时记录 3.15 mm 和 0.50 mm 筛下物的质量。ISO 8371：2024 增加了 10 mm 方孔筛作为可选项，并删除了 3.15 mm 和 0.50 mm 筛分要求。在筛分方式上，ISO 8371 的 1994 版、2007 版没有提到机械筛分方式，2015 版和 2024 版增加了机械筛分方式。

各版本标准关于热裂试验称量、加热、冷却和筛分环节的对比如图 2 所示。

2.4.3　试验结果表示

历次标准均以 < 6.30 mm 粒度来表征热裂指数，但 ISO 8371：1994、GB/T 10322.6—2004 和 ISO 8371：2007 标准中描述了“同时报告通过 3.15 mm 和0.50 mm筛的质量百分比”，ISO8371：2007甚

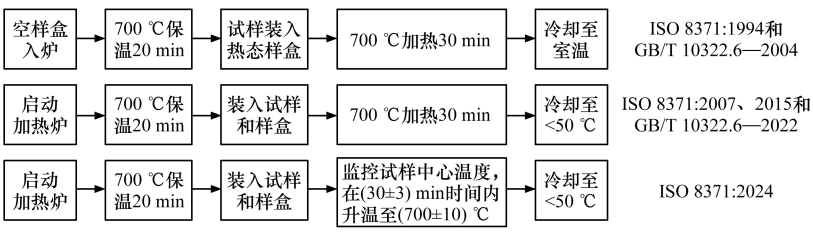


图 2　热裂试验过程对比

Fig. 2　Comparison of decrepitation test procedure

至专门定义了 m_3 和 m_4，却没有与之对应的 <3.15 mm和 <0.5 mm 的热裂指数，直到 ISO 8371:2015 和 GB/T 10322.6—2022 才删除此条要求。ISO 8371:2024 将 6.30 mm 筛上物作为主要计算对象，筛下物仅用于监控筛分过程中的质量损失。

上述 ISO 和 GB 标准的主要技术差异对比见表3。

2.5 GB/T 10322.6—2022 标准解析

2.5.1 范围、规范性引用文件和测试原理

与2004版相比，该标准明确了适用范围为高炉炉料用铁矿石块矿。此外，该标准出了铁矿石取制样的ISO相关标准及其对应的GB标准号，便于查阅。明确指出需将试验样从室温快速加热到700 ℃，尽量提高加热速度；明确要求加热后的试样需在空气中冷却至室温；明确指出采用 <6.30 mm 的质量百分比计算热裂指数。

2.5.2 取样、制样和试验样的制备

（1）明确了取样和制样应按照 ISO 3082 进行。根据 ISO 3082 第 10.8.2.4.4 节的要求，高炉块矿除转鼓测定和体积密度其它物理试验样品的制备流程需把 A2 样品缩分成三部分：第一部分作为保留样；第二部分经干燥后缩分成三份，用于制备试样测定动态低温还原粉化指数（LTD）、静态低温还原粉化指数（LTRD）、还原度、荷重还原度等参数；第三部分作为热裂测定样品，用25 mm和20 mm筛网筛分，然后丢弃 >25 mm 和 <20 mm 部分，在（105±5）℃干燥 20~25 mm 部分，在 20 mm 的筛网上再次筛分试样，去除所有黏性细矿，然后缩分试样来获得最终热裂测定样品约 5 kg，置于干燥器中。

（2）试样干燥至恒重。删除了2004版中烘干2次，每次12 h的冗长要求，对试样的质量控制更加科学。

表3 主要的铁矿石热裂指数测定方法的标准对比

Table 3 Comparison of main standards for determination of the decrepitation index of iron ores

技术内容	ISO 8371:1994 和 GB/T 10322.6—2004	ISO 8371:2007	ISO 8371:2015 和 GB/T 10322.6—2022	ISO 8371:2024
试样制备	分别用25 mm和20 mm的试验筛筛分2次，并烘干12 h，进行2次	（105±5）℃下干燥至恒重，用20 mm试验筛筛分	（105±5）℃下干燥至恒重，用20 mm试验筛筛分	（105±5）℃下干燥24 h，用20 mm试验筛筛分
试样称量	每个试样质量为（500±1）g，称量精度未作要求	每个试样质量为（500±1）g，试样的称量精度应达到1 g	每个试样（500±1）g，试样的称量精度应达到1 g	每个试样（500±1）g，试样的称量精度应达到0.1 g
试样加热	试样盒与炉子一起升温、保温，热态装样，加热	炉子先升温，再将样盒和试样冷态装入，加热	炉子先升温，再将样盒和试样冷态装入，加热	炉子先升温，再将样盒和试样冷态装入，加热，监控试样中心温度
试样冷却	冷却至室温	冷却至50 ℃以下	冷却至50 ℃以下	冷却至50 ℃以下
试样筛分	在6.30、3.15、0.50 mm筛上筛分，m_2 定义不明确	在6.30、3.15、0.50 mm筛上筛分，记录筛下物质量，定义了 m_3 和 m_4	在6.30、3.15、0.50 mm筛上筛分，记录筛下物质量，不定义 m_3 和 m_4	在6.30、10 mm（可选项）筛上筛分，筛上物质量定义为 m_2，筛下物质量定义为 m_3
筛分方式	手工筛分，可采用机械筛分	按ISO 4701手工筛分	手工筛分，删除了“按ISO 4701的要求”，可采用机械筛分	手工筛分，删除了“按ISO 4701的要求”，可采用机械筛分
结果表示	同时报告通过3.15 mm和0.50 mm筛的质量百分比	同时报告通过3.15 mm（m_3）和0.50 mm（m_4）筛的质量百分比	删除了“同时报告通过3.15 mm和0.50 mm筛的质量百分比”的要求	用试验后总质量减去6.30 mm或10 mm筛上物的质量的百分比表示

（3）删除了在 25.0 mm 筛上再次筛分的要求，精简了恒重后的筛分流程。

（4）修改了每个试验样的质量要求为 500 g（±1 g），试样的称量精度应达到 1 g，并记录在相应样单上。

2.5.3　设备

（1）增加了设备概述。热裂试验主要由加热炉、试验样盒、试验筛、称重装置和普通实验室设备组成。

（2）修改了加热炉和试验筛的要求。要求加热炉的升温速度尽量快，控温精度尽量高。试验筛删除了 25 mm 和 20 mm 尺寸，仅保留 6.30、3.15 mm 和 500 μm 的尺寸。

（3）增加了称量装置的要求，精度达到 1 g。

2.5.4　试验步骤

（1）更改了加热程序。使用冷态样盒，即在室温状态下将试样装入样盒，代替 2004 版中规定的热态样盒。

（2）更改了筛分程序。要求在 6.30、3.15 mm 和 500 μm 筛上筛分，记录筛下物质量，手工筛分，删除 ISO 8371:2007 中“按 ISO 4701 的要求”说明文字，可采用机械筛分。

2.5.5　结果表示和校验

删除了“同时报告通过 3.15 mm 和 0.50 mm 筛的质量百分比”的要求，未采用 ISO 8371:2007 中定义的 m_3 和 m_4 的概念，采用 <6.30 mm 粒度数值来表达热裂指数。由于定期校验设备对于确保试验结果的可靠性至关重要，增加了第 10 章“校验”部分。

3　对 GB/T 10322.6—2022 的修改建议

虽然 GB/T 10322.6—2022 对 2004 年版本进行了科学合理的技术性修订，但由于其等同采标 ISO 8371:2015，仍然存在一些问题，修改建议如下。

3.1　编辑性修订

编辑性修订：① 增加“目次”章节；② 前言中的主要技术变化第“h）”条中的“0.05 mm”应为文字差错，建议修改为“0.50 mm”或与 ISO 8371:2015 保持一致修改为“500 μm”；③ 引言的文字尽量与 GB/T 10322 系列其他标准保持一致。

3.2　技术修订

（1）增加设备规格描述。加热炉和试验样盒是热裂试验关键设备，加热炉的尺寸影响到试样的真实温度，试验样盒的尺寸、厚度、盒盖也会影响试样的受热均匀程度，这些关键的设备规格参数如不做明确约定，将会造成不同试验之间数据横向对比困难。同系列标准的 GB/T 10322.1 中给出了各种取样机的示例图，GB/T 10322.7 中给出了湿筛的示意装置，因此建议该标准第 6 章增加加热炉和试验样盒等设备的技术规格描述和示例图，明确加热炉炉膛的尺寸、额定温度、加热元件、温度控制精度。试验样盒可采用不锈钢 SUS304 材质，钢板厚度为 1 mm，样盒尺寸约为 12 cm×9 cm×4 cm。

（2）明确热裂试验装料步骤。试样在样盒中铺装层数会对温度均匀性造成影响，一层铺装还是多层铺装的温度存在波动。样盒的装入量也会对温度均匀性造成影响，每次放入 1 个样盒、10 个样盒或按某种规则组批放入，对试验结果的精密度也有影响。因此，建议标准第 7.2 章对试样铺装层数、试验样盒装入数量进行明确，要求一次只能装入一个样盒，样盒的尺寸要能保证所有试样颗粒能平铺在一层内而不叠加。为保证试验的重现性，也可参考 JIS 标准将单个试样量增加至 2 kg。

（3）明确热裂试验加热温度和加热速率。① 明确加热温度。现行标准的核心要求是试样在 700 ℃加热并保温 30 min，但仅对加热炉控制温度为 700 ℃并不意味着试验样盒和试样中心温度一定为 700 ℃。实践证明，加热温度和控温精度、炉膛尺寸有关，要想保证试样温度为 700 ℃，则加热炉的温度预设值可能需达到 730 ~ 740 ℃。② 明确加热速率。加热速率要足够快，才能模拟高炉炉顶真实状况，对于指导中国、日本等国家的大型高炉的生产实践有利。因此，建议该标准第 7.2 章增加“加热炉升温至合适的预设温度，在预设温度保温 20 min。在加热过程中，必须监测试验样盒中心的温度，使其保持在（700 ± 10）℃，并且规定最小加热速度（如从试验开始在 10 min

之内升温至500 ℃)。如试验样盒中心的温度无法保持在(700 ± 10) ℃，则需调整预设温度”的要求。

(4) 优化热裂试验筛分步骤。既然试验结果表示中没有 <3.15 mm 和 <0.5 mm 的热裂指数，也不需要报告通过3.15 mm 和0.50 mm 筛的质量百分比，第7.3 章节中要求“测定并记录通过3.15 mm 和500 μm 的质量”必要性不大，建议删除或改为可选项。同时，根据国内大型钢铁企业现有的试验数据，建议增加 10 mm 方孔筛筛分，以提高筛分效率。

(5) 优化热裂试验结果表示。如上所述，国内高炉使用的进口块矿经热裂试验后，粒度相对较大，6.30 mm 甚至 10 mm 的筛上物较多，粉末较少，因此测量筛上物的质量更为准确和便利。建议将6.30 mm 或 10 mm 筛上物的质量定义为 m_2、m_1 定义不变，则第8 章热裂指数计算公式修改为

$$Y_{\mathrm{DI-6.3\ mm}}=\frac{m_1-m_2}{m_1}\times 100\%$$

式中：$Y_{\mathrm{DI-6.3\ mm}}$为块矿热裂指数(计算结果精确到小数点后 1 位),%；m_2 为保留在 6.30 mm 或 10 mm 筛上部分的质量，g；m_1 为热处理后的试验样质量，g。

4 结 语

(1) ISO 8371 系列标准虽然已经更新到第四版本，但相比于同属 ISO/TC102 分委员会 SC3 负责的其它标准，其关注度较低，因此修订工作并不与时俱进。针对其中的试样制备过程、试验过程和试验结果表示等关键技术问题，ISO 进行了数次修订，但仍然存在一些问题，如：试验设备规格描述过于简略，未给出加热炉的尺寸和控温精度，试验样盒的尺寸、厚度、材质未做统一要求；未明确热裂试验的装料步骤，试样铺装层数、试验样盒装入数量未做统一要求；加热速率不明确，虽然要求在(30 ± 3) min 时间内升温至(700 ± 10) ℃，但不清楚是匀速加热还是阶梯加热。

(2) GB/T 10322.6—2022 在文字上存在少量错误、结构框架上尚未完全标准化，还有一些技术问题值得讨论和明确，建议根据 ISO 8371:2024 适时修订，以增强该标准的操作性和实验室间的对比性。

参考文献：

[1] 蔡大为,范晓慧. 钢铁工业低碳炉料及绿色冶炼技术进展[J]. 烧结球团,2023,48(4):1-7.
CAI Dawei, FAN Xiaohui. Progress of low-carbon charge and green smelting technology in iron and steel industry [J]. Sintering and Pelletizing, 2023, 48(4): 1-7.

[2] 李建军,邵雁,熊劲,等. 烧结工序节能减排技术研究综述[J]. 烧结球团,2022,47(5):95-101.
LI Jianjun, SHAO Yan, XIONG Jin, et al. Research review on energy saving and emission reduction technology in sintering process[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(5): 95-101.

[3] 邸航,杜屏,王永红,等. 2 680 m^3 高炉使用非主流块矿的稳产降本实践[J]. 中国冶金,2022,32(3):68-72.
DI Hang, DU Ping, WANG Yonghong, et al. Practice of yield stability and cost reduction in 2 680 m^3 blast furnace with non-mainstream ores[J]. China Metallurgy, 2022, 32(3): 68-72.

[4] 朱勇军,吕坤,魏国. 高比例块矿高炉块状带炉料运动的物理模拟[J]. 炼铁,2023,42(2):60-63.
ZHU Yongjun, LÜ Kun, WEI Guo. Phisical simulation of movement of lumpy zone burden in BF operating with high percentage of lumpy ore [J]. Ironmaking, 2023, 42(2): 60-63.

[5] 朱勇军,徐辉,王士彬. 宝钢4 号高炉提高块矿比例实践[J]. 炼铁,2019,38(1):32-35.
ZHU Yongjun, XU Hui, WANG Shibin. Practice of increasing the proportion of lump ore in Baosteel No. 4 blast furnace[J]. Ironmaking, 2019, 38(1): 32-35.

[6] 庞焯刚,丁望,于原浩,等. 高炉配加预脱水块矿的炉料软化熔滴性能[J]. 钢铁,2023,58(4):21-29.
PANG Zhuogang, DING Wang, YU Yuanhao, et al. Softening-melting properties of blast furnace charge with pre-dehydrated lump iron ore[J]. Iron and Steel, 2023, 58(4): 21-29.

[7] 毕雪亮. 高炉添加块矿对炼铁过程的影响[D]. 唐山:华北理工大学,2018:20.
BI Xueliang. Effect of natural lump ore on ironmaking process of Tangsteel blast furnace[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2017: 20.

(下转第30 页)

特性及热爆裂行为研究[J]. 烧结球团,2021,46(4):72 – 77.
ZHAO Qiang, XIAO Huarong, WEI Jinchao, et al. Research on physicochemical characteristics and thermal crack behavior of typical PB lump ore[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(4):72 – 77.

[3] 左海滨,于文涛,张建良. 温度对天然块矿爆裂的影响[J]. 钢铁,2015,50(5):7 – 12.
ZUO Haibin, YU Wentao, ZHANG Jianliang. Effects of temperature on the decrepitation performance of natural lump ores[J]. Iron & Steel,2015,50(5):7 – 12.

[4] 朱勇军,徐辉,王士彬. 宝钢4号高炉提高块矿比例实践[J]. 炼铁,2019,38(1):32 – 35.
ZHU Yongjun, XU Hui, WANG Shibin. Production practice under higher lump ore ratio in Baosteel No. 4 BF [J]. Ironmaking,2019,38(1):32 – 35.

[5] 邹忠平. 小块焦回收利用的研究与实践[J]. 钢铁技术,1994(4):20 – 33.
ZOU Zhongping. Research and practice on small coke recycling and utilization[J]. Iron & Steel Technology, 1994(4):20 – 33.

[6] MOUSA E A, BABICH A, SENK D. Effect of nut coke-sinter mixture on the blast furnace performance[J]. ISIJ International,2011,51(3):350 – 358.

[7] YANG Z X, YANG J L. Effect of coke-ore mixed charging on reduction and gas flow characteristics in softening-melting zone [J]. Ironmaking and Steelmaking, 1995, 22(2):161 – 165.

[8] WATAKABE S, TAKEDA K, NISHIMURA H, et al. Development of high ratio coke mixed charging technique to the blast furnace[J]. ISIJ International,2006,46(4):513 – 522.

[9] 李家新,糜克勤. 混装焦丁时的焦炭热强度及适宜加入量[J]. 炼铁,1994,13(6):53 – 54.
LI Jiaxin, MI Keqin. Thermal strength and suitable addition amount of coke when mixed with coke butyl[J]. Iron Making,1994,13(6):53 – 54.

[10] WANG G, XUE Q G, WANG J S. Effect of mixing charge of highly reactive semicoke nut on the reaction of high Al_2O_3 ferrous burden in blast furnace[J]. Ironmaking & Steelmaking,2019,46(5):477 – 484.

(上接第16页)

[8] 刘鹏飞,郑丽丽,郭卓团,等. 蒙古铁矿块矿直接入炉基础冶金性能[J]. 钢铁研究学报,2019,31(10):882 – 888.
LIU Pengfei, ZHENG Lili, GUO Zhuotuan, et al. Research on metallurgical properties of Mongolian lump ore[J]. Journal of Iron and Steel Research,2019,31(10):882 – 888.

[9] 袁兵. 重钢铁矿石冶金性能及合理经济配矿的研究[D]. 重庆:重庆大学,2006:28.
YUAN Bing. Research on reasonable structure burden of blast furnace and iron ore metallurgical properties at CSIC[D]. Chongqing: Chongqing University,2006:28.

[10] 吴艺鹏,潘积国,刘玉猛,等. 青岛特钢高炉使用PB块和纽曼块对比分析[J]. 山东冶金,2021,43(1):29 – 30.
WU Yipeng, PAN Jiguo, LIU Yumeng, et al. Contrastive analysis of PB block and Newman block used in Qingdao special steel blast furnace[J]. Shandong Metallurgy, 2021,43(1):29 – 30.

[11] 易凌云,肖华荣,张楠,等. 典型纽曼块矿的热爆裂机制[J]. 中南大学学报(自然科学版),2022,53(11):4226 – 4233.
YI Lingyun, XIAO Huarong, ZHANG Nan, et al. Decrepitation mechanism of Newman lump ore[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2022,53(11):4226 – 4233.

[12] 肖华荣. 天然块矿热爆裂行为、机理与防爆基础研究[D]. 长沙:中南大学,2022:30 – 48.
XIAO Huarong. Study on the decrepitation behavior, mechanism and abatement of natural lump ore[D]. Changsha: Central South University,2022:30 – 48.

[13] 祁成林,冯根生,许满兴,等. 高炉冶炼条件下天然块矿热裂指数评价新方法[J]. 烧结球团,2022,47(2):67 – 73;109.
QI Chenglin, FENG Gensheng, XU Manxing, et al. A new method for evaluating decrepitation index(DI) of natural lump ore under BF ironmaking[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(2):67 – 73;109.