高炉冶炼条件下天然块矿热裂指数评价新方法

祁成林[1]，冯根生[1]，许满兴[1]，王筱留[1]，朱 旺[2]
（1. 北京科技大学 冶金与生态工程学院，北京 100083；2. 北京首钢股份有限公司，河北 唐山 064400）

摘要：随着天然块矿在高炉中使用占比的逐渐升高，其热裂指数的评价显得愈加重要。本文通过一系列试验提出高炉冶炼条件下块矿热裂指数评价的新方法，并探索样品粒度、反应气氛、反应温度和时间 4 个因素对块矿热裂行为的影响机理。试验结果表明：① 块矿标准热裂后，内部存在大量裂纹，并有局部聚集的情况，此部分极易在高炉内挤压摩擦而形成粉末，这一过程形成粉末的能力即为块矿动态热裂指数；② 块矿动态热裂指数试验最佳参数：样品粒度为 20 ~ 25 mm，反应温度为 900 ℃，还原气氛，反应时间为 60 min；③块矿 A 和 B 的标准热裂指数（$DI_{-6.3\ mm}$）分别为 11.27% 及 6.10%，而依据上述试验条件测试得到块矿 A 和 B 的动态热裂指数（$DI_{-6.3\ mm}$）分别为 18.31% 及 15.35%，二者相差不大。

关键词：块矿；热裂；无损测量；冶金性能
中图分类号：TF521；TF57 **文献标识码**：A **文章编号**：1000 - 8764(2022)02 - 0067 - 07
doi：10.13403/j.sjqt.2022.02.026

A new method for evaluating decrepitation index (*DI*) of natural lump ore under BF ironmaking

QI Chenglin[1], FENG Gensheng[1], XU Manxing[1], WANG Xiaoliu[1], ZHU Wang[2]
(*School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing* 100083, *China*; 2. *Beijing Shougang Co., Ltd., Tangshan* 064400, *Hebei*, *China*)

Abstract: As the proportion of natural lump ore used in blast furnace is gradually increasing, the evaluation on its decrepitation index (*DI*) becomes more and more important. In this paper, a new method for evaluating the heat cracking index of lump ore under BF ironmaking through a series of experiments is proposed, and the influence mechanism of such 4 factors including sample particle size, reaction atmosphere, reaction temperature and time on the decrepitation behavior of lump ore is explored. The results show that: 1) after the standard decrepitation of lump ore, there is a large number of cracks inside with local aggregation, this part is very easy to form powder by extrusion and friction in the blast furnace, and the ability of this process to form powder is the dynamic *DI* of lump ore; 2) the best parameters for the test of dynamic *DI* of lump ore: sample particle size is 20 ~ 25 mm, reaction temperature is 900 ℃, reducing atmosphere, and reaction time is 60 min; 3) the standard heat cracking indices ($DI_{-6.3\ mm}$) of lump ore A and B are 11.27% and 6.10%, respectively, while the dynamic heat cracking indices ($DI_{-6.3\ mm}$) of lump ore A and B are 18.31% and 15.35%, respectively, based on the above test conditions, which are not significantly different from each other.

Key words: lump ore; decrepitation; nondestructive measurements; metallurgical properties

随着我国钢铁工业的快速发展，高炉炼铁工艺技术水平突飞猛进，其进步表现之一为天然块矿在炉料结构中的占比不断增加。大量生产实践表明，天然块矿对高炉冶炼优、缺点并存，其优点：① 部分种类块矿可以提高入炉品位，节省造块成本；② 块矿与球团比较具有较

收稿日期：2021 - 12 - 03；**修回日期**：2022 - 01 - 24
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51974021）；中央高校基本科研业务费（FRF-IC-20 - 06）；高校仪器设备专项经费（YSZ202104）
作者简介：祁成林（1982—），男，博士，从事铁矿粉造块工艺参数优化及匹配技术研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

大的价格优势；③ 天然块矿没有铁矿粉造块生产过程中的污染物；④ 部分种类块矿在炉内的间接还原性好，炉顶煤气利用率高，有利于降低焦比。此外，很多企业使用块矿后，降本增效显著[1-2]。但是，块矿使用也存在一些不利影响：① 块矿经过长距离运输转运、摔打和摩擦会产生大量粉末；② 部分块矿难筛分；③ 炉内块矿热爆裂会产生较多粉末；④ 部分种类块矿较致密，其还原性稍差；⑤ 单种块矿的软化熔滴性能较差，过量使用对高炉下部软熔滴落性能的影响较大。

热裂指数是块矿入炉的重要评判标准之一，目前该参数的试验方法只能采用《铁矿石热裂指数的测定方法》(GB/T 10322.6—2004)。实际上，该方法仅可表征块矿在高炉布料进入炉喉瞬间达到700 ℃，因结晶水及碳酸盐的分解而产生内应力，进而爆裂成小于6.3 mm粉末的能力。但是块矿随炉料下降，仍然会发生炉料间的挤压摩擦，以及温度升高和还原反应。为此，本文通过模拟高炉条件下块矿的反应行为，分析温度、还原环境、气体流量、反应时间及转鼓等因素对热裂指数的影响，以期得出评价块矿热裂指数的最佳试验参数，为高炉内块矿热裂指数评价提供新方法。

1 试验原料与方法

1.1 块矿选择

选择两种国内最常用的澳块A和B，其化学成分及部分冶金性能如表1所示。由表1可知：块矿B的TFe质量分数为63.32%，烧损为4.93%；而块矿A的TFe质量分数稍低，为56.12%，烧损为8.53%；脉石成分中，块矿A的SiO_2和Al_2O_3质量分数较高，分别为6.94%和3.62%，块矿B的SiO_2和Al_2O_3质量分数分别为3.79%和1.54%；这两种矿的其他有害元素(P)质量分数较低，Al质量分数较好。两种块矿的还原性和低温还原粉化性都非常好，其中：块矿A、B的还原度指数分别为84.70%、83.68%，主要原因是该块矿的烧损高，内部结晶水与碳酸盐释放会产生大量的微孔，增加了反应的表面积；低温还原粉化指数$RDI_{+3.15\ mm}$分别为89.3%和81.83%，远高于烧结矿。从化学成分、还原性和低温还原粉化性来看，两种块矿的性能均较好。

表1 块矿的主要化学成分及冶金性能分析(质量分数)

Table 1 Main chemical component and metallurgical properties analysis of the lump %

原料名称	化学成分						烧损	冶金性能			
	TFe	FeO	SiO_2	Al_2O_3	P	Mn		$RDI_{+6.3\ mm}$	$RDI_{+3.15\ mm}$	$RDI_{-0.5\ mm}$	RI
块矿A	56.12	0.22	6.94	3.62	0.041	0.98	8.53	79.80	89.3	4.30	84.70
块矿B	63.32	0.93	3.79	1.54	0.058	0.13	4.93	62.30	81.83	6.12	83.68

1.2 试验方法

试验块矿取样及制样方法均依照《铁矿石取样和制样方法》(GB/T 10322.1—2014)执行。其他试验测量按如下执行。

(1) 标准热裂试验方法。块矿热裂试验采用《铁矿石热裂指数的测试方法》(GB/T 10322.6—2004)，具体步骤：选取粒度为20~25 mm块矿，将其干燥12 h后，取500 g样品放入标准尺寸试样盒中，将其置于700 ℃高温环境中反应30 min，取出冷却至室温，称其质量为m_1；将样品过6.30、3.15、0.5 mm方筛，取<6.30 mm粒度的矿石，称其质量为m_2。定义$DI_{-6.3\ mm}$为热裂指数(%)，计算方法如式(1)所示。

$$DI_{-6.3\ mm}=\frac{m_2}{m_1}\times 100\% \tag{1}$$

实际测量热裂指数10次取平均值，一般认为块矿$DI_{-6.3\ mm}>5\%$为爆裂性能较差。

(2) 三维无损测量。本文通过三维无损测量的方法来分析热裂后块矿的内部微裂纹，分析挤压摩擦对块矿造成的影响。无损测试设备为德国依科视朗工业X射线断层扫描系统，设备型号为FF35。

(3) 动态热裂指数研究方法。标准块矿热

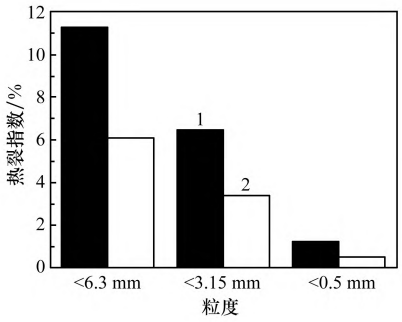
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

裂方法未考虑裂纹对块矿产生二次粉末的影响，故本文以动态热裂指数来考量此能力。

影响块矿在高炉内成粉的主要因素：① 挤压摩擦。反应后块矿存在大量裂纹，因而需要转鼓进行动态评估，既为动态热裂指数。② 温度及反应时间。左海滨等[17]已研究温度为 600～900 ℃，静态反应时间为 30 min 对块矿热爆裂的影响，得出 4 种标准试验方法检测结果较为接近，而且随着温度的升高，呈现不同的热裂趋势。因此，本文将反应温度提高到 900 ℃。③ 高炉中有一定流动气体，影响气体传热；其次还原性气体会夺取氧，使块矿破损能力有所变化。④ 标准检测方法的粒度为 20～25 mm，实际上很多块矿的粒度偏小，考虑到检测范围的适用性，需要采用动态热裂指数来评价小粒级块矿。

2　标准热裂指数测量及碎裂机理

A、B 两种块矿的热裂指数如图 1 所示。由图 1 可知：块矿 A、B 的热裂指数分别为 11.27%、6.10%。一般企业判断，块矿 B 的热裂性能可适量入炉；而块矿 A 的热裂性能不好，对高炉上部透气性影响较大，不宜入炉。



1—块矿 A；2—块矿 B。

图 1　A、B 两种块矿的国标法热裂指数

Fig. 1　*DI* of lump A and B with national standard method

实际上，块矿 A 在某些钢铁企业高炉炉料结构中占比达 10%～15%，冶炼效果也很好，煤气利用率升高，上部透气性并未因压差上升而恶化。为此，本文选取静态热爆裂后块矿 A 试样进行形貌观察，如图 2 所示。由图 2 可知：块矿粉末多呈片状，断面整齐，试样中致密性切面与裂纹并存。

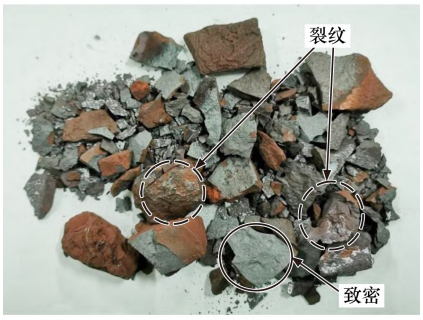
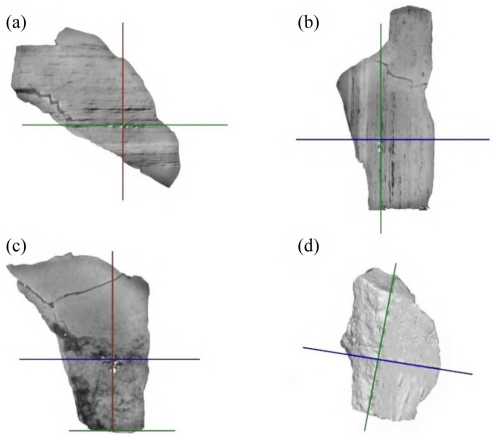


图 2　块矿 A 热裂反应后的形貌

Fig. 2　The morphology of lump A after decrepitation reaction

块矿 A 热裂反应前的三维无损剖析如图 3 所示。由图 3 可知：块矿内部有方向一致的孔隙带，呈条状[图 3(a)、(b)]，此处为块矿热裂的发起点；块矿有一个切面非常致密[图 3(c)]，即块矿内部为片状叠加结构。分析原因认为：当块矿受热时，结晶水和碳酸盐将分解，导致释放通路不畅，块矿内部产生内应力，进而沿着孔隙带爆裂，致使块矿爆裂后为片状。



（a）俯视剖面图；（b）正视剖面图；（c）侧视剖面图；（d）表观图

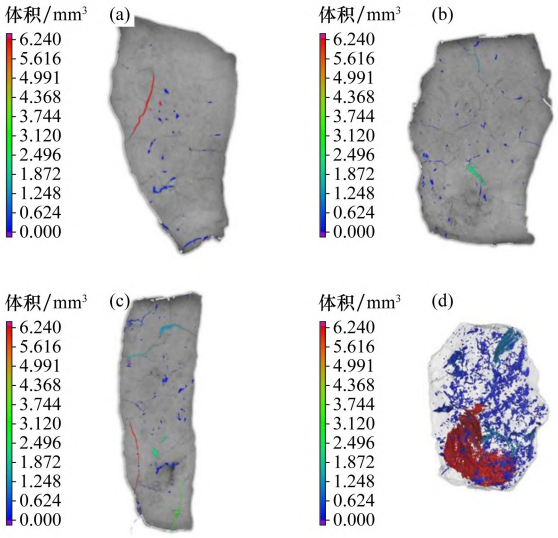
图 3　块矿 A 原矿无损测试

Fig. 3　Non-destructive test of raw ore of lump A

块矿热爆裂后，表面会产生大量裂纹，在高炉中挤压摩擦，块矿粒度会进一步减小，同时会产生更多的粉末。这种潜在产生粉末的能力并没有在块矿热裂的标准测试结果中体现。对标准热裂后块矿 A 进行无损测试，观测其内

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

部裂纹及细小肉眼无法观察到的组织结构，如图 4 所示。由图 4 可知：块矿内部有大量裂纹，不同颜色代表裂纹的宽度不同，裂纹越宽，在未来挤压摩擦中会进一步碎裂。红色(深色)区域裂纹较宽，蓝色(浅色)区域裂纹较窄。图 4(d)红色(深色)区域将在高炉中进一步碎裂产生粉末。



(a) 俯视剖视图；(b) 正视剖视图；
(c) 侧视剖视图；(d) 内部整体裂纹图

图 4 块矿 A 标准热裂后无损测试

Fig. 4 Non-destructive test of lump A after standard decrepitation reaction

3 试验结果与分析

3.1 反应温度、时间和气氛对静态热裂指数的影响

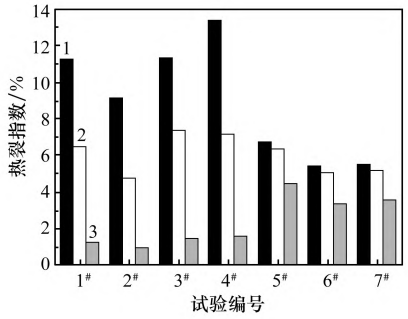
按表 2 所示试验方案对 20 ~ 25 mm 的块矿 A 进行静态热裂指数试验，结果如图 5 所示。由图 5 可知：

(1) 反应温度和时间。1#、3#方案的反应时间皆为 30 min，当温度从 700 ℃升高至 900 ℃时，$DI_{-6.3\ mm}$从 11.27% 上升到 11.32%，而 $DI_{-3.15\ mm}$从 6.48% 上升到 7.37%，$DI_{-0.5\ mm}$从 1.22% 上升至 1.43%，静态热裂指数变化不大；在反应温度为 900 ℃，反应时间分别为 10、30、60 min 时，2#、3#、4#的 $DI_{-6.3\ mm}$分别为 9.12%、11.32%、13.38%，呈显著增加趋势，而 $DI_{-3.15\ mm}$分别为 4.76%、7.37%、7.16%，$DI_{-0.5\ mm}$分别为 0.95%、1.43%、1.56%。由此可知，温度对块矿 A 的静态热裂指数影响并不大；静态热裂指数随反应时间的增加而增加，当反应时间超过 30 min 时，$DI_{-6.3\ mm}$显著增加，$DI_{-3.15\ mm}$和 $DI_{-0.5\ mm}$增加较少。

表 2 块矿静态热裂反应试验方案

Table 2 The test scheme of static decrepitation reaction of lump

试验编号	反应温度/℃	反应时间/min	反应气氛	气体流速/(L·min⁻¹)	是否转鼓
1#	700	30	—	—	否
2#	900	10	N_2	15	否
3#	900	30	N_2	15	否
4#	900	60	N_2	15	否
5#	900	30	N_2 + CO	15	否
6#	900	60	N_2 + CO	15	否
7#	900	120	N_2 + CO	15	否



1—$DI_{-6.3\ mm}$；2—$DI_{-3.15\ mm}$；3—$DI_{-0.5\ mm}$。

图 5 不同反应时间和气氛对块矿热裂指数的影响

Fig. 5 Influences of different reaction time and atmosphere on *DI*

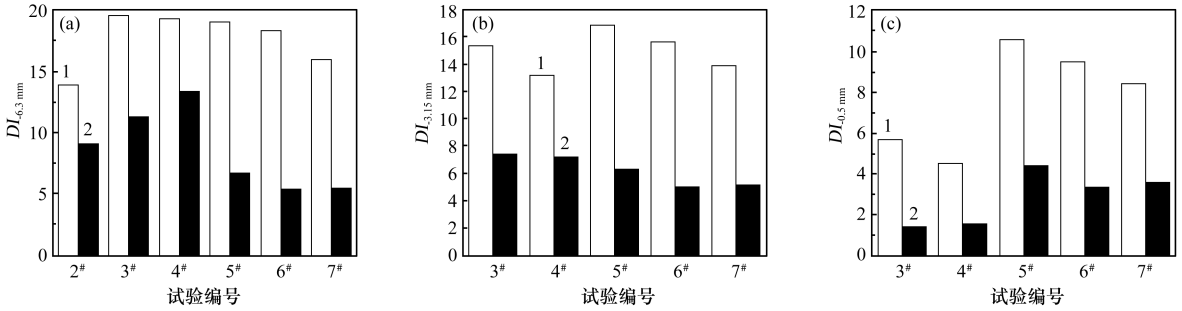
(2) 反应气氛。高炉中以 CO + N_2 还原性气氛为主，气体应起到传递热量和还原的双重作用。5# ~ 7#试验通入 15 L/min，30% CO + 70% N_2 气体。2#与 5#方案比较，$DI_{-6.3\ mm}$从 9.12% 降至 6.75%，$DI_{-3.15\ mm}$从 7.37% 降低至 6.33%，$DI_{-0.5\ mm}$从 1.43% 增加至 4.43%；4#与 6#方案比较，$DI_{-6.3\ mm}$从 13.38% 降至 5.42%，$DI_{-3.15\ mm}$从 7.16% 降低至 5.02%，$DI_{-0.5\ mm}$从 1.56% 增加至 3.36%。由此可知：通入还原性气氛后，$DI_{-6.3\ mm}$明显下降，$DI_{-3.15\ mm}$也呈下降趋势，$DI_{-0.5\ mm}$呈上升趋势。此外，在还原性气氛下，随着反应时间的增加，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5#与 6#、7#方案比较，*DI* 值均有所下降，反应超过 60 min 时下降趋缓。

3.2　动态与静态热裂指数比较

块矿在高炉内除受到内应力引起静态爆裂外，还有外应力的挤压摩擦。参照《铁矿石低温粉化试验静态还原后使用冷转鼓的方法》(GB/T 13242—2017)中转鼓试验方法，设置转鼓速度和时间分别为 25 r/min、8 min，在实验室模拟高炉内反应后块矿挤压摔打的强度指数。在转鼓条件下进行表 2 所示 2# ~ 7#试验，得到动态与静态热裂指数比较结果如图 6 所示。



(a) $DI_{-6.3\ mm}$；(b) $DI_{-3.15\ mm}$；(c) $DI_{-0.5\ mm}$

1—转鼓(动态)；2—无转鼓(静态)。

图 6　不同气氛下块矿动态与静态热裂指数比较

Fig. 6　Comparison of dynamic and static *DI* of lump under different atmospheres

由图 6(a)可知：2#方案(900 ℃，N_2 气氛下块矿反应 10 min 时)的动态 $DI_{-6.3\ mm}$ 为 13.88%，静态 $DI_{-6.3\ mm}$ 为 9.12%，相差 4.76%；当反应时间增加到 30 min 时(3#方案)，动态 $DI_{-6.3\ mm}$ 为 19.53%，静态 $DI_{-6.3mm}$ 为 11.32%，相差 8.21%；当反应时间增加至 60 min 时(4#方案)，动态 $DI_{-6.3\ mm}$ 为 19.32%，静态 $DI_{-6.3\ mm}$ 为 13.38%，相差 5.94%。当通入 CO 时，5#方案的动态 $DI_{-6.3\ mm}$ 为 19.08%，静态 $DI_{-6.3\ mm}$ 为 6.75%，相差 12.33%；6#方案动态 $DI_{-6.3\ mm}$ 为 18.31%，静态 $DI_{-6.3\ mm}$ 为 5.42%，相差 12.89%；7#方案动态 $DI_{-6.3\ mm}$ 为 15.92%，静态 $DI_{-6.3\ mm}$ 为 5.52%，相差 10.40%。对于动态热裂指数来说，在 CO 气氛下反应 30 min 时，$DI_{-6.3\ mm}$ 皆为 19%，反应 60 min 时，$DI_{-6.3\ mm}$ 略有下降。当反应达到 120 min 时，动态热裂指数明显下降。总体来说，随着反应时间的增加，动态 $DI_{-6.3\ mm}$ 下降，同样的反应时间，CO 气氛下 $DI_{-6.3\ mm}$ 要略低于 N_2，而 N_2 气氛下静态 $DI_{-6.3\ mm}$ 逐渐升高，比 CO 气氛下的 $DI_{-6.3\ mm}$ 略有降低。

块矿热裂指数另两个参考值 $DI_{-3.15\ mm}$ 及 $DI_{-0.5\ mm}$，如图 6(b)、6(c)所示。总体来说 $DI_{-3.15\ mm}$ 受反应气氛的影响较小，同一种反应气氛下均呈下降趋势。同一反应时间下，N_2 气氛下静态 $DI_{-3.15\ mm}$ 略高于 CO 气氛，N_2 气氛下动态 $DI_{-3.15\ mm}$ 略低于 CO 气氛。由图 6(c)可知，在同一个反应气氛下，$DI_{-0.5\ mm}$ 呈下降趋势。同一反应时间，N_2 气氛下静态 $DI_{-0.5\ mm}$ 高于 CO 气氛，CO 气氛下动态 $DI_{-0.5\ mm}$ 要远高于 N_2 气氛。由此可知，CO 气氛产生粉末的能力要高于 N_2，这是由于 CO 参与了还原，块矿内部微气孔增多，使小粒级粉末增多。

3.3　粒度对热裂指数的影响

为使块矿内外应力差较大，采用 20 ~ 25 mm 的块矿样品进行标准热裂试验。实际高炉生产中，很多种类块矿的粒级偏小，20 ~ 25 mm 粒度不能客观衡量此种块矿在高炉中、上部热裂产生粉末的实际情况，因此本文进行小粒度(10 ~ 20 mm)与大粒度(20 ~ 25 mm)热裂试验比较，便于反应小粒度在高炉中爆裂的趋势。

在 900 ℃，30% CO + 70% N_2 气氛下，进行反应时间为 30、60 min 及 120 min 的动态热裂试验，试验方案如表 3 所示，结果如图 7 所示。

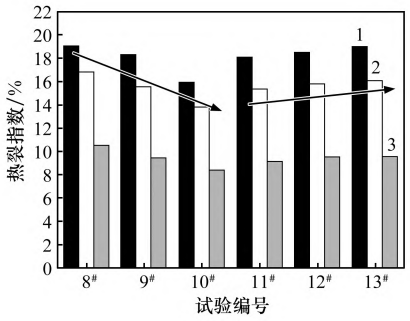
由图 7 可知：当反应 30 min 时，粒度为 20 ~ 25 mm 的 8# 方案的 $DI_{-6.3\ mm}$、$DI_{-3.15\ mm}$、

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表3 不同粒级块矿A热裂试验条件

Table 3 Test conditions of *DI* of lump A with different particle sizes

试验编号	粒度/mm	反应温度/℃	反应时间/min	反应气氛	是否转鼓
8#	20~25	900	30	N_2 + CO	是
9#	20~25	900	60	N_2 + CO	是
10#	20~25	900	120	N_2 + CO	是
11#	10~20	900	30	N_2 + CO	是
12#	10~20	900	60	N_2 + CO	是
13#	10~20	900	120	N_2 + CO	是



1—$DI_{-6.3\ mm}$；2—$DI_{-3.15\ mm}$；3—$DI_{-0.5\ mm}$。

图7 不同粒级对热裂指数的影响

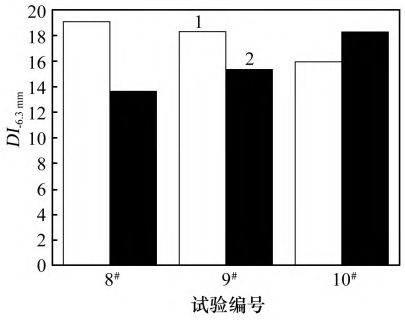
Fig. 7 Influence of difference particle sizes on *DI*

$DI_{-0.5\ mm}$分别为19.81%、16.85%、10.58%，粒度为10~20 mm的11#方案的$DI_{-6.3\ mm}$、$DI_{-3.15\ mm}$、$DI_{-0.5\ mm}$分别为18.1%、15.34%、9.14%；反应30 min时，8#与11#方案的$DI_{-6.3\ mm}$值相差不大，粒度为10~20 mm的$DI_{-6.3\ mm}$略小；当反应60 min时，粒度为20~25 mm的9#方案的$DI_{-6.3\ mm}$、$DI_{-3.15\ mm}$、$DI_{-0.5\ mm}$分别为18.31%、15.58%、9.46%，粒度为10~20 mm的12#方案的$DI_{-6.3\ mm}$、$DI_{-3.15\ mm}$、$DI_{-0.5\ mm}$分别为18.49%、15.83%、9.52%。9#与12#方案的热裂指数几乎相同，在反应时间为60 min时，块矿的热裂指数不受粒度的影响。当反应为120 mm时，粒度为20~25 mm的9#方案的$DI_{-6.3\ mm}$、$DI_{-3.15\ mm}$、$DI_{-0.5\ mm}$分别为15.93%、13.56%、9.14%，粒度为10~20 mm的13#方案的$DI_{-6.3\ mm}$、$DI_{-3.15\ mm}$、$DI_{-0.5\ mm}$分别为19.02%、16.08%、9.61%。10#比13#方案的热裂指数小。随着反应的进行，20~25 mm块矿的热裂指数呈现逐渐下降趋势，而10~20 mm块矿的热裂指数略有上升。反应时间为60 min时，20~25 mm与10~20 mm块矿的热裂指数几乎相同。在反应120 min时，20~25 mm块矿的热裂指数要低于粒度为10~20 mm的块矿。

在整个反应的过程中，两个因素影响着块矿热裂指数：① 来自结晶水和碳酸盐分解的内应力及来自裂纹和挤压摩擦的外应力；② 还原反应夺取氧。在反应30 min时，影响因素①起到决定性因素，在反应60 min时，①的作用减弱，随着反应的进行，因素②的作用逐渐显现。因此在60 min反应时间之内，试验样品的粒度可以采用10~20 mm。

3.4 两种块矿的动态热裂指数比较

块矿B是国内公认性能优良的块矿。在标准热裂试验条件下，700 ℃反应30 min，块矿的$DI_{-6.3\ mm}$只有6.1%，而块矿A的$DI_{-6.3\ mm}$为11.27%。单从热裂指数而言，块矿B适用于大高炉(炉容>2 500 m^3)，而块矿A只适用于小高炉(炉容<1 000 m^3)。而从经济角度而言，块矿A的吨矿价格远低于B。通过模拟高炉操作条件下块矿的热裂试验，对二者进行重新解析，结果如图8所示。



1—块矿A；2—块矿B。

图8 不同种类块矿的热裂指数比较

Fig. 8 Comparison of *DI* of different types of lump

由图8可知：在900 ℃，通入10.5 L/min的N_2及4.5 L/min的CO情况下，8#方案(反应时间为30 min)块矿A的$DI_{-6.3\ mm}$为19.08%，块矿B的$DI_{-6.3\ mm}$为13.64%；9#方案(反应时间为60 min)，块矿A的$DI_{-6.3\ mm}$为18.31%，

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

块矿 B 的 $DI_{-6.3\ mm}$为 15.35%；10#方案(反应时间为 120 min)，块矿 A 的 $DI_{-6.3\ mm}$为 15.93%，块矿 B 的 $DI_{-6.3\ mm}$为 18.26%。由此可知，块矿 A 的热裂指数逐渐降低，而块矿 B 的热裂指数逐渐增加，动态热裂指数逐渐接近；当反应时间为 120 min 时，块矿 B 的热裂指数甚至超过了块矿 A，其主要原因是微裂纹及还原的作用。

4　结　论

本文通过研究反应温度、反应气氛、反应时间、挤压摩擦转鼓等因素对天然块矿热裂指数的影响，得出如下结论：

(1) 天然块矿采用标准热裂试验方法测试后，内部存在大量裂纹。有些裂纹较为集中，有再次产生粉末的能力，标准方法并未表征。

(2) 通过大量模拟高炉试验条件，确定最佳试验参数：样品粒度为 20 ~ 25 mm，反应温度为 900 ℃，还原气氛下反应 60 mm，转鼓速度为 25 r/min，转鼓时间为 8 min。

(3) 比较 A、B 两种常见块矿，A 和 B 的标准 $DI_{-6.3\ mm}$分别为 11.27% 及 6.10%，而依据上述试验条件块矿 A 和 B 的动态 $DI_{-6.3\ mm}$分别为 18.31% 及 15.35%，二者相差不大。而根据高炉所反映的情况，动态热裂指数更加客观。

参考文献：

[1] 范晓慧，袁礼顺，曹亮. 高炉精料与科学配矿[J]. 烧结球团，2004，29(4)：1 - 3.
FAN Xiaohui，YUAN Lishun，CHAO Liang. High-grade blast furnace burden and scientific proportioning[J]. Sintering and Pelletizing，2004，29(4)：1 - 3.

[2] 许满兴. 优化高炉炼铁原料采购与烧结高炉配矿一体化的思路和方法[J]. 烧结球团，2016，41(5)：1 - 7.
XU Manxing. Ideas and methods of integrated optimization of BF iron-making raw materials procurement and sintering and BF proportioning[J]. Sintering and Pelletizing，2016，41(5)：1 - 7.

[3] WU S L，XU H F，TIAN Y Q. Evaluation of lump ores for use in modern blast furnaces as part of mixed burden practice[J]. Ironmaking & Steelmaking，2013，36(1)：19 - 23.

[4] 许满兴. 烧结矿冶金性能对其质量和高炉主要操作指标的影响[J]. 烧结球团，2014，39(3)：1 - 5.
XU Manxing. Influences of metallurgical properties of sinter on its quality and major operation indexes of blast furnace[J]. Sintering and Pelletizing，2014，39(3)：1 - 5.

[5] LIU Xinliang，HONEYANDS T，MITRA S，et al. A novel measurement of voidage in coke and ferrous layers in softening and melting under load test using synchrotron X-ray and neutron computed tomography[J]. ISIJ International，2018，58(11)：2150 - 2152.

[6] CHIN E L，LEANNE T M，DAMIEN P O. Lump ore and sinter behavior during softening and melting[J]. ISIJ International，2011，51(6)：930 - 938.

[7] WU Shengli，HAN Hongliang，XU Haifa，et al. Increasing lump ores proportion in blast furnace based on the high-temperature interactivity of iron bearing materials[J]. ISIJ International，2010，50(5)：686 - 694.

[8] 许满兴. 中国高炉炉料结构的进步与发展[J]. 烧结球团，2001，26(2)：6 - 9.
XUE Manxing. Improvement and development of blast furnace burden design in China[J]. Sintering and Pelletizing，2001，26(2)：6 - 9.

[9] 陈龙，薛庆国，郭文涛，等. 氧气高炉块矿与烧结矿软熔过程交互作用[J]. 钢铁，2016，51(2)：15 - 21.
CHEN Long，XUE Qingguo，GUO Wentao，et al. Interaction effect between lump and sinter under condition of oxygen blast furnace[J]. Iron & Steel，2016，51(2)：15 - 21.

[10] LIU Xinliang，HONEYANDS Tom，EVANS Geoffrey，et al. A review of high-temperature experimental techniques used to investigate the cohesive zone of the ironmaking blast furnace[J]. Ironmaking and Steelmaking，2019，46(10)：953 - 967.

[11] 吕庆，王福佳，李豪杰. 宣钢高炉合理炉料结构熔滴试验[J]. 钢铁，2016，51(6)：19 - 25.
LÜ Qing，WANG Fujia，LI Haojie. Rational burden structure by droplet test in Xuansteel blas furnace[J]. Iron，2016，51(16)：19 - 25.

[12] 刘杰，张洪宇，周明顺，等. 基于软熔滴落性能的高炉合理炉料结构[J]. 钢铁，2016，51(9)：11 - 15.
LIU Jie，ZHANG Hongyu，ZHOU Mingshun，et al. Rational burden structure of blast furnace based on softening and melting property[J]. Iron & Steel，2016，51(9)：11 - 15.

[13] 李新宇，张建良，苏步新，等. 基于主成分分析的高炉用天然块矿性能评价[J]. 中南大学学报(自然科学版)2016，47(9)：2943 - 2950.
LI Xinyu，ZHANG Jianliang，SU Buxin，et al. Performance evaluation of lump ores for blast furnace based on principle component analysis[J]. Journal of Central South University (Science and Technology)，2016，47(9)：2943 - 2950.

(下转第 109 页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

法[J]. 天然气技术,2008(5):54 - 56;65;79 - 80.
ZHU Hong, PAN Guozheng, CUI Changhong, et al. Disposal method of waste desulfurizer in natural gas treatment station [J]. Natural gas technology,2008(5):54 - 56;65;79 - 80.

[9] PAN Jian, SHI Benjing, ZHU Deqing, et al. Improving sintering performance of specularite concentrates by pre-briquetting process[J]. ISIJ International,2016,56(5):777 - 785.

[10] 潘建,朱德庆,崔瑜,等. 铁矿烧结烟气中 SO_2 的排放规律[J]. 中南大学学报(自然科学版),2011,42(6):1495 - 1500.
PAN Jian,ZHU Deqing,CUI Yu,et al. Emission law of SO_2 in iron ore sintering flue gas[J]. Journal of Central South University(Natural Science Edition),2011,42(6):1495 - 1500.

(上接第 73 页)

[14] 邸航,何志军,闫丽娟,等. 基于大型铁矿石熔滴检测设备的综合炉料性能[J]. 钢铁,2018,53(10):90 - 94.
DI Hang,HE Zhijun,YAN Lijuan,et al. Metallurgical property of mixed burden based on a large scale iron ore droplet testing equipment[J]. Iron & Steel,2018,53(10):90 - 94.

[15] 陶伟平. 矿石筛分与粉碎系统工艺流程的优化和改进[J]. 烧结球团,2019,44(4):51 - 56.
TAO Weiping. Optimization and improvement of the process flow of ore screening and pulverizing system[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(4):51 - 56.

[16] DONSKOI E,SUTHERS S P,FRADD S B,et al. Utilization of optical image analysis and automatic texture classification for iron ore particle characterization[J]. Minerals Engineering,2007,20:461 - 471.

[17] 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.

(上接第 100 页)

[12] 范佳慧,周莉莉,朱春要. 熔融制样 - X 射线荧光光谱法测定除尘灰中 10 种组分[J]. 冶金分析,2019(10):61 - 66.
FAN Jiahui, ZHOU Lili, ZHU Chunyao. Determination of ten components in dust ash by X-ray fluorescence spectrometry with fusion sample preparation[J]. Metallurgical Analysis, 2019(10):61 - 66.

[13] ZHAN Guang, GUO Zhancheng. Basic properties of sintering dust from iron and steel plant and potassium recovery[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2013,25(6):1226 - 1234.

[14] 钱峰,于淑娟,侯洪宇,等. 烧结机头电除尘灰资源化再利用[J]. 钢铁,2015,50(12):67 - 71.
QIAN Feng, YU Shujuan, HOU Hongyu, et al. Recycling of the electric dust in sintering machine head[J]. Iron and Steel, 2015,50(12):67 - 71.

[15] GAN Min, JI Zhiyun, FAN Xiaohui, et al. Emission behavior and physicochemical properties of aerosol particulate matter (PM_{10}/$PM_{2.5}$) from iron ore sintering process[J]. ISIJ International,2015,55(12):2582 - 2588.

[16] 黎在时. 电除尘器的选型安装与运行管理[M]. 北京:中国电力出版社,2005.
LI Zaishi. Selection, installation and operation management of electrostatic precipitator[M]. Beijing: China Electric Power Press,2005.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net