# 基于工业 CT 的球团矿三维孔隙结构表征与性能分析

兰大伟[a]，张建良[a]，李 卓[a]，王耀祖[b]，徐晨阳[a]，乔红梅[a]，李占国[a]，刘征建[a]
（北京科技大学 a. 冶金与生态工程学院；b. 人工智能研究院，北京 100083）

**摘要：** 孔隙在球团矿中的存在状态以及孔隙率对球团矿各项性能有着十分重要的影响。目前球团孔隙率检测方法为压汞法、SEM 图像识别方法以及 X 射线计算机断层扫描（CT）方法，为了明确 3 种检测方法的优缺点并准确得到球团的孔隙率，本文以现场两种（1#、2#）球团矿为基础进行了相关对比检测，并阐述了球团矿三维孔隙结构表征与性能间的关系。分析结果表明：压汞法无法检测封闭孔，SEM 图像识别方法仅能检测局部孔隙，CT 扫描方法可以重现球团矿内部孔隙分布状态，是一种较为完善的孔隙检测方法；孔隙结构的表征能够更加具象化分析球团抗压强度及冶金性能的变化，如内部孔隙较多且大部分以连通孔形式存在的 1#球团矿的抗压强度低于内部孔隙较少且大部分以封闭孔形式存在的 2#球团矿，而由于连通孔有利于还原气体的传递，故 1#球团矿的还原性能优于 2#球团矿。

**关键词：** 球团矿；孔隙结构；工业 CT；冶金性能
**中图分类号：** TG046.6 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764（2023）03－0099－07
**doi：** 10.13403/j.sjqt.2023.03.046

# Analysis on three-dimensional pore structure characterization and performance of pellets based on industrial CT

LAN Dawei[a], ZHANG Jianliang[a], LI Zhuo[a], WANG Yaozu[b], XU Chenyang[a],
QIAO Hongmei[a], LI Zhanguo[a], LIU Zhengjian[a]
(a. School of Metallurgical and Ecological Engineering; b. Institute of Artificial Intelligence, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The presence and porosity of pores in pellets have a very important influence on the performances of pellets. At present, the methods for detecting the porosity of pellets are mercury pressure method, SEM image recognition method and X-ray computed tomography (CT) method. In order to clarify the advantages and disadvantages of the three detection methods and accurately obtain the porosity of pellets, the relevant comparative tests are carried out based on on-site pellets 1# and 2#, and the relationship between the three-dimensional pore structure characterization and performances of pellets is elaborated. The analysis results show that the mercury pressure method cannot detect the closed pores, the SEM image recognition method can only detect local pores, and the CT scanning method can reproduce the internal pore distribution state of pellets, which is a relatively complete pore detection method. The characterization of pore structure can more concretely analyze the changes of compressive strength and metallurgical properties of pellets, such as the compressive strength of 1# pellets with more internal pores and most of them in the form of connected pores is lower than that of 2# pellets with fewer internal pores and most of them in the form of closed pores, and the reduction performance of 1# pellets is better than that of 2# pellets because the connected pores are conducive to the transfer of reducing gases.

**Key words:** pellets; pore structure; industrial CT; metallurgical property

**收稿日期：** 2022－01－26；**修回日期：** 2023－03－20
**基金项目：** 国家自然科学基金资助项目（52174291）
**作者简介：** 兰大伟（1977—），女，硕士研究生，从事钢铁冶金方面的研究。
**通信作者：** 刘征建（1981—），男，教授，从事炼铁方面的研究。

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

球团作为高炉炼铁原料，在成品球制备完成后，需要对其冶金性能进行检测，以探究球团矿在高炉内的还原行为，而在冶金性能的分析当中，主要依据成品球的抗压强度、化学成分、孔隙率及矿相结构来解析。球团矿中的孔隙分为连通孔和封闭孔。连通孔表现为球团内部的微裂纹，且孔隙体积占比较大，为还原气体提供了很好的传输通道；封闭孔为球团内部的微型圆孔，体积占比较小，外部气体无法流入。孔隙的分布状态及孔隙率与球团矿生产参数相关，且孔隙对球团矿的还原性有显著影响，决定了气体在球团中的传递速率及气固还原反应的接触面积[1]。所以做好球团矿孔隙率的检测及矿相结构的分析能够很好地探究后续的冶金性能。

常规孔隙率检测方法为压汞法，该方法使用的液体汞有毒性，导致测试后的球团矿无法进行回收，且无法检测到封闭孔，具有一定的局限性。在分析矿相结构的同时，可以利用电镜图进行图像识别分析二维状态下的孔隙占比，虽然只能观察到局部微观结构的孔隙，但可以观察到铁氧化物的交结状态及孔隙状态[2]。X 射线计算机断层扫描(CT)是一种比较成熟的三维扫描技术，通过三维重建软件将扫描的切片数据进行处理，通过阈值分割提取球团矿内部孔隙的各项参数，将球团矿内部孔隙以 3D 状态展现出来，可以直观地看到孔隙的分布状态[3]。目前已经有部分科研工作者在球团矿的三维重建技术上获得了不错的成果。SAHU 等[4]同样采用 CT 扫描技术对球团矿进行无损检测，对球团矿孔隙进行三维重建及表征，探究了球团内外部的孔隙分布情况，结合生产参数进行优化研究。AUGUSTO 等[5]采用 CT 三维成像对球团矿孔隙度进行表征，对比传统球团矿孔隙率测试方法，该技术可以表征球团中孔隙和裂纹的空间分布形态与位置，且可以区分连通孔和封闭孔，是一种十分完善的检测手段。前人的研究结果中主要着重探究球团矿孔隙的分布，并未与球团矿的冶金性能联系起来，且该方法在球团矿的孔隙表征方面并未广泛应用，所以将球团孔隙结合各项性能对球团矿质量进行评估十分必要。

针对于上述问题，本文立足于两种原料不同但热工参数一致的某球团厂现场球团矿，针对其化学成分、抗压强度、显微结构、并结合常规孔隙率检测手段及新型 CT 三维重建手段提取的球团内部孔隙结构，分析其物理性能及冶金性能。两种球团矿的作用在于区分三种孔隙率检测方法的差别，以及检验每种检测方法的准确性。通过试验结果深度探究球团矿三维孔隙结构表征与其各项性能之间的关联。

## 1 试验原料及方法

### 1.1 试验原料

试验过程中用到的两种球团矿取自某一球团厂，两种球团在铁矿粉原料上存在一些差异($SiO_2$ 含量不同)，但生产条件一致。成品球的化学成分分析如表 1 所示。由表 1 可以看出：1#球团矿的铁品位为 63.62%，FeO、$SiO_2$ 质量分数分别为 0.19%和 7.44%；2#球团矿铁品位较 1#球团矿高为 64.11%，FeO 质量分数相对偏高为 0.44%，$SiO_2$ 质量分数为 6.94%；两种球团矿碱度均为 0.04 左右，均属于高硅球团矿。

表 1 球团矿主要化学成分及碱度

Table 1 Main chemical composition and alkalinity of pellets

| 球团矿编号 | 主要化学成分(质量分数)/% | | | | | | | | | | | 碱度($R$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | TFe | FeO | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | CaO | MgO | P | S | $K_2O$ | $Na_2O$ | 烧损 | |
| 1# | 63.62 | 0.19 | 7.44 | 0.35 | 0.33 | 0.56 | 0.02 | 0.03 | 0.08 | 0.06 | −0.06 | 0.044 |
| 2# | 64.11 | 0.44 | 6.94 | 0.34 | 0.30 | 0.50 | 0.04 | <0.01 | 0.08 | 0.09 | −0.09 | 0.043 |

### 1.2 试验方法

(1) 试验首先采用压汞法、SEM 图像识别法以及工业 CT 法测量球团矿孔隙率。其原理：① 压汞法：在压缩条件下，将一定量的汞液填充到材料中，测量汞液占据的体积与材料体积之比；② SEM 图像识别方法：在获取球团矿 SEM 图片后，采用 FIJI/ImageJ 软件对电镜照片进行阈值分割处理，通过灰度值区分出孔隙、铁氧化物颗粒

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

与脉石颗粒，得到二维平面下的孔隙面积占比；③ CT 法：扫描的样品不需要任何制备步骤，直接将成品球放置在设备的样品支架上即可。试验使用工业 CT 型 X 射线计算机断层扫描系统，型号为 FF35CT，扫描期间，CT 扫描仪在 120 kV 和 150 μA 下运行，每个样本包括大约 1 700 个横截面图像。设备原理为利用 X 射线的穿透能力，且穿透不同密度的物质时衰减不同，拍摄一系列不同角度以及不同剖层的透视图像，再通过三维重构软件合成三维图像数据[6]。该设备具有高精度及多功能性，广泛应用于尺寸测量、孔隙度夹杂物分析及内部结构研究等方面。样品经过设备扫描后，形成大量的横切片图，采用 VG Studio max 软件将切片图进行重建，得到球团的三维结构图，并对每张横切片图进行阈值分割识别孔隙，进而得到三维状态下的孔隙体积占比及孔隙分布状态。

(2) 试验利用 CT 测量球团孔隙率而构建的三维结构图，对球团矿的抗压强度及冶金性能进行深入分析。首先，针对球团内部孔隙分布状态分析铁氧化颗粒的固结程度，来进一步判别球团矿抗压强度变化规律。其次通过区分球团矿内部的连通孔与封闭孔，来判别球团矿所受还原膨胀力的作用及还原气体的传递速度，以此进一步分析球团矿的冶金性能。

## 2　结果与讨论

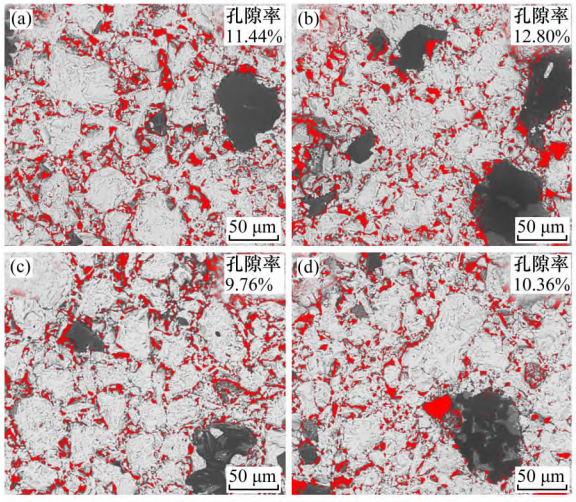
### 2.1　球团矿孔隙率检测效果

试样采用压汞法检测的孔隙率结果如表 2 所示。由表 2 可知，1#球团矿孔隙率较 2#球团矿孔隙率高。对两种球团矿进行 SEM 分析，采用图像分析软件 FIJI/ImageJ 对球团矿的扫描电镜图片做了灰度图像处理，将图中的孔隙提取出来并填充为红色，所提取的二维孔隙率数值放置于图片右上角。由于电镜观察倍数达到 1 000 倍，避开了较大孔洞和裂纹的位置，局部的微观孔隙占比相对于球团矿整体孔隙率偏小，但规律性十分明显，其结果如图 1 所示。由图 1 可知，1#球团矿整体孔隙率大于 2#球团矿，球团矿中心孔隙率大于边缘。球团矿边缘部位的铁氧化物颗粒连接紧密，孔隙均匀地分布在颗粒周围，没有发现较大的孔洞。由于脉石颗粒较粗，在造球过程中优先成核，球团长大后期更多的黏结矿粉颗粒，所以球团矿中心部位脉石颗粒较多，铁氧化物连接程度偏低，脉石颗粒周围容易出现较大的孔洞。

表 2　球团矿孔隙率(体积分数)

Table 2　Porosity of pellets　　%

| 球团矿编号 | 孔隙率 |
|---|---|
| 1# | 26.34 |
| 2# | 24.77 |




(a) 1#球团矿边缘部分；(b) 1#球团矿中心部分；(c) 2#球团矿边缘部分；(d) 2#球团矿中心部分

图 1　球团矿 SEM 显微结构孔隙识别

Fig. 1　Pore identification of SEM microstructure of pellets

利用 CT 扫描方法获取球团不同位置的切片扫描信息，采用 VG Studio max 软件对切片进行三维重建，通过阈值分割提取二维切片孔隙，重建后得到三维孔隙结构，并根据孔隙球度区分连通孔和封闭孔。球度计算公式[7]：

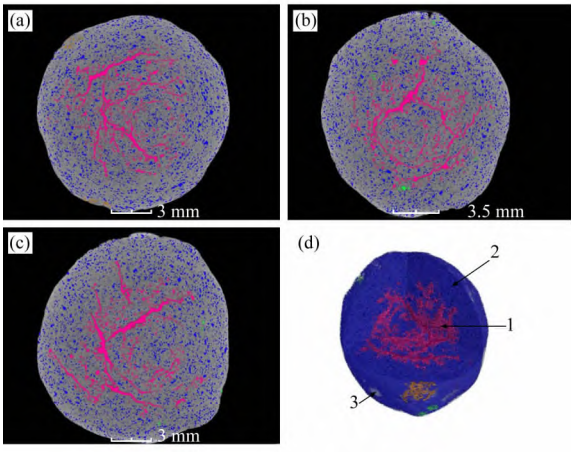
$$S=\frac{\pi^{1/3}\cdot(6V)^{2/3}}{A} \tag{1}$$

式中：$S$ 为孔隙球度(无量纲参数，球度接近 1 说明孔隙近似圆孔，球度接近 0 说明孔隙近似裂隙)；$V$ 为孔隙体积，$mm^3$；$A$ 为孔隙表面积，$mm^2$。

两种球团矿的 CT 切片处理结果如图 2、3 所示。孔隙经过识别后采用不同颜色进行区分，粉色区域为球度较小体积较大的连通孔，蓝色区域为球度较大体积较小的封闭孔，灰色区域为球团基质。对孔隙进行三维重建后，由于球团外部的

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

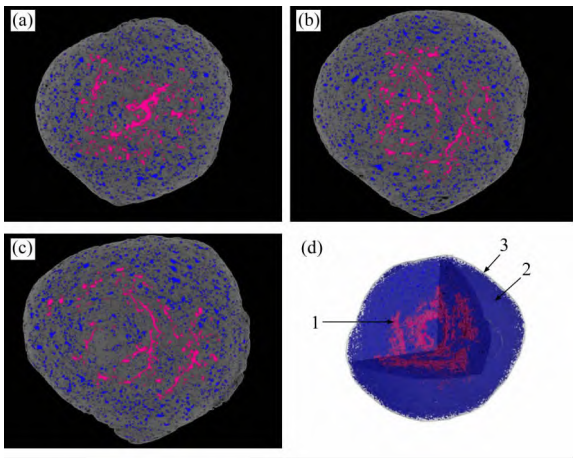
封闭孔较多且小，无法直观看到内部的孔隙状态，所以将重建后的孔隙分割出八分之一的球体，剩余球体如图 2、3 中(d)所示。由图 2、3 可以看出，无论是从切片的角度还是从三维立体结构的角度观看，1#球团矿内部孔隙中连通孔较多，皆为细长的裂纹，集中在球团中心位置，球团边缘位置均为封闭孔。2#球团矿内部孔隙中的连通孔相对较少，裂纹偏短粗状态，主要集中在中心位置，边缘位置均为封闭孔。通过 VG Studio max 软件计算孔隙体积占比，并提取孔隙数据信息，1#球团矿孔隙率为 29.08%，2#球团矿孔隙率为 27.33%。




(a)、(b)、(c) 球团不同部位切片；
(d) 球团三维孔隙结构
1—连通孔；2—封闭孔；3—球团基质。

图 2 1#球团矿 CT 扫描切片及三维重建

Fig. 2 CT slice scan and 3D reconstruction of 1# pellet

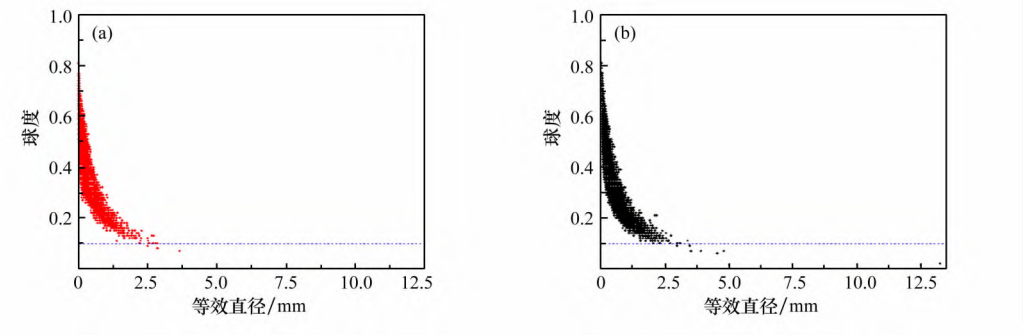



(a)、(b)、(c) 球团不同部位切片；
(d) 球团三维孔隙结构
1—连通孔；2—封闭孔；3—球团基质。

图 3 2#球团矿 CT 扫描切片及三维重建

Fig. 3 CT slice scan and 3D reconstruction of 2# pellet

孔隙球度随孔隙等效直径的变化规律如图 4 所示。由图 4 可知，孔隙等效直径越大，对应的球度越小，孔隙越接近裂纹状态，而对于球度小于 0.1 的孔隙，1#球团矿的孔隙体积较大，连通孔体积大且细长，与三维重建观察结果一致。对比可知，压汞法仅能检测到与外界连通的孔隙，封闭孔无法检测；SEM 图像识别方法仅能计算到微观状态下的微孔隙面积，无法统计到连通孔及整体孔隙率；而 CT 三维重建方法可以计算出球团内部的连通孔和封闭孔的体积占比，同时展现出孔隙的分布形态，是目前一种较为完善的孔隙检测方法。




(a) 1#球团矿；(b) 2#球团矿

图 4 孔隙球度随等效直径的变化

Fig. 4 Variation of sphericity of a pore with different equivalent diameters

## 2.2 球团矿矿相结构及冶金性能分析

两种球团矿的抗压强度及冶金性能如表 3 所示。由表 3 可知，1#球团矿抗压强度相对较低为 1 658 N/P，2#球团矿抗压强度较高为 1 962 N/P，1#球团矿的还原性指数及还原膨胀指数均优于 2#球团矿。孔隙率与抗压强度呈负相关关系，当球

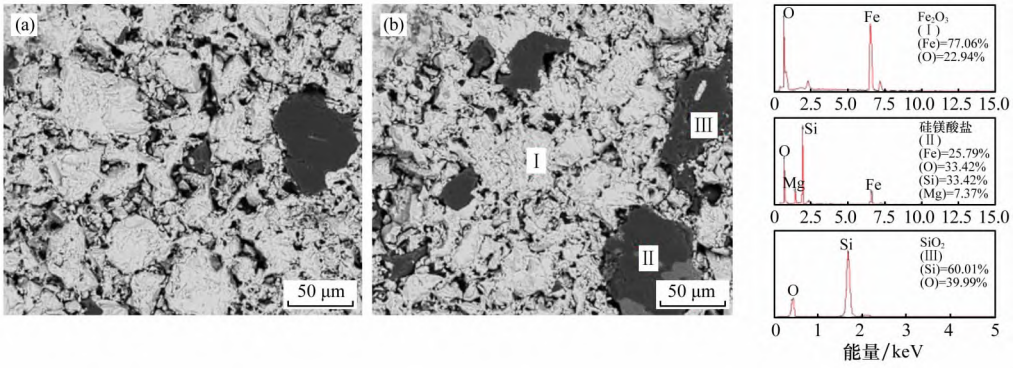
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

团矿孔隙率降低，球团矿整体更加致密，抗压强度随之增加[8]。经 CT 三维重建结果表明，1#球团矿的连通孔数量较多，2#球团矿的封闭孔数量较多，连通孔的存在使得球团无法抵抗太高的强度而发生破碎，导致球团抗压强度降低。1#、2#球团矿的 SEM-EDS 分析分别如图 5、6 所示。由如图 5、6 可知，1#球团矿由于自身 $SiO_2$ 质量分数较高，石英以较大的颗粒状分布于晶粒之间，且石英颗粒周围易存在孔隙，阻碍了 $Fe_2O_3$ 晶粒的连晶[9-10]，与石英伴生的还有镁橄榄石相，很大程度上降低球团矿的强度[11-12]。2#球团矿的 $SiO_2$ 质量分数偏低，球团内部因石英颗粒产生的孔隙减少。

表 3　球团矿抗压强度及冶金性能

Table 3　Compressive strength and metallurgical properties of pellets

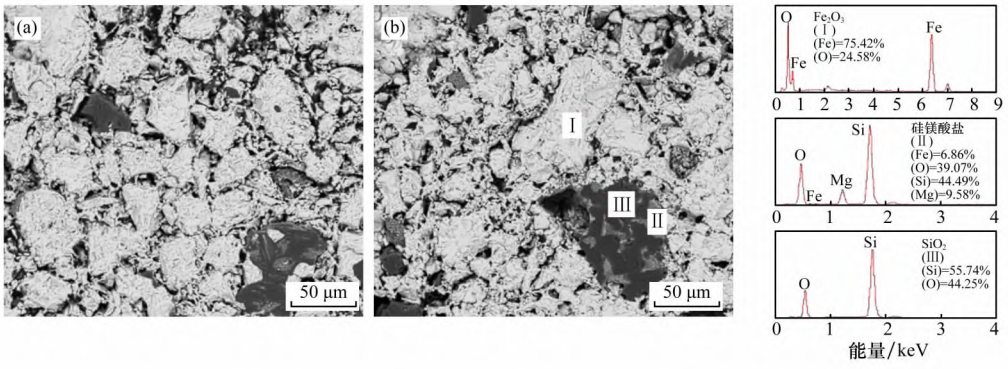
| 球团矿编号 | 抗压强度/(N·P$^{-1}$) | 还原性指数/% | 还原膨胀指数/% |
|---|---|---|---|
| 1# | 1 658 | 66.73 | 8.86 |
| 2# | 1 962 | 64.89 | 12.58 |




(a) 边缘部分；(b) 中心部分

图 5　1#球团矿 SEM 显微结构

Fig. 5　SEM microstructure of 1# pellets




(a) 边缘部分；(b) 中心部分

图 6　2#球团矿显微结构

Fig. 6　SEM microstructure of 2# pellets

此外，1#球团矿由于 $SiO_2$ 质量分数较高，降低了球团矿的全铁品位，不利于还原性的改善，但球团内部存在较多的孔隙，且连通孔数量较多，均以细长的状态分布在球团内部，还原性气体更容易进入到球团内部，增加了气体与球团内部的接触面积，发达的孔隙结构有效促进了气固相反应，使得球团还原性增加[13-14]。2#球团矿铁氧化物颗粒之间的连接程度较高，$Fe_2O_3$ 颗粒活性高，在还原阶段颗粒间的离子迁移能力强，有利于还原性的改善，但球团矿内部孔隙率偏低，连通孔偏短且数量较少，还原性气体扩散到球团内部受限，气固反应接触面积较少，由于两种球团矿的孔隙状态差异明显，对还原性的影响较大，所以 2#球团矿还原性略低于 1#球团矿。$SiO_2$ 对球团矿的膨胀行为有抑制作用，通过改变铁晶须的形核位置，来抑制膨胀[15]。在氧化固结过程中 FeO 与

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

$SiO_2$ 生成的铁橄榄石相会抑制 $Fe_2O_3$ 向 $Fe_3O_4$ 还原，从而抑制铁氧化物晶格转变所带来的膨胀。球团中的封闭孔在中温还原过程中会遭受挥发分的膨胀压力，使得气孔壁破裂从而发生恶性膨胀[16]。所以，在 $SiO_2$ 质量分数增加且连通孔数量较多的情况下，可以在一定程度上缓解球团矿所受膨胀力，故1#球团矿的还原膨胀指数低于2#球团矿。

## 3 结 论

(1) 采用压汞法检测球团矿孔隙仅能检测到与外界连通的孔隙，无法检测封闭孔；采用SEM图像识别计算微观状态下的孔隙占比，存在局限性，无法观察到连通孔的分布；采用CT扫描三维重建方法可以计算球团矿封闭孔和连通孔的占比，同时可以观察到内部孔隙的分布状态。三种检测方法的结果均为1#球团矿孔隙率较高，2#球团矿孔隙率较低。

(2) 内部孔隙较多且大部分以连通孔形式存在的球团矿的抗压强度低于内部孔隙少且大部分以封闭孔隙形式存在的球团结矿，但其还原性较好。

(3) 为了更加严谨地探究球团矿内部孔隙结构变化规律，后续会增加样本数量，增加因素水平，探究 $w(SiO_2)$ 分布在低、中、高三种水平、不同热工参数或其他脉石质量分数变化对孔隙结构所带来的影响。

## 参考文献:


[1] XU C Y, ZHANG J L, LIU Z J, et al. A comprehensive study of pore characteristics, formation mechanism and reliability analysis with advanced characterization methods within pellets [J]. Trans. Indian Inst. Met., 2020, 73(10): 2503 – 2510.

[2] BHUIYAN I U, MOUZON J, FORSBERG F, et al. Consideration of X-ray microtomography to quantitatively determine the size distribution of bubble cavities in iron ore pellets [J]. Powder Technology, 2013, 233: 312 – 318.

[3] TANG K N, WANG Y D, NIU Y F, et al. Particle classification of iron ore sinter green bed mixtures by 3D X-ray microcomputed tomography and machine learning [J]. Powder Technology, 2023, 415: 118151.

[4] SAHU S N, BISWAL S K. Alleviating dependency on fossil fuel by using cow-dung during iron ore pelletization; Assessment of pellet physical and metallurgical properties [J]. Powder Technology, 2021, 381: 401 – 411.

[5] AUGUSTO Karen Soares, PACIORNIKA Sidnei. Porosity characterization of iron ore pellets by X-ray microtomography [J]. Materials Research. 2018, 21(2): e20170621.

[6] 刘勇，胡霞，李宗超，等. 基于医学CT和工业CT扫描研究土壤大孔隙结构特征的区别 [J]. 中国农学通报，2016，32(14)：106 – 111.
LIU Yong, HU Xia, LI Zongchao, et al. Differences in soil macropore structure characteristics based on medical CT and industrial CT scanning [J]. China Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(14): 106 – 111.

[7] 许礼吉，段卓平，白志玲，等. RDX基PBX炸药热损伤演化行为的量化表征 [J/OL]. 兵工学报，2022，7(19)：1 – 12 [2023 – 03 – 14]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.tj.20220718.1732.012.html.
XU L J, DUAN Z P, BAI Z L, et al. Quantitative characterization of thermal damage evolution behavior of RDX-based PBX explosives [J/OL]. Acta Armamentarii, 2022, 7(19): 1 – 12 [2023 – 03 – 14]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.tj.20220718.1732.012.html.

[8] 王晓哲，郭晶，刘东辉，等. 轻烧菱镁石粉对低硅含镁球团矿孔隙和强度的影响 [J]. 材料与冶金学报，2021，20(1)：23 – 30.
WANG Xiaozhe, GUUO Jing, LIU Donghui, et al. Effect of light-burned magnesite powder on porosity and strength of low-silicon magnesium-containing pellets [J]. Acta Materials and Metallurgy, 2021, 20(1): 23 – 30.

[9] 马黎明，张建良，吴胜利，等. 基于熔剂性生球的复合造块工艺处理钒钛磁铁矿 [J]. 钢铁研究学报，2020，32(6)：462 – 469.
MA Liming, ZHANG Jianliang, WU Shengli, et al. Treatment of vanadium-titanium-magnetite by composite agglomeration process based on flux green pellets [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020, 32(6): 462 – 469.

[10] 朱德庆，黄铮静，杨聪聪，等. GF88赤铁精矿制备氧化球团的试验研究 [J]. 烧结球团，2020，45(6)：61 – 68.
ZHU Deqing, HUANG Zhengjing, YANG Congcong, et al. Experimental study on preparation of oxidized pel-


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

lets from GF88 hematite concentrate [J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(6):61 – 68.

[11] WANG R R,ZHANG J L,LIU Z J,et al. Effects of magnesium olivine on the mineral structure and compressive strength of pellets [J]. Ironmaking & Steelmaking,2020,47(2):100 – 105.

[12] 路明,陈小艳,王兴锋,等. 高硅磁精粉球团矿预热焙烧工艺制度优化研究 [J]. 烧结球团,2022,47(3):59 – 65.
LU Ming,CHEN Xiaoyan,WANG Xingfeng,et al. Research on optimization of preheating roasting process system for high silicon magnetic powder pellet [J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(3):59 – 65.

[13] 徐晨阳,张建良,刘征建,等. 有机复合黏结剂特性表征及对球团矿性能的影响 [J]. 钢铁研究学报,2021,33(11):1154 – 1160.
XU Chenyang,ZHANG Jianliang,LIU Zhengjian,et al. Characterization of organic composite binder and its effect on pellet properties [J]. Journal of Iron and Steel Research,2021,33(11):1154 – 1160.

[14] 李英魁. 焙烧工艺对球团矿还原性能的影响 [J]. 河北冶金,2017(1):11 – 14.
LI Yingkui. Influence of roasting process on reduction performance of pellets [J]. Hebei Metallurgy,2017(1):11 – 14.

[15] 郭宇峰,刘阔,刘雅婧,等. 铁矿球团还原膨胀机理及影响因素的研究进展 [J]. 钢铁,2021,56(4):9 – 15.
GUO Yufeng,LIU Kuo,LIU Yajing,et al. Research progress on reduction and expansion mechanism and influencing factors of iron ore pellets [J]. Iron & Steel,2021,56(4):9 – 15.

[16] 沈茂森,吕志义,康文革,等. 白云鄂博铁球团矿异常还原膨胀的机理 [J]. 中国冶金,2021,31(3):17 – 21;29.
SHEN Maosen,LÜ Zhiyi,KANG Wenge,et al. Mechanism of abnormal reduction and expansion of baiyan obo iron pellets [J]. China Metallurgy,2021,31(3):17 – 21;29.

(上接第 13 页)

[25] 文霄,刘迎云,关永兵. 湘南某铅锌矿区重金属赋存形态分析 [J]. 安全与环境工程,2013,20(5):42 – 45.
WEN Xiao,LIU Yingyun,GUAN Yongbing. Speciation analysis of heavy metals in a lead-zinc mine in southern Hunan [J]. Safety and Environmental Engineering,2013,20(5):42 – 45.

[26] 孙叶芳,谢正苗,徐建明,等. TCLP 法评价矿区土壤重金属的生态环境风险 [J]. 环境科学,2005,26(3):152 – 156.
SUN Yefang,XIE Zhengmiao,XU Jianming,et al. Assessment of toxicity of heavy metal contaminated soils by toxicity characteristic leaching procedure [J]. Environmental Science,2005,26(3):152 – 156.

(上接第 33 页)

[11] 朱德庆,侯明洲,杨聪聪,等. 复合黏结剂提高含锌尘泥团块干燥热稳定性能研究 [J]. 烧结球团,2022,47(3):73 – 82.
ZHU Deqing,HOU Mingzhou,YANG Congcong,et al. Study on improving thermal stability of Zinc-containing dust and mud mass with composite binder [J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(3):73 – 82.

[12] 赵丹丹,吴传文. 适用于转底炉处置含铁、锌粉尘的消解工艺 [J]. 现代冶金,2021,49(1):59 – 61.
ZHAO Dandan,WU Chuanwen. Suitable for rotary hearth furnace disposal of iron,zinc dust digestion process [J]. Modern Metallurgy,2021,49(1):59 – 61.

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