综 述

冷压铁矿球团用于高炉低碳炼铁的研究进展

杨志伟，王 广，王静松，薛庆国
（北京科技大学 钢铁冶金新技术国家重点实验室，北京 100083）

摘要： 当前，高炉炼铁所用含铁原料多为高碱度烧结矿、氧化球团矿和天然块矿。然而，随着全球铁矿石资源的日渐消耗和炼铁低碳技术的发展以及高炉炼铁资源高效利用等问题，高炉炉料的配比模式也逐步迈向多元化发展。冷压铁矿球团工艺与常规烧结和球团工艺相比，对原料的适应性强、工艺灵活简单，且可以降低制备过程的能源消耗，不失为高炉含铁炉料的一种补充。文章着重简述了冷压铁矿球团的冶金性能，分析了应用冷压铁矿球团对高炉冶炼的影响以及其节能减排效果。结果表明，冷压铁矿球团的冶金性能可基本满足高炉冶炼的需求，使用此球团生产1 t生铁理论上可减少的CO_2排放量约为522 kg。

关键词： 冷压铁矿球团；低碳炼铁；含铁炉料；节能减排
中图分类号： TF046.6 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)05－0001－08
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.05.064

Research development of cold-pressed iron ore pellets for low-carbon ironmaking in blast furnaces

YANG Zhiwei, WANG Guang, WANG Jingsong, XUE Qingguo
(State Key Laboratory of New Technology of Iron and Steel Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: At present, most of the iron-bearing raw materials used in blast furnace ironmaking are high alkalinity sinters, oxidized pellets and lump ore. However, with the increasing consumption of global iron ore resources, the development of low-carbon ironmaking technology and the efficient utilization of blast furnace ironmaking resources, etc., the ratio mode of blast furnace charge has gradually moved towards diversified development. Compared with conventional sintering and pelletizing processes, the cold-pressed iron ore pelletizing process has strong adaptability to raw materials, as well as flexible and simple processes, and can reduce the energy consumption of the preparation process, which is a supplement to the iron-containing charge of blast furnace. The metallurgical performance of cold-pressed iron ore pellets is mainly described, the influence of cold-pressed iron ore pellets on blast furnace smelting and its energy saving and emission reduction effects is analyzed. The results show that the metallurgical performance of cold-pressed iron ore pellets can basically meet the needs of blast furnace smelting, and the production of 1 t of pig iron using this pellet can theoretically reduce CO_2 emissions by about 522 kg.

Key words: cold-pressed iron ore pellets; low-carbon ironmaking; iron-containing charge; energy saving and emission reduction

随着铁矿资源短缺、各种冶金废物的大量堆积以及钢铁生产对环境污染的问题，低品位铁矿和含铁、含碳副产品的利用便成为解决这些问题的重要突破口。但受原料粒度、原料成分以及不

收稿日期：2023－04－12；修回日期：2023－05－09
基金项目：国家自然科学基金资助项目(U1960205)；中国五矿科技专项计划项目(2020ZXA01)
作者简介：杨志伟(1998—)，男，硕士研究生，从事冶金资源综合利用方面的研究。
通信作者：王 广(1985—)，男，博士，副教授，从事冶金资源综合利用方面的研究。

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

同工艺特性的影响，这些含铁废料在高炉炼铁中的应用受到限制。然而，为达到保护环境和资源高效利用的目的，这些含铁废料的部分用途便是在烧结过程中代替部分铁矿粉，用于生产烧结矿[1-2]。由于部分含铁废料中存在有害元素(锌、钾、钠)[3]，使其在用于生产烧结矿时受到限制。近年来，随着冷压铁矿球团技术的不断发展及其在高炉炼铁中的广泛应用，其在回收高炉二次资源、造球、节能减排等方面受到越来越多的青睐。将各种含铁废料与黏结剂混合成型并作为冶炼原料用于高炉、电炉、转炉冶炼，这不仅实现了冶金二次资源的利用，而且缓解了固废对环境污染的压力。与传统成型工艺相比，冷压铁矿球团工艺步骤较短，无需高温处理，减少了造块过程的能源消耗。在高炉炼铁过程中应用此类球团可使高炉料柱透气性得到不同程度的改善，而且冷压铁矿球团中碳的存在一定程度上降低了高炉炼铁时焦炭的消耗量，节约了能源，降低了二氧化碳和污染物的排放，使综合效益有所提升[4]。文章主要阐述了冷压铁矿球团用于高炉炼铁的发展现状，同时分析了应用此类球团对高炉炼铁以及碳排放的影响，以期为该技术的优化发展提供参考。

1 冷压铁矿球团用于高炉炼铁的发展历程

1.1 工艺流程

1899 年，芬兰首次利用精细磁铁矿粉生产冷压铁矿球团，并用于高炉冶炼操作[5]。然而，与传统烧结球团工艺相比，冷压铁矿球团设备的生产效率较低。随着成型工艺的逐渐改进，以及钢铁生产对固废资源化和绿色低碳方面的需求日增，冷压铁矿球团工艺再次在高炉炼铁中得到一定应用[6]。该工艺的特点是舍弃了常规烧结和球团工艺中高温处理步骤(振动压制除外)，通过对混合料施加压力破坏颗粒之间的机械应力形成“拱桥效应”，并使成型球团在自然环境中硬化[7]。最终以成品冷压铁矿球团作为主料或辅料，通过上料系统与其他炉料一起被送入高炉参与冶炼。该球团是通过细粉料生产而来，因此其化学组成可根据生产要求变化，以达到最合适的入炉品质。冷压铁矿球团工艺根据成型设备的不同可分为 4 类：① 利用辊压机生产冷压铁矿球团的辊压成型技术；② 通过冲床高频振动生产冷压铁矿球团的振动压制技术(该技术因振动压实周期较短，初期冷压铁矿球团机械强度较低，需在 70 ~ 95 ℃下进行加热处理)；③ 利用剪切应力促使混合料成型的真空挤压技术(与辊压和振动成型相比，采用该技术生产的冷压铁矿球团具有更高的强度，且密度更加均匀)；④ 通过圆盘造球机生产球形含铁炉料(图 1)[5,8]。

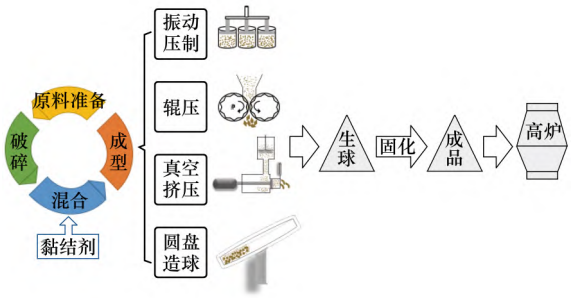


图 1 冷压铁矿球团工艺流程

Fig. 1 Process flow of cold-pressed iron ore pellets

1.2 国外发展现状

从 1899 年到 20 世纪 20 年代初，冷压铁矿球团技术在高炉冶炼领域迅速推广。20 世纪 60 年代，乌克兰的 Alchevsk、俄罗斯的 Nizhny Tagil 和 Magnitogorsk 钢铁厂利用辊压工艺将钢铁生产中的含铁废料变为可应用于高炉生产的冷压铁矿球团。芬兰 Raahe Works 公司用球团矿粉、焦粉、含铁废料以及水泥等原料生产了高炉用的振冲型团块[5]。1993 年，美国 Bethlehem Steel Corp 应用“J. C. Steele & Sons”公司设计开发的真空挤压技术，首次成功建设了一条利用氧气转炉污泥和粉尘等冶金废料生产冷压铁矿球团的生产线，并将其作为高炉炉料用于炼铁操作。随后于哥伦比亚 BHP Billiton 公司建造了年产 70 万吨的镍铁冷压铁矿球团生产线，用于镍铁生产[6]。

针对冶炼过程中产生的大量含铁废料，为实现副产品的高效利用，达到厂内内循环的目的。2011 年印度 Suraj Products Ltd 公司旗下的小型钢铁厂引进了一条真空挤压球团的生产线，并利用厂内生产的含铁废料生产了 w(TFe) 为 46.00% ~ 48.00%、w(CaO) 为 10.00% ~ 11.00%、$w(SiO_2)$ 为 7.20% ~ 7.70%、烧损为 11.00% ~ 11.90%、碱度为 1.40 的冷压铁矿球团，并在 45 m^3 的小型工

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

业高炉中成功实现了用 10%、80% 以及 100% 的此球团进行炼铁操作。操作中发现，随着该球团掺入比的增加，焦比逐渐下降。当其占比为 100% 时，焦炭消耗降低约 200 kg/t，铁水温度略有升高，生铁成分与使用铁矿石冶炼相比基本相同[9-10]。

1.3　国内发展现状

我国生产的冷压铁矿球团主要用于小高炉炼铁，在大高炉中主要作为辅助料参与炼铁过程。20 世纪末，为改变小高炉使用贫矿和原矿石的现状，山西省盂县南村铁厂利用铁矿粉、焦粉、水泥生产该类球团，并成功用于小高炉炼铁。试验发现，除冷压铁矿球团还原性能差外，其他性能优良，且在一定条件下，该球团的应用降低了生铁的成本，增加了企业的经济效益[11]。在铁矿石资源短缺、钢铁厂固废严重污染环境以及低碳的大环境下，利用冶金副产物生产冷压铁矿球团的方法得到了一定的发展。2006 年信阳钢铁公司试验了冷压铁矿球团用于锰铁生产的可行性。试验发现，当冷压铁矿球团配比在 20% 以下时，高炉冶炼的操作基本不变，该方法获得了较好的综合效益[12]。2017 年—2022 年，汉中钢铁、酒泉钢铁、洛阳钢铁等开发了返矿冷压铁矿球团技术（入炉比例高达 15%），此技术的应用不仅降低了烧结返矿率和综合焦比，提高了产能，而且铁水温度有所提升[13]。

2　冷压铁矿球团强度及其影响因素

2.1　冷压铁矿球团强度

冷压铁矿球团强度的优劣是其能否加入高炉冶炼的先决条件，而其从生产到入炉冶炼通常需要固化一个月[14]，在此过程中冷压铁矿球团必然会经历碰撞、冲击、挤压等，因此必须保证其具有足够高的机械强度，以满足在运输、储藏和入炉冶炼过程中不产生或产生较少细粉，使其在炉内具备有效还原以保证炉况顺行。此外，由于工厂的管理和固化条件的限制，此类球团可能会在室外储存和固化，且由于环境因素的影响，要求该球团在固化初期必须具有较高的冷强度[15]，而 BIZHANOV 等[10]、MOHANTY 等[16] 已经发现水泥－膨润土－水体系形成的混凝结构，使球团在固化的前三天内强度逐渐增加并达到局部最大值，满足了入炉冶炼的基本条件。在与烧结矿、球团矿、块矿强度对比试验中发现，由于制备工艺的优势使冷压铁矿球团具有更高的冷强度，且在固化期间强度整体上呈上升趋势，通过完善原料组成可使冷压铁矿球团在重复落下测试中能够达到较好效果，随炉料下降时可更好地保持其原有的形状。但因其强度主要靠黏结剂的黏结性能提供，在高温作用下，黏结性能失效以及铁氧化物发生相变均会引起热强度的变化[4,16-18]。SINGH 等[19] 在研究中发现不论是在中性气氛或还原气氛下，冷压铁矿球团的强度均会随温度的升高而降低，且在还原条件下尤为严重。但随着冷压铁矿球团压实度的增加，在其软化之前能够保持较好的完整性，直到进入软熔带被熔化[16]。

2.2　原料条件对冷压铁矿球团强度的影响

冷压铁矿球团的强度很大程度上取决于原料的化学组成、矿物成分以及物理性质。研究中发现此类球团的强度随着孔隙度的降低和粒度的减小而升高，且原料粒度分布决定着冷压铁矿球团压实度的高低和物料之间接触点的多少。随着混合料中细物料的增加，细物料渗入粗颗粒之间的缝隙当中，使颗粒之间接触点增多，在挤压过程中提高了冷压铁矿球团的压实度，减轻了负载下粗颗粒破碎的现象，进而提高了冷强度，同时超细粉的加入强化了固相烧结，使其热强度得到改善[19-21]，而由大量氧化铁皮、高炉烟尘、烧结返矿等粗粒度的物料制成的冷压铁矿球团孔隙较多，接触点较少，且强度较差导致在运输和储存时产生大量细粉。因此，粗细物料的合理配比，可使颗粒能够充分重排，相互填充，增强颗粒之间机械咬合力，有利于提高冷压铁矿球团的强度[22]。

冷压铁矿球团工艺可使用的含铁原料种类繁多，包括铁矿粉、返矿、冶金副产品等，这些材料在与水的亲和能力方面存在差异。当高炉烟尘、烧结返矿这些亲水性差的材料在混合料中占比超过 25% 时，在成型过程中颗粒易发生移动变形，混合料颗粒之间的黏结性能减弱，从而导致强度的降低，在高炉内随其他炉料下降时发生破裂而产生细粉，影响料柱的透气性和炉料的还原[20-22]。除了原料亲水性的影响外，原料塑性和

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

脆性也影响着冷压铁矿球团的强度。若掺入的脆性材料较多，在较大成型压力下这些脆性材料可能发生破碎，导致其抗压强度下降[18]。原料的表面特性和外貌特征同样对冷压铁矿球团强度有着较大影响，像高炉粉尘形状不规则、表面粗糙，且含C量较高，导致亲水性较差，在压块过程中颗粒容易移动，而转炉污泥颗粒尺寸小，比表面积大，在模具内易发生连桥，导致冷压铁矿球团密度不均匀，这都对强度有着显著影响[22]。

2.3 黏结剂对冷压铁矿球团强度的影响

成型工艺中黏结剂起着包裹和吸附材料颗粒的作用，提高了混合料的塑性。此外，黏结剂渗透到颗粒之间的缝隙中，增大了颗粒与颗粒的接触面积。当其固化时，黏结剂在冷压铁矿球团中形成连桥，从而提高了冷压铁矿球团的强度。

冷压铁矿球团中所用的黏结剂包括无机黏结剂、有机黏结剂、复合黏结剂。无机黏结剂具有较好的亲水性和热稳定性，常用的无机黏结有水泥、膨润土、水玻璃、石灰等；而有机黏结剂的冷黏结性能较好，但在高温下的热稳定性较差[23]，通常与无机黏结剂混合使用。在研究有机和无机黏结剂对其强度的影响时，研究人员发现利用有机黏结剂制备的冷压铁矿球团的冷强度明显优于无机黏结剂，如淀粉黏结剂冷压铁矿球团的冷强度明显高于膨润土和水玻璃黏结剂冷压铁矿球团。无机黏结剂本身黏结性能的差异，导致此类球团热强度也有所不同。与常用的无机黏结剂相比，水玻璃、七水硫酸镁黏结剂以及氧化铝水泥能为其提供更好的热强度，为高炉生产提供保障[24-26]。研究发现，黏结剂掺入量不同，冷压铁矿球团强度也有着较大差异[27]。SINGH等[14]报道了此类球团固化后和还原后，其强度随着水泥含量的增加几乎呈线性增长，在实验高炉中观察到其强度随着水泥掺量的增加而增加。MAO等[22]发现当水泥黏结剂用量低于8%时，冷压铁矿球团强度随着黏结剂用量的增加而提高，但当水泥用量超过8%时，受其中含水量的限制，水泥水化作用进行不彻底，部分水泥溢出，导致此球团的强度停止增长，甚至下降。ABDELRAHIM等[28]也发现了相同的现象，且发现与水泥黏结剂相比，钙矾石黏结剂能为其提供更好的机械性能。

复合黏结剂至少由两种黏结剂组成，多种黏结剂的混合使用不仅使其同时具备无机和有机黏结剂的双重优点[23]，而且黏结剂之间的相互作用改变了黏结剂的黏结性能，例如水泥-膨润土复合黏结剂使冷压铁矿球团的断裂从脆性断裂变为黏塑性断裂，并使其在受到外部压力时仍能保持形状的完整[10,29]。MAO等[22]发现水泥和羧甲基纤维素组成的混合黏结与水形成的高分子聚合物对颗粒具有更好的吸附作用，且在固化时形成网络状结构和固化膜，使得冷压铁矿球团的抗压强度和下落强度稳步升高。LI等[24]研究了复合黏结剂冷压铁矿球团的强度，发现复合黏结剂冷压铁矿球团要比烧结矿具有更高的综合强度，且随着复合黏结剂掺入量的增加，其机械强度显著提高。

2.4 成型工艺对冷压铁矿球团强度的影响

成型工艺主要包括辊压、振动压制、真空挤压、圆盘造球，由于不同工艺成型方式的差异，使冷压铁矿球团的机械强度存在差异。辊压、振动压制、真空挤压三者都是利用外部压力，通过模具将混合料压制成型。辊压生产的冷压铁矿球团主要是利用两压辊提供压力使混合料成型，但受到压辊转速、进料速度等因素的影响，导致原料颗粒之间存在较多空气影响了压实度，进而影响此类球团的强度。振动压制和真空挤压两种技术，前者利用高频振动降低了冷压铁矿球团中空气含量，而后者则通过设置真空室除去94%的空气，极大地提高了压实度，使其密度更加均匀，从而使生产的冷压铁矿球团的强度要高于辊压和振动压制生产的冷压铁矿球团的强度[30]。但值得注意的是振动压制生产的冷压铁矿球团需要高温干燥才能具备入炉冶炼的必要强度，而辊压和真空挤压生产的初始冷压铁矿球团本身便具有较高的强度。

3 冷压铁矿球团的冶金性能

3.1 还原性能

冷压铁矿球团作为由含铁废料与黏结剂组成的炼铁炉料，其还原性能的好坏决定了其是否适用于高炉炼铁。该球团由多种原料混合组成，其中由于高炉污泥、转炉污泥、氧化铁皮污泥等含

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

碳原料的存在，使其具有自还原特性[31-32]，而这些高活性的碳使冷压铁矿球团与其他炉料相比可以在更低的温度下还原，且在高温（>800 ℃）时碳气化产生的 CO 大大提高了铁氧化物的还原速度[33-34]。EL-HUSSINY 等[35]发现随着冷压铁矿球团含碳量的增加，其还原性也随之增强。此外，冷压铁矿球团的孔隙率也是影响还原的重要因素，孔隙率的高低决定了还原气体在此球团中的扩散是否顺畅、还原速率的快慢以及达到同一还原度所需时间的长短[36]。冷压铁矿球团还原时表现出多孔结构，且在热处理时形成的熔点高、还原性好的铁酸钙以及副产物中含有的少量铁酸钙对孔隙的形成有利，这促进了 CO 气体在该球团内部的扩散，在高炉内还原时可达到更高的还原度[16,33]。对比在相同温度条件下，高孔隙率的冷压铁矿球团与铁矿石相比具有更加优异的还原性能[16]。OGASAWARA 等[21]在对烧结返矿重新团聚作为高炉原料的研究中报道了冷压铁矿球团的还原性能要高于烧结矿，并推测冷压铁矿球团中高比例的微孔是导致还原性高的主要原因。

3.2　还原膨胀

目前，冷压铁矿球团在高炉炉料中的配比普遍不超过 5%，这与其膨胀性能有关，而且膨胀率的高低对其粉化性能有着直接影响。冷压铁矿球团的膨胀主要与高温下黏结相失效有关，同时铁氧化物还原过程相变及在还原为铁晶须时进一步促进了裂纹的发展，使该球团体积发生膨胀。在高温条件下，冷压铁矿球团虽有膨胀现象发生，但在不同温度下的膨胀率基本都在 20% 以下，且由于铁颗粒烧结效应的影响，随着温度的升高膨胀率急剧下降[16]。VITIKKA 等[34]在研究此类球团高温性能时发现，与其他工艺相比，在不同温度条件下真空挤压工艺生产的冷压铁矿球团的膨胀率要更低。冷压铁矿球团通过改变黏结剂配比和含量、增加小尺寸颗粒在原料中的占比，可以降低还原过程中的体积膨胀和减少裂纹的发展，使高炉运行更加顺畅。实际冶炼过程中，冷压铁矿球团在高炉内受到四周炉料的挤压，其膨胀率要比试验中所测得膨胀率更低[14,28,37]。

3.3　还原粉化

冷压铁矿球团主要是由粉状料制成，其强度的高低和形状的完整性主要靠黏结剂提供。在高炉内还原时，此类球团中黏结剂高温失效以及赤铁矿还原为磁铁矿，体积膨胀导致裂纹的扩展，严重时使其出现破碎粉化的现象，最终导致上部炉料透气性变差。然而黏结相的存在阻断了裂纹的进一步发展，且较高的成型压力使得 Fe_2O_3 在还原为 Fe_3O_4 和 FeO 的过程中球团体积膨胀受到抑制，使其与烧结矿相比具有更优异的还原粉化指数[21,36]。除此之外，选用热稳定性高的黏结剂可以显著改善冷压铁矿球团的粉化性能，例如利用镁基黏结剂制备的冷压铁矿球团在还原后虽发生了断裂，但基本不会产生细粉[25]。LEMOS 等[38]发现在含有粉尘、污泥和黏结剂的混合物中，粉尘质量分数超过 40% 可能会加剧冷压铁矿球团的粉化性能。

3.4　软熔性能

冷压铁矿球团与其他炉料进入炉内高温区后均会经历由固体向液体状态的转变过程，而在炉内形成软熔带的形状和位置影响着高炉的稳定操作及运行，因此研究其软熔性能的优劣对高炉操作有着重要的意义。此类球团的软化性能与组成成分有关，随着成分的变化而产生波动。BIZHANOV 等[39]通过测试不同组成的冷压铁矿球团发现，其软化温度区间为 860～1 220 ℃。这与烧结矿、球团矿和块矿相比更早开始软化，这主要与高温下黏结剂黏结性能失效后，机械强度下降有关。然而，新液态黏结相的形成和部分金属化使其不会因为较早的软化而崩解。冷压铁矿球团高温还原测试中发现，其在 1 200 ℃时便开始熔化，1 360 ℃时完全融化，此温度下 FeO 被大量还原为 Fe，此时该球团组成以金属铁为主[40-41]。在 MEFOS 试验高炉测试冷压铁矿球团软熔性能中，当炉料中冷压铁矿球团质量分数为 10% 时，软熔带温度区间减小，而当其质量分数增至 20% 时，软熔带温度区间略有增加[42]。

4　高炉使用冷压铁矿球团的冶炼指标

4.1　高炉炼铁的技术经济指标

冷压铁矿球团独特的冶金性能，使其在用于高炉炼铁时能达到意想不到的效果（表 1）。由表 1 中冷压铁矿球团用于炼铁的部分经济指标可知，

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

在不同类型的高炉中，随着此类球团在炉料中配比的不断增加，不仅降低了综合焦比，而且铁水的温度也有所提升，使高炉有效容积利用系数得到提升。此外，在我国450 m^3 和2 800 m^3 的高炉试用时，冷压铁矿球团有降低燃料比的作用[43]。由于此类球团中黏结剂的存在，使渣量略有增加，但不会对冶炼过程产生较大影响，同时在小高炉试验时发现，由于受到其含铁品位的影响，使得高炉产率降低。但从经济、环保、优化炉料配比方面综合考虑，高炉炼铁应用冷压铁矿球团能够取得较为满意的效果。

表1 高炉炼铁应用冷压铁矿球团的经济指标[10,44]

Table 1 Economic indexes of blast furnace ironmaking after application of cold-pressed iron ore pellets

冷压铁矿球团添加质量分数/%	高炉体积/m^3	焦比/(kg·t^{-1})	铁水温度/℃
0	2 800	502	1 517
0	45	686	1 380～1 440
5	2 800	490	1 523
80	45	530	1 400～1 450
100	45	490	1 410～1 450

4.2 使用冷压铁矿球团的成本

冷压铁矿球团的工艺对原料的适用范围广、要求较低，可使用品位各异的铁矿粉、含铁、含碳的冶金副产品、返矿等，而且本身低品位矿和冶金副产品价格较低，这意味此类球团的生产成本较低。与其他成型工艺相比，冷压铁球团工艺投资成本低、无需热处理工艺、流程短、工艺简单，以真空挤压工艺为例，该工艺生产设备的使用和维护简单，生产1 t冷压铁矿球团不超过75元[10]，而1 t烧结矿的成本为850～870元。除此之外，根据其成分特点和冶金性能，其作为高炉炼铁炉料可减少焦炭和熔剂的消耗，使得高炉炼铁的综合成本进一步降低。

4.3 对碳排放的影响

冷压铁矿球团技术有效地对富铁、富碳残渣、低品位矿石、返矿进行了开发，这种将铁矿石与含碳材质组成的新型复合冷压铁矿球团是一种低碳炉料，是低碳高炉发展的趋势之一[35]。高炉应用冷压铁矿球团对碳排放影响的主要体现：① 冷压铁矿球团的生产采用冷固结工艺，减少了炉料在高温焙烧工序方面的能耗；② 冷压铁矿球团的添加降低了热储备区的温度，提高了还原效率，使焦炭的入炉量约减少了6%(按综合焦比计，假设冷压铁矿球团中碳对焦炭的置换比为1)，从而达到了减排的目的[10]；③ 其中还原剂的存在降低了入炉焦炭的数量，减少了对应焦炭炼焦所产生的碳排放。综合以上3点考虑，利用冷压铁矿球团冶炼1 t生铁理论上可节省的CO_2排放量约为522 kg。此结果是在小高炉全焦冶炼的数据基础上计算得到的减排量，冷压铁矿球团于大高炉中应用的减排效果有待结合大高炉实际生产的数据进行分析。

5 结 论

(1) 冷压铁矿球团与烧结矿、球团矿和天然块矿相比，在抵抗冲击和抗压能力方面表现出更高的机械强度。通过优化原料组成、选用性能优异的黏结剂、升级成型技术可使此类球团具备更高的强度。

(2) 冷压铁矿球团较好的还原性能和自还原特性使其与其他炉料相比，在入炉冶炼时具备一定优势，且较低的还原膨胀和还原粉化特性能在一定程度上改善料柱的透气性。此类球团要比其他炉料更早的软化，且当其配比小于20%时，并不会对软熔带产生较大的影响。

(3) 冷压铁矿球团的生产采用冷固结工艺，较传统工艺而言，减少了高温焙烧方面的能耗，而且球团中碳的存在减少了焦炭入炉的比例，还原效率也得到提升，使得生产1 t生铁大约可减排522 kg的CO_2。

参考文献:

[1] 韩瑞仕，尹振奎，闫煜欣，等. 加强冶金副产品利用，降低烧结能耗和成本[C]//中国金属学会. 2004年全国炼铁生产技术暨炼铁年会文集. 北京：中国金属学会，2004：872－875.
HAN Ruishi，YI Zhenkui，YAN Yuxin，et al. Strengthen the metallurgical byproducts utilization，reducing the sintering energy consumption and cost [C]//The Chinese Society for Metals. 2004 National ironmaking production

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

technology and ironmaking annual conference. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2004: 872 – 875.

[2] DAS B, PRAKASH S, REDDY P S R, et al. An overview of utilization of slag and sludge from steel industries [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2007, 50(1): 40 – 57.

[3] 朱斌，周进东，赵龚池，等. 高炉内锌的赋存形式及对烧结矿性能的影响 [J]. 钢铁，2020，55(8)：130 – 139；144.
ZHU Bin, ZHOU Jindong, ZHAO Gongchi, et al. Occurrence form of zinc in blast furnace and its influence on sinter performance [J]. Iron & Steel, 2020, 55(8): 130 – 139; 144.

[4] BIZHANOV A M, AUBERTOT C. Sintering and briquetting synergy in blast furnace smelting [J]. Metallurgist, 2021, 65(7 – 8): 699 – 712.

[5] KURUNOV I, BIZHANOV A. Stiff extrusion briquetting in metallurgy [M]. Version 1. Cham: Springer International Publishing AG, 2018: 1 – 21.

[6] KURUNOV I F, BIZHANOV A M. Brex-a new stage in the agglomeration of raw materials for blast furnaces [J]. Metallurgist, 2014, 58(3 – 4): 173 – 178.

[7] 甘胤，王吉坤，包崇军，等. 冷压球团技术在冶金中的研究进展 [J]. 矿产综合利用，2014(1)：10 – 15.
GAN Yin, WANG Jikun, BAO Chongjun, et al. Research progress of cold-bonded pellet technology in metallurgy [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2014(1): 10 – 15.

[8] KURUNOV I. Stiff vacuum extrusion for agglomeration of natural and anthropogenic materials in metallurgy [M]. London: Intech Open, 2018: 36 – 55.

[9] DALMIA Y K, KURUNOV I F, STEELE R B, et al. Production of a new generation of briquettes and their use in blast-furnace smelting [J]. Metallurgist, 2012, 56(3 – 4): 164 – 168.

[10] BIZHANOV A, KURUNOV I, DALMIA Y, et al. Blast furnace operation with 100% extruded briquettes charge [J]. ISIJ International, 2015, 55(1): 175 – 182.

[11] 傅坚，张仁. 硅酸钠黏结剂冷固结球团矿冶炼试验 [J]. 炼铁，1988(4)：37 – 41.
FU Jian, ZHANG Ren. Sodium silicate binder cold-bonded pellet smelting test [J]. Ironmaking, 1988(4): 37 – 41.

[12] 赵东明. 冷压球团矿在锰铁高炉中的应用 [J]. 铁合金，2007(6)：26 – 28.
ZHAO Dongming, Application of cold briquetted ore in ferromanganese blast furnace [J]. Ferro-Alloys, 2007(6): 26 – 28.

[13] 严礼祥. 烧结返矿冷压成球入炉的可行性分析 [J]. 冶金管理，2020(21)：9 – 10.
YAN Lixiang. Feasibility analysis of returning fines of sintering cold-bonded pellets into furnace [J]. China Steel Focus, 2020(21): 9 – 10.

[14] SINGH M, BJORKMAN B. Testing of cement bonded briquettes under laboratory and blast furnace conditions part 1-effect of processing parameters [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2013, 34(1): 30 – 40.

[15] MAKELA M, PAANANEN T, HEINO J, et al. Influence of fly ash and ground granulated blast furnace slag on the mechanical properties and reduction behavior of cold-agglomerated blast furnace briquettes [J]. ISIJ International, 2012, 52(6): 1101 – 1108.

[16] MOHANTY M K, MISHRA S, MISHRA B, et al. A novel technique for making cold briquettes for charging in blast furnace [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016, 115(1): 1 – 11.

[17] BIZHANOV A M, ZAGAINOV S A. Tests of briquettes for mechanical strength [J]. Metallurgist, 2021, 65(3 – 4): 247 – 256.

[18] ABDELRAHIM A, AULA M, ILJANA M, et al. Suitability of self-reducing and slag-forming briquettes for electric arc furnace use based on laboratory tests [J]. Steel Research International, 2022, 93(2): 1 – 42.

[19] SINGH M, BJORKMAN B. Strength of cement-bonded briquettes [J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2006, 23(4): 203 – 213.

[20] SU F, LAMPINEN H, ROBINSON R. Recycling of sludge and dust to the BOF converter by cold bonded pelletizing [J]. ISIJ International, 2004, 44(4): 770 – 776.

[21] OGASAWARA Y, SATO T, ISHII J, et al. Agglomeration of return fines of sinter for blast furnace raw materials [J]. ISIJ International, 2020, 60(7): 1389 – 1394.

[22] MAO Rui, WANG Fei, XU Yuan, et al. Preparation process of cold bonded pellets with iron-bearing dust and sludge from steel production process [J]. Metallurgical Research & Technology, 2021, 118(6): 1 – 9.

[23] ZHANG Guojie, SUN Yinghui, XU Ying. Review of briquette binders and briquetting mechanism [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82(1): 477 – 487.

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

[24] LI Ying,XIONG Yuandong,ZANG Yonggong,et al. Study on properties of cold - bonded briquettes prepared from return fines of sinter [J]. Steel Research International,2022,93(11):1 - 12.

[25] KURUNOV I F,BIZHANOV A M,WAKEEL A K,et al. Behavior of extrusion briquettes in midrex reactors. part 2 [J]. Metallurgist,2016,60(3 - 4):243 - 247.

[26] AOTA J,MORIN L,ZHUANG Q,et al. Direct reduced iron production using cold bonded carbon bearing pellets part 1-laboratory metallisation [J]. Ironmaking & Steelmaking,2013,33(5):426 - 428.

[27] LANZERSTORFER C,BRUNNER C. Agglomeration of iron-bearing fines: selection of the binder for optimal briquette strength under various environments [C]//Tanger Ltd. 29th International Conference on Metallurgy and Materials. Tanger: Tanger Ltd,2020: 31 - 36.

[28] ABDELRAHIM A,NGUYEN H,OMRAN M,et al. Development of cold-bonded briquettes using by-product-based ettringite binder from ladle slag [J]. Journal of Sustainable Metallurgy,2022,8(1):468 - 487.

[29] BIZHANOV A M,KURUNOV I F,DASHEVSKII V Y. Mechanical strength of extrusion briquettes (brex) for blast-furnace and ferroalloy production: i. dependence of the strength properties of extrusion briquettes on the binder [J]. Russian Metallurgy (Metally),2015(3):185 - 190.

[30] BIZHANOV A M,PODGORODETSKYI G S,KURUNOV I F,et al. Experience with the use of extrusion briquettes (brex) to make ferrosilicomanganese [J]. Metallurgist,2013,57(1 - 2):105 - 112.

[31] ANDERSSON A,GULLBERG A,KULLERSTEDT A,et al. Recycling of blast furnace sludge to the blast furnace via cold-bonded briquettes: evaluation of feasibility and influence on operation [J]. ISIJ International,2019,10(59):1786 - 1795.

[32] DAVIDE M,GONCALVES D L,MAPELLI C,et al. Processing and characterization of self-reducing briquettes made of jarosite and blast furnace sludges [J]. Journal of Sustainable Metallurgy,2021,7(4):1603 - 1626.

[33] KEMPPAINEN A,ILJANA M,HEIKKINEN E,et al. Reduction behavior of cold-bonded briquettes under simulated blast furnace conditions [J]. ISIJ International,2014,54(7):1539 - 1545.

[34] VITIKKA O,ILJANA M,HEIKKILA A,et al. Suitability of auger pressing briquettes for blast furnace use based on laboratory tests [J]. Minerals,2022,12(7):1 - 19.

[35] EL-HUSSINY N A,SHALABI M E H. A self-reduced intermediate product from iron and steel plants waste materials using a briquetting process [J]. Powder Technology,2011,205(1):217 - 223.

[36] LI Ying,ZANG Yonggang,XIONG Yuandong,et al. Effect of briquetting pressure on the properties,reduction behavior,and reduction kinetics of cold-bonded briquette prepared from return fines of sinter [J]. Metallurgical and Materials Transactions B,2023,54(1):355 - 369.

[37] SINGH M,BJORKAM B. Effect of processing parameters on the swelling behaviour of cement-bonded briquettes [J]. ISIJ International,2004,44(1):59 - 68.

[38] LEMOS L R,ROCHA S F,CASTRO L F. Reduction disintegration mechanism of cold briquettes from blast furnace dust and sludge [J]. Journal of Materials Research and Technology,2015,4(3):278 - 282.

[39] BIZHANOV A M,BRANGIN V V,BARDAVELIDZE G G,et al. Metallurgical properties of blast furnace extruded briquettes (brex) based on hematite concentrate [J]. Metallurgist,2021,64(9 - 10):862 - 874.

[40] ROBINSON R. High temperature properties of by-product cold bonded pellets containing blast furnace flue dust [J]. Thermochimica Acta,2005,432(1):112 - 123.

[41] BIZHANOV A,PAVLOV A,CHADAEVA O,et al. High temperature reduction of the stiff vacuum extrusion briquettes under the ITmk3 conditions [J]. ISIJ International,2014,54(6):1450 - 1452.

[42] ROBINSON R,SUNDQVIST ÖKVIST L. Recycling of by-product pellets as burden in the blast furnace process: a lab and pilot scale investigation [J]. Steel Research International,2004,75(2):99 - 105.

[43] LI Y,CHEN H,HAMMAM A,et al. Study of an organic binder of cold-bonded briquettes with two different iron bearing materials [J]. Materials,2021,14(11):1 - 17.

[44] **中国金属学会. 科技新进展: 烧结返矿冷压球团技术及其实践** [EB/OL]. 2022 - 08 - 30. https://www.csm.org.cn/art/2022/8/30/art_6317_335572.html.
The Chinese Society for Metals. New progress of science and technology: return fines of sintering the cold-bonded pellets of technique and practice [EB/OL]. 2022 - 08 - 30. https://www.csm.org.cn/art/2022/8/30/art_6317_335572.html.

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