铁矿粉烧结技术进展

姜 曦[1],裴元东[2],韩宏亮[3]

1. 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083
2. 首钢技术研究院,北京 100043
3. 中国科学院过程工程研究所,北京 100190

摘要 在铁矿粉烧结过程中,需要充分把握铁矿粉的烧结行为和作用,考察其同化性、液相流动性、黏结相自身强度、连晶固结强度等烧结基础特性,有助于企业通过烧结优化配矿有效使用铁矿粉资源。近年来,国内外在铁矿粉烧结理论和技术方面取得了长足的进步,尤其体现在低温烧结、厚料层烧结技术的发展、褐铁矿使用技术的完善、预还原烧结的开发、镶嵌式烧结的设计、高温特性研究的不断深入等方面。这些技术的创新主要围绕如何高效利用铁矿粉资源进行,通常是源于资源的劣化和环境的恶化。然而,铁矿粉的优与劣其实是相对的,通过发挥其优势、抑制其劣势的方式,使得这种矿从劣质变为相对的"优质",并通过这些新技术使其优点凸显、缺点被弥补,那么该矿的使用量、技术指标就能得到提高,也就具有"优"的品质。通过这些研究,实现了对劣质铁矿粉资源的高效利用。本文对此进行综述。

关键词 铁矿粉;烧结;烧结技术

中图分类号 TF521 **文献标识码** A **doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.15.009

Progress of Iron Ore Sintering Technology

JIANG Xi[1], PEI Yuandong[2], HAN Hongliang[3]

1. *School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China*
2. *Shougang Research Institute of Technology, Beijing 100043, China*
3. *Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

Abstract The quality of the sinter influences its behavior in the blast furnace and the technical parameters of the blast furnace. The quality and the properties of the sinter are mainly determined by the properties of the iron ore powder. In recent years, the iron and steel industry faces with increasing cost pressures, as the quality of the powder iron ore deteriorates and its price increases. Meanwhile, an important progress is made in the technology of the iron ore sintering, especially in the development of the low temperature sinter and high-depth sinter, the improvement of limonite technology, the design of pre-reduction sintering and Mosaic Embedding Iron Ore Sintering (MEBIOS), and the improvement of high temperature properties of iron ore sintering, which will be briefly reviewed in the present paper. These technologies are aimed for more efficient use of the iron ore powder resource, related with concerns for resource degradation and environmental deterioration. The quality of ore is only a relative concept – a "low" quality ore can become relatively "high" if its strengths are exploited and weaknesses suppressed. These new technologies can reduce the consumption of ore and improve the quality of the final product, which are characteristic of a "good" ore, which means the efficient use of inferior resources.

Keywords iron ores; sintering; sintering technology

0 引言

烧结矿的质量直接影响其在高炉内的行为表现及高炉各项技术指标,而烧结矿的质量和性能又主要取决于铁矿粉的自身性能。近年来,随着铁矿粉资源的劣质化,烧结所用铁矿粉的来源、结构都发生着较大的变化,铁矿粉的自身特性以及铁矿粉在烧结中的行为规律也在一定程度上有所改变。

收稿日期:2011-04-06;修回日期:2011-04-28

作者简介:姜曦,博士研究生,研究方向为当代中国钢铁工业技术,电子信箱:jiangxi610@163.com

针对此,国内外烧结工作者进行了一系列相应的研究。

本文介绍了近些年来国内外在烧结理论和技术方面所取得的进步,主要包括低温烧结、厚料层烧结技术的发展、褐铁矿使用技术的完善、预还原烧结的开发、镶嵌式烧结的设计、高温特性研究等方面。

1　低温烧结技术

低温烧结是相对于传统高温烧结而提出来的概念。以往传统的烧结法,是控制烧结温度,在烧结过程中,物料大部分融化,产生大量熔体,从而完成烧结矿固结[1-2]。低温烧结则是控制烧结温度,使物料部分发生熔化,完成烧结矿固结[3-4]。在低温烧结时,烧结温度低于 1300℃,一般在 1280℃左右最佳。

基于铁酸钙理论的低温烧结矿的冷强度、还原粉化率 RDI、软熔特性和还原性等指标均明显优于高温烧结矿。然而,低温烧结技术所面临的一个重要问题是由于烧结温度的降低,导致烧结液相量不足,从而使烧结矿的强度有所下降。

低温烧结与高温烧结相比,具有如下特点[5-6]。

(1) 烧结温度低。一般在 1280℃左右,有利于复合铁酸钙的形成,以改善烧结矿的强度与还原性。

(2) 高温保持时间长。比高温烧结长 3—5min,有利于针状铁酸钙(SFCA)的形成与发育。

(3) 黏结相为针状复合铁酸钙,显微结构表现为交织熔蚀结构。

低温烧结技术不但能够降低烧结能耗,而且能够提高烧结矿质量指标,已在国内外广泛应用。

2　厚料层烧结技术

料层烧结可以大大改善烧结矿的质量,包括提高烧结矿的冷、热态强度,降低烧结矿的 FeO 含量并提高烧结矿的还原性能,同时也能降低烧结燃料的消耗量并改善烧结厂的劳动条件,这已被国内外烧结工作者实践所证明。早在 20 世纪 50—60 年代,法国在研究低品位鲕状褐铁矿烧结时,发展了高料层烧结工艺,并获得了高质量及低燃耗的烧结矿。此后,日本、澳大利亚等国家广泛使用此项技术。对于以细精矿烧结为主的苏联,于 20 世纪 70 年代积极发展厚料层烧结。进入 80 年代后,烧结料层仍逐渐提高。以烧富矿粉的日本为例,近年来烧结料层厚度均达到或超过 700mm,个别达到 800mm 以上。

国内烧结用精矿为主,近年来厚料层烧结技术也得到进一步发展,平均料层厚度达到 600mm 以上,个别企业可达到 700mm 以上。宝钢采用富铁矿粉烧结,近几年的烧结料层厚度均在 700mm 以上。

3　褐铁矿烧结技术

褐铁矿是一种含结晶水的赤铁矿($Fe_2O_3 \cdot nH_2O$),其粒度较粗,疏松多孔、还原性好,熔化温度低,易同化,堆比重小,烧结混合制粒的适宜水分含量高,因而在烧结过程中表现出其自身的特点:① 烧结速度慢,烧结利用系数低;② 烧结饼组织疏松,成品率低;③ 燃耗高。

由于褐铁矿的易熔性和高烧损,一般认为,烧结混合配料中豆状褐铁矿的配加量不能大于 25%,否则会强烈影响烧结过程和烧结矿质量。在对铁矿粉的烧结特性进行充分研究的基础上,日本学者肥田等[7-8]开发出了“自致密高熔点液相烧结工艺(SHS)”发展烧结液相,从而使烧结混合料中豆状褐铁矿的配加量可以大大提高,而烧结矿的产量和质量并没有多大变化,大大降低了烧结矿的成本,经济效益显著。但是这种烧结方法前期的投资较大,降低了使用低价矿粉带来的经济效益。

澳大利亚 BHP 钢铁公司纽卡索厂使用 0—50%扬迪(Yandi)豆状褐铁矿的工业性试验,认为当扬迪矿配加量在 40%以下时,烧结生产率及燃耗保持不变[9-10]。日本和韩国也在褐铁矿应用方面做了大量的研究。目前,日本的大部分钢铁厂和韩国浦项钢铁厂褐铁矿的配比普遍在 30%以上,高的达 40%—45%,甚至 50%。

中国宝钢从 20 世纪 90 年代初开始研究褐铁矿,1995 年后增加了研究的力度。宝钢经过近年来的研究,基本弄清了几种主要褐铁矿的特性,也逐步掌握了一些工业生产上的对策,如水、碳的调节,机速、料层的调整,矿粉品种、粒度的搭配,粉焦、熔剂粒度的改变,烧结热量的补充等,在技术上为增加褐铁矿的使用比例创造了条件。目前,宝钢褐铁矿的使用比例可达到 50%以上。

褐铁矿烧结技术在中国已经广泛应用,但其使用效果除宝钢等企业较好外,其他企业还需要进一步提高。

4　预还原烧结技术

为了降低高炉能耗和减少 CO_2 排放量,日本 JFE 开发了预还原烧结技术[11],主要通过在造块过程中将铁氧化物还原的方式,使其进入高炉后,节省了还原剂——焦炭,且低温粉化等指标得到改善,最终降低高炉焦比和压差,同时减少 CO_2 排放量。此外,造块过程中还可以使用劣质煤种,进一步减少对优质炼焦煤的依赖。

事实上,最初主要应用于直接还原和熔融还原的含碳球团也可视为一种预还原造块方式,近年来通过重新设计造块方式(如热压含碳球团)为其应用于高炉创造了条件[12]。图 1[13]为含碳球团还原过程示意图。S. Ueda 等[14]发现,还原剂的气化是含碳球团还原的限制环节。图 2[11]为一个 C 消耗与预还原烧结矿的还原度关系示意图。由图可见,随着还原度的提高,烧结工序中能耗升高,但综合高炉能耗,总的能耗是减少的;同时可见,烧结矿的还原度对于降能至关重要,而实际能达到的还原度低(40%—45%)也是预还原面临的一个问题。提高还原度的方法主要依靠配加较多碳实现,但过分熔融易导致 FeO 熔渣量的增加和微气孔的减少,可能对还原度提高

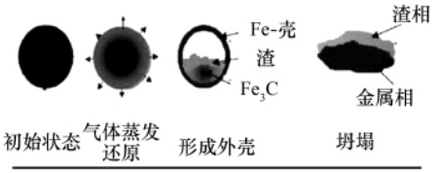

图 1　含碳球团还原过程示意

Fig. 1　Schematic diagram of reduction process

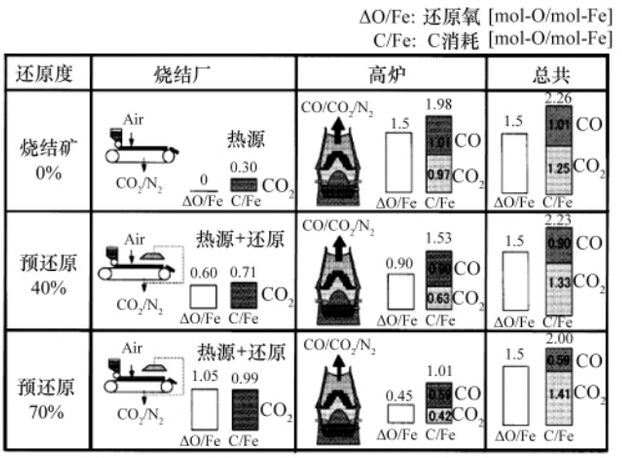

图 2　C 消耗与预还原烧结矿还原度的关系

Fig. 2　Relationship between the carbon consumption and the reduction degree of the pre-reduced sinter

不利。H. Sato 等[15]还发现,在生产预还原烧结矿时,要获得足够的还原度必须要有足够的高温保持。

预还原烧结技术在中国还处于探索阶段,要想实现工业生产,还需要进一步的研究。

5　镶嵌式烧结技术

镶嵌式烧结(MEBIOS)由 E. Kasai 提出(示意图见图 3[16]),初衷是为了利用劣质化的资源(针对针铁矿,尤其是马拉曼巴矿),使其在普通烧结条件下能够形成合适的空隙结构,确保烧结产质量;其方式为通过利用小球附近的边缘效应,提高料层的透气性,且小球自身不会过熔,最终烧结料层能形成较好的空隙结构;烧结料层提供热量,其碱度较高,而致密小球(熟成层)的碱度稍低,主要由马拉曼巴矿制成。

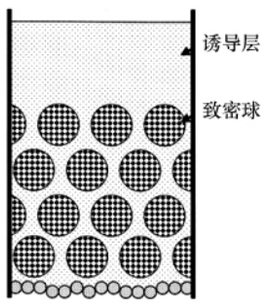

图 3　镶嵌式烧结示意

Fig. 3　Schematic diagram of MEBIOS

该技术在烧结过程中,利用大颗粒边缘的导流作用改善烧结料层的透气性。试验结果表明,此方法能够改善烧结过程的透气性,提高垂直烧结速度,在烧结矿质量基本不变的情况下提高烧结矿的产量[17]。

镶嵌式烧结技术目前已在中国包钢等企业进行工业化生产,并取得了良好的效果,但有待于进一步推广。

6　对铁矿粉高温特性的研究

与化学成分、粒度组成等常温特性相比,高温特性更能反映铁矿粉在烧结过程中的行为和表现,因而对其研究也越来越多。研究方法主要是微型烧结法,通过使用电炉、红外高温炉等设备进行[18]。微型烧结为模拟烧结过程中发生的现象提供了便利,可对铁矿粉与熔剂的反应性,形成熔相的黏度、渗透性,铁矿粉和熔相的同化性,铁矿粉与熔剂混合物的流动性、熔融性,铁矿粉与熔剂形成的黏结相等进行研究。图 4 为几种主要的高温特性研究方法和制样示意图。

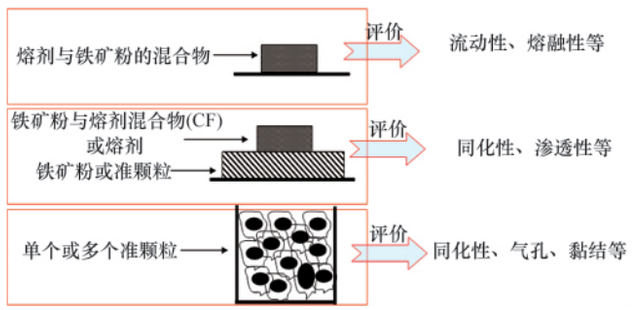

图 4　主要的高温特性研究方法和制样示意

Fig. 4　Methods with high-temperature characteristics

国内学者对铁矿粉高温特性进行了大量研究,如吴胜利等[19-22]发现由不同种类的铁矿粉生成的液相,其流动能力随温度、碱度的变化规律有很大差异,提出了铁矿粉的烧结基础特性并系统地研究了多种矿粉的同化性、液相流动性、黏结相自身强度、连晶强度、熔融性等。沈峰满等[23-26]也就黏结相的熔化特性、流动性、渗透性和润湿性等方面做了大量工作,发现 $n(CaO):n(Fe_2O_3)=1:1$ 时,黏结相的熔化温度最低,熔化时间最短;添加 MgO 黏结相的熔化温度升高,熔化时间变长;当 SiO_2 含量为 3%时,黏结相的熔化温度最低,熔化最快;当 Al_2O_3 含量为 3%时,黏结相的熔化温度最低,熔化最快。通过这些学者的研究,发现铁矿粉的同化性、液相流动性等高温特性,较常温特性更能反映铁矿粉在高温烧结过程中的行为,能够优化烧结配矿,为中国烧结优化配矿奠定了理论基础和技术依据。同时,近年来,国外在铁矿粉烧结理论研究和技术方面也取得了长足的进步,尤其体现在烧结过程相图的发展、预还原烧结的开发、镶嵌式烧结的设计、高温特性研究的不断深入、烧结模拟技术的发展等方面,得到了一些

重要的研究成果。

(1) 决定熔相渗透行为的是铁矿粉脱水前后的表面形态和铁矿粉化学成分。SiO_2 和 Al_2O_3 含量对渗透性起抑制作用。褐铁矿渗透性较差,赤铁矿的则较好[27]。

(2) 熔相的黏度、表面张力和密度等性能决定着黏结相结构,而这些性能又取决于矿物的化学成分和温度。熔相的这些性能决定熔相与气泡的变形与长大行为。烧结过程中主要的阻力来自高温区,但增加其中液相不一定会增加其阻力[28]。

(3) CF 熔相对赤铁矿垫片的润湿性随 SiO_2 和 Al_2O_3 和加入而改善;且熔相黏度和表面张力比值越高,扩散速率越快;SiO_2 和 Al_2O_3 抑制渗透,且熔相黏度和表面张力比值越高,渗透长度越小[29]。

(4) 核矿石的同化和熔相的流动性取决于熔相的化学成分;致密与多孔矿的同化机制存在差异[30]。

7　展望

实质上,烧结技术的进步,总是围绕如何高效利用铁矿粉资源而进行的。技术的创新通常源于资源的劣化和环境的恶化。然而,铁矿粉的优与劣其实是相对的。传统上被称为劣质矿的矿种,可能在某些方面呈现劣质,而在另一方面呈现优质,可以通过发挥其优势、抑制其劣势的方式,使得这些矿种从劣质变为相对的"优质",如果能通过配矿或操作使其优点凸显、缺点弥补,那么该矿的使用量、技术指标就能得到提高,也就具有"优"的品质。

另一方面,只有充分了解铁矿粉的性能,才能在烧结过程中对其高效利用。因此,有必要针对烧结过程,建立评价铁矿粉性能和质量的体系。主要包括如下几方面。

(1) 高温特性较常温特性更能反映铁矿粉在高温作用下的表现和行为,因而更能反映铁矿粉烧结的各项指标。

(2) 对铁矿粉的高温特性重视的同时,不能忽略铁矿粉的常温特性和微观特性,因为后者是基础,尤其在技术发展创新的时候,常温特性如 SiO_2、制粒等,往往成为研究的出发点甚至核心。

(3) 应根据外部环境(资源供应、价格等),确定铁矿粉评价指标的适宜范围,并能随着外部环境的变化,及时地变更铁矿粉评价指标,进而确定使用矿粉及其配比等,实现烧结优化配矿。

在实际的烧结生产过程中,应坚持基于铁矿粉高温特性,运用铁矿粉复合造块工艺,设计优化配矿方案,参考铁矿粉高温特性进行配矿。选择适宜的铁矿粉等烧结原料的结构,运用烧结机"低碳、厚料层"操作制度,依据不同原料条件选择适宜的混合料水分,减小混合料水分波动等措施,稳定和提高烧结矿强度。

参考文献(References)

[1] 王筱留. 钢铁冶金学: 炼铁部分[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
Wang Xiaoliu. Iron and steel metallurgy: Iron making part [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.

[2] 舒敏. SFCA 和低温烧结法简介[J]. 烧结球团, 1984, 9(5): 73-77.
Shu Min. *Sintering and Pelletizing*, 1984, 9(5): 73-77.

[3] 谭金昆. 低温烧结及其技术措施[J]. 烧结球团, 1992, 17(3): 1-4.
Tan Jinkun. *Sintering and Pelletizing*, 1992, 17(3): 1-4.

[4] 张士娟. 低温烧结技术机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 1995.
Zhang Shijuan. Mechanism research on low temperature technology[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 1995.

[5] 蔡湄夏, 曲敬海, 贺淑珍. 低温烧结技术在太钢推广应用的探讨[J]. 钢铁, 2002, 37(1): 1-4.
Cai Meixia, Qu Jinghai, He Shuzhen. *Iron and Steel*, 2002, 37(1): 1-4.

[6] 于强. 铁精矿粉低温烧结技术[J]. 山西冶金, 2005, 28(1): 19-20.
Yu Qiang. *Shanxi Metallurgy*, 2005, 28(1): 19-20.

[7] 李艳茹, 周明顺, 翟立委, 等. 褐铁矿用于烧结的试验研究 [J]. 烧结球团, 2005, 30(1): 4-7.
Li Yanru, Zhou Mingshun, Zhai Liwei, *et al*. *Sintering and Pelletizing*, 2005, 30(1): 4-7.

[8] Hida Y, Okazaki J, Nakamura K, *et al*. Development of high-geothite ore self-densification sintering process [J]. *ISIJ International*, 1992, 20(2): 1021-1028.

[9] Egundebi G O, Whiteman J A. Evolution of microstructure in iron ore sinters[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 1989, 16(6): 379-385.

[10] Zhang S R. The current situation and challenges to Chinese ironmaking [C]//International Symposium on Ironmaking for Sustainable Development. Osaka, Japan, Jan 26-27, 2010.

[11] Sato H, Machida S, Nushiro K, *et al*. Development of production process for pre-reduced agglomerate and evaluation of its quality [J]. *Tetsu-to-Hagane*, 2006, 92(12): 815-824.

[12] Kasai A, Mat sui Y, Miyagawa K. Development of carbon composite in ore hot briquette and basic investigation on its strength enhancing mechanism and reducibility [C]//Science and Technology of Innovative Ironmaking for Aiming at Energy Half Consumption. Tokyo: MEXT, 2003: 119-126.

[13] Gudenau H W, Senk D, Wang S, *et al*. Research in the reduction of iron ore agglomerates including coal and C-containing dust [J]. *ISIJ International*, 2005, 45(4): 603-608.

[14] Ueda S, Yanagiya K, Watanabe K, *et al*. Reaction model and reduction behavior of carbon iron ore composite in blast furnace [J]. *ISIJ International*, 2009, 49(6): 827-836.

[15] Sato H, Machida S, Nushiro K, *et al*. Development of production process for pre-reduced agglomerate using sinter bed[J]. *CAMP-ISIJ*, 2007, 20: 2-4.

[16] Kasai E, Komarov S, Nushiro K, *et al*. Design of bed structure aiming the control of void structure formed in the sinter cake [J]. *ISIJ International*, 2005, 45(4): 538-543.

[17] Kamijo C, Matsumura M, Kawaguchi T. Sintering behavior of raw material bed placing large particles [J]. *ISIJ International*, 2005, 45(4): 544-550.

[18] 段东平, 王树同, 孔令坛. 微型烧结法分析 [J]. 北京科技大学学报, 2000, 22(5): 422-426.
Duan Dongping, Wang Shutong, Kong Lingtan. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2000, 22(5): 422-426.

[19] 吴胜利, 刘宇, 杜建新, 等. 铁矿石的烧结基础特性之新概念[J]. 北京科技大学学报, 2002, (24)3: 254-257.
Wu Shengli, Liu Yu, Du Jianxin, *et al*. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2002, 24(3): 254-257.

[20] 吴胜利, 刘宇, 杜建新, 等. 铁矿粉与 CaO 同化能力的试验研究[J]. 北京科技大学学报, 2002, (24)3: 258-261.
Wu Shengli, Liu Yu, Du Jianxin, *et al*. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2002, 24(3): 258-261.
[21] 吴胜利, 杜建新, 马洪斌, 等. 铁矿粉烧结黏结相自身强度特性[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(2): 169-172.
Wu Shengli, Du Jianxin, Ma Hongbin, *et al*. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2005, 27(2): 169-172.
[22] 吴胜利, 杜建新, 马洪斌, 等. 铁矿粉烧结液相流动特性[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(3): 291-293.
Wu Shengli, Du Jianxin, Ma Hongbin, *et al*. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2005, 27(3): 291-293.
[23] 李光森, 金明芳, 姜鑫, 等. 烧结矿黏结相的熔化特性[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2008, 29(5): 697-700.
Li Guangsen, Jin Mingfang, Jiang Xin, *et al*. *Journal of Northeastern University:Natural Science*, 2008, 29(5): 697-700.
[24] Kasai E, Sakano Y, Kawaguchi T, *et al*. Influence of properties of fluxing materials on the flow of melt formed in the sintering Process[J]. *ISIJ International*, 2000, 40(9): 857-861.
[25] 金明芳, 李光森, 窦力威, 等. 铁酸盐粘结相熔化速率及对烧结强度的影响[J]. 钢铁, 2009, 44(1): 7-11.
Jin Mingfang, Li Guangsen, Dou Liwei, *et al*. *Iron and Steel*, 2009, 44(1): 7-11.
[26] 金明芳, 李光森, 姜鑫, 等. 矿石特性对 $CaO-Fe_2O_3$ 系熔体渗透性的影响[J]. 中国冶金, 2007, 17(7): 51-54.
Jin Mingfang, Li Guangsen, Jiang Xin, *et al*. *China Metallurgy*, 2007, 17(7): 51-54.
[27] Okazaki J, Higuchi K, Hosotani Y, *et al*. Influence of iron ore characteristics on penetrating behavior of melt into ore layer [J]. *ISIJ International*, 2003, 43(9): 1384-1392.
[28] Loo C E. A perspective of goethitic ore sintering fundamentals [J]. *ISIJ International*, 2005, 45(4): 436-448.
[29] Nakashima K, Saito N, Shinozaki S, *et al*. Wetting and penetration behavior of calcium ferrite melts to sintered hematite [J]. *ISIJ International*, 2004, 44(12): 2046-2051.
[30] Debrincat D, Loo C E, Hutchens M F. Effect of iron ore particle assimilation on sinter structure [J]. *ISIJ International*, 2004, 44(8): 1308-1317.

(责任编辑　朱宇)

·学术动态·

“中国工程科技论坛——2011 年国防科技工业科学发展论坛”征文

由中国工程院主办,中国兵工学会、中国工程院机械与运载工程学部承办的“中国工程科技论坛——2011 年国防科技工业科学发展论坛”将于 2011 年 8 月在北京召开。论坛主题为“从理论和实践方面阐述国防科技工业科学发展的重大意义;转变增长方式,实现军民融合式发展的途径;如何破除实现军民融合式发展的体制性和机制性障碍”。

征文范围:军民结合、保军转民、寓军于民、军民融合是一脉相承的理论体系(论述理论内涵、重大战略意义);如何建立市场经济环境下开放式国防科研生产体系和公共服务体系? 如何把握国家创新体系建设中有关军民融合的问题;科技资源配置和人才队伍建设中的军民融合问题探讨;实施军工国家重大专项过程中的军民融合问题(涵盖基础建设、规划预研、工程设计、项目管理等诸方面);有关军民融合的政策法规、投资融资、产业集群化、军地结合、资源整合、许可准入等。

通信地址:北京 2431 信箱(100089)

联系电话:010-68962461,68963154;电子信箱:gfkjlt@126.com。

科技导报 SCIENCE & TECHNOLOGY REVIEW

《科技导报》“科技要闻”栏目征稿

“科技要闻”栏目主要选登各类媒体报道的自然科学领域近期的重要科技研究成果新闻。欢迎各研究课题组和科技工作者个人推荐或自荐新闻,每条新闻约 300 字。栏目责任编辑:杨书卷,投稿信箱:yangshujuan@cast.org.cn。