

高温微波反应器工业化应用部分 关键问题分析

罗会龙^{1,2}, 彭金辉¹, 张利波¹, 郭胜惠¹, 刘秉国¹

(1. 昆明理工大学材料与冶金工程学院, 云南 昆明 650093;

2. 昆明理工大学建筑工程学院, 云南 昆明 650224)

摘要: 简述了高温微波反应器的工作原理及国内外研究现状。重点分析了高温微波反应器工业化应用在微波高温陶瓷材料、大功率微波发生器、物料温度测试及数值模拟、设备的适应性等方面存在的主要问题, 并展望了高温微波反应器的工业化应用前景。

关键词: 微波; 高温反应器; 工业应用

中图分类号: TQ052.6; TM924.76

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2009)05-0076-04

Analysis on some key problems of industrial application of high-temperature microwave reactor

LUO Hui-long^{1,2}, PENG Jin-hui¹, ZHANG Li-bo¹, GUO Sheng-hui¹, LIU Bing-guo¹

(1. Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Faculty of Architecture Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)

Abstract: The working principle and research progress in high-temperature microwave reactor are introduced briefly. In the fields of microwave high-temperature special ceramics, high-power micro-wave generator, temperature detection numerical simulation and equipment applicability, the key problems of industrial application of high-temperature microwave reactor are analyzed. The application prospect of high-temperature microwave reactor is also predicted.

Key words: microwave; high-temperature reactor; industrial application

微波加热作为一种工业加热技术早在 60 多年前就已经产生^[1]。与传统的加热方式相比,微波加热具有选择性加热、升温速率快、易于实现自动控制及可降低化学反应温度等优点^[2]。因而,微波加热在工业上的应用日益广泛。然而目前国内外微波加热设备主要集中在低温加热应用方面,如食品处理、木柴干燥、橡胶硫化等,微波高温加热设备的应用较少^[3]。微波高温加热是指利用微波能量将物料加热到 400℃ 以上,并对物料进行烧结、合成、改性或者热处理的一种技术^[4]。国内外相关学者的研究表明,高温微波反应器应用于冶金物料高温煅烧及难选矿物预处理可有效减少能源消耗、强化矿物表面化学性能,可望开发出在常规加热条件下无法实现的冶金新技术和新工艺,以改造某些传统的冶金工艺和技术^[5-7]。

近年来,微波高温加热领域的研究日益受到人们的关注,并成功地开展了小功率高温微波加热装

置陶瓷烧结、微波助磨、难处理矿物预处理的实验研究^[8-12]。为有效促进高温微波反应器的工业化应用,在微波专用高温陶瓷、大功率微波源、物料温度的测试及数值模拟、设备的适用性等方面尚需进行深入分析与研究。

1 工作原理

微波是一种电磁波,其频率在 300 MHz ~ 300 GHz。在微波高温加热设备中,目前允许使用的 2 种频率分别为 2.450 GHz 和 0.915 GHz。根据物料自身电磁特性,微波能够穿透一定厚度的物料。在电磁场中,极性偶极子分子总是试图随着迅速改变的电磁场方向调整其取向。当物料处于微波场中时,通过物料自身可极化粒子(如分子、离子、原子等)随微波电磁场快速的改变、粒子间相互摩擦耗散微波能产生热量加热物料^[13]。因此,与常规加热不同,微波加热不需由表及里的热传导,而是通过微波

收稿日期:2009-01-09

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50734007)

作者简介:罗会龙(1972-),男,博士,教授,从事微波高温加热设备传热传质数值模拟研究, huilongluo@kmust.edu.cn。

在物料内部的能量耗散来直接加热物料,可有效地减少物料内部的温度梯度。

高温微波反应器的基本构成主要由变压器、整流器、微波发生器、波导管和谐振腔等主要部件组成。微波发生器一般采用磁控管、调速管或磁旋管,其产生的微波经波导管馈入谐振腔中,对放置在腔体中的物料进行加热。由于波导管并不总与谐振腔完全匹配,因此一部分微波从谐振腔被反射回波导管。环形器将被反射回波导管的微波经导向水负载,从而有效保护微波发生器。

2 研究现状

高温微波反应器主要包括单模腔式高温微波反应器、多模腔式高温微波反应器和波导型高温微波反应器3种形式^[14]。目前,高温微波反应器的研究及应用以多模腔式高温微波反应器占主导地位。

单模腔式高温微波反应器是在标准矩形波导中激起单一基模微波传输的一种反应器,在其谐振腔中心处可建立起很高的电场强度^[14]。因而单模腔式高温微波反应器谐振腔中心处功率密度大,可实现物料快速升温,适用于小尺寸材料的高温处理。但是由于单模腔式高温微波反应器腔体体积小,均温区小,只能进行尺寸较小的试样分批处理,难以应

用于大尺寸材料的加工和连续生产,适用范围有限^[15]。

多模腔式高温微波反应器的主体采用由金属壁封闭的矩形多模谐振腔体,其三维尺寸主要由被处理物料的大小,微波功率密度和谐振腔内微波模式的多少及分布来确定^[14]。近年来,随着微波加热技术的发展,各种多模腔式高温微波反应器的实验装置及中试设备相继研制成功,其中部分高温微波反应器设备在陶瓷烧结、金属氧化物的碳热还原等领域得到了小规模工业化应用^[16-17]。

波导型高温微波反应器主要由矩形波导谐振腔、石英反应管以及耦合膜片3部分组成。微波能量通过耦合膜片馈入谐振腔,调节短路活塞使谐振腔达到谐振状态。馈入谐振腔的微波能量作用于石英反应管内的原料气体,使其发生化学反应。波导型高温微波反应器结构简单,容易制造,但只适用于处理尺寸较小的细杆或薄带材料,并且石英反应管内存在一定的反应不均匀性^[18]。

3 工程化应用的部分关键问题

3.1 高温微波加热专用陶瓷材料

在高温微波反应器中,待加热物料置于谐振腔中的陶瓷管内,馈入谐振腔的微波能需穿过陶瓷

(上接第75页)

4 结语

粗苯的主要成分是苯、甲苯、二甲苯等单环芳烃,是工业上制取该类有机化合物的重要原料。噻吩及烷基噻吩的加氢脱除是粗苯加氢精制的关键。与粗苯高温加氢精制法相比,粗苯低温加氢精制法更是适合我国国情的粗苯精制方法。研制脱硫脱氮活性高、强度大、抗粉化能力好的粗苯低温法加氢精制催化剂和优化其工艺流程,从而进一步降低粗苯低温法加氢精制的投资建设费用以及BTX的生产成本是当前粗苯加氢精制研究的重要方向。

参考文献

- [1] 杨瑞平.粗苯酸洗工艺与加氢工艺的比较[J].燃料与化工,2006,37(6):41-43.
- [2] 杜雄伟,凌开成,申俊.焦化粗苯及其深加工的探讨[J].现代化工,2007,27(增刊):344-348.
- [3] 吕国志,叶煌.国内焦化粗苯加工发展趋势[J].燃料与化工,2006,37(1):35-38.
- [4] 王建华,周晓,耿瑞增.粗苯低温催化加氢和萃取精馏精制[J].

煤气与热力,1998,18(5):17-20.

- [5] 景志林,杨瑞平.粗苯加氢精制工艺技术路线比较与选择[J].煤化工,2007(6):8-11.
- [6] 薛璋.宝钢Litol法与K.K法粗苯加氢的对比[J].燃料与化工,2006,37(3):32-36.
- [7] Nonnenmacher H, Mannheim, Von Fuener W. Purification of crude benzol:US,2705773[P].1955-04-05.
- [8] Reitz O, Heidelberg, Von Fuener W. Purification of crude benzol:US,270209[P].1955-04-12.
- [9] 杨煌,林恒生,陈受斯,等. Cr-Mo-Al₂O₃ 催化剂用于焦化粗苯加氢精制的研究[J].燃料化学学报,1981,10(1):12-19.
- [10] 陈受斯,薛文华,张日廉,等.焦化粗苯加氢精制复合床催化剂及其制法和用途:中国,1100004A[P].1995-03-15.
- [11] 廖炯,陈耀状,鄢义,等.一种用于粗苯加氢脱硫脱氮制精苯的催化剂及其制备方法:中国,1947841A[P].2007-04-18.
- [12] 北京化工大学.负载型非晶态焦化粗苯预加氢催化剂的制备:中国,1701848A[P].2005-11-30.
- [13] 北京化工大学.制备高分散、非晶态、高效新型脱硫催化剂:中国,1724163A[P].2006-01-25.
- [14] 薛璋.低温苯加氢装置要点探讨[J].燃料与化工,2008,39(5):41-45.
- [15] 任培兵.粗苯加氢工艺催化剂的再生[J].燃料与化工,2007,38(5):36-37. ■

管壁进入待加热物料。因而,高温微波反应器专用陶瓷材料应为微波透波材料,具有较低的介电系数和介电损耗角正切值,对微波电磁波的透过率应高于 70%。另一方面,高温微波反应器的陶瓷材料不仅需要具备普通耐火材料所具有的基本理化性质,而且在高温条件下能够经受结构应力、各种物理、化学和机械作用,其热膨胀系数应较低,耐火度高(一般需高于 1 580℃),同时具有一定的机械强度^[19]。

高温微波加热陶瓷材料是耐火材料的新分支。缺乏理想的高温微波加热陶瓷材料已成为制约高温微波反应器工业应用的技术瓶颈。高温微波反应器专用陶瓷材料的电磁、机械性能及热物理性质取决于微波冶金耐火材料的组分、粒度、相态及密度等关键因素。目前,高温微波加热陶瓷材料主要包括硅酸铝质制品、硅质制品、镁质制品、碳质制品及纯度较高的氧化物制品等,其中纯物质耐火材料是目前应用比较理想的高温微波加热陶瓷材料^[20-21]。为有效提高高温微波加热的热效率,进一步开发具有优良电磁、机械性能及热物理性质的高温微波加热陶瓷材料对促进高温微波反应器工业应用尤为重要。

3.2 大功率微波发生器设计

工业加热所处理的物料量通常很大,因而单个设备所需加热功率也相应较大。目前,大功率微波发生器的设计是高温微波反应器工业化应用的另一技术瓶颈。提高高温微波反应器微波功率的途径主要包括增大单个磁控管的功率及多微波功率源功率合成技术^[22-23]。大功率磁控管一方面生产成本高,价格昂贵,不利于高温微波反应器的推广应用;另一方面,受高功率微波的物理产生机制以及器件工艺结构等限制,单个磁控管的微波功率也很有限,如在 915 MHz 频率下,目前单个磁控管最大功率为 75 kW,难以满足工业加热的功率需求。

采用多个小功率微波源进行功率合成是大功率高温微波反应器设计的一个新的发展方向。多微波源功率源功率合成包括相干功率源及非相干功率源的合成 2 种方式。在高温微波反应器中,功率源在实际工作时其相位和频率随机变化,因此多个微波源的功率合成实际上是非相干源的合成。利用时域有限差分法(FDTD)、有限元法(FEM)等电磁场数值计算方法,求解 Maxwell 方程组可获得谐振腔内的电磁场分布静态微波能量分布。结合待加热物料的电磁参数及热传导方程,可进一步求解耗散功率及物料的温度分布^[24]。在此基础上,根据待加热物料的电磁特性、热物性参数及加热工艺对高温微波反应

器的谐振腔体进行优化设计,以有效提高微波能及温度分布的均匀性。

3.3 微波加热高功率微波场中温度测量

在高温微波反应器中,物料的温度是重要的工艺及控制参数。在功率密度相对较低的微波场中,可采用带屏蔽保护套的常规热电偶测温或热敏电阻-高阻导线组成的抗电磁干扰温度传感器进行测量,但上述方法在连续测温、自动控温方面都不太理想,并且仍存在一定的电磁干扰^[25]。

光纤测温是 20 世纪 70 年代发展起来的一门新兴测温技术,与传统温度传感器相比,光纤温度传感器有一些独特的优点,如抗电磁干扰、耐高压、体积小、质量轻等,为功率密度较高的微波场测温问题提供了一条新的途径^[26]。较适用于微波场测温的主要有以下几类:①半导体吸收式光纤温度传感器;②荧光辐射式光纤温度传感器;③光纤液晶温度传感器;④光纤辐射温度传感器;⑤接触式点传感器。但目前光纤温度传感器仍处在研究发展阶段,并且由于产品稳定性较差、造价高,限制了它在微波场测温中的推广应用。

红外测温仪根据被测物的红外辐射强度确定其温度,是一种非接触测量仪表,用于物体的表面温度测量较方便。但红外测温仪用于高温微波反应器测温存在视场小的局限,并且不能检测物料内部的温度。此外,超声波测温仪也可用于微波场中温度测量。但超声波测温仪造价昂贵,并且有待于进一步研究开发。

3.4 微波高温加热数值模拟

在微波高温加热研究领域,建立高温微波反应器内物料的传热、传质模型,通过数值模拟及实验测试,一方面可精确了解高温反应器内微波场和温度的分布,从而对物料进行加热工艺的优化控制;另一方面,可进一步研究外部条件变化对反应过程的影响,得到微波加热物料过程的一般规律,实现高温反应器在高温条件下的正常运行。

目前,对微波加热温度的数值模拟基本上集中在低功率、低温段、单模式、小体积和单一物料方面,如在食品的加热、保鲜以及木材的干燥等^[27]。在上述应用领域中,物料在加热过程中温度变化范围不大,其电磁参数和热物性参数变化不明显,数值模拟时可近似处理为常数,加热过程是线性的,数值模拟相对较简单。在微波反应器中,一方面随物料温度的升高,其介电常数、电导率等电磁参数及定压比热、导热系数等热物性参数相应变化,加热过程是非

线性的。另一方面,微波反应器中物料多是混合物,物料的介电常数及热性能相差较大,且难以测定。因此,物料变温介电常数及热物性参数等基础数据的严重缺乏影响微波加热温度分布数值模拟研究。

3.5 高温微波反应器的适应性

高温微波反应器中谐振腔内的微波能量分布不仅与微波源、波导、谐振腔的结构及尺寸等因素密切相关,而且受物料的形状、数量、电磁和热物性参数的影响。由于不同物料的电磁特性热物性参数差异较大,加热工艺也不尽相同,因而对于给定的物料需要设计专用的高温微波反应器,使得高温微波反应器难以成为一种通用型设备。为有效促进高温微波反应器的工业应用,应设法提高其适应性。在这一研究领域,需要借助于高温微波反应器内物料传热、传质模型,通过更换模拟物料,分析数值计算模型的适应性。在此基础上,结合模拟物料的加热工艺,可优化高温微波反应器应用于不同物料、不同功率规格的移植性方案,为高温微波反应器工程设计提高理论指导。

4 结语

目前,高温微波反应器在高温微波专用陶瓷、大功率微波发生器、设备的适应性、谐振腔内物料温度测量及数值模拟等方面均存在部分尚需解决的问题。但与传统的工业加热设备相比,高温微波反应器具有选择性加热、升温速率快、温度分布均匀、易于实现自动控制等优点,符合工业加热设备高效、清洁、易于自控的发展方向,并且已经在纳米陶瓷、介电陶瓷、磁性材料及炭热还原合成冶金材料等方面小规模应用,具有广阔的工业化应用前景。随着微波与物质作用机理研究的深入、相关技术瓶颈的不断突破,高温微波反应器可望在新材料制备、难处理稀缺矿石处理等领域率先获得工业化应用。

参考文献

[1] Ford J D, Pei D C T. High temperature chemical processing via microwave absorption[J]. *Journal Microwave Power*, 1967, 2(2): 61 - 64.
 [2] Tinga W R, Voss Wag. *Microwave Power Engineering*[M]. New York: Academic Press, 1968.
 [3] Yu V B, Rybakov K I, Semenov E. High-temperature microwave processing materials[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2001, 34(13): 55 - 75.
 [4] 彭虎, 李俊. 微波高温加热技术进展[J]. *材料导报*, 2005, 19

(10): 100 - 103.
 [5] Kingman S W, Jackson K, Cumbane A, *et al.* Recent development in microwave-assisted combination[J]. *Int J Miner Process*, 2004, 74(1): 71 - 83.
 [6] Haque K Z. Microwave energy for mineral treatment processes: A brief review[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 1999, 57(1): 1 - 24.
 [7] Kingman S W, Rowoson N A. Microwave treatment of minerals: A review [J]. *Minerals Engineering*, 1998, 11(11): 1081 - 1087.
 [8] 赵秦生. 微波在黑钨精矿的苏打烧结中的利用[J]. *稀有金属与硬质合金*, 2003, 31(1): 51 - 52.
 [9] 秦文峰, 彭金辉, 樊希安, 等. 微波煅烧钼酸铵制备高纯氧化钼新工艺[J]. *新技术新工艺*, 2004(4): 42 - 44.
 [10] 杨晓青, 秦文峰. 微波加热技术在钼工业中的应用[J]. *中国钼业*, 2005, 29(2): 43 - 46.
 [11] 陈舰, 叶君怡. 微波加热技术的应用: 微波烧结陶瓷材料[J]. *东莞理工学院学报*, 2005, 12(1): 92 - 95, 98.
 [12] 吴国元, 戴永年. 微波能在冶金中的应用[J]. *有色矿冶*, 1998(5): 41 - 44.
 [13] Galema S A. Microwave chemistry[J]. *Chemistry Society Review*, 1997, 26: 233 - 238.
 [14] 金钦汉. *微波化学*[M]. 北京: 科技出版社, 2001.
 [15] 彭金辉, 杨显万. *微波能技术新应用*[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1997.
 [16] 邹继兆, 曾燮榕, 熊信柏, 等. 微波高温加热真空系统的研制[J]. *微波学报*, 2006, 22(6): 67 - 70.
 [17] Pickles C A. Microwave heating behaviour of nickeliferous limonitic laterite ores[J]. *Minerals Engineering*, 2004, 17(6): 775.
 [18] 孙永志, 杨鸿生. 矩形波导谐振腔微波化学反应器的研究[J]. *电子学报*, 2006, 34(9): 1708 - 1710.
 [19] 陈津, 赵晶, 冯秀梅, 等. 微波冶金耐火材料研究[J]. *工业加热*, 2006, 35(3): 56 - 60.
 [20] 郑兴华, 俞建长, 汤德平. 高介电常数微波介质陶瓷[J]. *山东陶瓷*, 2004, 27(6): 28 - 32.
 [21] 艾涛, 王汝敏. 航天透波材料最新研究进展[J]. *材料导报*, 2004, 18(11): 12 - 15.
 [22] Raner K D, Thorn J S. New microwave reactor for batchwise organic synthesis[J]. *Journal of Organic Chemistry*, 1995, 60(8): 2456 - 2460.
 [23] Breccia A, Fini A, Feroci G, *et al.* Coupled systems dielectric microwave to improve thermal effects[J]. *Microwave Power*, 1995, 30(1): 3 - 9.
 [24] 叶君永, 黄卡玛. 随机相位和随机频率微波加热效应的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(12): 1576 - 1570.
 [25] 王世杰. 一种抗强电磁场干扰的温度传感器[J]. *传感器技术*, 1996(1): 491 - 51.
 [26] 刘迎春, 叶湘宾. *现代新型传感器原理及应用*[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
 [27] Herve A G, Tang J, Luedecke L, *et al.* Dielectric properties of cottage cheese and surface treatment using microwaves[J]. *Journal of Food Engineering*, 1998, 37(4): 389 - 410. ■