



氮化硅陶瓷微波烧结几何参数对电磁场分布影响规律的研究

杨辉,徐伟伟*,石子雨,闫国栋,周钧豪
(南京工程学院,江苏南京 211167)

摘要:在微波烧结过程中,烧结试样内部电场分布情况对试样烧结过程起决定性的作用。采用 HFSS 仿真软件,对一种加载氮化硅试样的 5 馈口微波烧结腔进行模拟仿真。同时,研究了试样的半径、高度及放置位置对微波电场的影响规律。模拟结果表明:当试样半径在 42—44 mm 左右时,内部电磁场分布均匀;随着试样高度的增加,电场的均匀性先下降后上升到最大值后又下降,试样高度在 92—94 mm 处附近时内部电磁场分布较为均匀、场强梯度小;随着放置高度的增加,试样内均匀性上升,但超过一定高度后电磁场均匀性下降;经比较研究,得出电磁场分布均匀、符合烧结要求的最佳烧结试样尺寸为高度 93 mm、半径 44 mm、放置高度 215 mm。

关键词:微波烧结;三维电磁仿真;加热均匀性;氮化硅;波导;电磁场;陶瓷材料;影响因素

中图分类号:TQ174

文献标志码:A

文章编号:1673-9981(2024)01-0031-06

引文格式:杨辉,徐伟伟,石子雨,等.氮化硅陶瓷微波烧结几何参数对电磁场分布影响规律的研究[J].材料研究与应用,2024,18(1):31-36.

YANG Hui, XU Weiwei, SHI Ziyu, et al. Study on the Influence Law of Geometrical Parameters of Microwave Sintered Silicon Nitride Ceramic Materials on Electromagnetic Field Distribution[J]. Materials Research and Application, 2024, 18(1): 31-36.

0 引言

微波烧结加热方式与传统烧结的热辐射加热方式不同,微波烧结是通过微波电磁场内的介质材料极化消耗产生的热量进行加热。相较于传统烧结,微波烧结有着独特的优点,即烧结材料本身作为热源无需热传导过程、材料内部温度梯度低不会产生残余应力^[1-6]。微波烧结时升温速率快,相比于传统烧结方式能够节约 50%—90% 的加热时间^[7]。微波烧结陶瓷材料相较于传统烧结所需烧结温度可以下降 100—300 °C^[8],从而使得材料在低温环境下快速烧结,提高了烧结效率,同时可使得材料晶粒细化而提高致密性^[9-14]。因此,近些年来微波烧结在陶瓷烧结领域中得到了广泛地应用。由于微波烧结时热量是由烧结腔内电磁场与材料微观耦合作用产生的结果,随着温度的升高材料介电属性会发生变化,介电损耗会随着温度的变化而产生相应地变化,这导致了材料对微波吸收能力产生变化,从而引起了试样内部电场的变化。因此,需要使烧结样品处于相对均匀的电磁场环境中,以保证在烧结过程中样品内部电场均匀,防止局部过烧及局部欠烧。由于过

强的场强会导致烧结时容易打火,从而出现“热点”现象导致试样开裂,而过低的场强则会使得烧结过程中产生的热量不足影响烧结。因此,需要了解烧结时样品内部电场分布,确定合适烧结的样品尺寸及烧结位置。

近年来,部分国内外学者对影响烧结腔内电场的因素进行了研究。张景强^[15]研究了微波烧结腔内馈口数量对微波电磁场的影响,发现当馈口数量为 3、大小为 70 mm×50 mm×20 mm 时,烧结炉内电磁场分布效果最佳。殷增斌^[16]研究了微波电场和温度随试样加载方式的变化规律,发现当多个试样平行放置于烧结腔中心位置时,试样内部电场场强均匀、温差低。曹湘琪^[17]研究了烧结腔馈口位置及长度对加热效率的影响,发现当两馈口间夹角大于 120°、馈口长度大于 30 cm 时,加热效率较高。吕晶^[18]研究了试样几何参数对电场分布的影响,发现当试样尺寸为高度 77 mm、半径 30 mm 时,场内均匀性比最高。但是,目前研究通常是针对粉末、硬质合金、金属等材料的烧结,烧结温度不超过 1 400 °C,而对于陶瓷刀具等陶瓷而言,烧结温度通常高达

收稿日期:2023-06-04

基金项目:国家自然科学基金项目(52205471);江苏省高等学校自然科学基金项目(21KJB460022);高层次引进人才科研启动基金项目(YKJ202004)

作者简介:杨辉,硕士研究生,研究方向为陶瓷刀具。E-mail:847313648@qq.com。

通信作者:徐伟伟,博士,讲师,研究方向为先进制造工艺与装备。E-mail:xuweiwei@njit.edu.cn。

1 600 °C, 这便对烧结时试样内部电场强度及均匀性提出了更高的要求。如今市面上的微波烧结炉型号多样, 确定烧结试样几何参数与烧结腔的匹配性至关重要。本文采用型号为NL-5KW的烧结炉, 仿真研究了氮化硅材料不同尺寸及烧结放置位置对微波电场分布影响规律。

1 实验部分

通过对型号为NL-5KW的微波高温烧结设备的烧结腔场强分布情况进行了仿真分析, 利用HFSS自带的建模功能对实验模型进行建模(见图1)。其中, 圆柱形烧结腔尺寸高为530 mm、半径为300 mm, 馈口所用波导为BJ-26型波导, 4个馈口放置位置为对称放置, 馈口之间正交布置, 第五个馈口介于4个馈口之间呈45°夹角放置。各馈口功率设置为1 kW, 总汇入功率为5 kW。

实验试样为圆柱形氮化硅, 将其放置于烧结腔高度方向265 mm处。设置电磁波激励频率为2.45 GHz, 烧结腔内部保持真空, 腔壁材料设置为不锈钢, 边界条件设置为理想边界。

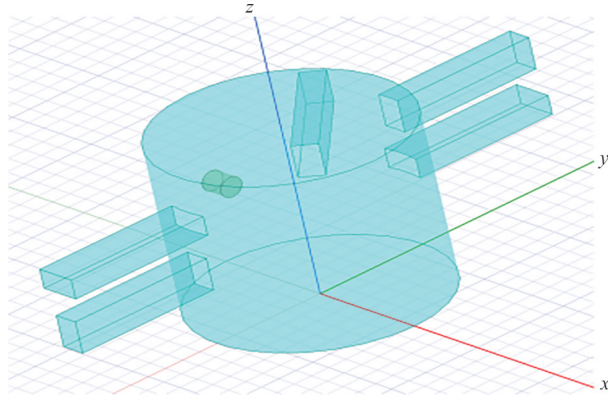


图1 烧结腔模型
Figure 1 Sintering cavity model

2 结果分析与讨论

2.1 试样半径对电磁场的影响

试样采用氮化硅材料, 高度分别固定为30、60和90 mm。采用控制变量法控制试样半径的变化进行仿真分析, 半径作为可变参数, 设置变化范围为10—100 mm、步长为10 mm, 通过仿真模拟得到不同半径下试样内部场强情况, 以及场分布情况。

图2为高度30 mm试样电场横截面图。从图2可见: 当试样固定高度30 mm时, 由于试样高度过小, 试样内部电场分布极不均匀; 随着试样半径的增加, 试样内部热点区域向试样边缘转移; 当半径大于50 mm时, 试样中心成为场强最低处, 并且随着半径的增加低场强区域扩散。

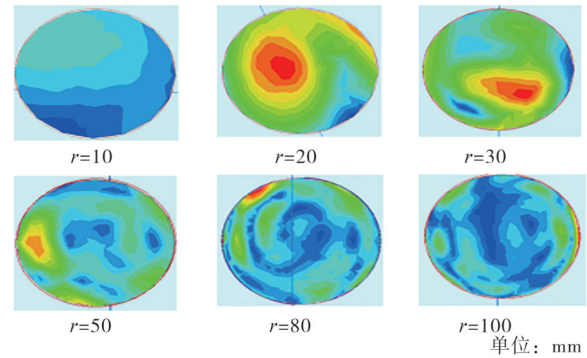
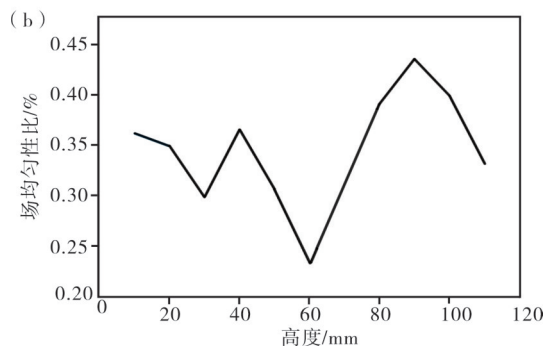
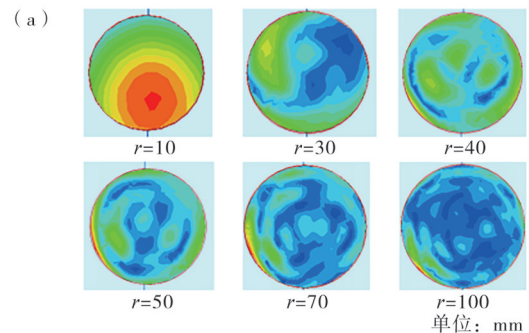


图2 高度30 mm试样电场横截面图

Figure 2 Cross-sectional view of the electric field of a sample with a height of 30 mm

图3为试样半径为10—100 mm的电场横截面图及场均匀性比图。从图3可见: 增加试样高度至90 mm时, 试样内部电场分布趋势与试样固定高度30 mm时相似; 由于试样高度的增加, 在试样半径尺寸为30—50 mm时试样内部电场均匀性比较高(场均匀性比表示试样内部电场横截面中具有均匀性最大区域的面积/试样的横截面积), 同时场强强度适中; 随着试样半径持续增加, 其内部低场强区域扩散而导致场均匀性变差, 当半径为100 mm时低场强区域扩散至试样整体, 虽然此时电场均匀性增加, 但是总体场强偏低, 平均场强约为 $1\ 532\ \text{V}\cdot\text{m}^{-1}$, 不适合烧结。



(a) — 电场横截面图; (b) — 电场均匀性比图。

(a) — cross section; (b) — plot of field uniformity ratio.

图3 半径10—100 mm场横截面图及场均匀性比图
Figure 3 Cross section and plot of field uniformity ratio of a field with a radius of 10—100 mm

图4为不同试样高度下半径为30—50 mm时的电场图。从图4可以看出,当试样半径在30—50 mm时,不同高度下试样内部电场分布相对均匀。

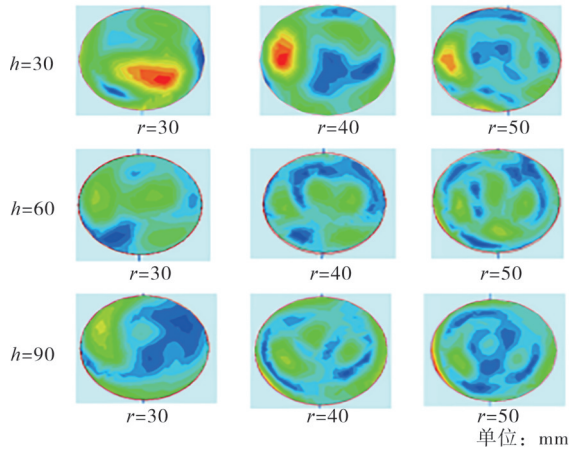
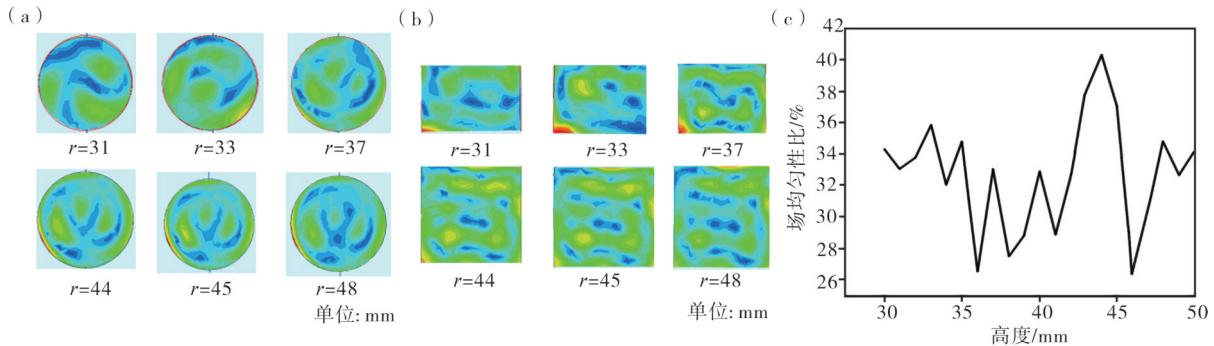


图4 不同高度下试样内电场横截面图

Figure 4 Cross-sectional view of the electric field inside the sample at different heights

为了进一步确定适合烧结的试样半径大小,将其高度固定为90 mm,将其半径变化范围改为30—

50 mm,设置步长为1 mm,分析其电场分布变化情况。图5为半径30—50 mm电场横截面图、电场轴向截面图及场均匀性比图。从图5(a)横截面电场图可以看出,试样半径33 mm为一个分界点,当半径大于33 mm时试样内部电场围绕试样中心形成3个高场强区域并呈品字型分布,其中左侧区域中心场强较大、上方区域与右方区域中间形成场强较小区域,3个区域外围被低场强区域环绕,随着半径的增大外围低场强区域逐步向高场强区域扩散并沿着3个场强相邻区域相交而得到更低场强区域。从图5(b)试样轴向电场图可以看出:试样外围出现“热点”现象,随着半径的增加“热点”现象逐渐消失并在半径为44 mm时彻底消失,与此同时电磁场逐渐开始变得均匀;随着半径的进一步增加,试样内部电场整体强度与均匀性下降,低场强区域再次扩散。从图5(c)试样场均匀性比图可见,当试样半径在42—45 mm附近时,试样内部电场分布均匀且适合烧结。所以,选择场均匀比最为优的半径为44 mm的试样进行下一步实验。



(a)一电场横截面图;(b)一电场轴向截面图;(c)一电场均匀性比图。

(a)—cross-sectional view;(b)—axial cross-sectional view;(c)—plot of field uniformity ratio.

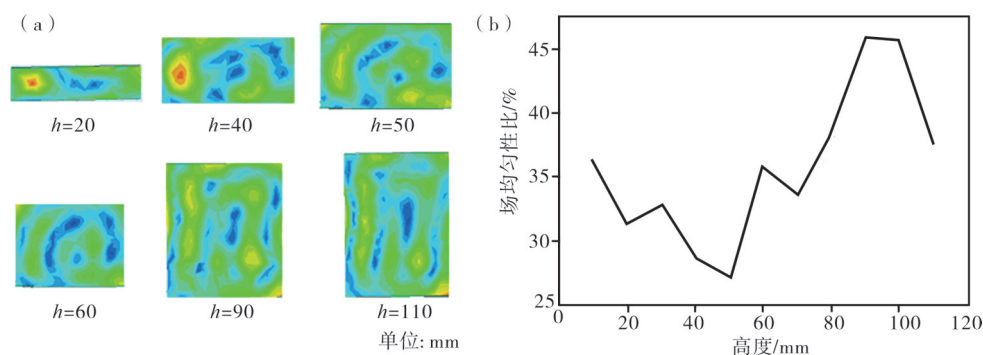
图5 半径30—50 mm电场横截面图、轴向截面图及场均匀性比图

Figure 5 Cross-sectional view, axial cross-sectional view, and plot of field uniformity ratio of the electric field with a radius of 30—50 mm

2.2 试样高度对电磁场的影响

将试样半径固定为44 mm,试样高度变化范围设置为10—110 mm、步长为10 mm,模拟计算出试样内部电磁场分布情况及均匀性,模拟结果如图6所示。从图6可以看出:随着试样高度的增加,试样内部电磁场分布均匀性先是逐步降低后又逐步提升最后又再次降低趋势;当高度10—30 mm时为第一次均匀性降低阶段,此时试样中心位置场强较低;随着高度的增加,低场强区域向外围一侧扩散而将试样内部分割为两个高场强区域,其中一侧高场强区域中心处出现“热点”现象;随着试样高度的增加,

“热点”所在区域场强降低,而低场强区域平均场强也降低;当试样高度为60—90 mm时电磁场均匀性提升,此时试样中心处依旧为低场强区域,但低场强区域场强上升,与此同时高场强区域场强下降在试样内部形成高低场强间隔分布的条状区域;当试样高度为100—110 mm时,低场强区域场强进一步降低且范围进一步扩大,同时试样外围出现“热点”现象。综上所述可知,当试样高度在90—100 mm之间时存在相对于其他高度而言更为均匀的电磁场,为进一步确定最为合适烧结的高度,将半径固定为44 mm、高度变化范围缩小至90—100 mm、步长减小至1 mm。



(a)—电场轴向截面图;(b)—电场均匀性比图。

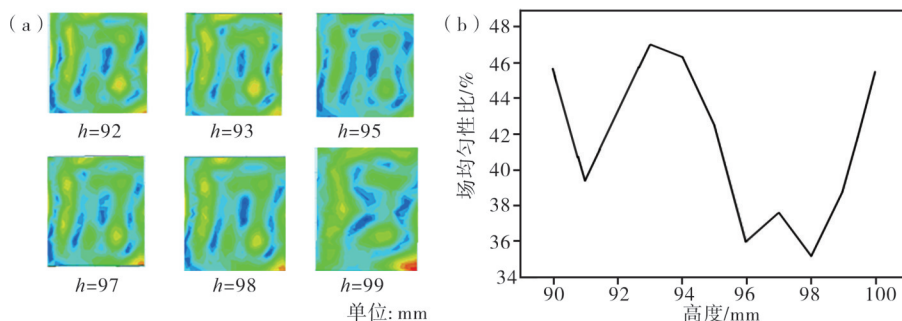
(a)—axial cross-sectional view;(b)—plot of field uniformity ratio.

图6 高度10—110 mm 电场轴向截面图及场均匀性比图

Figure 6 Axial cross-sectional view of the electric field and plot of field uniformity ratio at heights of 10—110 mm

图7为高度90—100 mm 电场轴向截面图及电场均匀性比图。从图7可以看出:当高度在90—93 mm 时,边缘部分低场强区域场强上升,高场强区域场强下降,使得整体电磁场均匀性得到提升;当高度大于

93 mm 时,低场强区域重新开始扩散且边缘处“热点”再次出现。因此,综上所述可知,试样高度为92—94 mm 时,试样内部电磁场均匀性最好,最终确定试样高度为93 mm、半径为44 mm。



(a)—电场轴向截面图;(b)—电场均匀性比图。

(a)—axial cross-sectional view;(b)—plot of field uniformity ratio.

图7 高度90—100 mm 电场轴向截面图及电场均匀性比图

Figure 7 Axial cross-sectional view of the electric field and ratio of electric field uniformity at a height of 90—100 mm

2.3 试样放置位置对电磁场的影响

在确定了试样尺寸的基础上,对其烧结最佳位置进行探讨。先前实验是将试样默认放置于烧结腔边缘中部位置,即放置高度(G)为265 mm,现改变其放置高度,将初始位置设置为烧结腔边缘底部,将放置高度变化范围设置为0—530 mm、步长设置66 mm后进行初步扫描。

图8为不同放置高度下电场轴向图。从图8可以看出:试样放置高度随着从烧结腔边缘底部向上提升,在放置高度到达165 mm 之前,高场强区域由试样外围向着试样中心转移,同时试样底部出现“热点”现象,随着放置高度的增加,“热点”向着试样底部中心移动,导致试样内部平均电场强度增加,使得整体均匀性提升;当试样放置高度超过165 mm 时,试样内部电场均匀性陡然下降,紧接着场强逐步提

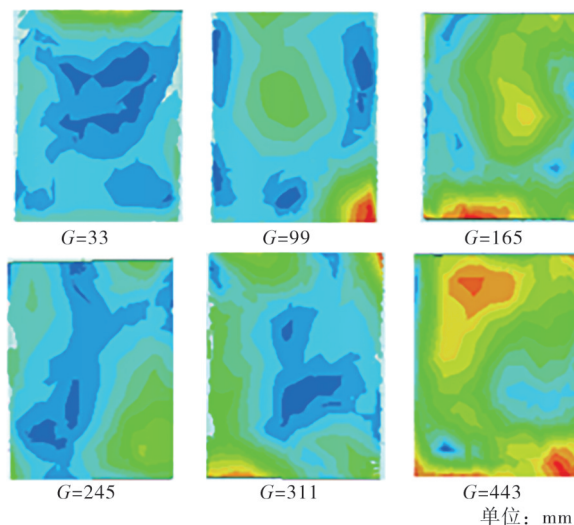


图8 不同放置高度下电场轴向图

Figure 8 Axial view of the electric field at different placement heights

高使试样内部电磁场分布梯度变大,试样多处出现“热点”现象。

将放置高度变化范围缩至165—245 mm、步长缩至5 mm,模拟计算出试样内部电场轴向分布情况,结果如图9所示。从图9可见:随着放置高度的增加,试样两侧出现大范围的“热点”现象且向着一侧移动,同时“热点”区域场强逐渐减小、低场强区域场强增加;当放置高度为215 mm附近时“热点”现象消失,试样内部场强梯度减小;随着放置高度的进一步增加,试样内部电磁场左右分为高场强区域与低场强区域。因此,确定试样放置高度为215 mm。

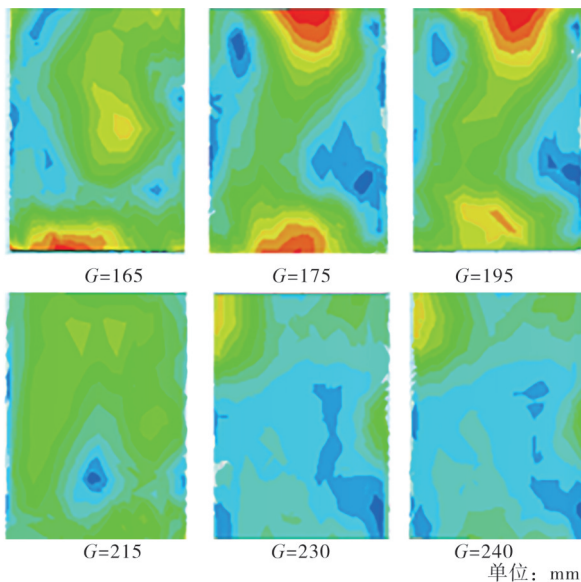


图9 放置在165—245mm高度的电场轴向图

Figure 9 Axial view of the electric field placed at a height of 165—245 mm

3 结论

通过改变样品的尺寸及放置位置,可以改变样品内部电磁场分布情况。

(1)当试样高度固定,随着试样半径的增加,场的均匀性先逐步提高。但是,若半径过大,场的均匀性会变得极不均匀。当试样半径在42—44 mm范围内时,试样内部电磁场分布比较均匀,符合烧结需求。

(2)当试样半径固定而高度变化时,随着试样高度的增加,试样内部电磁场分布均匀性整体呈现上升趋势。试样高度在92—94mm范围内时,场均匀性达到最大值,超过这个高度范围后场均匀性开始下降,超出了适合烧结范围。

(3)在确定试样尺寸之后,改变其放置位置,发现随着放置高度的增加,试样内电磁场开始有所提高,超过215 mm时内部电场不再均匀,超出了适合

烧结范围。

参考文献:

- [1] MOELLER M, SHULMAN H S, GIESCHE H. A novel approach to understanding microwave heating of zirconia[J]. Ceramic Transactions(USA), 2002, 135: 27-37.
- [2] 李县辉,孙永安,张永乾.陶瓷材料的烧结方法[J].陶瓷学报,2003(2):120-124.
- [3] 王瑞虎,杨军,邹德宁,等.金属材料微波烧结技术的研究进展[J].材料导报,2021,35(23):23153-23161.
- [4] 谢蒙优,石建军,陈国平,等.微波烧结技术的研究进展及展望[J].粉末冶金工业,2019,29(3):66-72.
- [5] 方可,方利.微波烧结原理及研究进展[J].价值工程,2011,30(14):53-55.
- [6] 杨俊锋,丁明建,冯毅龙,等. Bi_2MoO_6 对 $\text{Bi}_2\text{Mo}_2\text{O}_9$ 低温烧结陶瓷微波介电性能的影响[J].材料研究与应用,2018,12(2):87-92.
- [7] 殷增斌,袁军堂,程寓,等.陶瓷材料微波烧结工艺与机理研究现状[J].硅酸盐通报,2016,35(5):1492-1497.
- [8] HONG D, YIN Z, GUO F, et al. Microwave synthesis of duplex α/β -SiAlON ceramic cutting inserts: Modifying m, n, z values, synthesis temperature, and excess Y_2O_3 synthesis additive [J]. Journal of Advanced Ceramics, 2022, 11(4):589-602.
- [9] 谭划,南博,马伟刚,等.先进陶瓷材料快速烧结技术发展现状及趋势[J].硅酸盐通报,2021,40(9):3064-3080.
- [10] 苏晓晖,吴丽艳,黎松龄,等.烧结方式对氧化锆陶瓷老化性能的影响[J].实用口腔医学杂志,2015,31(6):766-769.
- [11] 汪宏显.微波烧结在陶瓷中的应用[J].当代化工,2014,43(12):2624-2626.
- [12] AGRAWAL D. Microwave sintering of ceramics, composites and metal powders [M]. London: Woodhead Publishing, 2010: 222-248.
- [13] LIU Y, ZHU J, DAI B. Transparent MgAl_2O_4 ceramics prepared by microwave sintering and hot isostatic pressing[J]. Ceramics International, 2020, 46(16): 25738-25740.
- [14] Sylvain M. Tuning, impedance matching, and temperature regulation during high-temperature microwave sintering of ceramics [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018 (2018): 1-8.
- [15] 张景强,王祺,郭建焯,等.陶瓷砂轮微波烧结炉腔内馈口影响仿真研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2017,37(5):69-73.
- [16] 殷增斌,朱智勇,王子祥,等.复杂刃形陶瓷刀具微波烧结技术研究[J].中国机械工程,2022,33(8):899-907.

- [17] 曹湘琪,姚斌,郑勤红,等.圆柱形微波加热器加热效率及均匀性仿真分析[J].包装与食品机械,2014,32(6):29-31.
- [18] 吕晶,陈利祥,聂贺峰,等.试样几何参数对微波烧结腔电场分布的影响[J].青岛大学学报(自然科学版),2015,28(3):29-34.

Study on the Influence Law of Geometrical Parameters of Microwave Sintered Silicon Nitride Ceramic Materials on Electromagnetic Field Distribution

YANG Hui, XU Weiwei*, SHI Ziyu, YAN Guodong, ZHOU Junhao
(Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: The internal electric field distribution of the sintered sample plays a decisive role in the microwave sintering process. The HFSS simulation software is used to simulate a 5-feeder microwave sintering cavity loaded with silicon nitride samples. The influence of the radius, height and placement position of the sample on the microwave electric field is studied by simulation. The simulation analysis shows that when the sample radius is around 42—44 mm, the internal electromagnetic field is evenly distributed. As the sample height increases, the uniformity of the electric field first decreases, then rises to the maximum value, and then decreases again. The sample height is around 92—94 mm. The internal electromagnetic field distribution is relatively uniform, and the field strength gradient is small; as the placement height increases, the uniformity of the sample increases, but after a certain height, the electromagnetic field uniformity decreases; the comparison shows that the optimal sintered sample size is 93 mm in height and 44 mm in radius, and 215 mm in placement height.

Keywords: microwave sintering; 3D electromagnetic simulation; heating uniformity; silicon nitride; waveguide; electromagnetic field; ceramic materials; influence parameters

(学术编辑:黎小辉)