SPS烧结添加导电增强相的Si_3N_4基复合陶瓷刀具材料的电热行为仿真与试验研究

尹明越[1,2,3] 刘含莲[1,2,3*] 黄传真[4] 王冠群[1,2,3] 刘 盾[1,2,3]
裘英华[1,2,3] 徐龙华[4]

1.山东大学机械工程学院,济南,250061
2.山东大学高效洁净机械制造教育部重点实验室,济南,250061
3.山东大学先进射流技术研究中心,济南,250061
4.燕山大学机械工程学院,秦皇岛,066004

摘要:放电等离子烧结(SPS)技术的高升温速率会导致烧结系统产生较大的温度差异,进而影响烧结试样结构和性能的均匀性。借助COMSOL Multiphysics软件,通过引入PID算法,构建了温度随时间可控的二维热-电耦合有限元模型,并通过烧结实验验证了模型对电流场和温度场计算的可靠性与准确性。基于有效介质渗流理论,分析了添加的导电相TiCN含量对Si_3N_4基陶瓷刀具材料电导率的影响,并揭示了它对SPS烧结过程中电热行为的影响规律和机理。结果表明,导电相含量会显著影响烧结系统中的电流密度和温度分布,尤其是试样内部的温度分布,其中,烧结试样轴向温度表现出较好的一致性,但径向温度差异相对较大。利用这种温度差异调控试样径向的物相组成,有望实现烧结刀具材料径向微观组织及力学性能的适度调控。

关键词:放电等离子烧结;氮化硅;导电相;温度分布
中图分类号:TQ174;TB332
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.09.021 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Simulation and Experimental Study on Electrothermal Behavior of SPS-sintered Si_3N_4-based Composite Ceramic Tool Materials with Conductive Reinforcing Phase

YIN Mingyue[1,2,3] LIU Hanlian[1,2,3*] HUANG Chuanzhen[4] WANG Guanqun[1,2,3] LIU Dun[1,2,3]
QIU Yinghua[1,2,3] XU Longhua[4]

1.School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan, 250061
2.Key Laboratory of High-efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education, Shandong University, Jinan, 250061
3.Center for Advanced Jet Engineering Technologies(CaJET), Shandong University, Jinan, 250061
4.School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004

Abstract: The high heating rate of SPS technology might cause significant temperature differences within the sintering system, thereby affecting the uniformity of the structure and properties of sintered specimens. The COMSOL Multiphysics software was used to construct a two-dimensional thermo-electrical coupling finite element model with controllable temperature over time by introducing a PID algorithm. The reliability and accuracy of the model were verified through sintering experiments in calculating the current field and temperature field. The influence of the added conductive phase TiCN content on the electrical conductivity of Si_3N_4-based ceramic tool materials was analyzed based on effective medium percolation theory, revealing the patterns and mechanisms governing their electrothermal behavior during SPS sintering. Results indicate that the conductive phase content significantly influences current density and temperature distribution within the sintering system, particularly the internal temperature distribution of specimens. Axial temperature distribution exhibits good consistency, whereas radial temperature differences are relatively substantial. By using this temperature difference to regulate the phase composition in the radial direction, it is expected to moderately control the radial microstructure and mechanical properties of sintered tool materials.

Key words: spark plasma sintering(SPS); silicon nitride; conductive phase; temperature distribution

收稿日期:2025-08-29
基金项目:国家自然科学基金(52475472,52275464)

0　引言

氮化硅(Si_3N_4)陶瓷以其优异的综合性能而被广泛应用于球轴承、切削刀具和发动机耐高温部件等领域[1-2]。放电等离子烧结(spark plasma sintering,SPS)结合了脉冲电流和压力,能在短时间内实现快速致密化并抑制晶粒长大,是制备高性能Si_3N_4的理想技术[3-4]。然而,研究表明SPS过程中石墨模具和试样内部存在复杂的温度分布,这会影响制品的物相组成、微观组织和力学性能等[5],因此,深入了解SPS过程中的温度分布及成因至关重要。

由于SPS烧结过程中难以对温度等参数进行原位测量,因此仿真模拟对SPS工艺探索至关重要[6]。大多数模型考虑了热-电耦合,以同步求解烧结过程的电场和温度场,部分研究进一步引入力学耦合以研究应力分布[7],或直接引入致密度曲线以研究烧结致密化行为[8]。本文聚焦与本研究紧密相关的热-电耦合模型的研究进展。谭树林等[9]将热-电-扩散耦合模型与相场模型结合,发现电流辅助烧结的升温速率的提高能增大扩散驱动力以提高SiC陶瓷的致密化速率。VANHERCK等[10]通过耦合热电有限元模型,提出了一种通过优化模具厚度和高度来改善试样温度场均匀性的方法,烧结系统最大温差小于5℃。ACHENANI等[11]基于Al_2O_3的SPS烧结实验,构建了热-电耦合有限元模型,发现模具偏移与局部隔热可以有效改善温度不均匀性,从而提高材料性能一致性。徐伟伟等[12]通过仿真与实验,同样强调了烧结过程中的电场和温度场的均匀性是Si_3N_4陶瓷材料力学性能一致性的关键。与之相反,MORIN等[13]通过有限元建模和实验验证,成功设计了一种能够产生大温度梯度的SPS模具配置,并成功制备了具有微观结构梯度的Al_2O_3基功能梯度材料。这种通过工艺过程中的温度梯度来产生性能梯度,相较于传统FGM制备方法(如逐层铺粉)具有工艺简洁、界面连续以及原位可调等优势。综上,当前研究多集中在对模具几何尺寸的调整,试样自身电热参数对温度场的影响尚未充分讨论,并且缺少针对Si_3N_4基复合陶瓷材料体系的仿真研究。

然而,烧结试样的电热特性,尤其是电导率,的确会影响SPS烧结过程中的电场和温度场[14-15]。ZHOU等[16]证实了向电绝缘的Si_3N_4中添加TiN导电相,能够增强SPS过程中试样内部焦耳热以降低烧结温度,并促进了α-β相变。RÄTHEL等[17]对比了导电材料WC和非导电材料Si_3N_4在烧结过程的温度场,明确其由材料电导率、模具壁厚和直径共同决定。VANMEENSEL等[18]通过仿真发现,SPS烧结导电TiN试样时的径向温度梯度比电绝缘的ZrO_2试样的温度梯度要大得多。MINIER等[19]则指出,导电材料Ni热量主要来自自身的焦耳热效应,而绝缘材料Al_2O_3则依靠模具的热传递。

基于以上现状,本文的主要工作是研究添加导电第二相TiCN后,Si_3N_4电导率变化对SPS烧结过程中电流路径、电流密度分布以及系统温度场的影响;分析Si_3N_4-TiCN复合刀具材料体系的温度分布特点及温度分布差异对力学性能、物相组成等的影响规律。

1　基于COMSOL的Si_3N_4复合陶瓷材料二维热电耦合模型的构建

1.1　模型介绍

本研究利用COMSOL Multiphysics 6.2软件对SPS烧结Si_3N_4-TiCN复合材料过程中的电热行为进行仿真分析。图1展示了烧结系统的几何结构、配合关系和尺寸等信息。仿真模型简化为二维轴对称结构,几何部分包括石墨材质的上下压头、上下冲头、阴模以及位于石墨模具内烧结试样,没有考虑合金材质的上下电极,图1中还标注了一些研究中可能用到的特殊位置点A～G。

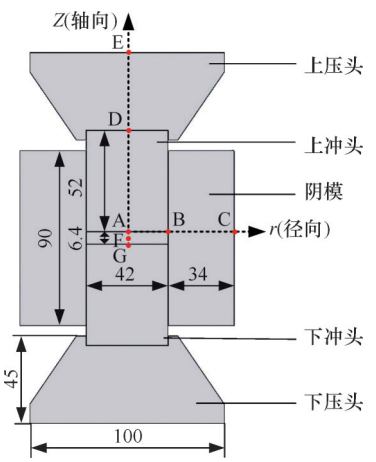


图1　烧结模具和试样的几何结构、配合关系和尺寸示意图

Fig.1　Schematic of the geometry, fit relationship and dimensions of sintering mold and specimen

1.2　控制方程

模型电势分布由偏微分方程求解[20]:

$$-\nabla\cdot(k_e\nabla V)=0 \tag{1}$$

式中:k_e为电导率,S/m;V为电势,V。

模型各点的温度分布由含热源的热扩散控制方程求解[20]:

$$\rho c_p\frac{\partial T}{\partial t}-\nabla\cdot(k_t\nabla T)=Q \tag{2}$$

式中：ρ为密度，kg/m³；c_p为比热容，J/(kg·K)；T为温度，K；t为烧结时间；k_t为热导率，W/(m·K)；Q为单位时间每单位体积焦耳效应产生的热量，W/m³。

本研究借助PID算法，使模型能够实时跟踪实际SPS设备升温曲线，并自动求解所需电流输出。图2为PID控温原理示意图，以模型A点温度与程序温度的误差为输入，经PID运算后输出电流密度$J(t)$。PID算法的具体形式为

$$J(t)=K_P\Delta\theta(t)+K_I\int_0^t\Delta\theta(\tau)\mathrm{d}\tau+K_D\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\Delta\theta(t) \quad (3)$$

$$\Delta\theta(t)=\theta_{set}(t)-\theta_{feed}(t)$$

式中：$\theta_{set}(t)$、$\theta_{feed}(t)$分别为程序温度和仿真过程中A点温度。

以稳态误差、超调量、仿真与实验数据拟合程度为指标，经过优化实验，确定最佳PID参数组合为：比例增益K_P=25，积分增益K_I=0.45，微分增益K_D=0。

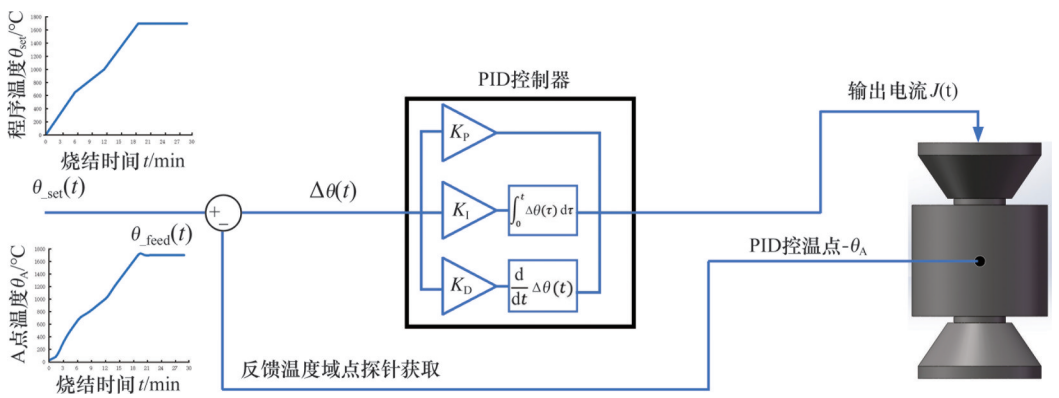


图2 PID控温原理示意图

Fig.2 Schematic of PID temperature control principle

1.3 边界条件、初始值和网格划分

上下电极顶部和底部设置为对流换热边界条件，模拟SPS实际水冷循环。辐射传热部分由Stefan-Boltzmann定律计算。冲头/试样、阴模/试样、冲头/阴模等接触界面设置接触热阻和接触电阻。

初始值设定：①对流传热系数h=880 W/(m²·K)，冷却水温度T_w恒定为300K；②石墨模具发射率ε=0.8；③下压头表面接地，电势V=0，上压头为电流输入端；④接触热导率k_c=0.04 W/(m·K)，接触电导率σ_c与界面微观粗糙度有关，界面平均粗糙度设置为1 μm。

本模型使用自定义网格大小，在验证网格独立性的基础上，石墨模具网格大小设置为更细，最大网格大小7.41 mm，最小0.0251 mm。烧结试样网格大小设置为极细，最大网格大小2.0 mm，最小0.004 01 mm，以精确计算其内部电流场和温度场。模型总的求解的自由度数为4520。图3总结了模型边界条件、初始值和网格划分的具体信息。

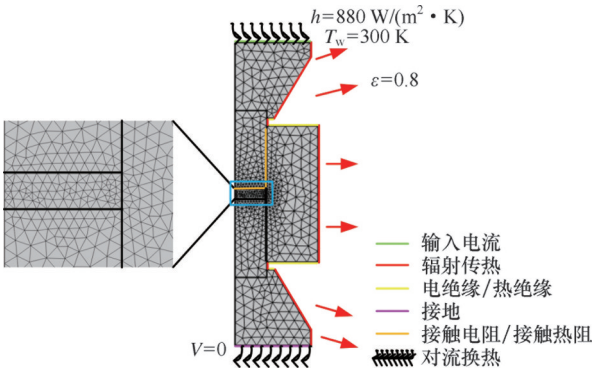


图3 模型边界条件、初始值和网格划分细节示意图

Fig. 3 Schematic of model boundary conditions, initial values and meshing details

1.4 材料参数

表1总结了石墨和Si_3N_4-TiCN复合材料的基本物理性能[21-23]，其中关键电热参数(热容、电导率、热导率)均以热力学温度T函数形式给出，复合材料参数适用温度为273 K～2000 K。

为更好地描述两相复合材料中第二相含量对

表1 石墨和Si_3N_4-TiCN复合材料的物理性能[21-23]

Tab.1 Physical properties of graphite and Si_3N_4-TiCN composite[21-23]

参数	石墨	Si_3N_4-TiCN复合材料
弹性模量/GPa	103	250
泊松比	0.32	0.23
密度/(kg·m⁻³)	1800	3100
热容/(J·kg⁻¹·K⁻¹)	$1023+0.6285T$	$1301.4812/[1+\exp(-0.00705\times(T+122.629))]$
电导率/(S·m⁻¹)	$4.5\times10^7/(1328-1.37T+1.5\times10^{-3}T^2-5\times10^{-7}T^3+7.4\times10^{-11}T^4)$	见式(4)
热导率/(W·m⁻¹·K⁻¹)	$104.7643-0.1359T+1.492\times10^{-4}T^2-8.3859\times10^{-8}T^3+1.7368\times10^{-11}T^4$	见式(5)

复合材料电导率和热导率的影响，本文基于有效介质渗流理论[23-25]，给出如下Si_3N_4-TiCN复合材料的有效电导率k_e和有效热导率k_t计算式：

$$k_e=\frac{1}{4}\left[(2r_m-r_p)+3\varphi_{TiCN}(r_p-r_m)+\sqrt{[r_p-2r_m+3\varphi_{TiCN}(r_m-r_p)]^2+8r_mr_p}\right] \quad (4)$$

$$k_t=\frac{1}{4}\left[(2k_m-k_p)+3\varphi_{TiCN}(k_p-k_m)+\sqrt{[k_p-2k_m+3\varphi_{TiCN}(k_m-k_p)]^2+8k_mk_p}\right] \quad (5)$$

$$r_m=\frac{1}{1.2647\times10^{24}\exp(-0.015T)} \quad (6)$$

$$r_p=\frac{7}{6\times10^{-9}T+4\times10^{-8}}+\frac{300}{39.648+0.0176T} \quad (7)$$

$$k_m=32-0.0136T \quad (8)$$

$$k_p=16.7958+6.86\times10^{-3}T+3\times(1.85+4.5\times10^{-3}T-1.07\times10^{-5}T^2+1.25\times10^{-8}T^3-6.89\times10^{-12}T^4+1.46\times10^{-15}T^5) \quad (9)$$

式中：r_m、k_m、r_p和k_p分别表示基体相Si_3N_4的电导率、热导率和添加相TiCN的电导率和热导率；φ_{TiCN}为常数，表示TiCN的体积分数。

以式(5)为例，该理论自动考虑基体相(k_m)与第二相(k_p)的耦合作用，对$k_p>k_m$(导热增强)或$k_p<k_m$(导热削弱)均适用。

2　结果与讨论

2.1　模型验证

使用Si_3N_4-TiCN复合粉体在1700 ℃、保温8 min条件下进行烧结实验，并将实验过程中由红外热像仪记录(600 ℃开始记录)的A点温度和上电极负载电流与仿真结果进行对比，结果如图4所示。图4a说明负载电流仿真结果与实验数据在整体趋势上保持一致，尤其是在电流上升和稳定阶段。图4b表明烧结温度的仿真值与实测值在升温与保温全过程均保持高度一致性，最大误差仅1.5%，进一步证明了模型对温度场计算的可靠性与准确性。

2.2　SPS烧结过程电流密度分布

SPS技术的核心在于脉冲电流的引入。在烧结非导电材料时，电流几乎不穿过试样，而是沿石墨模具流动并通过焦耳热间接完成烧结；而当材料导电时，电流会直接进入试样内部，使其自身发热[16]。因此，要准确预测烧结过程中的温度分布，必须先研究不同TiCN含量对材料导电性能的影响，进而分析电流在试样与模具间的分配及其对温度场分布的作用。

表2是由式(4)计算的1700 ℃烧结温度下复合材料有效电导率与TiCN含量的关系。当TiCN体积分数φ_{TiCN}低于20%时，电导率维持在10^{-11} S/m量级，几乎为纯绝缘体，当φ_{TiCN}增至33.5%的渗流阈值后，电导率跃升至1.20×10^3 S/m，意味着导电TiCN颗粒形成了连续渗流网络，体系由绝缘态转变为导电态。继续提高φ_{TiCN}至40%，电导率再增约40倍。

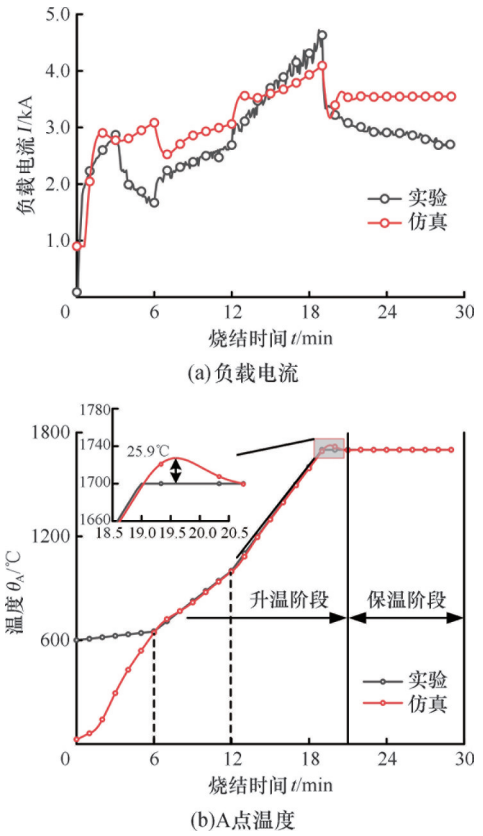


图4　仿真结果与实验数据对比

Fig.4　Comparison of simulation results with experimental data

表2　1700 ℃时复合材料有效电导率与TiCN含量的关系

Tab.2　Effective conductivity of composite as a function of TiCN content at 1700 °C

	φ_{TiCN}				
	0	10	20	33.5	40
电导率/(S·m^{-1})	1.40×10^{-11}	1.45×10^{-11}	2.18×10^{-11}	1.20×10^{3}	4.38×10^{4}

图5揭示了TiCN含量对电流路径的调控作用。如图5a、图5b所示，当φ_{TiCN}低于20%时，复合材料仍属绝缘体，电流几乎全部流经冲头与石墨模具，试样内部无流线。一旦φ_{TiCN}升至渗流阈值，试样呈现半导体特征，部分电流开始穿透试样，流线分布由模具环流转变为模具-试样并联模式，如图5c所示。当φ_{TiCN}进一步提高到40%时，试样导电性已与石墨相当，大部分电流直接经试样内部流动，流线呈纵向贯通，如图5d所示。值得注意的是，无论TiCN含量高低，由于冲头截面积比压头小，系统电流密度云图均显示上下冲头

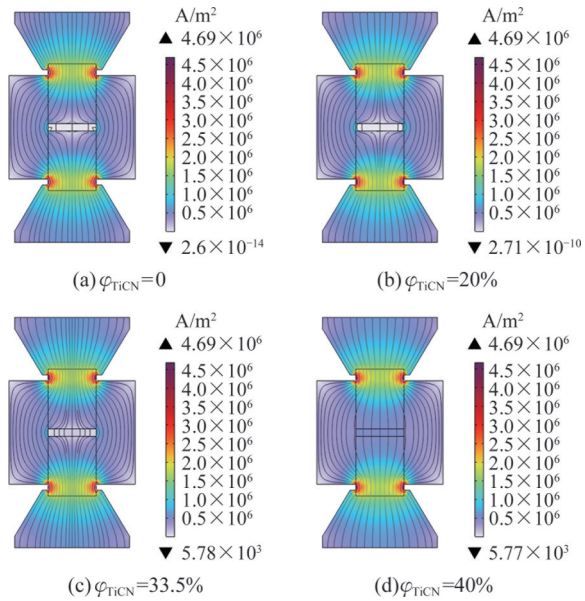


图5 θ_A=1700 ℃时不同TiCN含量下电流密度分布图

Fig.5 Current density distribution at θ_A=1700 °C for different TiCN contents

与模具接触边缘出现局域高值。

2.3 烧结系统整体温度分布

在对烧结系统电流密度分布研究的基础上，进一步探讨了烧结系统温度随时间变化关系。图6给出了φ_{TiCN}=20%的TiCN试样烧结过程中4个不同时刻的温度分布云图，首先可以明显看出，在所有时刻，最高温度区域始终集中在冲头与压头接触位置。2.2节已述，此处电流密度最大，而焦耳热与电流平方成正比，因此这些高电流密度区域自然成为最高温区，这一现象被称为冲头过热效应[26]。

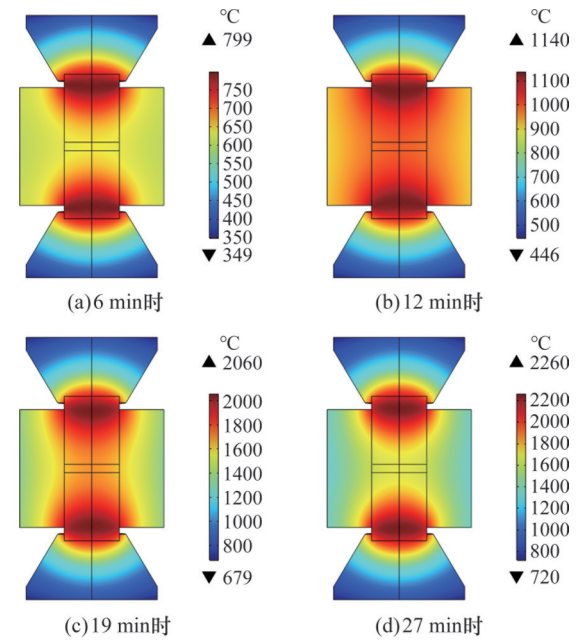


图6 烧结系统温度随时间变化图

Fig.6 Temperature variation with time in the sintering system

另外，从时间演变来看，6 min时（θ_A=650 ℃）热量集中在冲头，12 min时（θ_A=1000 ℃）热量向阴模扩散，19 min升温结束（θ_A=1700 ℃）和27 min保温结束（θ_A=1700 ℃）时热量由冲头和阴模深入试样，揭示了烧结过程中热量从冲头向阴模和试样传导的路径和动态变化。

为了定量分析烧结试样、冲头和压头的温度，我们选取升温结束时（19 min、θ_A=1700 ℃）烧结系统沿G-E线的温度曲线。如图7所示，各部分之间的温差非常显著，冲头区域最高温度达到2057.4 ℃。烧结试样的轴向温度变化不大，基本在设定温度1700 ℃左右。系统最低温度出现在压头部分，为806.1 ℃，这是因为它与冷却水直接接触，热量被持续带走。

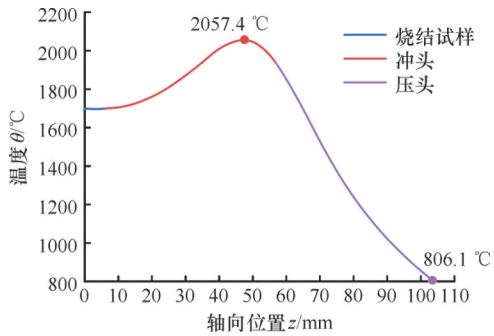


图7 θ_A=1700 ℃时烧结系统沿G-E线的温度分布

Fig.7 Temperature distribution along the G-E line of the sintering system at θ_A=1700 °C

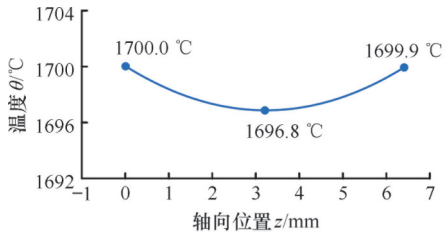
2.4 烧结试样内的温度分布

2.4.1 烧结试样轴向温度分布

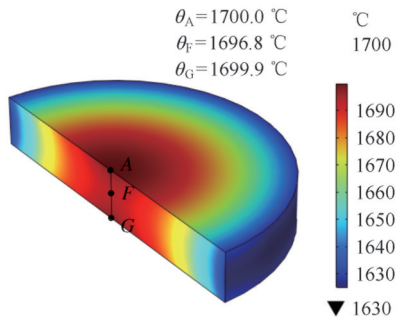
与石墨模具较大轴向温差不同，试样在升温结束（19 min）时的轴向温度差异并不明显，基本保持在1700 ℃的程序设定温度左右，如图8a、图8b所示。图8c表明，在整个烧结过程中，试样表面与芯部温差$\theta_A-\theta_F$最大值仅6.9 ℃，保温阶段维持在3.3 ℃，这充分说明试样在轴向上具有很好的温度均匀性。本研究利用HVS-50数显维氏硬度计对实际烧结的试样进行了正反两面的维氏硬度和断裂韧度测试，测试条件为98.07 N（10 kgf），保载15 s，结果如图8d所示。A面和G面的维氏硬度和断裂韧度分别为（17.21±0.06）GPa、（17.20±0.15）GPa和（8.30±0.37）MPa·$m^{1/2}$、（7.47±0.64）MPa·$m^{1/2}$。测试结果表明试样在轴向上的性能的确具有很好的一致性，这也从侧面验证了本模型预测的准确性。

2.4.2 烧结试样径向温度分布

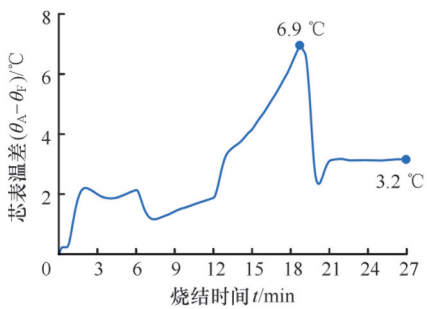
图9为烧结试样温度随时间变化云图。与轴向温度分布的均匀性形成鲜明对比，试样在径向



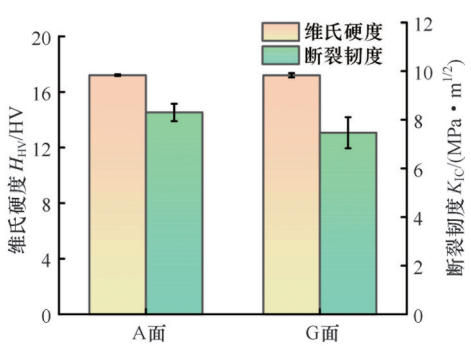
(a)试样轴向温度分布



(b)试样轴向温度分布云图



(c)烧结过程中的轴向最大温差波动



(d)维氏硬度和断裂韧度测试结果

图8　烧结试样轴向温度和力学性能

Fig.8　Axial temperature and mechanics properties of sintered specimen

上展现出显著的温度差异。随着烧结时间的延长，试样的温度逐渐升高。4个时刻试样径向最大温差$\Delta\theta_{max}$分别为10 ℃、19 ℃、71.5 ℃和69.1 ℃，温度分布从初期的相对均匀(图9a、图9b)逐渐变为后期的中心区域温度高、边缘区域温度低的温度分布(图9c、图9d)。由于热量从冲头传递至试样时，沿着径向逐渐散失，导致靠近冲头区域的温度较高，而试样边缘位置热量更多地来自阴模，但阴模温度低于冲头，且阴模不断向外热辐射而损失热量，因而导致烧结后期试样径向上“中心温度高、边缘温度低”的差异。

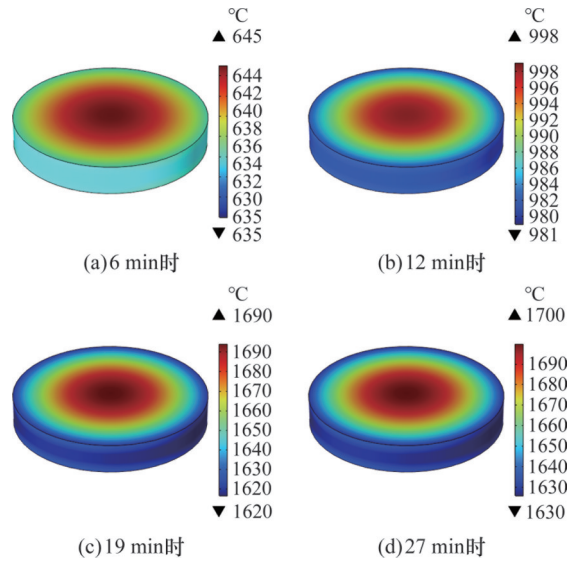


图9　烧结试样温度随时间变化图

Fig.9　Temperature variation with time in the sintered specimen

本文进一步分析了试样径向温度分布与TiCN体积分数φ_{TiCN}的关系，结果如图10所示。φ_{TiCN}低于渗流阈值33.5%时，试样径向温度分布差别不大，但当φ_{TiCN}超过渗流阈值33.5%时，试样径向最大温差$\Delta\theta_{max}$又有明显增长。这是因为TiCN含量超过渗流阈值后，试样的电导率飞跃提高(见表2)，流经试样的电流密度呈指数级增长，从10^{-10} A/m^{2}增长至10^3 A/m^2(见图5)。由焦耳热公式可知，焦耳热正比于电流密度的平方，即$Q\propto J^2$，这意味着，当TiCN含量超过渗流阈值后，试样内部将产生更多的焦耳热，导致试样“中心温度高、边缘温度低”的径向温度分布特征更加显著。

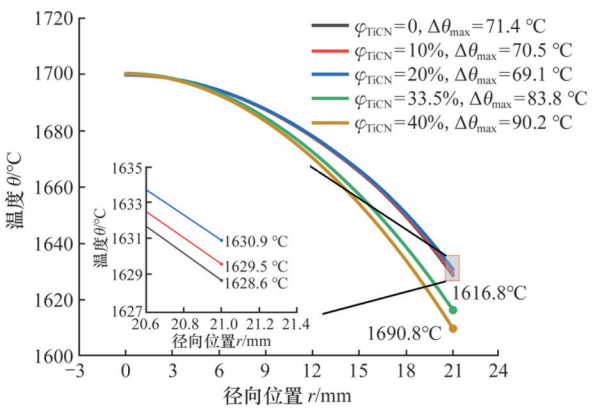


图10　θ_A=1700 ℃时试样径向温度分布(A-B线)随TiCN含量变化曲线

Fig.10　Radial temperature distribution(line A-B) of specimen with TiCN content at θ_A=1700 ℃

为了验证试样径向温度分布对其空间位置物相组成的影响，分别对烧结试样边缘和中心位置

取样进行X射线衍射(XRD)分析。使用Kamal方法[27-28]，根据XRD图谱特征峰衍射强度计算α/β-Si_3N_4中α-Si_3N_4相的质量分数。图11所示为烧结试样径向不同位置的XRD图谱和相组成分析。沿径向每隔约5 mm取样测试(图11a)。由图11b可见，试样径向不同位置主物相均为α-Si_3N_4，但边缘位置α相峰强明显高于中心。图11c计算结果显示，中心位置的α/β-Si_3N_4相比例为70.4%/29.6%，过渡位置为79.1%/20.9%，边缘位置为90.0%/10.0%，中心位置β-Si_3N_4相含量比边缘多19.6%，这意味着具有更高温度的中心区域更有利于β-Si_3N_4相的形成，边缘则保留了更多的α-Si_3N_4相。这种空间位置相变的差异会影响材料的力学性能，如图11d所示，试样维氏硬度呈现“边缘高、中心低”的梯度，梯度大小约0.1 GPa/mm，硬度梯度证明了通过径向温差变化达到调控烧结刀具材料的微观组织与性能的可行性。

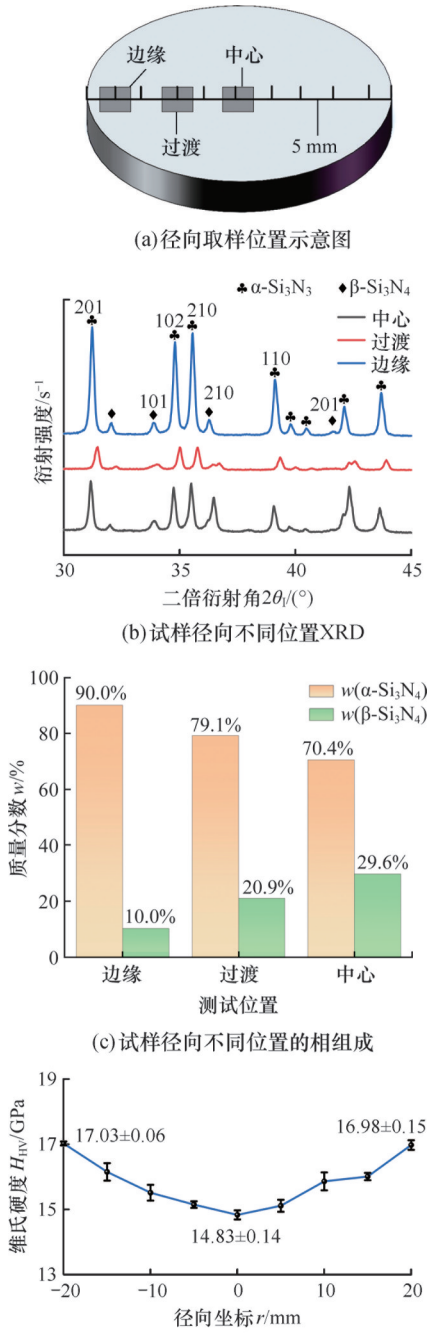


图11 烧结试样的X射线衍射图谱、相组成和硬度

Fig.11 XRD patterns, phase composition and hardness of sintered specimen

3 结论

1)导电相TiCN含量对电流路径具有显著影响。当TiCN含量低于渗流阈值时，电流仅流经模具和冲头；超过渗流阈值后，电流开始穿透试样，形成模具-试样并联模式。另外，电流密度最大值总是在冲头与模具接触边缘。

2)烧结系统各部分之间的轴向温差非常显著，系统最高温度区域始终集中在冲头与压头接触位置，最高温度达到2057.4 ℃，系统最低温度出现在压头部分，为806.1 ℃。

3)烧结试样轴向温度具有较好的一致性，试样表芯最大温差仅6.9℃。相比之下，径向温度差异较大，最大温差$\Delta\theta_{max}$可达71.5 ℃。调整TiCN含量可以改变试样的温度分布，进而达到调控烧结试样的微观结构和性能的目的。

本研究揭示了SPS烧结过程中烧结试样径向方向的温度分布差异机制，这一差异使Si_3N_4试样的α-β相变量在径向呈梯度分布，并有望通过该工艺实现原位制备具有径向梯度功能的Si_3N_4基陶瓷刀具新材料。

参考文献：

[1] DU Songmo, ZHANG Jie, LI Fei, et al. Effect of Initial Phase Composition on the Phase Composition, Microstructure, and Mechanical Properties of Si_3N_4 Ceramics[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2024, 107(4): 2556-2564.

[2] TANG Shaojun, GUO Weiming, SUN Shikuan, et al. Design Strategy of Phase and Microstructure of Si_3N_4 Ceramics with Simultaneously High Hardness and Toughness[J]. Journal of Advanced Ceramics, 2023, 12(1): 122-131.

[3] LI Yongxia, SHI Jiaxin, MAN Chao, et al. Effect of Sintering Additive Composition on Microstructure, Thermal and Mechanical Property of Multi-step Spark Plasma Sintered Silicon Nitride[J]. Materials Chemistry and Physics, 2023, 307: 128211.

[4] HU Zhengyang, ZHANG Zhaohui, CHENG Xingwang, et al. A Review of Multi-physical Fields Induced Phenomena and Effects in Spark Plasma Sintering: Fundamentals and Applications[J]. Materials & Design, 2020, 191: 108662.

[5] YU Junjie, SUN Shikuan, WEI Wanxin, et al. Continuous and Symmetric Graded Si_3N_4 Ceramics Designed by

Spark Plasma Sintering at 15　MPa[J]. Ceramics International, 2019, 45(13): 16703-16706.

[6] WANG Cao, CHENG Laifei, ZHAO Zhe. FEM Analysis of the Temperature and Stress Distribution in Spark Plasma Sintering: Modelling and Experimental Validation [J]. Computational Materials Science, 2010, 49(2): 351-362.

[7] BAI Wenhui, LIU Wei, WANG Weimin, et al. Drucker-Prager-cap Modelling of Boron Carbide Powder for Coupled Electrical-Thermal-Mechanical Finite Element Simulation of Spark Plasma Sintering[J]. Ceramics International, 2021, 47(15): 21536-21545.

[8] PRESTON A D, MA Kaka. Mechanism of Thermal Gradients in Spark Plasma Sintering of Titanium and the Resultant Graded Microstructure: a Novel Strategy of Incorporating Master Sintering Curve into Finite Element Modeling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 310: 117779.

[9] 谭树林，张晓敏，赵志鹏，等. 电流辅助烧结过程的多物理场耦合体系模拟[J]. 粉末冶金技术，2020，38(6)：414-422.
TAN Shulin, ZHANG Xiaomin, ZHAO Zhipeng, et al. System Simulation of Multi-physical Field Coupling in Electric Current-assisted Sintering [J]. Powder Metallurgy Technology, 2020, 38(6): 414-422.

[10] VANHERCK T, JEAN G, GONON M, et al. Spark Plasma Sintering: Homogenization of the Compact Temperature Field for Non Conductive Materials[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2015, 12 (S2): E1-E12.

[11] ACHENANI Y, SAÂDAOUI M, CHEDDADI A, et al. Finite Element Modeling of Spark Plasma Sintering: Application to the Reduction of Temperature Inhomogeneities, Case of Alumina[J]. Materials & Design, 2017, 116: 504-514.

[12] 徐伟伟，张作轩，朱松青，等. 氮化硅基陶瓷材料微波烧结参数实验优化[J]. 中国机械工程，2025，36(3)：435-443.
XU Weiwei, ZHANG Zuoxuan, ZHU Songqing, et al. Experimental Optimization of Microwave Sintering Parameters for Si3N4-based Ceramic Materials[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(3): 435-443.

[13] MORIN C, Le GALLET S, ARIANE M, et al. Spark Plasma Sintering Tool Design for Preparing Alumina-based Functionally Graded Materials[J]. Ceramics International, 2016, 42(2): 3056-3063.

[14] ZUO Fei, MENG Fan, LIN Dongtao, et al. Effect of Current Pattern and Conductive Phase on Sintering Behavior of Si3N4-based Ceramic Composite [J]. Ceramics International, 2018, 44(8): 9561-9567.

[15] 骆俊廷，刘永康，申江龙，等. 放电等离子烧结工艺对不导电材料整体电阻的影响[J]. 中国机械工程，2015，26(18)：2524-2527.
LUO Junting, LIU Yongkang, SHEN Jianglong, et al. Influences of Spark Plasma Sintering Process on Overall Resistance of Non-conductive Materials[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(18): 2524-2527.

[16] ZHOU Manyuan, RODRIGO D, CHENG Yibing. Effects of the Electric Current on Conductive Si3N4/TiN Composites in Spark Plasma Sintering[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 547: 51-58.

[17] RÄTHEL J, HERRMANN M, BECKERT W. Temperature Distribution for Electrically Conductive and Non-conductive Materials during Field Assisted Sintering (FAST)[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2009, 29(8): 1419-1425.

[18] VANMEENSEL K, LAPTEV A, HENNICKE J, et al. Modelling of the Temperature Distribution during Field Assisted Sintering[J]. Acta Materialia, 2005, 53(16): 4379-4388.

[19] MINIER L, Le GALLET S, GRIN Y, et al. A Comparative Study of Nickel and Alumina Sintering Using Spark Plasma Sintering (SPS) [J]. Materials Chemistry and Physics, 2012, 134(1): 243-253.

[20] SCHWERTZ M, KATZ A, SORREL E, et al. Coupled Electro-Thermo-Mechanical Finite Element Modeling of the Spark Plasma Sintering Technique [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2016, 47(2): 1263-1273.

[21] GIUNTINI D, RAETHEL J, HERRMANN M, et al. Spark Plasma Sintering Novel Tooling Design: Temperature Uniformization during Consolidation of Silicon Nitride Powder [J]. Journal of the Ceramic Society of Japan, 2016, 124(4): 403-414.

[22] MOHAMMAD BAGHERI S, VAJDI M, SADEGH MOGHANLOU F, et al. Numerical Modeling of Heat Transfer during Spark Plasma Sintering of Titanium Carbide [J]. Ceramics International, 2020, 46(6): 7615-7624.

[23] VANMEENSEL K, LAPTEV A, VANDERBIEST O, et al. The Influence of Percolation during Pulsed Electric Current Sintering of ZrO_2 - TiN Powder Compacts with Varying TiN Content[J]. Acta Materialia, 2007, 55(5): 1801-1811.

[24] LANDAUER R. The Electrical Resistance of Binary Metallic Mixtures[J]. Journal of Applied Physics, 1952, 23 (7): 779-784.

[25] NAIT-ALI B, HABERKO K, VESTEGHEM H, et al. Thermal Conductivity of Highly Porous Zirconia[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2006, 26(16): 3567-3574.

[26] GIUNTINI D, OLEVSKY E, GARCIA-CARDONA C, et al. Localized Overheating Phenomena and Optimization of Spark-plasma Sintering Tooling Design[J]. Materials, 2013, 6(7): 2612-2632.

[27] DEVLIN D J, AMIN K E. A Method for Quantitative Phase Analysis of Silicon Nitride by X-ray Diffraction[J]. Powder Diffraction, 1990, 5(3): 121-124.

[28] LI Pengcheng, WANG Tao, GUO Ruipeng, et al. Effect of Sintering Temperature on Hardness Gradient of Si_3N_4 Ceramics Fabricated by Spark Plasma Sintering[J]. Vacuum, 2023, 216: 112479.

（编辑　王旻玥）

作者简介：尹明越，男，2001年生，硕士研究生。研究方向为高性能氮化硅基陶瓷刀具材料设计。E-mail：17854798184@163.com。**刘含莲***（通信作者），女，1970年生，教授、博士研究生导师。研究方向为高效加工及刀具技术。E-mail:lhl70@sdu.edu.cn。

本文引用格式：

尹明越，刘含莲，黄传真，等. SPS烧结添加导电增强相的Si_3N_4基复合陶瓷刀具材料的电热行为仿真与试验研究[J]. 中国机械工程，2026，37(9)：2290-2297.

YIN Mingyue, LIU Hanlian, HUANG Chuanzhen, et al. Simulation and Experimental Study on Electrothermal Behavior of SPS-sintered Si_3N_4-based Composite Ceramic Tool Materials with Conductive Reinforcing Phase [J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(9): 2290-2297.