

W-Cu 液相烧结体系致密化行为的模拟

池永恒¹, 张瑞杰², 方伟², 杨诗棣¹, 曲选辉^{1,2}

(1. 北京科技大学 新金属材料国家重点实验室, 北京 100083;

2. 北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083)

摘要: 基于流体流动模型和液相烧结作用力模型, 对液相烧结第一阶段中(液相生成与固相颗粒重排阶段)液相 Cu 对固相 W 颗粒的润湿情况及颗粒的重排和密实化行为进行模拟。本模型包含 Navier-Stokes(N-S)方程、区分气-液两相流的 VOF 方程及颗粒所受作用力(毛细力和黏性力)方程。使用二维非定常分离隐式 PISO 算法求解 N-S 方程, 描述流体流动行为; 求解 VOF 方程以区分气-液两相流; 根据颗粒所受作用力编制颗粒运动自定义程序, 控制颗粒运动, 描述固相颗粒在毛细力牵引及黏性力共同作用下的运动。分析烧结过程液相对固相颗粒的润湿行为及液相烧结第一阶段密实化规律。探讨润湿角、颗粒间距对毛细力大小的影响, 并结合具体烧结模型研究烧结体系颗粒尺寸对密实化速度的影响及不同初始液固比与烧结体系最终孔隙率的关系。最终将模拟结果与理论分析结果进行对比, 两者基本一致。

关键词: Cu; W; 液相烧结; 数值模拟; 毛细力; 黏性力; Navier-Stokes 方程; VOF 方程

中图分类号: TG115

文献标志码: A

Simulation of densification process of W-Cu system during liquid-phase sintering

CHI Yong-heng¹, ZHANG Rui-jie², FANG Wei², YANG Shi-di¹, QU Xuan-hui^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Advanced Metal and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Institute of Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The computational fluid dynamics model and interaction force model were applied to simulating the first wetting and rearrangement stage and densification behavior of W-Cu liquid phase sintering system. Navier-Stokes equation, volume of fluid (VOF) equation and interaction force (capillary force and viscosity force) equation were all involved in the model. The Navier-Stokes equations of fluid phases (including liquid and gas phases) were solved by pressure implicit with splitting of operators (PISO) and the VOF model was used to distinguish flowing behavior between liquid and gas phases. The interaction force between solid and liquid was described by a published theoretical model. The movement of solid particles was calculated by a user defined program based on the interaction forces. The wetting behavior of liquid phase to solid particle during sintering process and densification behavior were studied. The effects of wetting angle and particle distance on capillary forces were investigated. The influences of particle size on densification rate and the initial liquid-solid ratio on the final porosity were both discussed. Finally, simulation results were compared with the published theoretical results. The results show that they agree well with each other.

Key words: Cu; W; fluid phase sintering; numerical simulation; capillary force; viscosity force; Navier-Stokes equation; VOF equation

液相烧结通常被分为 3 个阶段^[1-4]: 颗粒重排阶段、溶解-析出阶段和固相烧结阶段。液相的存在可以通过提供毛细力及高扩散率促进密实化过程^[5-6]。

尽管目前有大量文献描述液相烧结过程, 但液相烧结的初始颗粒重排阶段并没有得到足够的研究^[7-8]。这是由于这一阶段在烧结开始后很短的时间内完成, 相对于整个烧结过程, 第一阶段所占用的时间很短^[9]。因此, 这一阶段对后续烧结体微观形貌的影响极易被随后的两个烧结阶段所掩盖^[10-11]。

在过去几十年里科研工作者一直致力于液相烧结过程的模拟研究, SVOBODA 等^[12]提出了一个液相烧结模型, 研究了液相流动、液相对固相的润湿、液相对固相原子溶解的影响等问题, 并将其应用于描述 Si_3N_4 非等温条件烧结的密实化曲线, 数值解与理论解吻合较好。MEHRABADI 等^[8]对液相烧结初始阶段粉末的力学行为进行了讨论, 研究了颗粒尺寸、液固相体积比、接触角、外部压力和样品边界形状对密实化的影响。VILLANUEVA 等^[13]探讨了液相烧结过程中在毛细力驱动下的流动, 包括液滴在固体表面的润湿行为; 假设固体颗粒固定不动, 模拟了液相对固相颗粒的润湿形貌并研究了平衡接触角的大小对液相吸入多孔介质情况的影响。VILLANUEVA^[1]等提出了模拟液相烧结的多元多相模型, 对液相烧结中的两个重要动力学行为, 即快速润湿和颗粒移动进行了研究。QI 等^[14]基于热力学方法和特定几何模型研究了液相烧结初始阶段液相的铺展及颗粒的重排行为; ZORAN 等^[15-16]模拟了 W-Ni 体系在液相烧结过程中孔洞的演化, 之后又在三维尺度模拟了毛细力驱动下颗粒的重排行为。CHENG 等^[17]基于 CALPHAD(相图计算)方法, 提出了液相 Co 在 WC-Co 硬质合金液相烧结体系中的迁移模型。国内学者也对液相烧结过程的密实化行为开展了一系列研究^[18-21]。范景莲等^[18]研究了 W-Cu 复合粉末的烧结机制; 鲍寅祥等^[21]采用蒙特卡罗法模拟了液相中颗粒的溶解-析出过程。

W-Cu 烧结过程与典型液相烧结体系(固-液相元素间有一定固溶度)相比具有如下特点: 体系的致密化阶段集中于液相烧结的第一阶段, 即液相生成与颗粒重排阶段; 在进一步的烧结过程中由于 W-Cu 间互溶度低, 因此不存在溶解-析出阶段进一步的密实化; 此外, 由于烧结温度介于 Cu 的熔点和 W 的熔点之间, 且一般远低于 W 的熔点, 即便出现 W 固相颗粒的接触, 也不会出现明显的固相烧结。为避免烧结过程其他因素(溶解析出、固相烧结等)对密实化过程的影响, 鉴于 W-Cu 的以上特点, 本文作者选取 W-Cu 液相烧结体系作为研究对象。

本文作者提出的液相烧结模型综合考虑了毛细力、黏性力、润湿角、初始液固比及颗粒大小等因素, 模拟了等温下液相烧结第一阶段体系的致密化行为, 并将其应用于 W-Cu 液相烧结体系。

1 液相烧结模型

1.1 流体流动模型

液相烧结体系中同时存在固相、液相和气相。其中液相及气相为流体相, 采用质量守恒方程及动量守恒方程来求解^[22]。烧结为等温烧结, 为简化模型而又不失所模拟情况的一般性, 初始固-液颗粒形状设为球形, 结合具体的 W-Cu 烧结体系, 本文作者主要探讨烧结初期颗粒的重排及密实化情况。

质量守恒方程:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{u}$ 为速度矢量; t 为时间; ρ 为液体密度; μ 为液体黏度; p 为压强; $\mathbf{g}$ 为重力加速度向量。

1.2 VOF 模型

在运动界面追踪问题的数值模拟方法中, VOF 方法(Volume of fluid method)是最重要的方法之一, 由 HIRT 等^[23]提出。其基本思想是: 在整个流场中定义一个函数, 其值等于流体体积与网格体积的比值, 且满足对流方程, 称为流体体积函数。换句话说, 在计算区域内, 规定其中一种流体为“目标流体”, 每个网格上的 VOF 函数定义为目标流体体积和网格总体积的比值, 所以单元上的流体体积分数(C)定义为

$$C = \frac{V_1}{V_2} \quad (3)$$

式中: V_1 为单元中目标流体的体积; V_2 为单元总体积。

在充满流体的网格上 $C=1$, 不含流体的网格 $C=0$, $0 < C < 1$ 的网格则是含有自由表面的网格。

设在计算区域内, 目标流体和另一种流体所占区域分别为 Ω_1 和 Ω_2 , 交界面为 Γ , 首先定义运动界面初值:

$$C(\mathbf{x}, t) = \begin{cases} 1, & \mathbf{x} \in \Omega_1 \\ 0 < C < 1, & \mathbf{x} \in \Gamma \\ 0, & \mathbf{x} \in \Omega_2 \end{cases} \quad (4)$$

VOF 函数满足 VOF 控制方程:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

式中: u 为 x 轴方向速度分量; v 为 y 轴方向速度分量。通过对 VOF 控制方程的求解, 得 $C(\mathbf{x}, t)$ 值, 将 $C(\mathbf{x}, t)$ 值介于 0 与 1 的网格连线得到更新后的自由表面。

1.3 作用力计算模型

重力是影响液相烧结致密化过程的重要因素, 因为当重力超过毛细力或与毛细力数量级相当时, 流体的流动将是两者共同作用的结果, 重力的影响不可忽视。判断液体重力是否超过毛细力大小的判据, 称作“毛细力常值”判据^[9, 12]:

$$a = \sqrt{2\gamma/(\rho g)} \quad (6)$$

式中: γ 是液体表面张力, N/m; ρ 为液体密度, kg/m³; g 为重力加速度, m/s²。设 $\bar{D}$ 为液相烧结体系中固相颗粒间的平均粒距。当 $a \gg \bar{D}$ 时, 重力对烧结体内流体流动的影响可以忽略; 当 $a \ll \bar{D}$ 时, 需要考虑重力对流体流动的影响。

在所考虑的烧结体系中, $\bar{D}$ 为 1~10 μm , $\gamma=1.28$ N/m^[2], 显而易见, $a \gg \bar{D}$, 所以在颗粒重排过程中只考虑了毛细力作用而忽略重力的影响。

1.3.1 毛细力计算模型

由液桥连接的两个球形颗粒间的相互作用力 F 的表达式如下^[2]:

$$F = 2\pi r \gamma \cos \Phi - \pi r^2 \Delta p \quad (7)$$

式中: 右边第一项表示在润湿周长为 $2\pi r$ 的表面张力产生的作用力; 第二项为毛细压力差产生的作用力。

HPPANN 等^[2]通过圆形近似, 将式(7)改为如下形式:

$$F = \gamma \left[\pi R^2 \sin^2 \psi \left(\frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_1} \right) + 2\pi R \sin \psi \sin(\psi + \theta) \right] \quad (8)$$

其中,

$$\rho_1 = R \sin \psi - \left[R(1 - \cos \psi) + \frac{D}{2} \right] \cdot \frac{1 - \sin(\psi + \theta)}{\cos(\psi + \theta)} \quad (9)$$

$$\rho_2 = \frac{R(1 - \cos \psi) + \frac{D}{2}}{\cos(\psi + \theta)} \quad (10)$$

由于液桥体积(V)不变, 上述公式中各变量满足如下恒等方程:

$$V = 2\pi \left[\cos(\psi + \theta) - \left(\frac{\pi}{2} - (\psi + \theta) \right) \right] \cdot (\rho_2^3 + \rho_1 \rho_2^2) + \pi \rho_1^2 \rho_2 \cos(\psi + \theta) \quad (11)$$

式中: R 、 D 、 ρ_1 、 ρ_2 、 Φ 、 ψ 、 r 和 θ 的物理意义如图 1 所示。液体 Cu 的表面张力 $\gamma=1.28$ N/m。

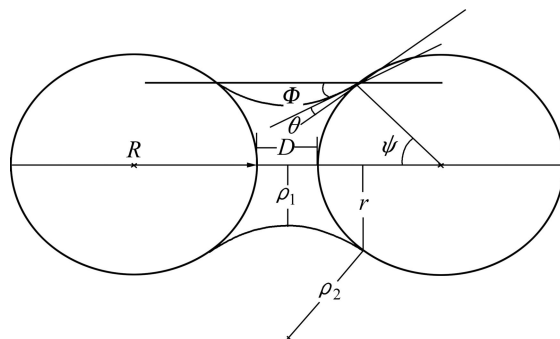


图 1 由液桥连接的两颗粒的几何模型

Fig. 1 Geometric model of contact between two spherical particles with intermediate liquid film

1.3.2 黏性力计算模型

因为液体是有黏性的, 颗粒在液桥提供的毛细力作用下相互靠近的过程中, 必然同时受到颗粒间液桥黏性力的阻碍作用。本文作者采用 LEE 等^[24]提出的黏性力模型:

$$F_{v_{ij}} = \frac{\pi K \eta R^2 v_{ij}}{d_{ij}} \quad (12)$$

式中: K 为常数; R 为颗粒半径; η 为液体的动力黏度, Pa·s; v_{ij} 为两颗粒相互靠近的速度; d_{ij} 为两颗粒的间距。

2 几何模型

对液相烧结的密实化过程进行数值模拟, 就是对上述控制方程在几何模型(求解域)内结合具体的边界条件进行求解并将其可视化的过程。在对模型进行求解前, 首先应将计算区域离散, 即对空间上连续的计算区域进行划分, 将其划分成许多个子区域, 并确定每个区域中的节点, 从而生成网格。然后, 将控制方程在网格上离散, 即将偏微分格式的控制方程转化为各个节点上的代数方程组, 进而转化为对方程组的求解。

2.1 模型的创建及网格划分

由简及繁, 创建三球模型及三十二球模型, 单元

网格选用三角形平铺非结构化网格。具体模型尺寸如表 1 所列。

表 1 几何模型参数设置

Table 1 Parameters of geometric model

Model	Computational domain size/ μm	Solid particle radius/ μm	Liquid drop radius/ μm	Time step size/s
3-particle model	80×40	10	5	1×10^{-8}
32-particle model	100×100	5–25	1–10	1×10^{-8}

2.2 FLUENT 中固-液-气三相边界条件及参数的设置

由于所模拟的 W 与 Cu 互溶度很小, 所以可以忽略烧结过程中的溶质扩散影响, 模拟过程为等温烧结, 忽略传热影响。将固体 W 颗粒与液体 Cu 和空气接触的界面设置为壁面型边界条件。

压坯在氩气或氢气气氛下烧结, 所以四周边界设置为压力入口边界条件。

材料的物性参数如表 2 所示。

表 2 材料的物相参数^[25]

Table 2 Physical properties parameters of materials^[25]

Material phase	Density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Viscosity/ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	Surface tension/ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)
Gas	1.225	0.000 017 9	1.28
Liquid Cu	8 978	0.003 9	—
Solid W	19 350	—	—

3 模拟结果与讨论

3.1 作用力方程的数值解

借用三球模型, 综合考虑毛细力和黏性力的综合作用。颗粒所受作用力表达式为

$$F = F_c + F_v \tag{13}$$

式中: F_c 为毛细力; F_v 为黏性力。

取固体颗粒半径 $R=10\ \mu\text{m}$, 颗粒初始间距 $D=10\ \mu\text{m}$, 润湿角 $\theta=10^\circ$, 其他参数如表 2 所列。

图 2 所示为单个颗粒所受毛细力、黏性力及两者合力随时间的变化。由图 2 可见, 毛细力随颗粒初始间距的减小逐渐增大; 黏性力开始随颗粒运动速度增加逐渐增大, 但增速较慢, 这是由于整个过程颗粒运

动速度相对较小。但当颗粒趋于接触时, 由于黏性力与颗粒间距成反比, 黏性力急剧增加, 甚至超过毛细力, 颗粒相应减速靠近, 直至接触。图 3 所示为润湿角 $\theta=10^\circ$ 下相应颗粒间距随时间的变化。

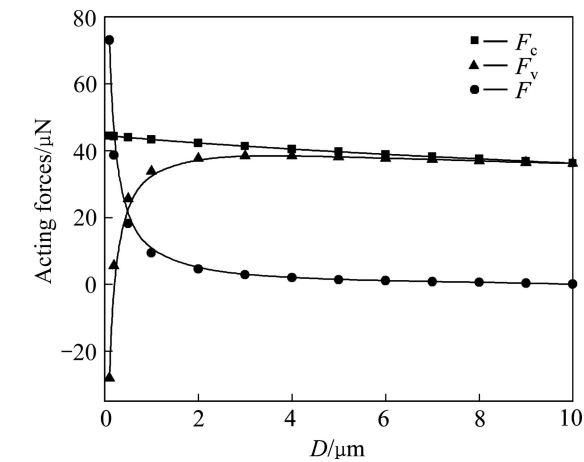


图 2 三球模型中固体颗粒所受毛细力、黏性力及两者合力随颗粒间距的变化

Fig. 2 Interparticle forces involving capillary force (F_c), viscosity force (F_v) and resultant force (F) of F_v and F_c as function of distance (D) of two spherical particles at wetting angle of $\theta=10^\circ$ and initial distance of $D_0=10\ \mu\text{m}$ and $R=10\ \mu\text{m}$

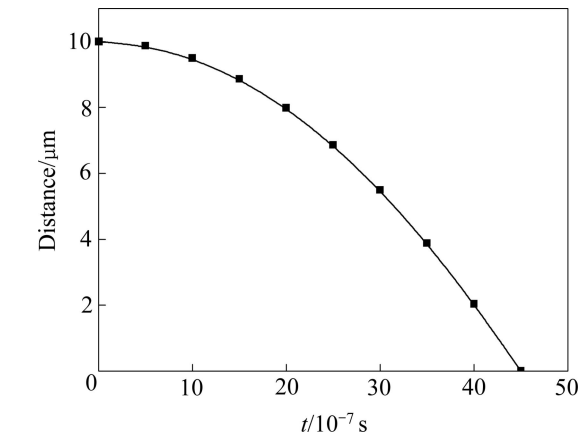


图 3 润湿角 $\theta=10^\circ$ 下颗粒间距随时间的变化

Fig. 3 Interparticle distance D as function of time at wetting angle $\theta=10^\circ$

图 4 所示为不同尺寸固相颗粒在所受毛细力及黏性力合力作用下, 由颗粒运动方程计算所得的相应颗粒运动速度随颗粒间距的变化。当颗粒间距趋近于 0 时, 由于黏性力陡增, 颗粒运动速度会快速下降, 颗粒接触时会存在弹性能耗散, 细微的弹性能耗散过程在此不做讨论, 近似认为颗粒一旦接触碰撞, 运动速度骤降为 0。

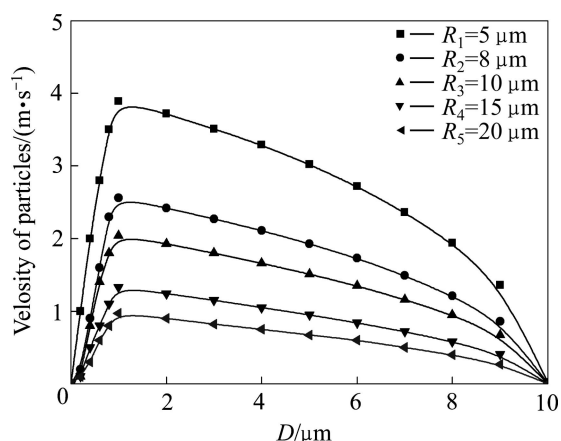


图 4 不同尺寸颗粒运动速度随颗粒间距的变化

Fig. 4 Moving velocity of particles with different sizes as function of interparticle distance

3.2 液相润湿行为

根据牛顿第二定律, 液相烧结体系中颗粒 i 的运动方程可以表示如下:

$$m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \sum_{j=1}^n (\bar{F}_{c,ij} + \bar{F}_{v,ij}) \quad (14)$$

式中: $\bar{F}_{c,ij}$ 和 $\bar{F}_{v,ij}$ 分别代表颗粒 i 所受周围颗粒 j 所提供的毛细力和黏性力。 m_i 为颗粒质量; x_i 为颗粒 i 的坐标位置; t 为时间。基于以颗粒运动方程(14), 编制 UDF 程序, 结合动网格技术, 在 FLUENT 中用 PISO 求解器求解流体方程以分析液相对固相颗粒的润湿行为。图 5 所示为求解三球模型所得的密度场和速度场, 显示与快速润湿和毛细力牵引相关的密度和速度图像。模型参数采用颗粒初始间距 $D=10 \mu\text{m}$, 润湿角 $\theta=10^\circ$, 颗粒半径 $R=10 \mu\text{m}$, 其他参数如表 2 所列。

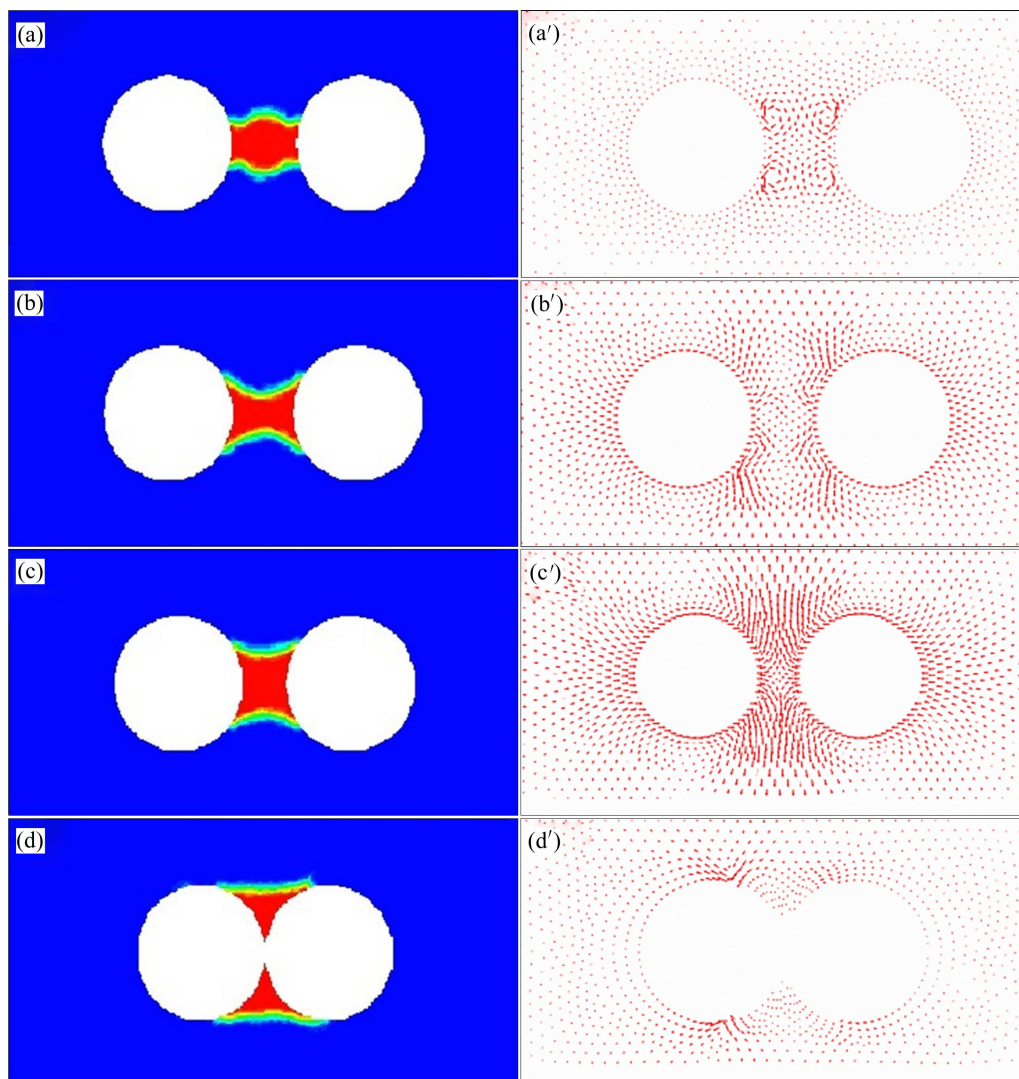


图 5 求解三球模型所得不同时间下密度场和速度场

Fig. 5 Density field ((a), (b), (c), (d)) and velocity field ((a'), (b'), (c'), (d')) from solution of 3-particle model at different times: (a), (a') 0.1 μs; (b), (b') 1 μs; (c), (c') 3 μs; (d), (d') 5 μs

从图 5(a)中可以看到由于快速润湿所产生的靠近颗粒上下表面的 4 个涡流。图 5(b)和(c)中, 正如图 2 所示, 随所受合力 F 逐渐增大, 所得的速度场相应增大。如图 5(d)所示, 当颗粒趋于接触时, 黏性力急剧增大, 速度逐渐减小, 体系趋于稳定。

3.3 液相烧结体系的密实化行为

将三球模型进一步扩展为具有不同颗粒半径的三十二球模型, 其他参数如表 2 所列不变, 模拟二维情况下烧结体系的密实化过程。在液相烧结体系中, 每个固体颗粒都被数量不等的液滴包围, 所以颗粒将在数个液桥所提供的不同方向的毛细力合力作用下运动, 在毛细力、黏性力和液滴润湿过程的综合作用下, 烧结体系逐渐趋于致密化。

如图 6(a)~(i)烧结不同时期的密度云图所示, 烧结初期, 液相首先快速润湿固相颗粒, 接触角达到平衡接触角 θ ; 然后在毛细力及黏性力综合作用下孔隙率随颗粒的移动重排及液相对固相的不断润湿过程而逐渐降低。颗粒重排及致密化过程可以进一步细分为如下 3 个阶段: 在烧结初始阶段, 毛细力较小, 孔隙率降低的速度较缓慢; 第二阶段, 随着时间的延长, 颗粒逐渐靠近, 毛细力增大, 颗粒运动速度相应增大, 孔隙率降低速度逐渐增大; 第三阶段, 伴随体系中有些颗粒相继开始接触, 有些颗粒被液相完全包围不再受毛细力作用, 颗粒运动状态趋于稳定, 孔隙率也逐渐趋于稳定。

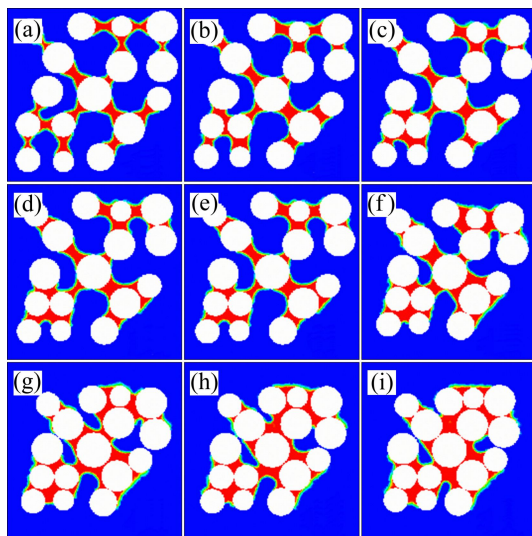


图 6 $\theta=10^\circ$, $S_L/S_S=0.2$, $R=10 \mu\text{m}$ 和在不同时间下三十二球模型中密度云图演化图像及相同初始液相量、不同平均颗粒半径下孔隙率随时间的变化

Fig. 6 Evolution of microstructure during liquid-phase sintering at $\theta=10^\circ$, $S_L/S_S=0.2$, $R=10 \mu\text{m}$ and time of 0.05(a), 0.2(b), 0.5(c), 1(d), 1.5(e), 2(f), 3(g), 5(h) and 7 μs (i), respectively, and porosity of liquid-phase sintering system as function of time for particles with different sizes at equal liquid amount(j)

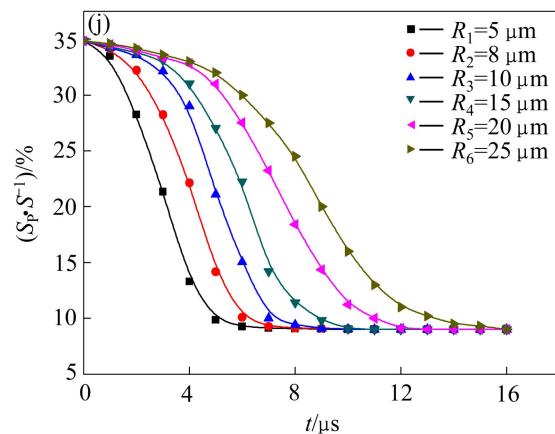
鉴于上述模拟是针对二维烧结体系, 本文作者还研究了在不同固-液颗粒尺寸及不同初始液固面积比下, 烧结体系孔隙率随时间的变化。图 6(j)所示为固体颗粒平均半径分别为 5、8、10、15、20 和 25 μm 的烧结体系在初始液固面积比为 20%条件下, 孔隙率 S_p/S (S_p 为孔隙面积, S 为截面总面积)随时间的变化。由图 6(j)可知, 颗粒尺寸越小, 孔隙率降低速率越快, 但当液相烧结体系达到平衡时, 孔隙率相差不大, 说明液相烧结最终孔隙率的大小与初始固液比相关。

图 7 所示为不同初始固液面积比条件下体系最终致密化形貌及稳态孔隙率与初始固液比关系。由图 7 可知, 初始液固比越大, 稳态孔隙率越小, 致密化效果越好。

KINGERY^[26]提出的液相烧结第一阶段收缩动力学方程为

$$\Delta L/L = 1/2 \cdot \Delta S/S = 1/3 \cdot \Delta V/V = Kr^{-1}t^{1+x} \quad (15)$$

式中: $\Delta L/L$ 为线收缩率; $\Delta S/S$ 为面收缩率; $\Delta V/V$ 为体收缩率; r 为原始颗粒半径。KINGERY 随后通过对不同成分和粒度的 Fe-Cu 复合粉末压坯在 1150 $^\circ\text{C}$ 进行液相烧结获得的致密化动力学曲线验证了上述方程的正确性, 且得出对于 Fe-Cu 液相烧结体系, $1+x=1.3\sim 1.4$ 。在烧结第一阶段, 主要的密实化机理是毛细力作用下颗粒的重排, Cu 对 Fe 和 W 都具有良好的润湿性, 在烧结第一阶段应具有相似的致密化规律。如图 8 所示, 将模拟所得 $\ln(\Delta S/S)$ 对 $\ln t$ 作图, 所得数据



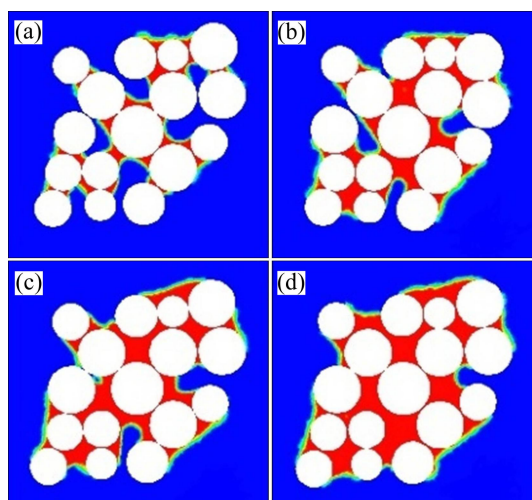


图 7 初始液-固面积比分别为 0.05、0.15、0.3 和 0.45 情况下液相烧结体系的微观形貌及稳态孔隙率与初始固-液面积比的关系

Fig. 7 Final microstructures of liquid-phase sintering at initial solid-liquid area ratios of 0.05(a), 0.15(b), 0.3(c), 0.45(d), respectively, and steady-state porosity S_p/S as function of initial solid-liquid area ratio S_L/S_S (e)

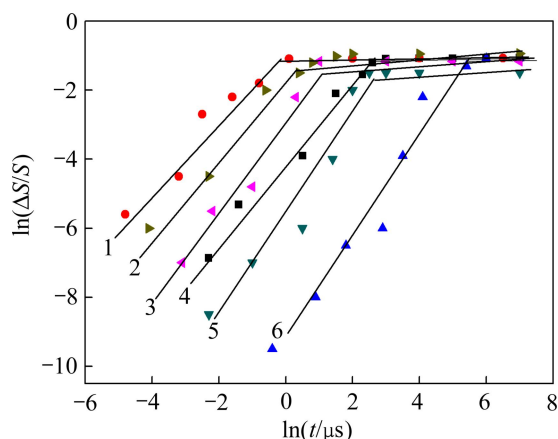
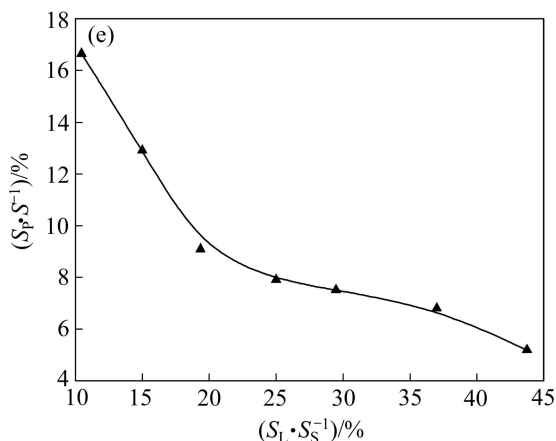


图 8 不同烧结条件下液相烧结体系收缩率与时间关系

Fig. 8 Shrinkage of liquid-phase sintering system under different condition: 1— $R=8 \mu m$, $S_L/S_S=0.3$; 2— $R=8 \mu m$, $S_L/S_S=0.25$; 3— $R=8 \mu m$, $S_L/S_S=0.2$; 4— $R=5 \mu m$, $S_L/S_S=0.2$; 5— $R=10 \mu m$, $S_L/S_S=0.2$; 6— $R=20 \mu m$, $S_L/S_S=0.2$

基本呈线性关系, 将所得结果进行线性拟合, 所得斜率 $k=1.2808$, 对应于 KINGERY 公式中 $1+x=1.2808$ 。由此可见, 模拟结果与理论计算结果基本一致。

4 结论

1) 结合液相烧结颗粒所受作用力的理论模型、N-S 方程及初始几何模型, 建立了液相烧结模型, 并应用于 W-Cu 液相烧结体系, 模拟了液相烧结第一阶段的润湿及致密化行为。本模型包含气、液及固三相。

2) 利用 VOF 模型结合 PISO 算法求解液相及气相相应的 N-S 方程。根据颗粒所受液桥提供的毛细力及颗粒运动过程中所受黏性力, 编制程序描述固体颗粒的移动。

3) 用三球模型研究了颗粒在毛细力和黏性力综合作用下的颗粒移动及液相润湿行为; 用三十二球模型研究了液相烧结第一阶段的颗粒重排和致密化行为, 并将此阶段进一步分为 3 个阶段: 在烧结初始阶段, 毛细力较小, 孔隙度降低的速度较缓慢; 第二阶段, 随着时间的延长, 颗粒逐渐靠近, 毛细力相应增大, 孔隙率降低速度逐渐增大; 第三阶段, 体系中部分颗粒相继开始接触, 部分颗粒被完全包围后不再受毛细力作用, 颗粒运动状态趋于稳定, 孔隙率也逐渐趋于稳定。

4) 探讨了烧结体系颗粒尺寸对致密化速度的影响及不同初始液-固比与烧结体系最终孔隙率的关系。所得面积收缩率与 KINGERY 提出的第一阶段收缩动力学方程进行了对比, 计算结果与理论结果基本一致。

5) 在本模型中只考虑了液相烧结第一阶段的致密化过程, 下一步的研究将进一步综合考虑第二、三阶段烧结过程, 从而达到对整个致密化过程的模拟。

REFERENCES

- [1] VILLANUEVA W, GRONHAGEN K, AMBERG G, AGREN J. Multicomponent and multiphase simulation of liquid-phase sintering[J]. Computational Materials Science, 2009, 47:

- 512–520.
- [2] HPPANN W J, RIEGGER H. Modelling of rearrangement processes in liquid phase sintering[J]. *Acta Metallurgica*, 1975, 23: 965–971.
- [3] LU P Z, XU X P, YI W W, GERMAN R M. Porosity effect on densification and shape distortion in liquid phase sintering[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 318: 111–121.
- [4] 黄培云. 粉末冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011: 311.
- HUANG Pei-yun. Powder metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011: 311.
- [5] MANESHIAN M H, SIMCHI A. Solid state and liquid phase sintering of mechanically activated W-20 wt.% Cu powder mixture[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2008, 463: 153–159.
- [6] YU J H, KIM T H, LEE J S. Particle growth during liquid phase sintering of nanocomposite W-Cu powder[J]. *Nanostructured Materials*, 1997, 9(1): 229–232.
- [7] GERMAN R M, SURI P, PARK S J. Review: Liquid phase sintering[J]. *Journal of Materials Science*, 2009, 44: 1–39.
- [8] MEHRABADI M M, XU K. Mechanics of powders in the initial rearrangement stage of liquid-phase sintering[J]. *Mechanics of Materials*, 1998, 28: 237–245.
- [9] ANESTIEV L A, FROYEN L. Model of the primary rearrangement processes at liquid phase sintering and selective laser sintering due to biparticle interactions[J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 86(7): 4008–4017.
- [10] MORTENSEN A. Kinetics of densification by solution-precipitation[J]. *Acta Materialia*, 1997, 45(2): 749–758.
- [11] OH U C, CHUNG Y S, KIM D Y. Effect of grain growth on pore coalescence during the liquid phase sintering of MgO-CaMgSiO₄ systems[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2005, 71(10): 854–857.
- [12] SVOBODA J, RIEDEL H, GAEBEL R. A model for liquid phase sintering[J]. *Acta Materialia*, 1996, 44(8): 3215–3226.
- [13] VILLANUEVA W, AMBERG G. Some generic capillary-driven flows[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2006, 32(9): 1072–1086.
- [14] QI Z, LEONG C L. Maps of spreading during the initial stage of liquid-phase sintering[J]. *Scripta Materialia*, 2010, 62(8): 544–547.
- [15] ZORAN S N, MASAHIRO Y. Numerical simulation of pore evolution during liquid-phase sintering[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2010, 51: 1140–1145.
- [16] ZORAN S N, FUMIHIRO W. Computer study of liquid phase sintering three-dimensional time dependent rearrangement [EB/OL]. [2013-11-10]. <http://iopscience.iop.org/1757-899X/18/2/022004>.
- [17] CHENG K M, XU T, ZHANG H, WANG S Q, DU Y, ZHANG L J, KONG D F, ZHANG Z J. Application of CALPHAD approach in simulation of liquid phase migration of cellular cemented carbide[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2014, 42: 180–184.
- [18] 范景莲, 朱松, 刘涛, 田家敏. 超细/纳米 W-20Cu 复合粉末的液相烧结机制[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(7): 1587–1593.
- FAN Jing-lian, ZHU Song, LIU Tao, TIAN Jia-min. Mechanism of ultrafine/nano W-20Cu composite powder during liquid sintering[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(7): 1587–1593.
- [19] 汪维金, 周志耀, 詹士生, 杨宁, 朱玉斌. 钨铜生坯在连续液相烧结中的致密化行为[J]. *稀有金属材料与工程*, 2009, 38(4): 730–733.
- WANG Wei-jin, ZHOU Zhi-yao, ZHAN Tu-sheng, YANG Ning, ZHU Yu-bin. The densification of W-Cu green in continuous liquid phase sintering[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38(4): 730–733.
- [20] 娄静, 易健宏, 周承商. 微波烧结 WC-Co 硬质合金致密化与晶粒生长[J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(7): 1976–1983.
- LOU Jing, YI Jian-hong, ZHOU Cheng-shang. Densification and grain growth of microwave sintered WC-Co cemented carbide[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(7): 1976–1983.
- [21] 鲍寅祥, 张晓泳, 周科朝. 颗粒在液相中溶解-析出过程的蒙特卡罗模拟[J]. *粉末冶金材料与科学与工程*, 2012, 17(1): 18–24.
- BAO Yin-xiang, ZHANG Xiao-yong, ZHOU Ke-chao. Monte-Carlo simulation for dissolution-precipitation process of particle in liquid phase[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2012, 17(1): 18–24.
- [22] 于勇. FLUENT 入门与进阶教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008: 46.
- YU Yong. FLUENT introduction and advance tutorial[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2008: 46.
- [23] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39(1): 201–225.
- [24] LEE S M, CHAIX J M, MARTIN C L, ALLIBERT C H, KANG S J L. Computer simulation of particle rearrangement in the presence of liquid[J]. *Metals and Materials*, 1999, 5(2): 197–203.
- [25] 范志康, 梁淑华, 肖鹏. CuW 假两相合金的溶渗参数研究[J]. *中国有色金属学报*, 2001, 11(S1): s102–s104.
- FAN Zhi-kang, LIANG Shu-hua, XIAO Peng. Infiltration parameters of CuW pseudobinary alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2001, 11(S1): s102–s104.
- [26] KINGERY W D. Densification during sintering in the presence of a liquid phase. I: Theory[J]. *Journal of Applied Physics*, 1959, 30(3): 301–306.

(编辑 陈卫萍)