

文章编号: 1001-4888(2016)03-0361-08

基于相场模型的金属微波烧结演化机制 分析及同步辐射断层扫描实验验证^{*}

康丹, 许峰, 胡小方, 刘文超, 董博, 肖宇

(中国科学技术大学材料力学行为和设计重点实验室, 安徽合肥 230027)

摘要: 为了探索不同种类金属材料的微波烧结机制, 本文针对钛和铝两种具有不同电磁学特性的金属材料, 分析了微波与金属微粒的相互作用。依据经典的麦克斯韦方程, 金属表面产生电子涡流和趋肤效应。由 P. Mishra 和 K. I. Rybakov 等提出的金属在微波中的加热效率理论, 推导出钛金属表面的热效应明显高于铝。因为电子涡流在磁场中产生指向颗粒内部的洛伦兹力这一微波非热效应, 阻碍了内部物质向外的扩散, 且铝的感应涡流大于钛, 故其向心力更大。由于微波的热效应和非热效应导致物质扩散的驱动力不同, 得出“钛的微波烧结速率明显大于铝”这一区别于常规烧结的结论。将获得的分析结果引入相场数值模拟, 改变相场模型中控制演化过程中的表面和体扩散变量, 获得不同的模拟结果, 定量分析了烧结颈等微观结构参数随模拟时间的演化曲线。结合同步辐射断层扫描(SR-CT)技术获得的金属在微波烧结过程中的实验参数, 与理论分析和模拟结果相吻合, 从而验证了分析和模拟的正确性和可行性。上述结果可为研究金属在微波烧结过程中的演化机制提供支持。

关键词: 金属; 微波烧结; 微结构演化; 相场动力学模型; 同步辐射断层扫描

中图分类号: O432 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-16-013

0 引言

微波烧结是近年来发展迅速的新型材料加热烧结技术。传统加热方式原理是使热量从外向内传递, 材料中不可避免地存在温度梯度而使加热不均匀。和传统的常规加热方式相比, 微波是利用微波的特殊波段与材料的基本结构耦合使温度迅速升高, 能耗仅为传统加热方式的几分之一甚至几十分之一, 同时可实现温度均匀的整体加热^[1,2], 避免了传统方式造成的局部过热现象, 降低了内部热应力, 最终获得的产品力学性能更加优异, 因此在陶瓷等材料的高温烧结方面引起越来越多的关注^[3,4]。传统观点认为块状金属材料会强烈反射微波而不能被加热, 但 Roy 等人在 1999 年发现金属粉末可以有效地吸收微波^[5], 首次实现了金属粉末在微波场中的致密化烧结, 并将成果发表于 nature 期刊上, 该课题组针对一系列金属进行研究发现, 微波加热金属使颗粒尺寸分布更均匀, 孔隙形状也更圆滑, 增强了金属材料的致密程度, 因此表现出更好的机械性能^[6,7]。由于微波烧结金属材料的优越性, 微波烧结制备金属材料已经逐渐成为一个研究热点, 研究人员开展了大量金属及合金的烧结研究^[8-10]。然而因为微波烧结金属的复杂性, 加热机理尚不清晰, 迄今为止尚未形成关于微波—金属耦合机制公认的比较全面的

^{*} 收稿日期: 2016-01-21; 修回日期: 2016-02-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 11272305, No. 11172290, No. 11472265, No. 10902108), 973 项目(No. 2012CB937504)和安徽省自然基金(No. 1508085MA17)共同资助

通讯作者: 许峰, 男, 副教授。研究方向: 基于同步辐射 CT 技术实验固体力学。Email: xufeng3@ustc.edu.cn

理论^[11,12]。由于不同的金属具有不同的电磁学性能,且和微波的相互作用存在差异,烧结获得的材料结构性能也不同,因此,需要针对不同的金属微波烧结展开研究。

目前,已有研究者开展了微波烧结金属的 SR-CT 实验研究^[13],实时在线地观测微观结构的演化,但是实际的微波烧结过程是各种物理过程(如表面扩散、晶界扩散、蒸发—凝聚扩散和晶粒生长等)相互耦合的结果,具有复杂的非线性关系,通过数值模拟,有利于解析相关作用机制。相场(phase field)方法利用空间梯度描述扩散界面,不需要追踪界面的几何形态,大大提高了运算效率,通过连续的场变量来描述微观结构,对界面的形态没有限制,能更精准地实现多种扩散机制耦合作用下微观形貌演化的模拟^[14-16]。

为了研究微波烧结不同金属材料的机理,本文以广泛应用于常规和新型材料中的金属铝(Al)和钛(Ti)作为研究对象,通过分析趋肤效应和洛伦兹力,给出两者的热和非热效应结果,并且得出 Ti 比 Al 更容易烧结这一区别于常规烧结的结论;将相应的理论分析代入相场模型中,得到烧结颈微观结构的演化数据;引入同步辐射 CT 技术获得的实验结果,验证了分析和模拟的正确性和可行性。

1 数值模拟

1.1 微波烧结对物质扩散的影响

经典的麦克斯韦方程表明,块体金属因反射大部分微波能量而不会被加热。但实验研究发现,金属颗粒尺寸减小至微米甚至纳米尺度时,微波吸收系数明显增加^[17],且电导率降低迅速,微波能穿透的深度随之增加,其在不同金属的穿透深度是不同的。

1.1.1 热效应

迅速变化的微波磁场的切向分量会在金属粉末表面感生出涡流电场 E ,自由电子运动会释放焦耳热,产生涡流损耗,入射的微波能量得到有效地衰减。根据 P. Mishra 等^[18]和 K. I. Rybakov 等^[19]的理论研究,涡流在粉末表面单位面积产生的热量 P 为:

$$P = \frac{2R_s |E_0|^2}{\eta_0} \quad (1)$$

式中, R_s 为表面电阻($R_s = \frac{1}{\delta\sigma}$), σ 为导电率; E_0 为颗粒表面的电场强度; η_0 为真空阻抗(377Ω)。如果金属颗粒直径为 r_p 的小球,被吸收能量完全转化为粉末内能,则温度变化为:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{6R_s |E_0|^2}{\eta_0^2 r_p \rho C_p} \quad (2)$$

式中, T 为温度; t 为加热时间; ρ 和 C_p 为密度和热容。同样微波功率和加热时间条件下, Ti 的温度变化为 Al 的 6 倍,而 Ti 在常规加热条件下的烧结温度是 Al 的 2.5 倍(Ti 的烧结温度为 1258°C , Al 为 495°C),涡流损耗导致 Ti 金属颗粒在微波场中加热效率更高,加速了 Ti 颗粒表面扩散速度。

1.1.2 非热效应

除了上述热效应外,电磁波在传播时,由于金属表面涡流自由电子的“屏蔽”作用,将发生趋肤效应。由于 Al 的导电性能更强,且自由电子更多,“屏蔽”作用更强,使得微波衰减速度更快。根据趋肤深度 $\delta = 0.029 \sqrt{\rho\lambda_0}$ (ρ 是电阻率, λ_0 是电磁场波长)计算可知,同样颗粒尺寸下, Ti 的趋肤深度约为 Al 的 4 倍,微波电磁场在 Ti 颗粒中穿透的距离更远(图 1),更有利于 Ti 颗粒内部和微波的相互作用。



图 1 Al(a) Ti(b) 微波在金属颗粒中的穿透深度

Fig. 1 Microwave penetration depth in the metal particles

在快速交变磁场的作用下,电场力和洛伦兹力驱动金属颗粒表面导电电子产生交变的感应涡流,由

涡流产生的感应磁场及其磁感应强度也是变化的,其变化方向和微波磁场的变化方向相反。例如微波磁场是垂直向内变小的,则感应涡流产生的磁场应该向外增大,故表面涡流的方向为逆时针,涡流和微波磁场作用下产生指向颗粒中心的洛伦兹力(图2),抑制了物质向外扩散。由于 Al 具有较强的磁电性能,其向心的洛伦兹力更大,抑制了 Al 的体扩散。

1.2 相场数值模拟

相场方法以 Ginzburg-Landau 理论为基础,用微分方程来体现扩散、有序化势和热力学驱动的综合作用。相场方法引入相场变量 Ψ ,表征某时刻系统中各点的物理状态: $\Psi=1$ 代表固相, $\Psi=0$ 代表气相,在 $0<\Psi<1$ 的区域代表固气界面。在相场模型中,颗粒和气孔由密度场 ρ 表示,不同的 n 个颗粒由长程取向场 η_i ($i=1,2,\dots,n$) 表示^[20],体系总自由能为:

$$F = \int_V \left\{ f_0[\rho(r); \eta_i] + \frac{1}{2} \beta_\rho |\nabla \rho|^2 + \frac{1}{2} \beta_\eta \sum_i |\nabla \eta_i|^2 \right\} d^3 r \quad (3)$$

式中, f_0 为体自由能密度; β_ρ 和 β_η 是密度场和长程取向场的界面能系数。

$$f_0(\rho, \eta_i) = A(\rho^4 + \frac{-4\rho_{vap} - 4(1-V_c) - 2}{3}\rho^3 + \frac{4\rho_{vap}(1-V_c) + 2\rho_{vap} + 2(1-V_c)}{2}\rho^2 - 2\rho_{vap}(1-V_c)\rho) + B(\rho^2 + 6(1-\rho) \sum_i \eta_i^2 - 4(2-\rho) \sum_i \eta_i^3 + 3 \sum_i \eta_i^4 + 6C_{gbe} \sum_i \sum_{j \neq i} \eta_i^2 \eta_j^2) \quad (4)$$

式中, ρ_{vap} 是蒸汽密度; V_c 为平衡空位浓度; A 和 B 为常数; C_{gbe} 是和界面能相关的系数。

密度场和取向场的演化控制方程为:

$$\frac{d\rho}{dt} = \nabla \cdot [M \nabla (\frac{\partial f_0}{\partial \rho} - \beta_\rho \nabla^2 \rho)] \quad (5)$$

$$\frac{d\eta_i}{dt} = -L_i (\frac{\partial f_0}{\partial \eta_i} - \beta_\eta \nabla^2 \eta_i) \quad (6)$$

由于热效应和非热效应影响了金属的表面扩散和体扩散等,故物质扩散系数 M 采取以下形式:

$$M = M_{vol} \phi(\rho) + M_{vap} [1 - \phi(\rho)] + M_{surf} \rho(1 - \rho) + M_{gb} \sum_i \sum_{j \neq i} \eta_i \eta_j \quad (7)$$

式中, $\Phi = \rho^4(7\rho^2 - 18\rho + 12)$; M_{vol} , M_{vap} , M_{surf} 和 M_{gb} 分别与体扩散、蒸发-凝聚、表面扩散和晶界扩散系数相关。由于金属在微波中以涡流损耗为主,因此表面扩散系数 M_{surf} 占据最大比例。模拟参数 β_ρ 和 β_η 分别取 10 和 3.75; 常数 A 和 B 的取值分别为 16 和 1, $\rho_{vap} = 0.009$, $V_c = 0.001$, 使得界面能和表面能之比为 0.66。由 1.1 的分析可知,热效应和非热效应影响了 Al 和 Ti 的表面扩散和体扩散,故模拟 Ti 的演化时, M_{vol} , M_{vap} , M_{surf} 和 M_{gb} 对应取值为 0.08, 0.012, 45 和 4.1, 代入扩散函数 M 中, M 在表面、界面、颗粒内部和蒸发-凝聚的值分别为 2.0, 0.4, 0.08 和 0.016。模拟 Al 时 M_{vol} , M_{vap} , M_{surf} 和 M_{gb} 则分别为 0.02, 0.012, 10 和 4.1, 模拟步长取值 0.001, 每隔 500 步统计一次模拟结果。图 3 展示了 Al 和 Ti 微观结构在相同模拟步长和步数情况下的演化结果。从图 4 可以看出,在同一模拟时间下, Ti 的演化程度明显比 Al 剧烈。每隔 500 步统计 Ti 和 Al 的烧结颈大小和晶界位置,结果如图 5 所示。由图可看出,在模拟开始时,两种金属的烧结颈均快速形成,且 Ti 的烧结颈生长速率明显快于 Al,但晶界的位置基本稳定。到模拟后期时,晶界位置发生明显移动,直至吞并小颗粒。

2 实验验证

微波烧结是一个高温动态过程,传统的光学或电子显微技术只能观测样品表面形貌且难以实现无损实时的在线实验。SR-CT 技术是近年来发展起来的一种无损检测技术,利用该技术可以实现在外场(温度场、电磁场等)作用下对材料内部微结构演化的实时、无损观测^[21-23],避免了传统实验方法的缺点,可为验证相场模拟提供有用的实验数据。本实验室利用 SR-CT 技术已经开展了 Al 和 Ti 的微波烧

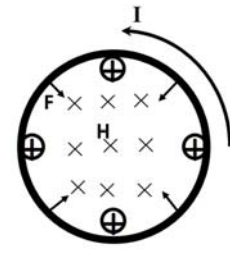


图2 感应涡流产生的洛伦兹力

Fig. 2 Lorentz force generated by induced eddy currents

结在线研究,详细实验参见文献[13],文献中的实验结果表明,和常规烧结相比,微波加快了金属的烧结(图6)。从实验图像(图7)可以看出,Ti的演化速度明显快于Al,这和常规烧结的现象相反。同时,利用红外热像仪TH5104(测温范围: $-10^{\circ}\text{C} \sim 1500^{\circ}\text{C}$,精度 $\pm 10\%$)对样品温度变化进行观测,升温曲线如图8,由图可知在烧结过程中,两个样品的温度差异较小,而常规烧结中,Ti的烧结温度为Al的2.5倍,证明微波的非热效应产生了重要作用。

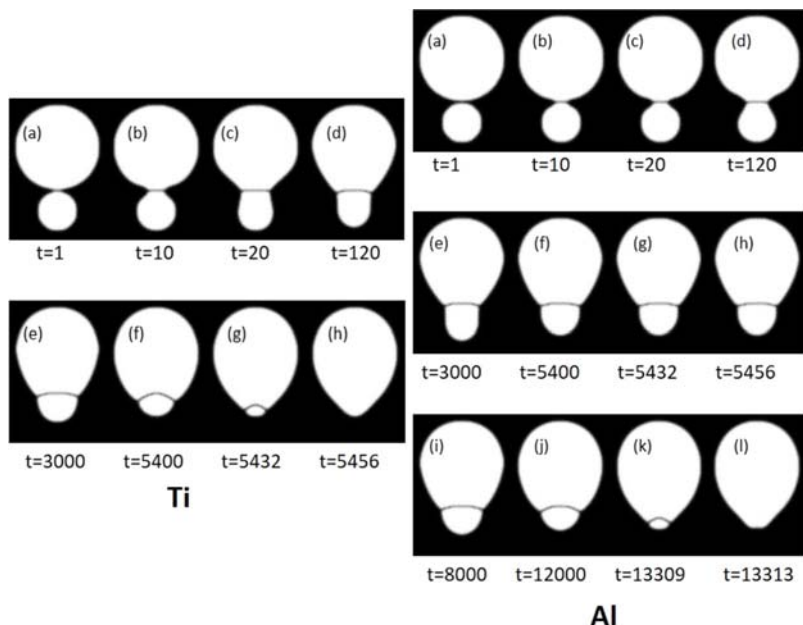


图3 Ti和Al微结构随时间的演化

Fig.3 Microstructure evolution of Ti and Al



图4 同一时间 Ti(虚线)和 Al(实线)的微结构

Fig.4 Microstructure of Ti (dotted line) and Al (solid line) at the same time

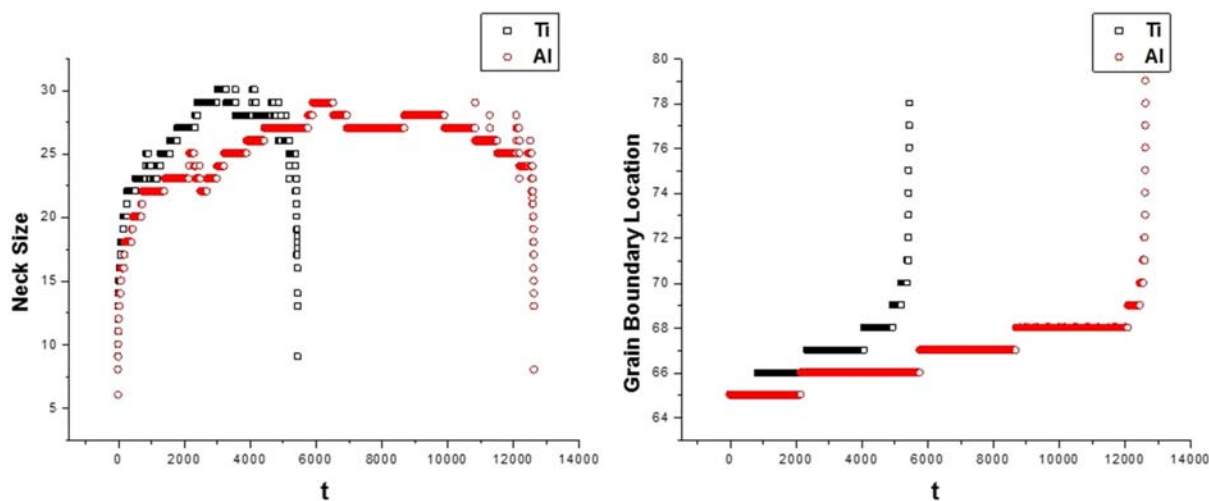


图5 Ti与Al烧结颈尺寸和晶界位置随模拟时间的演化

Fig.5 Evolution of sintering neck size and grain boundary location of Ti and Al

颗粒的烧结颈生长,直接反映了烧结的扩散驱动力大小。Kuczynski把烧结颈尺寸和时间的关系归纳如下^[24]:

$$\left(\frac{x}{r}\right)^n = \frac{F(T)}{r^m} t \quad (8)$$

式中, x 和 r 分别为烧结颈和晶粒的平均直径。图9是烧结颈相对尺寸和烧结时间的双对数关系,由图可以看出在微波烧结实验中,Ti的生长演化速度明显快于Al,证明了本文理论分析和模拟的正确性。

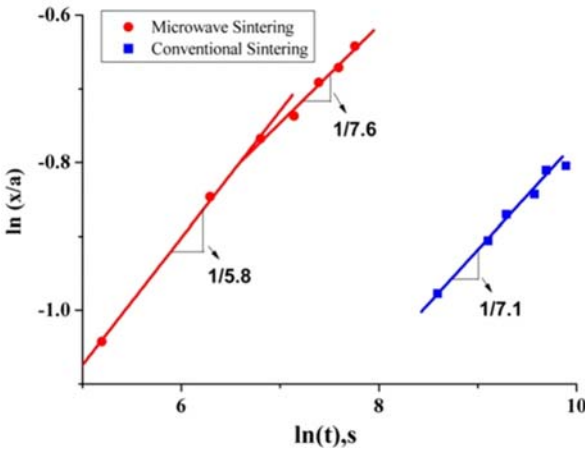


图 6 金属 Al 在常规烧结和微波烧结中的烧结颈生长双对数曲线
Fig. 6 Sintering neck growth curves at $\ln(x/a)-\ln(t)$ of Al

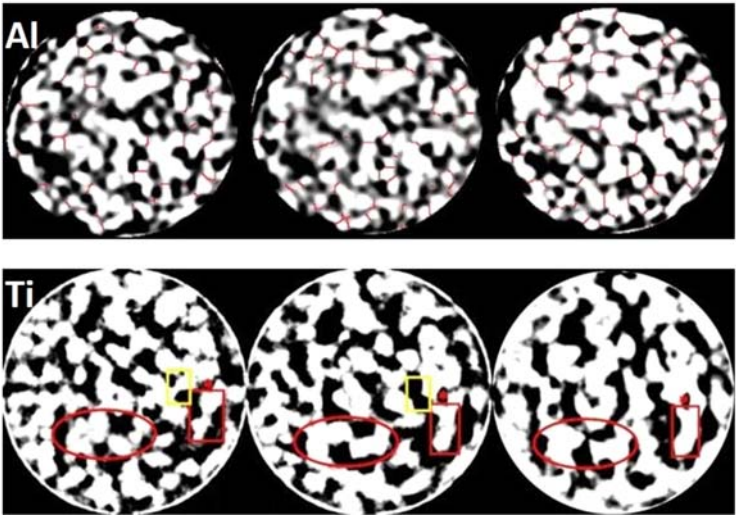


图 7 Ti 和 Al 样品同一区域在不同烧结时间的演化图
Fig. 7 Microstructure evolution of Ti and Al sample during sintering time

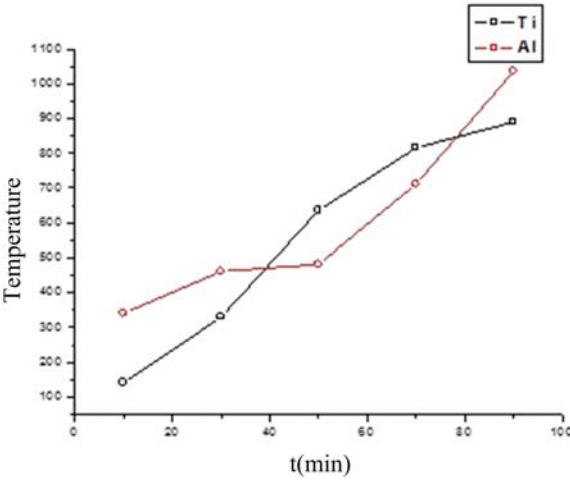


图 8 Ti 和 Al 在微波场中的温度变化
Fig. 8 Temperature variation of Ti and Al in the microwave field

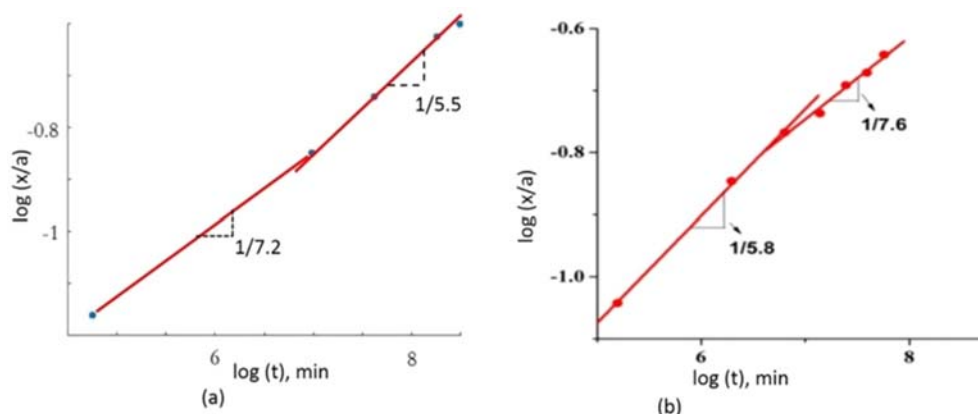


图 9 Ti (a)和 Al (b)烧结颈生长的双对数曲线

Fig. 9 Sintering neck growth curves at $\log(x/a)$ - $\log(t)$ of Ti (a) and Al (b)

3 结论

为了探索不同种类金属材料的微波烧结机制,本文针对 Ti 和 Al 两种具有不同电磁学特性的金属材料,根据麦克斯韦方程,结合 P. Mishra 和 K. I. Rybakov 的微波加热理论,研究分析了两种金属颗粒在烧结过程中与微波产生的相互作用。

(1) 分析了涡流损耗产热导致 Ti 和 Al 表面加热效率的不同,Ti 的表面扩散速度明显大于 Al。另一方面,运动的电荷在磁场中产生指向颗粒内部的洛伦兹力,抑制了内部物质向外的扩散,Al 在微波磁场中产生的感应电流更大,造成颗粒的向心力更大,其体扩散速度弱于 Ti。由于热效应和非热效应共同作用,Ti 的烧结速度会明显快于 Al。

(2) 以多种扩散综合作用的相场模型为基础,控制 Ti 和 Al 颗粒模型的表面扩散和体扩散参数,模拟了颗粒间烧结颈的形成、生长和迁移等一系列微观结构演化过程,定量分析了烧结颈的尺寸和晶界位置随模拟时间的演化曲线,结果表明 Ti 的烧结颈演化速度明显大于 Al,晶界迁移发生时期也比 Al 早。

(3) 在 Ti 和 Al 的微波烧结实验中,依托 SR-CT 技术获得了样品微观结构的演化图像,统计烧结颈尺寸随时间演化的数据,并拟合出烧结颈—时间双对数曲线,发现实验中烧结颈演化趋势与理论分析一致;根据 Ti 和 Al 的样品的温度变化曲线,发现在烧结过程中,两个样品的温度差异较小,而常规烧结中,Ti 的烧结温度为 Al 的 2.5 倍,证明微波的非热效应产生了重要作用。样品微观结构的演化和实验过程的升温速率,都表明了微波对金属烧结的促进作用,同时也验证了分析和模拟的正确性和可行性。

致谢: 本文是在国家自然科学基金项目 (No.11272305, No.11172290, No.11472265, No.10902108),973 项目 (No.2012CB937504)和安徽省自然基金 (No.1508085MA17)的共同资助下完成的,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] Yadoji P, Peelamedu R, Agrawal D, et al. Microwave sintering of Ni-Zn ferrites: comparison with conventional sintering[J]. Materials Science and Engineering:B, 2003, 98(3):269—278.
- [2] Oghbaei M, Mirzaee O. Microwave versus conventional sintering: a review of fundamentals, advantages and applications[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 494(1):175—189.
- [3] 晋勇, 薛妃, 汤小文 等. 纳米金属陶瓷材料的微波烧结工艺研究[J]. 机械工程材料, 2004, 28(12):49—51 (JIN Yong, XUE Qi, TANG Xiaowen, et al. Microwave sintering technology of nanometer cermet[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2004, 28(12):49—51 (in Chinese))
- [4] 王美娜, 丘泰, 沈春英. 钛酸镁基介电陶瓷的微波烧结[J]. 机械工程材料, 2009, 21:2085—2088 (WANG

- Meina, QIU Tai, SHEN Chunying. Microwave sintering of magnesium Titanate dielectric ceramics[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2009, 21:2085—2088 (in Chinese))
- [5] Roy R, Agrawal D, Cheng J, et al. Full sintering of powdered-metal bodies in a microwave field[J]. Nature, 1999, 399(6737):668—670.
- [6] Panda S S, Singh V, Upadhyaya A, et al. Sintering response of austenitic (316L) and ferritic (434L) stainless steel consolidated in conventional and microwave furnaces[J]. Scripta Materialia, 2006, 54(12):2179—2183.
- [7] Anklekar R M, Bauer K, Agrawal D K, et al. Improved mechanical properties and microstructural development of microwave sintered copper and nickel steel PM parts[J]. Powder Metallurgy, 2005, 48(1):39—46.
- [8] 周承商, 易健宏, 罗述东 等. 微波烧结 W-Ni-Fe 高密度合金的变形现象及纤维组织[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2010(3):300—304 (ZHOU Chengshang, YI Jianhong, LUO Shudong, et al. Distortion and microstructure of microwave sintered W-Ni-Fe heavy alloys[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2010(3):300—304 (in Chinese))
- [9] 王存龙, 李波, 刘勇. 微波技术在陶瓷与粉末冶金烧结中的应用[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 11(6):97—102 (WANG Cunlong, LI Bo, LIU Yong. The Application of microwave technology in sintering of ceramics and powder metallurgy[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2010, 11(6):97—102 (in Chinese))
- [10] 朱凤霞, 易健宏, 周承商 等. 微波烧结对粉末冶金铜材显微组织与性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2007, 12(6):364—368 (ZHU Fengxia, YI Jianhong, ZHOU Chengshang, et al. The influence of microwave sintering on the powder metallurgy copper's microstructure and performance[J]. Powder Metallurgy Materials Science and Engineering, 2007, 12(6):364—368 (in Chinese))
- [11] Minay E J, Veronesi P, Cannillo V, et al. Control of pore size by metallic fibres in glass matrix composite foams produced by microwave heating[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2004, 24(10):3203—3208.
- [12] Veronesi P, Leonelli C, Bassoli E, et al. Microwave assisted sintering of SLS green metal parts[J]. CD-ROM Proceedings of Sintering, 2003:14—17.
- [13] Xu F, Li Y, Hu X, et al. In situ investigation of metal's microwave sintering[J]. Materials Letters, 2012, 67(1):162—164.
- [14] 景晓宁, 倪勇, 何陵辉 等. 陶瓷烧结过程孔隙演化的二维相场模拟[J]. 无机材料学报, 2002, 17(5):1078—1082 (JING Xiaoning, NI Yong, HE Linghui, et al. 2-D phase-field simulation of pore evolution in sintering ceramics[J]. Journal of Inorganic Materials, 2002, 17(5):1078—1082 (in Chinese))
- [15] 景晓宁, 赵建华, 何陵辉. 固相烧结后期晶粒和气孔拓扑生长演化的二维相场模拟[J]. 材料科学与工程学报, 2003, 21(2):170—173 (JING Xiaoning, ZHAO Jianhua, HE Linghui. 2-D phase field simulation of coupled pore and grain topological evolution during final stage sintering[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2003, 21(2):170—173 (in Chinese))
- [16] Kumar V, Fang Z Z, Fife P C. Phase field simulations of grain growth during sintering of two unequal-sized particles[J]. Materials Science and Engineering A, 2010(528):254—259.
- [17] Marquardt P, Börngen L, Nimitz G, et al. Microwave absorption by small metal particles[J]. Physics Letters A, 1986, 114(1):39—42.
- [18] Mishra P, Upadhyaya A, Sethi G. Modeling of microwave heating of particulate metals[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2006, 37(5):839—845.
- [19] Rybakov K I, Semenov V E, Egorov S V, et al. Microwave heating of conductive powder materials[J]. Journal of Applied Physics, 2006, 99(2):023506.
- [20] 高英俊, 罗志荣, 黄创高. 相场方法模拟变形合金的静态再结晶过程[J]. 固体力学学报, 2010(S1):29—33 (GAO Yingjun, LUO Zhirong, HUANG Chuangao. Phase field simulation of static recrystallization for deformation alloys[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2010(S1):29—33 (in Chinese))
- [21] 江帆, 胡小方, 许峰 等. 陶瓷粉末烧结演化的同步辐射观测[J]. 实验力学, 2007, 22(5):477—482 (JIANG Fan, HU Xiaofang, XU Feng, et al. Observation on the ceramic powde revolution during sintering by synchrotron sadiation X-ray computed tomography[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(5):477—482 (in Chinese))
- [22] 胡小方, 景晓宁, 赵建华 等. 应用 SR-CT 技术研究陶瓷材料的孔隙结构及密度分布[J]. 实验力学, 2003, 18

- (4):485—489 (HU Xiaofang, JING Xiaoning, ZHAO Jianhua, et al. A study on the porosity and density distribution of ceramics by using SR-CT technique[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2003, 18(4):485—489 (in Chinese))
- [23] 牛玉, 许峰, 胡小方 等. 铝素坯烧结过程微结构演化的实时观测[J]. 实验力学, 2012, 27(2):140—147 (NIU Yu, XU Feng, HU Xiaofang, et al. The real-time observation of microstructure evolution of aluminum element during sintering process[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(2):140—147 (in Chinese))
- [24] 果世驹. 粉末烧结理论[M]. 冶金工业出版社, 1998:35—42 (GUO Shiju. Powder sintering theory[M]. Metallurgical Industry Press, 1998:35—42 (in Chinese))

Evolution Mechanism Analysis of Metal Microwave Sintering Based on Phase-Field Model and its Experimental Validation by SR-CT

KANG Dan, XU Feng, HU Xiao-fang, LIU Wen-chao, DONG Bo, XIAO Yu

(Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: In order to explore the mechanism of microwave sintering of different kinds of metal material, in this paper, both titanium and aluminum with different electromagnetic characteristics were selected, the interaction between microwave and metal particles was analyzed. According to classical Maxwell equations, eddy current and skin effect are generated on metal surface. Based on the microwave heating efficiency theory proposed by P. Mishra and K. I. Rybakov, it is derived that thermal effect of titanium is much higher than that of aluminum. Since Lorentz force generated by eddy current and pointing to the interior of particles has non-thermal effect and hinders the outward diffusion of internal matter, and the induced eddy current of aluminum is larger than that of titanium, so its centripetal force is larger than that of titanium. The driving force of material diffusion is different due to the thermal effect and non thermal effect of microwave. It is concluded that the microwave sintering rate of titanium is obviously larger than that of aluminum, which is different from conventional sintering. Introducing analysis results into phase field numerical simulation, changing the surface and bulk diffusion variables, which control the evolution process, in phase field model, different results were obtained. Quantitative analysis of the evolution of sintering neck and microstructure parameters with the simulation time was carried out. The experimental parameters obtained by synchrotron radiation computed tomography (SR-CT) technology are consistent with the theoretical analysis and simulation results, which verify the correctness and feasibility of the analysis and simulation. Above results may provide support for the study of mechanism evolution of metal subjected to microwave sintering.

Keywords: metals; microwave sintering; microstructure evolution; phase-field dynamics model; Synchrotron radiation computed tomography (SR-CT)