

文章编号: 1001-4888(2018)01-0041-08

金属异质界面对微波烧结扩散影响的在线实验和相场模拟联合分析^{*}

康丹, 许峰, 胡小方, 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: 合金材料具有优异的力学性能和广泛的应用范围, 与传统方法相比, 利用微波制备合金具有明显的优势。为了探索合金材料的微波烧结机制, 本文采用合金领域关注度较高的 Ti 和 Al 混合金属样品, 利用在线实验方式获得了样品在微波烧结时的微观结构演化结果。和单质 Ti 和单质 Al 对比发现, 混合 Ti-Al 样品的烧结温度明显降低, 烧结速率显著增加。由上述现象分析认为, Ti 和 Al 之间形成了金属间化合物, 由于该化合物和单质金属电导率不同, 导致界面极化现象的产生。极化损耗导致界面处温度升高, 提高了界面物质的扩散速度。同时, 由于界面处物质扩散加剧, 大量原子向烧结颈聚集, 造成空位向晶界扩散。过饱和的空位被晶界上的位错歼灭, 在该处生成牵引力, 促使相邻颗粒之间产生对心刚体运动。利用理论分析的结果, 在相场数值模拟中同时引入多种扩散机制和刚体运动项, 修正密度场控制方程, 并拟合烧结颈等微观结构参数随模拟时间的演化曲线。曲线和实验结果基本一致, 进一步验证了混合金属与微波产生了特殊作用, 即驱动物质扩散的热效应和促使颗粒间向心运动的作用力。上述结果可为研究合金体系在微波烧结过程中的演化机制提供支持。

关键词: 混合金属; 微波烧结机制; 微结构演化; 相场动力学模型; 同步辐射断层扫描(SR-CT)技术

中图分类号: O432

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-093

0 引言

合金材料具有较强的韧性、较高的硬度和强度, 以及抗腐蚀和质量轻等优势, 被广泛应用于航空航天等重要领域。合金在制造过程中需要特殊的工艺或技术, 自 20 世纪 50 年代末开始, 合金性能的提高主要不是靠成分的调整, 而是靠制备工艺的改进^[1], 因此, 研究人员不断探索新型技术用以制备高性能合金材料。自从 Roy^[2]等人首次实现了金属和合金粉末在微波场中的致密化烧结, 利用微波技术烧结金属、合金和金属陶瓷等材料的研究也日益兴起。Roy 等人研究发现, Fe-Ni 合金经过 10~30 分钟微波热处理后, 断裂模量增加了 60%。Brevail^[3]等人利用微波烧结 WC-Co 材料, 获得的样品硬度比常规烧结的高 1~5 GPa, 抗腐蚀能力高出 6 倍; 在微波烧结 W-Ni-Fe 的研究中, 烧结时间减少了 75% 且所需的加热功率更小^[4]; 周承商^[5]等人在研究 W-Ni-Fe 的微波烧结中发现, 合金硬度(HRC)比常规烧结高 2.3, 平均晶粒尺寸比常规烧结低 5.88 μm。利用微波技术可使样品在更低温度下实现快速致密化, 得

^{*} 收稿日期: 2016-05-18; 修回日期: 2016-06-27

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), 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

到的合金晶粒尺寸更加精细和均匀,致密程度更高,机械性能表现更加优秀,能源损耗更低,极大地推动了高性能合金材料制备技术的发展,和常规烧结相比,微波烧结合金的技术具有能耗低、无污染、效率高和产品性能优的特点^[6],被誉为“烧结技术的一场革命”^[7]。

但是,目前微波和金属相互的作用机制尚不清晰,造成烧结过程和合金材料最终的结构和性能都不可控,限制了这一优秀技术的推广应用。虽然科研人员已经展开一系列的机理研究,但研究方法的不足制约了相关研究的进展,因为研究“微波影响合金微观结构演化”的问题需要可靠的实验观测方法,探索“微波烧结合金的作用机理”需要有效的解析结果,因此,研究微波烧结机理,较为有效的方式是可靠的实验手段和有效的数值模拟联合分析,因为实验可以提供直观的数据,而数值模拟可以利用实验数据解析出微波烧结合金的关键影响参数。然而,由于微波加热合金是在高温场、电场和磁场等多场耦合的极端条件下,材料随烧结时间而变化的动态过程,对实验观测条件要求极为严苛;同时,烧结过程是具有复杂微观结构的材料在各种物理过程(如表面扩散,晶界扩散,蒸发-凝聚扩散和晶粒生长等)相互耦合作用下的结果,因此,模拟方法需要能够反映出多种作用机制下的复杂结构演化过程。

由于微波加热环境的极端性和动态性,要求实验手段可在线场作用下实现在线观测。同步辐射断层扫描技术(SR-CT)是近年来发展起来的一种无损检测技术^[8-10],利用该技术可以实现在线场作用下对材料内部微结构演化的实时、无损观测,提供合金材料微观结构在微波作用下实时动态的演化结果。获得微波烧结合金的实验数据以后,再联合数值模拟进行分析,可以解析出微波烧结合金的关键影响参数。但现有烧结模拟方法(如有限元和有限差分法)都需要追踪界面,因此大多基于简单的几何模型,难以处理复杂的表面形态演化,而实际烧结过程中,由于初始形貌的不规则性和物质的扩散,微观结构的界面难以追踪,故这些基于界面跟踪思想的模拟方法难以真实有效地反映实际的烧结过程。相场(phase-field)方法基于扩散界面思想,不需要追踪界面几何形态,通过连续的场变量来描述微观结构,能更精准地实现多种扩散机制的耦合作用下以及微观拓扑形貌演化的模拟^[11-14],真实有效地模拟出和实验过程相符的微观结构演化过程,给出影响合金在微波烧结中的关键影响参数。因此,SR-CT 实验和相场模拟联合分析,是微波烧结混合金属机理研究中有意义的尝试。

为了研究微波烧结合金的相关机制,本文采用在合金材料中应用较为普遍且具有优异力学性能铝钛(Al-Ti)混合金属粉末,利用 SR-CT 技术在线观测该样品在微波烧结过程的变化。本文将通过实验获得样品内部微观结构随烧结实验的演化图像,提取烧结颈等微观参数和烧结时间的关系,分析混合金属和微波间特殊的热、力作用机制,在此分析基础上,修正相场数值模拟热力学扩散系数和引入刚体运动项,验证微波烧结混合金属产生的作用机制。

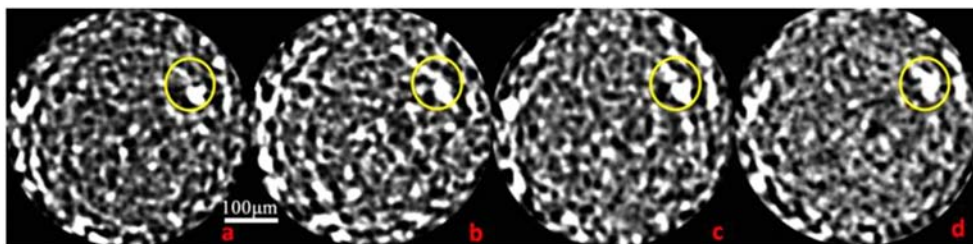


图 1 Al-Ti 同一断层微观结构随烧结时间的演化

Fig. 1 Microstructure evolution of the same cross section at different sintering times

(a) $t=4\text{min}$, (b) $t=18\text{min}$, (c) $t=32\text{min}$, (d) $t=46\text{min}$

1 Al-Ti 异质界面对微波烧结演化促进作用的 SR-CT 在线实验分析

异质界面的存在,导致混合金属体系某些物理性质(如导电性能)和组元金属相比会出现改变,和微波的相互作用也会不同。采用平均尺寸为 $30\mu\text{m}$ 的 Ti 和 Al 颗粒,按 Al 和 Ti 的体积比为 83 : 17 均匀混合,疏松堆积于石英管中。为了在线观测微波加热对 Al-Ti 混合金属微观结构(如界面)演化的影响,在线采集微波烧结过程中样品微观结构演化的投影,图像分辨率为 $0.74\mu\text{m}/\text{pixel}$,并和单质 Al 的研究结果进行对比^[15],图 1 展示了 Al-Ti 样品同一断层随烧结时间的变化,可以清晰地观测到样品内部微

观结构的演化: 颗粒间烧结颈的形成和生长, 颗粒的长大和孔隙的减少等。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 Al-Ti 样品烧结过程的温度变化进行观测记录, 升温曲线如图 2 所示。由图中可以看出样品特殊的烧结现象: 常规烧结时, Ti 的烧结温度为 1200°C , 但在微波加热温度为 480°C 时, Ti 颗粒迅速烧结并且长大(如图 1 中圆圈标注区域)。以上的在线微波实验表明, Al-Ti 混合金属降低了烧结温度, 加速了烧结进程。

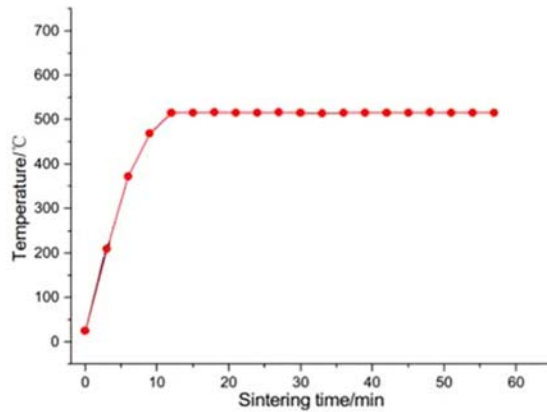


图 2 Al-Ti 样品温度随烧结时间的变化

Fig. 2 Temperature at different sintering times of Al-Ti sample

颗粒的烧结颈生长, 伴随着 Al-Ti 合金界面的形成。把烧结颈尺寸和时间的关系归纳如下^[16]:

$$\left(\frac{x}{r}\right)^n = \frac{F(T)}{r^m} t \quad (1)$$

式中, x 和 r 分别为烧结颈和晶粒的平均直径; $F(T)$ 和 m 对应一定烧结条件的系数, 与温度、材料性质和结构等相关; n 对应生长指数; t 为烧结时间。图 3 是 Al-Ti 和纯 Al 烧结颈相对尺寸与烧结时间的双对数关系, 可以看出: 样品在烧结进行一段时间后, 金属 Al 的烧结颈生长速率由 $1/5.8$ 降低至 $1/7.6$, 和 Al 样品相比, Ti-Al 烧结体的烧结颈生长速率不仅没有下降, 反而由 $1/6.0$ 明显增加到 $1/4.1$ 。统计结果表明, 由于某种特殊机制导致 Ti-Al 混合金属的物质扩散速度发生改变, 促进了烧结进程。

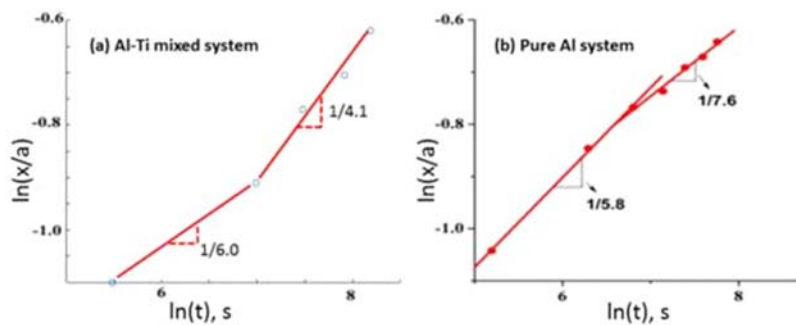


图 3 烧结颈相对尺寸和时间双对数关系

Fig. 3 Sintering-neck growth curves for $\ln(x/a) - \ln(t)$

在微波电磁场作用下, 材料单位体积内吸收的总能量为:

$$W = \omega(\epsilon_0 \epsilon' E^2 + \mu_0 \mu' H^2) / 2 \quad (2)$$

式中, ω 为微波频率; ϵ_0 为真空介电常数; ϵ' 为材料介电损耗; E 为微波电场强度; μ_0 为真空磁导率; μ' 为材料磁损耗; H 为磁场强度。

由于金属颗粒的导电性, 在交变的微波磁场中, 颗粒内产生环绕磁通量变化方向的涡流, 磁感应强度 B 的变化滞后于微波磁场的变化, B 的振幅由颗粒表面向内部减弱, 称为趋肤效应(如公式(3)所示), 故涡流损耗主要存在于颗粒表面。随着烧结的进行, Ti 颗粒和 Al 颗粒的界面因为微波加热形成了金属间化合物, 且该化合物的电导率 σ 小于金属单质, 由公式(3)可知, 异质界面的趋肤深度 δ 增加

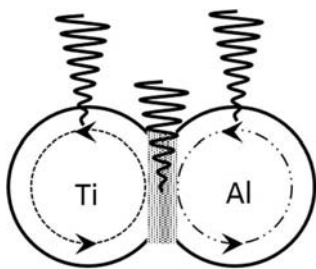


图 4 微波在 Al-Ti 中的分布示意图

Fig. 4 Diagram of microwave in Al-Ti

(如图 4 所示)。由于异质界面和两侧金属颗粒中的微波衰减程度不同,即存在微波强度梯度,促进了 Ti-Al 界面间的物质扩散。

$$\delta = \sqrt{2/\mu\omega\sigma} \quad (3)$$

式中, μ 为磁导率的实部; ω 为角频率。

此外,随着混合金属体系温度的升高,金属颗粒的表面形成氧化物,颗粒间氧化物产生“微区聚焦”效应,微波电场强度在颈部聚集而增强,导致该区域产生了强烈的介电损耗效应,进一步提高了微波能量的吸收和转化,使温度上

升,物质扩散进一步增强。

2 基于在线实验的相场数值模拟及异质界面扩散作用的进一步验证

上文分析中,由于 Al-Ti 间异质界面和微波的相互作用,促进了物质扩散的速率,因此,需要控制相场模型中的热力学扩散系数,模拟微波对合金烧结的促进作用。微波烧结过程中,系统自由能的减少驱动物质扩散,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,体系总自由能为:

$$F = \int_V \left\{ f_0[\rho(r); \eta_i] + \frac{1}{2} \beta_\rho |\nabla \rho|^2 + \frac{1}{2} \beta_n \sum_i |\nabla \eta_i|^2 \right\} d^3 r \quad (4)$$

式中, f_0 为体自由能密度; $\beta_\rho=10$ 和 $\beta_n=1$ 是密度场和长程取向场的界面能系数。 f_0 为双势阱函数,在 $\rho=0$ 和 $\rho=1$ 处取得平衡。

$$f_0(\rho, \eta_i) = A\rho^2(1-\rho)^2 + B[\rho^2 + 6(1-\rho) \sum_i \eta_i^2 - 4(2-\rho) \sum_i \eta_i^3 + 3(\sum_i \eta_i^2)^2] \quad (5)$$

式中, $A=16$, $B=1$ 。

密度场和取向场的演化控制方程为:

$$\frac{d\rho}{dt} = \nabla \cdot [M \nabla (\frac{\partial f_0}{\partial \rho} - \beta_\rho \nabla^2 \rho)] \quad (6)$$

$$\frac{d\eta_i}{dt} = -L_i \left[\frac{\partial f_0}{\partial \eta_i} - \beta_n \nabla^2 \eta_i \right] \quad (7)$$

式中, M 和 L_i 是热力学扩散系数和界面迁移率。实际烧结过程是各种扩散机制耦合的作用,故 M 采取以下形式^[17]:

$$M = M_{vol}\phi(\rho) + M_{vap}[1-\phi(\rho)] + M_{surf}\rho(1-\rho) + M_{gb} \sum_i \sum_{j \neq i} \eta_i \eta_j \quad (8)$$

式中, $\phi=\rho^3(10-15\rho+6\rho^2)$; 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 Ti-Al 界面的存在和微波之间产生了特殊的作用,提升了物质扩散速率,在相场模型中, M_{vol} 、 M_{vap} 、 M_{surf} 和 M_{gb} 这些参数可以和特定材料的物理性质联系起来。由于金属在微波中以涡流损耗为主,因此表面扩散占据最大比例,故在单质金属烧结的模拟中, M_{vol} 、 M_{vap} 、 M_{surf} 和 M_{gb} 对应取值为 0.1、0.01、40 和 4,代表在表面、界面、颗粒内部和蒸发-凝聚比值为 1000:100:10:1。由于混合金属颗粒间异质界面的存在,导致界面处的扩散增强,故模拟 Al-Ti 的演化时, M_{vol} 、 M_{vap} 、 M_{surf} 和 M_{gb} 对应取值为 0.1、0.01、40 和 40。模拟步长取值 0.0001,每隔 100 步统计一次模拟结果。

为了更贴近真实的金属颗粒的微观结构,采用随机堆积的颗粒模型,利用分析所得的参数,代入相场模拟,所得结果如图 5 所示。从图中可以明显看出颗粒间接触、烧结颈生长和气孔孤立球化等典型的烧结现象,但是,统计模拟结果,拟合颗粒间颈部尺寸和模拟时间的双对数曲线,得到的斜率为 1/6.4 (如图 6),依然远远小于实际测量的 1/4.1。由此分析,异质界面的存在,不仅促进了物质的扩散,还存在其他促进烧结进程的作用。

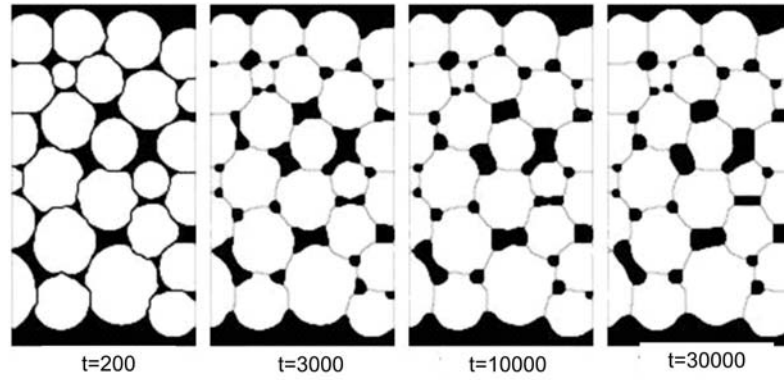


图 5 二维随机堆积模型微结构的演化

Fig. 5 Microstructure evolution of two-dimension model

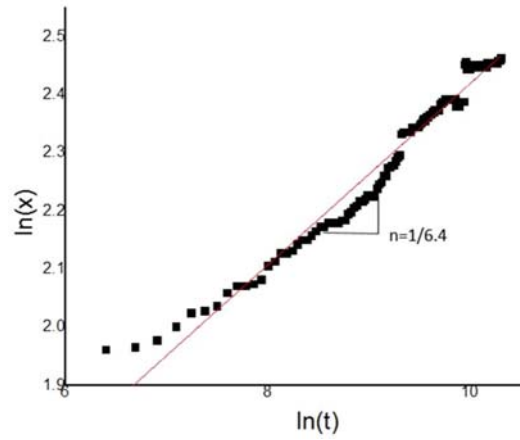


图 6 烧结颈尺寸和时间的双对数曲线

Fig. 6 Sintering neck growth curve at $\ln(x)$ 和 $\ln(t)$

在微波烧结 Al-Ti 混合金属的过程中,金属原子会向烧结颈的方向进行扩散,而空位则会向晶界的方向进行扩散,由于界面处热效应显著,过饱和的空位很快被晶界上的位错歼灭,在空位消失的位置就产生了一个垂直指向晶界的力,此时,异质界面的存在,对 Al-Ti 混合金属的微波烧结产生了力学效应。在相场模型中引入晶界上的作用力:

$$dF_i = \sigma_{gb} = \gamma \sum_{i \neq j} (\rho - \rho_0) \langle \eta_i \eta_j \rangle [\nabla \eta_i - \nabla \eta_j] d^3 r \quad (9)$$

式中, γ 是刚性常数; ρ_0 为平衡状态时的物质密度, $\rho_0 = 0.5$; $[\nabla \eta_i - \nabla \eta_j]$ 表示该点的物质浓度分布梯度,用取向场来代替密度场的原因是为了使(10)式的量纲和应力一致。 $\langle \eta_i \eta_j \rangle$ 的表达式如下:

$$\langle \eta_i \eta_j \rangle = \begin{cases} 1, & \eta_i \eta_j \geq 0.005 \\ 0 & \eta_i \eta_j < 0.005 \end{cases} \quad (10)$$

$\langle \eta_i \eta_j \rangle$ 的作用是确定晶界的位置,只有在两个颗粒相交的晶界上,两个取向场之积才不为 0。对 dF_i 积分,得到某个金属颗粒 i 受到的合力 $F_i = \int_V dF_i$, 颗粒的刚体运动由下式计算:

$$v = \frac{m}{V_i} F_i \eta_i \quad (11)$$

将刚体运动项引入密度和取向控制方程,即有

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \nabla \cdot \left[M \nabla \frac{\delta F}{\delta \rho} - \rho v \right] \quad (12)$$

$$\frac{\partial \eta_i}{\partial t} = -L \frac{\delta F}{\delta \eta_i} - \nabla \cdot [\eta_i v_i] \quad (13)$$

在晶界扩散 M_{gb} 增强的相场模型基础上,将刚体模型引入到数值模拟过程, γ 取值 50,模拟结果如图 7 所示。从图中可以看出颗粒间的气孔在球化以后,由于晶界作用力的影响,某些气孔还被排出(如图 7 中椭圆、矩形和三角形局域所示),烧结现象更加明显,整个体系更加致密。

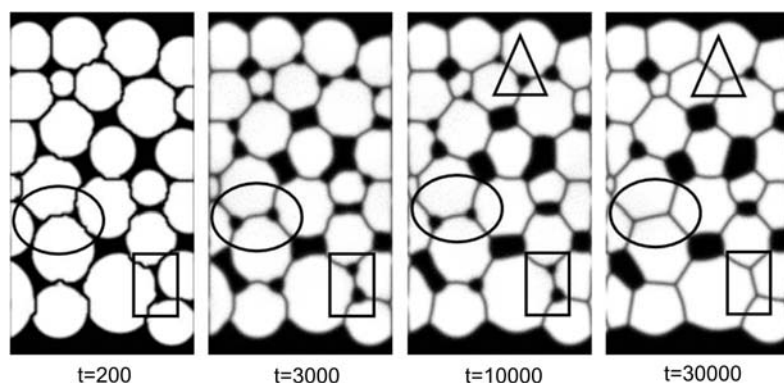


图 7 引入晶界应力的微观结构演化过程

Fig. 7 Microstructure evolution with grain boundary stress

拟合烧结颈尺寸和模拟时间的双对数曲线(图 8),得到的斜率为 $1/4.3$,和实验结果一致。通过扩散系数增强和引入界面作用力的相场模型,证明异质界面和微波产生了相互作用,不仅使物质扩散效应增强,而且由于空位湮灭等原因,在界面上产生了吸引力,也进一步提升了烧结颈的生长速度。

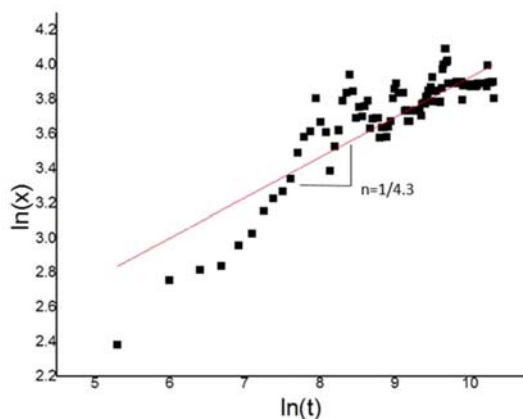


图 8 引入界面应力后的烧结颈尺寸和时间的双对数曲线

Fig. 8 Sintering neck growth curve at $\ln(x)-\ln(t)$ with interfacial stress

3 结论

为了探索合金材料的微波烧结机制,本文采用 Al-Ti 混合金属样品,利用在线 SR-CT 实验和相场数值模拟,研究分析了金属异质界面的存在对烧结过程产生的促进作用。

(1) 采用 SR-CT 技术观测 Al-Ti 样品在微波场中的烧结过程,获得了样品内部微观结构演化图像,统计烧结过程中的烧结颈的尺寸,拟合烧结颈和时间的双对数曲线,发现和纯金属 Al 相比,Al-Ti 样品在烧结过程进行一段时间后,烧结颈生长速度不仅没有下降,反而明显增加,表明由于微波和混合金属间的特殊作用,加快了烧结颈的生长。

(2) 分析由于 Al 和 Ti 异质界面的存在,使微波穿透深度更大,提高了微波的加热效率,由于界面两边的微波强度梯度,促进了颗粒间物质的扩散。同时,由于 Al-Ti 表面的氧化,在颗粒之间形成“微区聚焦”效应,增强了介电损耗,产热量大大增加,又极大地促进了物质扩散的速率。

(3) 利用分析的结论,以多种扩散综合作用的相场模型为基础,加大 Al-Ti 模型的界面扩散热力学参数的权重,模拟了颗粒随机堆积模型下烧结颈的形成和生长等一系列微观结构演化过程,分析烧结颈

的尺寸随模拟时间的演化关系,结果表明晶界扩散的增强,加快了烧结颈的生长,但微波和混合金属之间还存在其他的促进烧结颈生长的效应。

(4) 由于界面处物质扩散的增强,加速了空位的湮灭,出现了指向界面的应力,促使相邻颗粒之间产生对心刚体运动。在相场模拟的控制方程中引入刚体运动模型,模拟图像的微观结构演化更加迅速,拟合烧结颈尺寸和时间的双对数曲线,斜率和在线实验结果基本一致,证明了分析和模拟的正确性。

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)和安徽省自然科学基金(No. 1508085MA17)的共同资助下完成的,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 师昌绪, 仲增墉. 中国高温合金 40 年[J]. 金属学报, 1997, 33(1):1—8 (SHI Changxu, ZHONG Zengyong. Forty years of superalloy R&D in China[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1997, 33(1):1—8 (in Chinese))
- [2] 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.
- [3] Breval E, Cheng J P, Agrawal D K, et al. Comparison between microwave and conventional sintering of WC/Co composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 391(1):285—295.
- [4] Upadhyaya A, Tiwari S K, Mishra P. Microwave sintering of W-Ni-Fe alloy[J]. Scripta Materialia, 2007, 56(1):5—8.
- [5] 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))
- [6] 范景莲, 黄伯云, 刘军 等. 微波烧结原理与研究现状[J]. 粉末冶金工业, 2004, 14(1):29—33 (FAN Jinglian, HUANG Boyun, LIU Jun, et al. Microwave sintering theory and research status[J]. Powder Metallurgy Industry, 2004, 14(1):29—33 (in Chinese))
- [7] 晋勇, 谢华银. 微波烧结技术的应用与进展[J]. 工具技术, 2005, 39(1):19—22 (JIN Yong, XIE Huakun. Application and development of microwave sintering technology[J]. Tool Engineering, 2005, 39(1):19—22 (in Chinese))
- [8] Xu F, Li Y, Hu X, et al. In situ investigation of metal's microwave sintering[J]. Materials Letters, 2012, 67(1):162—164.
- [9] 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 powder evolution during sintering by synchrotron radiation X-ray computed tomography[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(5):477—482 (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] 景晓宁, 倪勇, 何陵辉 等. 陶瓷烧结过程空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))
- [12] 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, 25(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, 25(2):170—173 (in Chinese))
- [13] 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.
- [14] 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 Chuanggao. Phase field simulation of static recrystallization for deformation alloys[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2010(S1):29—33 (in Chinese))
- [15] Xu F, Xiao Y, Hu X, et al. In situ investigation of Al-Ti mixed metal system microwave sintering by synchrotron radiation computed tomography[J]. Journal of Instrumentation, 2016, 11(02):C02074.
- [16] Kuczynski G C. Self—diffusion in sintering of metallic particles[M]. Sintering Key Papers. Springer Netherlands, 1990:509—527.
- [17] Wang Yu U. Computer modeling and simulation of solid-state sintering: A phase field approach[J]. Acta Materialia, 2006(54):953—961.

Conjoint analysis of online experiment and phase field simulation for the effect of metal hetero interface on diffusion of microwave sintering

KANG Dan, XU Feng, HU Xiao-fang, XIAO Yu

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

Abstract: Alloy material has excellent mechanical properties and wide application, compared with traditional method, it has obvious advantage to prepare alloy by microwave. In order to explore the mechanism of microwave sintering alloy materials, the Ti and Al mixed metal sample, which has high degree of concern in alloy domain, was adopted in this paper, microstructure evolution during microwave sintering was obtained by online experiment. By comparing with pure Ti and pure Al, it is found that the sintering temperature of mixed Ti-Al sample decreases significantly, and the sintering rate increases significantly. Analysis considers, intermetallic compound is formed between Ti and Al, which leads to interfacial polarization due to different conductivity. The polarization loss leads to the increase of temperature at interface and the diffusion rate of interface substance. Meanwhile, due to the intension of material diffusion at interface, a large number of atoms aggregates to sintering neck, resulting in the diffusion of vacancies to the grain boundary. Supersaturated vacancies are annihilated by the dislocations at grain boundaries, producing an local force that pulls neighboring particles toward one to another. Using the results of theoretical analysis, a variety of diffusion mechanism and rigid body motion were introduced, and the control equation of density field was modified, and the evolution curves of microstructure parameters such as sintering neck and so on were fitted. The curves and experimental results are basically consistent, which further verified that the mixture of metals and microwave produces a special effect, that is, the thermal effect driving material diffusion and the force acting on particle moving. Above results provide support for study of alloy evolution mechanism during microwave sintering process.

Keywords: mixed metal; microwave sintering mechanism; microstructure evolution; phase field model; Synchrotron Radiation-Computed Tomography (SR-CT) technology