

微波技术在金属材料制备中的应用现状

彭元东¹, 易健宏¹, 罗述东¹, 李丽娅¹, 陈刚¹, 冉俊铭²

(1. 中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 湖南 长沙 410083)

(2. 昆明理工大学, 云南 昆明 650093)

摘要: 微波技术如何应用于金属材料制备是当前材料研究工作的重要方向之一。本文在分析微波场与金属的相互作用后, 简要介绍了微波技术在金属间化合物合成、金属粉末冶金材料烧结、金属材料熔炼及焊接等方面的研究进展。

关键词: 微波技术; 金属材料; 应用

中图分类号: TM25; TF124.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)04-0742-06

微波是介于无线电波与红外线之间的电磁波, 波长为 1 mm~1 m, 频率范围为 300 MHz~300 GHz。微波波长与地球上一般物体的尺寸处于同一数量级或更小, 因此当微波照射到物体上时, 将被强烈反射, 遵循波动的基本规律, 如多普勒效应、惠更斯原理等, 从而被广泛应用于广播电视、通信、雷达等领域。

微波具有极性, 与极性物质作用时, 引起极性分子旋转, 当这种旋转行为受到原子的弹性散射或晶格热振动等因素阻碍时会引起能量耗散, 电磁能转化为热能, 从而引起物体温度升高。微波技术表现出来的利用材料的介电损耗来提高系统内能的特征, 决定了它具有体积加热的特点。传统加热技术中热能通过辐射、传导、对流等方式传递到样品表面, 而后消除温度梯度使材料内部温度趋于平衡, 在整个过程中传递的是热能。与之不同的是, 在微波技术中材料温度的升高、平衡等过程依赖于微波能的传递、分布以及吸收情况。自 20 世纪 70 至 80 年代, 人们对微波技术进行了大量研究, 对象主要为具有吸收微波能力的粮食、木材、药材、陶瓷、聚合物等^[1~4]。传统观点认为块体材料对微波反射强烈, 吸波能力弱, 从而不能被加热。实验表明, 微波对颗粒状态的金属有很好的加热效应, 甚至能达到烧结固化温度, 这就引起了人们利用微波来加工金属材料的广泛兴趣^[5~8]。近 20 年来, 人们对微波技术在金属材料中的应用进行了广泛的研究, 内容主要包括合成、烧结、熔炼、焊接等方面。本文就微波与金属的相互作用、微波应用于金属材料制备的研究现状进行系统介绍。除本文介绍的 4 种应用研究

外, 微波技术还可被用于金属材料的热处理^[9], 但相关工作甚少。

1 微波与金属的相互作用

经典的麦克斯韦方程表明, 微波照射到块体金属表面时, 大部分能量被反射, 剩余能量在穿透金属过程中快速衰减, 趋肤深度在微米量级, 因此与微波发生耦合作用的仅仅是金属极薄的表面层, 所吸收的能量不足以改变金属整体的温度^[10]。

但是, 当金属几何尺寸减小至微米甚至纳米尺度时, 它与电磁波的相互作用行为发生异常变化^[11]。P Marquardt 等报道, 纳米尺度金属颗粒铟或铝的吸收系数 (α) 与电磁场频率存在 $\alpha \sim f^{0.8}$ (In) 或 $\alpha \sim f$ (Al) 关系, 这不同于块体金属吸收电磁波的 $\alpha \sim f^{0.5}$ 关系^[12]。实验还发现, 由于量子限域效应, 金属尺寸减小到介观尺度后, 电导率降低迅速, 趋肤深度随之增加^[13]。粉末冶金生产中使用的粉末原料粒度在亚微米到几百微米范围内, 其比表面积在 $10^0 \sim 10^3 \text{ m}^2/\text{g}$ 范围。虽然微波在块体金属中的趋肤深度有限, 但是在金属粉末中, 其趋肤深度与粉末尺寸处于同一量级或与之相当, 则微波所及之体积占据极高的比例, 该部分体积所耗散的能量足以引起金属粉末温度的显著变化。P. Mishra 和 K. I. Rybakov 等在理论上分析了微波加热金属粉末的行为^[14,15], 他们认为磁场的切向分量 H_t 在金属粉末表面感生出一电场 E , 感生电场引起表面电流, 该电流在金属粉末中产生焦耳热, 粉末表面单位面积产生的热量 P 为:

收到初稿日期: 2008-04-07; 收到修改稿日期: 2009-02-16

基金项目: 中国博士后科学基金资助 (第四十批); 中南大学博士后基金资助 (第五批)

作者简介: 彭元东, 男, 1974 年生, 助理研究员, 博士生, 中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 湖南 长沙 410083, 电话: 0731-8877328, E-mail: pengyuandongpm@163.com

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

式中: R_s 为表面电阻 ($R_s=1/\sigma\delta$), 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, 则电磁场能量密度 P_{EM} 可表示为:

$$P_{EM} = \frac{3P}{r_p} = \frac{6R_s |E_0|^2}{\eta_0^2 r_p} \quad (2)$$

如果被吸收能量完全转化为粉末内能, 则温度变化为^[16]:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{P_{EM}}{\rho C_p} = \frac{6R_s |E_0|^2}{\eta_0^2 r_p \rho C_p} \quad (3)$$

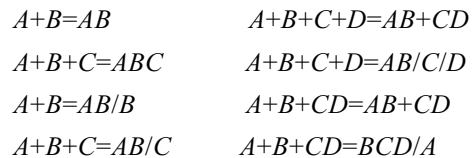
式中: T 为温度, t 为时间, ρ 、 C_p 分别为粉末密度和热容。可见, 当颗粒尺寸减小时, 它吸收的能量增加, 温度升高。计算表明, 钨粉粒度从 $12 \mu\text{m}$ 减小到 $3 \mu\text{m}$ 时, 加热 120 min 后所达到温度从 $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 增加到 $2300 \text{ }^\circ\text{C}$ 。作者在 2.45 GHz 微波场加热锡、铜和钨等粉末压坯, 对理论模型进行了实验验证, 在考虑对流、辐射等影响系统温度的因素后, 获得了与理论基本一致的结果。

2 微波技术在合成金属间化合物中的应用

微波合成或微波燃烧合成, 是以微波为点火方式的高温自蔓延合成技术。与其他点火方式如电火花、强热流、激光等不同, 它们是在原料的外部开始的, 燃烧波是自外向内扩展, 而微波具有内部快速加热、选择性介电加热的特性, 其点火方式在原料的内部开始, 燃烧波由内向外扩展, 从而形成独特的自蔓延合成工艺^[17]。微波合成是基于高损耗物质能被微波加热至较高温度、化学活性提高而实现的。实验表明, 一些金属或非金属粉末在短时间内被微波加热到高温, 如 $600 \text{ }^\circ\text{C}/90 \text{ s}$ (Al) (表示 Al 粉末在加热 90 s 后温度达到 $600 \text{ }^\circ\text{C}$)、 $768 \text{ }^\circ\text{C}/420 \text{ s}$ (Fe)、 $1283 \text{ }^\circ\text{C}/60 \text{ s}$ (Cu)、 $1150 \text{ }^\circ\text{C}/60 \text{ s}$ (Ti)、 $1000 \text{ }^\circ\text{C}/40 \text{ s}$ (B)、 $1200 \text{ }^\circ\text{C}/60 \text{ s}$ (C)、 $1000 \text{ }^\circ\text{C}/70 \text{ s}$ (Si) 等, 满足自蔓延合成条件^[5]。

微波合成最早提出于 1990 年, 首先是以金属与非金属粉末为反应前驱物, 通过微波合成而生成碳化物、硼化物、氮化物、硅化物以及复合材料等。R. C. Dalton 等将反应前驱物粉末置于微波波导中, 通过微波点火使样品引发化学反应, 反应过程释放热量以维持反应的继续进行, 在极短时间内获得高纯度产物^[18]。由于粉末态金属能被加热至很高温度, 因此也可以通过微波能合成金属间化合物。S. Gedevarishvili 等利用微波技术首次成功地在众多体系中合成出金属间化合物, 这些体系包括 Ti-Al、Ni-Al、Fe-Al、Nb-Al、Ta-Al、

Ge-Al、Cu-Al、Co-Al、Mo-Al、W-Al、Pt-Al、Pd-Al、Sb-Al、Zr-Al、Cr-Al、Nb-Ge、Ti-Ni、Ti-Co、Ti-Fe、Cu-Ti、Cu-Zn、Fe-Ni、Ni-Mg、Ni-Zr 等多种二元甚至多元体系^[19]。与传统的合成机制一样, 微波合成也涉及固-固、固-液之间的扩散行为。实验发现, 使用 SiC 为辅助加热材料预热粉末压坯, 能提高金属与微波的耦合效率, 样品内温度分布更趋均匀, 合成速度显著加快, 所得产物显微组织均匀, 力学性能得到提高。可以预测, 微波能够以如下方式合成多种金属间化合物或它们的复合材料:



其中: A 、 B 、 C 、 D 均代表金属。随后, G. Zhou 等对微波合成锂的金属间化合物进行了成功尝试, 合成出 Li_3Bi 、 Li_3Sb 、 $\text{Li}_{21}\text{Si}_5$ 和 $\text{Li}_{17}\text{Sn}_4$ 等物质^[20,21]。在合成 $\text{Li}_{17}\text{Sn}_4$ 金属间化合物时, 以锡粉和锂箔为原料, 合成时间仅为 $10\sim 20 \text{ min}$, 远远短于传统高温合成方法所需的数天时间。同时, 作者报道, 合成过程伴随有放电现象, 当反应结束后火花熄灭。J. R. Jokisaari 等详细研究了微波燃烧合成 Ti-Al 体系金属间化合物, 并与常规燃烧合成、热激活燃烧合成等方法进行比较^[22]。结果表明, 常规燃烧合成不能得到 TiAl 或 Ti_3Al 产物, 其余两种方法均能制备; 与热激活燃烧合成方法相比, 微波合成 TiAl 和 Ti_3Al 化合物时的峰值温度均高于前者, 分别达到 1500 和 $1450 \text{ }^\circ\text{C}$; 即使在偏离化学计量的配比下, 微波合成也能获得单相纯净的 Ti_3Al 产物, 而 TiAl 中的 Ti_3Al 第二相也可以通过添加过量的 Al 来降低其含量, 但热激活燃烧合成 TiAl 产物中 Ti_3Al 第二相含量明显更高, 这表明微波合成在控制 Ti-Al 体系金属间化合物相成分方面有更大的优越性。G. Poli 等在理论上和实验上对微波辅助燃烧合成 NiAl 金属间化合物进行了研究, 旨在提高产物纯度和能量使用效率, 并解决微波合成方法存在的重复性差的问题^[23]。实验在单模腔中进行, 通过对试样托盘和反应气氛的优化和选择, 在 $30\sim 180 \text{ s}$ 内合成出纯度达到 $98.7\%\sim 100\%$ 的 NiAl 化合物。同时还发现, 由于氩气能避免样品氧化, 对样品表面有冷却作用, 从而以氩气为保护气氛时能够提高 NiAl 化合物产量和延长合成时间; 使用 SiC 等为辅助加热材料, 可以获得最佳的可重复性和最低能量消耗 (3.1 kWh/kg)。

3 微波烧结金属粉末冶金材料

粉末态金属与微波耦合效率显著改善后, 能够吸

收微波能量,材料达到较高温度,这为微波烧结金属基粉末冶金材料提供了条件。由于是金属颗粒而非样品表面参与微波吸收,所以微波对金属粉末压坯的加热是体积加热行为^[24]。在 1999 年, R Roy 等进行了第一次成功尝试微波烧结金属粉末冶金材料,他们在 2.45 GHz、最大输出功率 6 kW 的多模腔微波炉中烧结出 Fe-Ni-C、Fe-Cu-C 等铁基材料和纯金属材料^[6,19]。他们的实验引发了微波烧结在金属材料领域的研究热潮,在仅仅 8 年时间内,报道了大量微波烧结各种金属材料的成功实例。目前,人们尝试的材料体系广泛,从纯金属到多组元合金,从低烧结温度的 Mg、Al 基合金,到高烧结温度的钨基高密度材料,具体体系包括 Fe 基合金^[6, 25~30]、Cu 基合金^[31,32]、Al 基合金^[33,34]、Mg 基合金^[33,35,36]、Sn 基无铅焊料^[33]、钨基高密度合金^[37]、金属 W^[14,38,39]、金属 Ag^[40]、金属 Cu^[24,29]、金属 Ni^[29]、金属 Fe^[29]、金属 Co^[6, 29]、金属 Zr^[41]以及部分金属间化合物^[19]。

3.1 微波烧结金属粉末冶金材料特点

与常规烧结工艺相比,微波烧结金属粉末冶金材料在工艺和材料显微组织、力学性能上均体现出了显著优势。实验发现,微波烧结升温速度快,烧结时间短。在传统电阻加热的烧结工艺中,样品温度的平衡是通过热量在内部传递来实现的,因此,为降低样品内温度分布的不均匀性,通常以较低的速度升温(≤ 5 °C/min),从而整个烧结过程较长。微波加热是一种体积加热行为,样品温度的分布与微波场的空间分布、样品的均匀性有关(不考虑表面热量散失),所以,在微波源功率足够大的条件下,可以获得极高的升温速度。在烧结 W-Ni-Fe 合金、316L/434L 不锈钢时,升温速度分别达到 20 °C/min、45 °C/min,而且样品不产生变形、力学性能优异^[26,37],甚至有文献报道,烧结某些金属粉末时,升温速度达到 80 °C/min^[29]。快的升温速度导致微波烧结时间缩短,通常仅为传统烧结的 10%~25%。微波烧结样品晶粒细小,组织均匀,这跟微波烧结时间短相关。烧结时间短,晶粒生长过程短,因此晶粒尺寸小。在研究烧结模式对 92.5W-6.4Ni-1.1Fe 高密度合金的影响中,作者发现 1500 °C 烧结后,常规烧结和微波烧结获得的 W 晶粒尺寸分别为 17.3±0.8 μm 和 9.4±0.5 μm,后者几乎为前者的一半^[37]。此外,微波体积加热特点和短的烧结时间有利于促进材料组织的均匀分布,R. M. Anklekar 等采用不同方法烧结粉末冶金钢材料,结果显示微波烧结样品明显具有更均匀的显微组织,而且还发现在材料粉末表面包覆一层吸波介质,比使用 SiC 棒从外部辅助加热更能提高样品组织的均匀性^[27,28]。晶粒细小、组织均匀显

示材料有更优异的力学性能。在微波烧结 Fe 基粉末冶金材料实验中,硬度、强度、延伸率等典型力学性能指标均比传统烧结材料高^[27,28,42,43],如 Fe-2Cu-0.8C 合金钢硬度(HRB)从常规烧结的 800 MPa 提高到微波烧结的 960 MPa,增幅达 20%^[6]。92.5W-6.4Ni-1.1Fe 高密度合金采用微波烧结,抗拉强度和延伸率分别为 805±14 MPa、11.2±1.1%,均高于常规烧结的 642±23 MPa、3.5±0.8%^[37]。

3.2 微波烧结金属粉末冶金材料的工艺特点

在微波烧结金属粉末冶金材料实验中,材料的吸波特性和样品内的温度分布是需要着重考虑的因素。金属具有正的电阻温度系数,温度升高,电阻增加,即电导率降低,微波在高温金属中的趋肤深度大,这有利于促进样品的吸波能力。因此,实验时通常在样品周围埋设 SiC、MoSi₂ 等高介电损耗材料,在压坯升温初期,利用介电材料传递热量以提高样品温度,从而快速增强样品的吸波能力。此外,随着致密度的提高,压坯逐渐失去金属粉末特征,吸收微波能力降低,介电损耗材料则可以进行能量补偿,促进样品进一步致密。这种既利用样品自身吸收微波从样品内部加热,又通过高介电材料进行温度的外部补偿的方法叫做双向微波辅助烧结^[33,35]。在双向微波辅助烧结中,介电材料还具有保温作用,降低样品表面热量的辐射损失。也有不使用高介电材料辅助烧结金属材料的报道,在这种情况下,样品升温速度较慢^[6]。金属粉末表面积大,化学活性高,容易发生氧化。金属氧化物比金属具有更低的微波反射率,从而在烧结过程中,表面氧化层吸收能量后对自身和内部的金属颗粒均产生加热作用,促进整体温度的升高。这虽然对提高样品整体温度分布有利,但是如果氧化物得不到还原,则影响材料性能。有文献报道,添加吸波能力强的陶瓷粉末如 SiC、Y₂O₃ 等是改善金属压坯烧结温度分布均匀性的途径之一,这非常适合烧结颗粒增强复合材料^[25,36]。在低温时,金属颗粒吸收微波能力弱,如果能从邻接陶瓷颗粒获取能量,以迅速提高温度,则就增强了吸波能力。但是,由于陶瓷颗粒添加量较低,而且在样品达到一定致密度后,金属基体对微波反射增强,“屏蔽”了陶瓷颗粒。因此,这种工艺对金属材料烧结初期有帮助。

4 微波熔炼金属材料

熔炼金属是微波技术的另一重要应用。由于冶炼是基础工业之一,因此,微波技术在该领域具有巨大的市场前景和经济价值。美国橡树岭国家实验室在微波熔炼金属材料方面开展了卓有成效的工作,他们在

多模腔微波设备中熔炼了 Ti、Zr、U、Cu、Al、钢、黄铜、青铜等金属材料，能够熔炼出 340 kg 锭块，该技术已步入工业生产规模^[44-46]。在微波熔炼金属材料研究中，为最大程度提高微波能量的利用率，坩埚的选择十分重要。文献报道，在石墨坩埚表面涂覆耐热材料涂层，即能够避免熔液润湿坩埚，又能减少锭块中的夹杂^[47,48]。

M. Sato 等详细报道了微波熔炼铁矿石的研究工作，证明这一技术极具吸引人的优势和潜力^[49]。其基于微波的选择性加热特点，利用磁场分量、电场分量分别与磁性物质 Fe_3O_4 、导电物质碳的强烈耦合，在多模腔微波设备中加热铁矿石 (Fe_3O_4) 粉末与碳粉混合物压坯，制备出纯度极高的铁锭。研究发现，还原过程在 1380 °C、数十分钟完成，产物含铁量高，Mg、S、Si、P、Ti 等杂质含量仅为传统高炉熔炼的 5%~10%，而且碳消耗量也仅为后者的一半。同时，还原产物中有 CO_2 气体，无 CO 释放。作者揭示了熔炼机制，由于样品中颗粒对微波的选择性吸收，产生微区温度的不均匀性，即出现热点，这种热量的非平衡态能促进晶界处各相的混合，进而加速化学反应的进行；热点尺寸在 100 μm 大小，持续数秒时间；虽然热点随机产生、消失，甚至能移动，但是它的温度、尺寸、形状和持续时间则保持一定的恒定性。

需要指出的是，虽然文献^[49]报道在无 SiC 辅助加热材料情况下，微波能够直接与矿石粉末样品耦合，完成熔炼，但是，由于金属在熔融状态对微波反射能力强，并不能被加热^[50]，因此，关于微波熔炼金属材料的机制、尤其在熔炼后期存在何种作用需要做进一步研究。

5 微波焊接金属材料

微波技术在焊接金属材料方面也表现出优越于传统工艺的特点^[51]。在微波场中，虽然块体金属对微波反射率大，不能被加热，但是，当两块金属接近时会在间隙位置感应出等离子体，等离子体加热金属，导致金属焊接，被称之为金属材料的微波焊接^[52]。K. Y. Chiu 等利用该技术将 NiTi 合金包覆在 316L 不锈钢表面，显著提高了不锈钢的抗孔隙侵蚀能力^[53]。在该实验中，作者选用熔点较低的铜合金 (50Cu-33Zn-9Ag-8Cd) 为焊料，焊料在微波场中熔化时，两侧的 NiTi 合金与 316L 不锈钢保持固态，维持了样品形状。研究发现，在焊接过程中 NiTi 合金与不锈钢中的 Ti、Fe 组元扩散到焊料当中，使得焊料厚度由焊接前的 0.1 mm 增加到焊接后的 0.2 mm，界面结合强度增加，剪切强度达到 100~150 MPa。

金属-陶瓷结构在一定程度上结合了陶瓷材料硬度高、耐磨损、抗氧化等特性与金属材料塑性好、导电导热等特性，表现出良好的综合性能，应用于众多领域。鉴于陶瓷与金属基体结合较弱，采用单一工艺制备金属-陶瓷结构存在困难。目前，人们尝试了微波技术，获得巨大的成功。E. G. Pan 等在焊接牙科用材料与 Ni-Cr 合金的研究中发现^[54,55]，微波焊接样品的界面结合强度明显高于传统真空焊接样品，前者超过 20 MPa，而后者仅有 9.0~9.5 MPa。同时，界面结合强度提高的原因之一就是微波场促进原子的扩散，对界面处 Cr 元素分布的分析结果显示，微波焊接样品中 Cr 原子的扩散能力异常突出。此外，S. Put 等开展了 WC-Co 硬质合金焊接于钢基体的研究^[56]。作者通过电泳沉积工艺在钢基体表面预先涂覆一层粒度约 1 μm 、厚度约 200 μm 的硬质合金粉末层，而后利用微波复合加热技术进行烧结。在烧结过程中，基体的 Fe 原子和合金化元素扩散到粉末层发生反应，提高了界面结合强度。表面硬质合金层无裂纹，样品表面硬度达到 8 GPa (HV0.1)，是钢基体的 4 倍。微波焊接金属材料的成功实验预示着其具有重要价值，目前已经成为备受瞩目的前沿技术。

6 结 语

总之，微波技术在金属材料制备中有着广泛的应用。特别是近 20 年来，随着人们对微波技术的认识不断深入，其在金属材料制备中的研究与应用也变得越来越广泛而深入，研究结果也显示了该技术具有传统加热技术不可比拟的独特优势，部分研究成果已经获得小规模的商业应用。但就目前而言，微波制备金属材料主要工作还局限于实验室，离大规模实用化尚有一定距离，因此在理论研究、设备制造以及工艺控制等方面仍需要开展大量工作。

参考文献 References

- [1] Holt C B. *Phys Technol*[J], 1998, 19: 18
- [2] Katz J D. *Annu Rev Mater Sci*[J], 1992, 22: 153
- [3] Clark D, Sutton W H. *Annu Rev Mater Sci*[J], 1996, 26: 299
- [4] Thostenson E T, Chou T W. *Compos A*[J], 1999, 30: 1055
- [5] Walkiewicz J W, Kazonich G, McGill S L. *Min Metall Process* [J], 1988, 5: 39
- [6] Roy R, Agrawal D, Chen J *et al. Nature*[J], 1999, 399: 668
- [7] Agrawal D. *Sohn International Symposium: Advanced Processing of Metals and Materials*[C]. San Diego: [s.n.], 2006, 4: 183
- [8] Riply E B, Douglas D M. *AIChE Annual Meeting*[C]. Austin:

- TX, 2004: 1667
- [9] Clift J H, Ripley E B, Oberhaus J. *AIChE Annual Meeting*[C]. Austin: TX, 2004: 7
- [10] Yi Jianhong(易健宏), Luo Shudong(罗述东), Tang Xinwen(唐新文) *et al. Powder Metall Ind*(粉末冶金工业)[J], 2003, 13: 22
- [11] Tang X, Tian Q, Zhao B *et al. Mater Sci Eng A*[J], 2007, 445~446: 135
- [12] Marquardt P, Nimtz G. *Phys Rev B*[J], 1989, 40: 7996
- [13] Nimtz G, Marquardt P, Gleiter H. *J Cryst Growth*[J], 1990, 86: 66
- [14] Mishra P, Sethi G, Upadhyaya A. *Metall Mater Trans B*[J], 2006, 37: 839
- [15] Rybakov K I, Semenov V E, Egorov S V *et al. J Appl Phys*[J], 2006, 99: 23 506
- [16] Bykov Y V, Rybakov K I, Semenov V E. *J Phys D: Appl Phys*[J], 2001, 34: 55
- [17] Peng Jinhui(彭金辉), Zhang Libo(张利波). *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2001, 25: 222
- [18] Dalton R C, Ahmad I, Clark D E. *Ceram Eng Sci Proc*[J], 1990, 11: 1729
- [19] Gedeveanishvili S, Agrawal D, Roy R. *J Mater Sci Lett*[J], 1999, 18: 665
- [20] Zhou G, Palchik O, Elena S *et al. J Mater Chem*[J], 2003, 13: 2607
- [21] Zhou G, Palchik O, Nowik I *et al. J Solid State Chem*[J], 2004, 177: 3014
- [22] Jokisaari J R, Bhaduri S, Bhaduri S B. *Mater Sci Eng A*[J], 2005, 394: 385
- [23] Poli G, Sola R, Veronesi P. *Mater Sci Eng A*[J], 2006, 441: 149
- [24] Takayama S, Saitou Y, Sato M *et al. Japan J Appl Phys*[J], 2006, 45: 1816
- [25] Panda S S, Singh V, Upadhyaya A *et al. Metall Mater Trans A*[J], 2006, 37: 2253
- [26] Panda S S, Singh V, Upadhyaya A *et al. Scripta Mater*[J], 2006, 54: 2179
- [27] Anklekar R M, Agrawal D K, Roy R. *Powder Metall*[J], 2001, 44: 355
- [28] Anklekar R M, Bauer K, Agrawal D K *et al. Powder Metall* [J], 2005, 48: 39
- [29] Saitou K. *Scripta Mater*[J], 2006, 54: 875
- [30] Takayama S, Link G, Miksch S *et al. Powder Metall*[J], 2006, 49: 274
- [31] Upadhyaya A, Sethi G. *Scripta Mater*[J], 2007, 56: 469
- [32] Sethi G, Upadhyaya A, Agrawal D. *Sci Sintering*[J], 2003, 35: 49
- [33] Gupta M, Wong W L E. *Scripta Mater*[J], 2005, 52: 479
- [34] Thakur S K, Kong T S, Gupta M. *Mater Sci Eng A*[J], 2006, 452~453: 61
- [35] Wong W L E, Gupta M. *Compos Sci Technol*[J], 2007, 67: 1541
- [36] Tun K S, Gupta M. *Compos Sci Technol*[J], 2007, 67(13): 2657
- [37] Upadhyaya A, Tiwari S K, Mishra P. *Scripta Mater*[J], 2007, 56: 5
- [38] Jain M, Skandan G, Martin K *et al. Int J Powder Metall*[J], 2006, 42: 45
- [39] Jain M, Skandan G, Martin K *et al. Int J Powder Metall*[J], 2006, 42: 53
- [40] Perelaer J, Gans B de, Schubert U. *Adv Mater*[J], 2006, 18: 2101
- [41] Ebadzadeh T, Valefi M. *J Alloys Compos*[J], 2008, 448(1~2): 246
- [42] Roy R, Agrawal D K, Cheng J. *US Patent*, 6805835[P]. 2004: 1
- [43] Gerdes T, Willert-Porada M, Park H S. *Powder Met 2006—International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials*[C]. San Diego: [s.n.], 2006
- [44] Riply E B, Oberhaus J A. *Ind Heating*[J], 2005, 72: 65
- [45] Riply E B, Douglas D M. *AIChE Annual Meeting*[C]. Austin: TX, 2004: 1661
- [46] Givens K R, Ripley E B, Hunt Y *et al. AIChE Annual Meeting*[C]. Austin: TX, 2004: 1671
- [47] Huey H E, Morrow M S. *AIChE Annual Meeting*[C]. Austin: TX, 2004: 1669
- [48] Morrow M S, Huey H E. *AIChE Annual Meeting*[C]. Austin: TX, 2004: 1715
- [49] Sato M, Matsubara A, Takayama S *et al. Sohn International Symposium Advanced Processing of Metals and Materials*[C]. San Diego: [s.n.], 2006: 157
- [50] Sun X, Hwang J Y, Huang X *et al. J Min Mater Characterization Eng*[J], 2005, 4: 107
- [51] Radtke R, Geddes J. *AIChE Annual Meeting*[C]. Austin: TX, 2004: 1431
- [52] Siores E, Rego D Do. *J Mater Process Technol*[J], 1995, 48: 619
- [53] Chiu K Y, Cheng F T, Man H C. *Mater Sci Eng A*[J], 2005, 407: 273
- [54] Pan E G, Rravaev A A. *Adv Eng Mater*[J], 2004, 6: 61

- [55] Pan E G, Ravaev A A. *Mater Lett*[J], 2004, 58: 2679 1361
[56] Put S, Vleugels J, AnnéG *et al. Scripta Mater*[J], 2003, 48:

Review of Microwave Energy Application in Metallic Materials Preparation

Peng Yuandong¹, Yi Jianhong¹, Luo Shudong¹, Li Liya¹, Chen Gang¹, Ran Junming²

(1. State Key Laboratory for Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

(2. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The current application of microwave energy to preparing metallic products is one of the important projects in materials research. With analyzing the interaction between microwave field and metals, the microwave energy applications in intermetallic synthesis, metallic PM parts sintering, molting and joining of metallic materials etc. are introduced in this review.

Key words: microwave energy; metallic material; application

Biography: Peng Yuandong, Candidate for Ph. D., State Key Laboratory for Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, P. R. China, Tel: 0086-731-8877328, E-mail: pengyuandongpm@163.com