

[文章编号] 1004-0609(2001)S2-0016-05

微波焊接进展^①

李小路, 周 健

(武汉理工大学 材料复合新技术国家重点实验室, 武汉 430070)

[摘 要] 阐述了微波焊接过程中微波和物质作用的机理、陶瓷的升温特征、实验装置的优化以及近年来国内外微波焊接陶瓷的发展状况, 分析了焊接过程中存在的问题, 并对微波焊接作出了展望。

[关键词] 微波焊接; 陶瓷; 介电损耗

[中图分类号] TM 924.76

[文献标识码] A

陶瓷材料具有耐高温和抗腐蚀能力强等优点, 正逐渐取代金属材料在高温环境中作为结构材料使用, 但是由于陶瓷材料的机械加工性能差、延性和冲击韧度低、耐热冲击能力弱, 因此制造形状大而复杂的零件很困难, 而通过焊接简单陶瓷零件制造复杂构件成为可能的制造途径^[1]。

目前已出现了等离子弧、电子束、激光、超声波、爆炸等焊接技术^[1, 2], 利用微波在高温下焊接陶瓷, 是近十几年来迅速发展的一种新技术。微波焊接具有接头强度高、升温速度快、易于控制温度、能耗低等优点。由于升温速率极快, 陶瓷内部晶粒不会严重长大, 晶界相元素分布比焊接前更均匀, 因此材料可以保持优良的性能^[3]。

1 微波焊接的原理

微波焊接是利用微波电磁场与材料的相互作用, 使电介质在交变电场的作用下产生极化和损耗, 从而完成焊接。在微波频段陶瓷材料主要表现为离子迁移损耗和偶极矩松弛损耗。当离子迁移频率和微波作用频率相近或一致时, 出现损耗最大值。陶瓷的晶界处往往有不平衡电荷, 存在永久性极矩, 偶极子反复极化过程中相位滞后于微波电场, 形成偶极矩松弛损耗, 最终把微波电磁场能量转换为分子或原子(离子)的动能和势能^[4, 5]。由于微波加热具有选择性, 可以对材料损耗大的部分进行选择加热, 所以陶瓷材料的损耗较小。微波加热除了具有热效应以外, 还可以产生非热效应扩散^[6]。在微波场作用下, 离子及缺陷的分布表现出

松弛、极化特征, 离子晶体中存在离子-空位形成的缔合缺陷, 并且存在偶极矩, 在外加电场作用下, 使离子沿电场方向的跃迁几率增加, 同时, 在微波电场作用下空位表现为围绕离子跃迁, 从而形成宏观迁移, 降低了离子扩散的活化能, 增强了扩散。

微波焊接基本公式^[4]为

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0(\varepsilon' - j\varepsilon'') \quad (1)$$

式中 ε' 为介电系数, ε'' 为介电损耗系数, ε_0 为真空中的介电系数。

在微波加热时, 材料单位体积所吸收的微波能 P_s 可表示为

$$P_s = 2\pi f \varepsilon_r E^2 \tan \delta \quad (2)$$

式中 ε_r 为相对介电常数, δ 为介电损耗, E 为材料内部电场强度, f 为微波频率。

当微波在材料中传播时, 微波能会发生衰减, 微波功率的穿透深度 $D_{1/2}$ 被定义为微波功率从材料表面衰减至表面值 1/2 的距离, 可用下式计算:

$$D_{1/2} = \frac{3\lambda_0}{\sqrt{8.686\pi(\varepsilon_r/\varepsilon_0)^{1/2}\tan\delta}} \quad (3)$$

式中 λ_0 为微波在自由空间的波长。

当材料吸收微波能后, 温度上升, 可由 Stefan-Boltzman 定律来近似描述, 有人曾根据几种不同陶瓷的微波升温特点对升温过程进行了数学归纳^[7]:

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = f(T, P_s) = \frac{0.011\varepsilon_0}{\rho_p h} + \frac{0.956Q(T)\varepsilon''(T)P_s}{\rho_p V \sqrt{\varepsilon'}} - \frac{1.35 \times 10^{-12} \varepsilon_0 (273 + T)^4}{\rho_p h} \quad (4)$$

① [基金项目] 武汉市晨光计划(20005004034)

[收稿日期] 2001-08-20; [修订日期] 2001-10-22

[作者简介] 李小路(1978-), 男, 硕士研究生。

式中 V 为样品的体积, h 为样品的高度, c_p 为比定压热容; ρ 为密度, $Q(T)$ 为含有样品的腔体的品质因数。

升温过程可分 3 个阶段, 第一项描述材料温度趋于线性缓升阶段。第二项是温度急剧升高阶段, 当温度升高时, 离子的跃迁频率增大, 当达到微波场频率时, 就会达到最大损耗, 因此此时温度变化是损耗因子的函数, 亦即是温度的函数, 此阶段是非线性的, 从而解释了陶瓷材料在室温下的介电损耗因子较小, 但随着温度升高而迅速增加的温度飞升现象(热失控)^[7]。第三项为温度饱和阶段。

利用微波选择性加热、加热速度快、基体导热系数低等特点, 可确保陶瓷接头的温度上升, 使陶瓷有效而牢固地连接在一起。

2 微波焊接研究现状

2.1 焊接装置

目前的装置日趋完善, 根据材料的微波升温特点及介电性能随温度变化对微波场的微扰, 焊接装置多数采用场强大的单模可调式腔体^[8, 9], 如 TE₁₀₃, TM₀₁₀, TE₀₁₁, TE₁₁₁ 等, 用途最广泛的是 TE₁₀₃ 矩形谐振腔。

周健^[8]等研制了一种新型的焊接大尺寸元件的实用微波焊接装置, 该装置结构简单、易控制、电场和温度分布较均匀、运行稳定可靠, 原理图如图 1 所示。

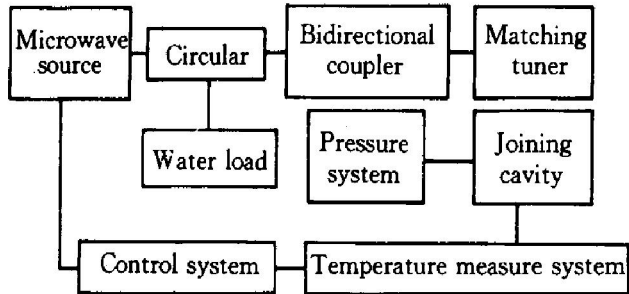


图 1 微波焊接装置原理图

Fig. 1 Skeleton diagram of microwave joining equipment

装置工作频率为 2.45 GHz, 功率 0~1.5 kW 连续可调, 微波源出口接一个 2 kW 的铁氧体环形器, 反射的能量由另一端水负载吸收, 环形器的出口接一双向定耦合器。为了便于加压, 在腔体上下各加装一段具有场强指数衰减的特征截止式圆波导, 可有效防止微波泄漏。腔体末端的短路活塞可以上下移动, 通过改变腔体尺寸实现焊接材料温度

升高时有效介电常数及损耗增加引起的负载变化情况下的谐振, 同时通过耦合窗的选择, 防止在整个调谐范围内其它干扰模式的出现。试样的焊接温度由调节微波源的功率大小和焊接腔的匹配来实现。试样的表面温度由光导纤维红外辐射温度计实时测量。利用准光学原理, 采用混合场方案可以大大增大微波烧结均匀区, 在此基础上, 采用异行非均匀填充微波谐振腔, 可以在小尺寸的谐振腔中实现较大尺寸的均匀区。焊接腔体如图 2 所示。

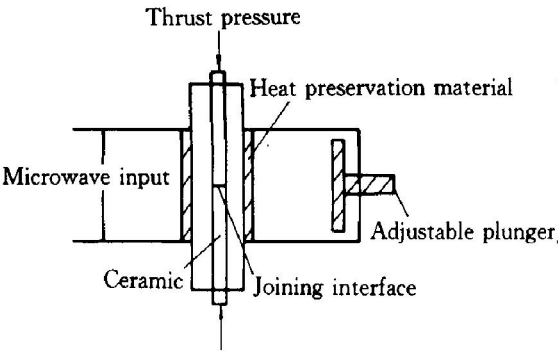


图 2 焊接腔体示意图

Fig. 2 Schematic diagram of joining cavity

2.2 焊接理论模型

目前陶瓷微波焊接主要包括氧化物陶瓷、非氧化物陶瓷、陶瓷金属焊接等, 可分为直接焊接和有中间层的间接焊接。目前研究较多的是 Al₂O₃/Al₂O₃, Si₃N₄/Si₃N₄, SiC/SiC 陶瓷的焊接。与常规条件下焊接相比较, 微波焊接显示了一定的优越性。研究者们认为晶界相(玻璃相)的吸波性强, 损耗大, 可被选择性加热, 晶界产生熔融、流动、扩散、粘连, 加之微波的增强扩散效应, 促使了焊接进行^[10](模型如图 3 所示)。纯度高的陶瓷材料直接焊接比较困难, 是因为其主要靠固相传质, 扩散不够充分, 因此对于高纯度的陶瓷一般要选用一定的焊接助剂。目前还没有氧化铝高纯瓷(纯度 99% 以上)直接焊接成功的报道。

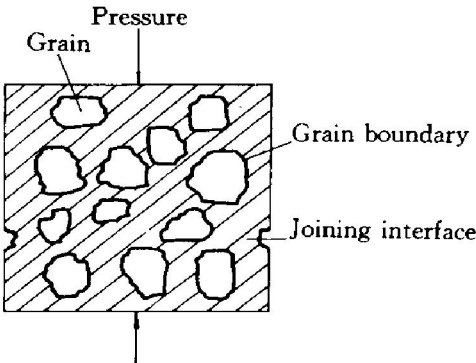


图 3 焊接模型

Fig. 3 Joining model

对于焊接界面,有两种状况:1) 焊接界面处完全由熔融或软化的晶界相物质填充,并且形成一定的厚度,晶粒没有在此处生长或运动。2) 焊接界面处除了有晶界熔融物质外,还有晶粒相,焊接界面处的结构和基体相似。

2.3 发展现状

2.3.1 氧化物陶瓷的焊接

Meek 和 Black^[11] 最早开始微波焊接的研究工作,他们利用家用微波炉(Littion 151 型,700 W)实现了 Al_2O_3 薄片间的玻璃封接,这种方法还被用于陶瓷/玻璃/金属封接。Fukushima^[12] 等用不同比例掺杂的非高纯 Al_2O_3 进行直接焊接和用低纯 Al_2O_3 作中间层焊接高纯 Al_2O_3 ,都得到很好的效果,焊接强度接近基体强度,并提出了 Al_2O_3 焊接的微观模型,即晶界相的熔融促进了焊接。

Binner 等^[10] 在 TE_{102} 型微波单模腔中对纯度 85%, 94%, 99.8% 的氧化铝陶瓷进行了焊接(焊接参数见表 1),并利用多晶陶瓷混合介电常数计算公式近似计算了 Al_2O_3 陶瓷中玻璃相的介电损耗值,结果表明其远高于 Al_2O_3 相的,证实了晶界损耗大,微波能对它进行选择加热,晶界相在微波作用下的熔融、流动,产生粘连,并且晶粒在焊缝处运动和重排,致使焊缝处晶粒和晶界分布均匀,和基体结构相似,这是强度提高的主要原因。

表 1 3 种不同纯度 Al_2O_3 陶瓷的焊接参数

Table 1 Microwave joining parameters of Al_2O_3 ceramics with different purities

Parameter	Purity of Al_2O_3 ceramics/ %		
	85~ 85	94~ 94	85~ 99.8
Temperature / $^{\circ}\text{C}$	1 400~ 1 600	1 500~ 1 600	1 500~ 1 600
Power/ W	250	250	250
Pressure / MPa	0.25~ 1	0.5~ 1	0.5~ 1
Heating rate / ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$)	3.0(< 1 200 $^{\circ}\text{C}$) 0.4(> 1 200 $^{\circ}\text{C}$)	2.5(< 1 000 $^{\circ}\text{C}$) 1.0(> 1 000 $^{\circ}\text{C}$)	3.6(< 1 200 $^{\circ}\text{C}$) 0.5(> 1 200 $^{\circ}\text{C}$)
Cooling rate / ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$)	3.0	3.7	3.5
Holding time / min	10	10	10
Total time / min	30	40	30
Effect	Good	Preferable	Normal

Cozzi 等^[13] 用 94% 的 Al_2O_3 做中间层,对 99.5% 的 Al_2O_3 进行了焊接,温度 1 450~ 1 550 $^{\circ}\text{C}$,

压力 1~ 3 MPa。

周健等^[14] 成功地对 Al_2O_3 - Al_2O_3 以及 Al_2O_3 和 HAP 生物陶瓷进行了焊接,并借助电镜、电子探针分析了界面结合情况。前者在压力 2 MPa, 1 300 $^{\circ}\text{C}$, 保温 15 min 时结合强度达到基体强度。后者在 2.5 MPa, 1 200 $^{\circ}\text{C}$ 保温 15 min 左右成功将两类材料焊接在一起。

蔡杰等^[4] 用 TE_{103} 型谐振腔在 1 300 $^{\circ}\text{C}$ 和 1 400 $^{\circ}\text{C}$ 对 Al_2O_3 - Al_2O_3 进行直接焊接,认为在 1 300 $^{\circ}\text{C}$ 焊接时,虽经长时间保温,焊接效果不明显,焊缝清晰可见,在 1 400 $^{\circ}\text{C}$ 保温 20 min,焊缝消失。

如上所述,氧化铝陶瓷一般采用直接焊接,对于高纯度氧化铝陶瓷一般采用低纯氧化铝或玻璃^[11, 15] 做中间层,目前也有人用溶胶凝胶方法制备的氧化铝做中间层^[2]。

Sato 等^[16] 用微波在短时间内焊接了 MgO 陶瓷。微波焊接的温度和压力越高,接头的抗弯强度越大,微波焊接后接头的硬度比基体的硬度高,在温度约 1 867 $^{\circ}\text{C}$, 压力 0.5 MPa 下微波焊接 4 min,弯曲强度达最大值的 70%。

Sato^[17] 用单模微波腔体,在温度 1 577~ 1 877 $^{\circ}\text{C}$, 压力 0.03~ 0.5 MPa, 时间 2~ 10 min, 对 MgO/ Al_2O_3 进行了焊接。结果表明,在 1 877 $^{\circ}\text{C}$, 0.5 MPa 条件下加热 4 min,得到焊接件的最大抗弯强度为 90 MPa,是 MgO 基体的 60%;实验测得在 MgO 和 Al_2O_3 之间有 MgAl_2O_4 生成;在抗弯测试中裂痕产生在 MgAl_2O_4 和 MgO 之间, MgAl_2O_4 的存在影响了接头的强度。

白向钰^[18] 利用微波加热方法对 ZTA (Al_2O_3 +20% ZrO_2 , 质量分数), Y-TZP (2.7% Y_2O_3 , 摩尔分数) 进行了同时烧结与连接,并进行了常规加热对比试验。结果表明,利用微波加热可以顺利实现陶瓷材料之间的同时烧结与连接;与常规方法相比,微波加热时致密化过程快,收缩致密化协调性好,组织细小、均匀,连接强度高。

Binner^[19] 在 1 565 $^{\circ}\text{C}$, 2.7 MPa 下, TE_{102} 微波单模腔中对 ZrO_2 进行了焊接。由于 ZrO_2 具有大的热膨胀系数 ($\alpha = 10.6 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), 并且容易产生热失控,因此焊接强度不高。

Al_2O_3 - ZrO_2 ^[20] 的焊接实验中,焊接助剂选择钠硅酸盐玻璃。实验表明,陶瓷和玻璃的结合强度高于中间层玻璃的强度,减小中间层的厚度和焊接材料的晶粒尺寸可以提高接头强度。

2.3.2 非氧化物的焊接

Si_3N_4 / Si_3N_4 焊接^[12] 是在氮气氛围中进行的,

随着 Si_3N_4 中其他元素掺杂比例的不同, 焊接结果也不一样, 实验证实含 Fe 量高的 Si_3N_4 其焊接强度也高, 作者用 Fe 含量高的 Si_3N_4 做中间层, 成功焊接了其他成分的 Si_3N_4 陶瓷。

Binner^[19] 等对热压烧结 SiC (HPSC) 和反应烧结 SiC (RBSC) 在 TE_{102} 微波单模腔中进行了焊接, RBSC 在没有中间层, 1 350 °C, 1.5 MPa, 加热 10 min 左右, 焊接成功, 作者认为这是因为晶界的游离硅在高温下软化, 流动密实了焊缝, 焊缝完全由硅填充, SiC 晶粒没有在焊缝处生长和运动; 而 HPSC 升温到 1 310 °C, 由于吸波能力下降, 对微波产生很强的反射, 温度不能继续上升而导致焊接失败。

Sirbelgitt, Ahmad 等^[2] 用单模和多模微波腔体焊接了陶瓷片。用硅粉作粘接剂, 焊接后 SiC 界面厚度为 50 μm ; 把硅粉与油混合成稀浆, 涂在 SiC 圆片上, 焊接界面层厚度为 10 μm ; 用等离子技术喷涂硅层到 SiC 圆片上进行焊接, 焊接后界面层的厚度不超过 5 μm ; 把一定比例的硅、碳和钛粉冷压成大约 1 mm 的圆片, 用 20 碳烯作为粘接剂, 进行 SiC 焊接, 界面层中出现了 TiC , TiO_2 , Ti_3O_5 等物质。

利用微波选择性加热的特性, 改善陶瓷与金属热膨胀系数不匹配的问题。例如 SiC/Al 的焊接, 将 SiC 管置于金属铝管的内壁, 由于 SiC 吸波性较强, 迅速被加热升温, 把热量传递给金属铝管的内壁, 在 SiC 与 Al 之间发生反应, 冷却至低温时, 金属铝管收缩挤压 SiC, 从而完成焊接。

对于有金属中间层的焊接, 如 Si-SiC/Al/Si 和 SiC/Al/SiC 等^[21], 在这里就不一一赘述。

3 微波焊接存在的问题

3.1 均匀加热

均匀加热^[22] 一直是陶瓷焊接中最为重要和关键的环节, 是陶瓷件, 特别是大尺寸、复杂形状陶瓷件, 均匀烧结的前提条件, 好的加热均匀性是焊接强度的保证。非均匀加热现象很容易在微波加热烧结过程中出现, 严重时会产生很大的残余应力, 导致陶瓷件开裂。原因可分为 3 类: 1) 微波场不均匀(近似的均匀区域也很小); 2) 特有的微波加热现象, 如热失控^[7, 23]、热点^[22, 24]、选择加热; 3) 焊接材料本身的原因, 如热膨胀系数大, 热导率低、形状复杂、尺寸过大等。Beale^[23] 等曾根据陶瓷在微波作用下的升温特点, 通过功率补偿系统调节

输入功率, 抑制热失控, 降低了由材料尺寸引起的由材料中心到表面的径向温度梯度。

3.2 其他问题

对采用中间层的焊接研究还不够, 焊料的选择, 介电损耗及与基质材料匹配性有待进一步搞清。材料的焊接尺寸有待提高^[8], 目前微波焊接腔体的微波场的均匀区域还不大, 改进微波场的分布, 提高加热均匀区域, 可以提高材料的焊接尺寸。焊接材料的种类有待增加, 目前微波焊接陶瓷一般为结构陶瓷, 增加焊接材料的种类, 可以使微波焊接的用途更为广泛。

4 微波焊接展望

微波焊接是材料加工中新兴的, 也是日益被重视的一种材料加工方法, 是一种极有实用价值和前景的焊接技术。如上所述, 微波焊接具有增强扩散、较低能耗、焊接时间短、接头致密性好等优点。作为焊接工艺的一种, 微波焊接可用于下述领域: 1) 同种材料的焊接; 2) 异种材料材的焊接; 3) 陶瓷器件的密封和修补等。由此可见, 微波焊接陶瓷可以解决一系列陶瓷材料的焊接问题。微波焊接将是以后材料焊接的重要手段, 将向更为广泛的领域发展。

[REFERENCES]

- [1] REN Jia-lie(任家烈), WU Ai-ping(吴爱萍). Joining of Advanced Materials (先进材料的连接) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. 120- 125.
- [2] PENG Jin-hui(彭金辉). 微波焊接陶瓷材料 [J]. Rare Metals(稀有金属), 1998, 22(6): 444- 446.
- [3] CAI Jie(蔡杰), TIAN Yong-lai(田永贵), SHI Jian-lin(施剑林), et al. 氧化铝陶瓷的微波焊接研究 [J]. Journal of Microwave(微波学报), 1992, 2: 50- 53.
- [4] CHEN Xin-mou(陈新谋), LIU Wu-ri(刘悟日). High Frequency Heating Dielectric Technology(高频介质加热技术) [M], Beijing: Science Press, 1979. 1- 30.
- [5] Kingery W D. Introduction to Ceramics, Part 2(陶瓷材料概论, 下册) [M]. Beijing: Xiaoyuan Press, 1995. 860- 890.
- [6] ZHANG Qiao-xin(章桥新), ZHANG Dong-ming(张东明), ZHOU Jian(周键). 氧化铝陶瓷的微波焊接特性研究 [J]. 硅酸盐学报, 1998, 26(3): 369- 372.
- [7] Kenkre V M, Skala L, Weiser M. M. Theory of mi

- crowave interactions in ceramic materials: the phenomenon of thermal runaway [J]. J Mater Sci, 1991, 26: 2483– 2489.
- [8] ZHOU Jian (周 健), ZHANG Qiao-xin (章桥新), CHEN Ji-ping (程吉平), et al. 新型微波焊接装置的研究 [J]. Journal of Materials Engineering (材料工程), 1998 (增刊): 341– 342.
- [9] Siores E, Do Rego D. Microwave applications in materials joining [J]. J Mat Processing Tech, 1995, 48(1– 4): 619– 625.
- [10] Binner J G P, Fernie J A, Whitaker P A, et al. The effect of composition on the microwave bonding of alumina ceramics [J]. J Mat Sci, 1998, 33(12): 3017– 3029.
- [11] Meek T T, Blake R D. Ceramic-ceramic seals by microwave heating [J]. J Mat Sci Let, 1986(5): 270– 274.
- [12] Fukushima H, Yamanaka T, Matsui M. Microwave heating of ceramics and its application to joining [J]. J Mat Res, 1990, 5(2): 397– 405.
- [13] Cozzi A D, Clark D E, Ferber M K. Microwave joining of high-purity alumina [J]. Cera Eng and Sci Proc, 1996, 17(3): 7– 11.
- [14] ZHOU Jian, ZHANG Qiao-xin, MEI Bing-chu, et al. Microwave joining of alumina ceramic and hydroxylapatite bioceramic [J]. J Wuhan Univ of Tech Mater Sci, 1999, 14(2): 46– 49.
- [15] Aravindan S, Krishnamurthy R. Microwave joining of alumina using sodium silicate glass as a bonding agent [J]. Ind Ceram (Italy), 1998, 18(3): 173– 176.
- [16] Sato T, Seki M, Shimakage K. Microwave joining of magnesia [J]. J ceram Soc Jap, 1996, 104(2): 155– 157.
- [17] Sato T, Takahashi N, Shimakage K. Microwave joining of alumina to magnesia [J]. J Ceram Soc Jap, 1996, 104(10): 900– 902.
- [18] BAI Xiang-yu (白向钰), LU An-li (鹿安理), WU Su (吴 苏), et al. 微波加热实现陶瓷材料同时烧结与连接的研究 [J]. Journal of Aviation Materials (航空材料学报), 1998, 18(4): 26– 30.
- [19] Binner J G P, Fernie J A, Whitaker P A. An investigation into microwave bonding mechanisms via a study of silicon carbide and zirconia [J]. J Mat Sci 1998, 33(12): 3009– 3015.
- [20] Aravindan S, Krishnamurthy R. Joining of ceramic composites by microwave heating [J]. Materials Letters, 1999, 38(4): 245– 249.
- [21] Arunajatesan S, Carim A H, Yin T Y, et al. TEM investigation of microwave joined SiC/Al/SiC and α -SiC/Al/ α -SiC [J]. J Mater Res Soc Symp Proc, 1993, 314(12– 14): 131– 135.
- [22] ZHANG Jin-song (张劲松), CAO Li-hua (曹丽华), YANG Yong-jin (杨永进). 微波烧结关键技术进展 [J]. Materials Review (材料导报), 1994(2): 34– 37.
- [23] Guy B O, Francisco A J, Black M W. Design and evaluation of a controller for the process of microwave joining of ceramics [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1992, 39(4): 301– 312.
- [24] Yarlagadda K D V. Characterization of materials behaviour in microwave joining of ceramics [J]. J Mater Proce Tech, 1998, 84(1– 3): 162– 174.

Overview of microwave joining

LI Xiao-lu, ZHOU Jian

(State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing,
Wuhan University and Technology, Wuhan 430070, P. R. China)

[Abstract] The interaction mechanism of microwave with ceramics, the characteristics of temperature change and the equipment of microwave joining were expatiated, and the development on microwave joining in recent years was provided, then some problems in the microwave joining process were referred. At last a prospect on microwave joining technology was made.

[Key words] microwave joining; ceramics; dielectric loss factor

(编辑 杨 兵)