

高频基片复合材料的研究进展

王亚明 贾德昌 周玉

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院 哈尔滨 150001)

文 摘 介绍了电路组装技术对基片的性能要求、性能影响因素及基片设计原则,评述了高频基片复合材料的发展现状,并提出未来研究工作的重点。

关键词 聚合物,高频基片复合材料,性能

High Frequency Substrate Composites

Wang Yaming Jia Dechang Zhou Yu

(School of Material Science and Engineering, Harbin Institute of Technology Harbin 150001)

Abstract Substrate properties required by circuit mount technology, various factors to effect the properties, and principles to design the high frequency substrate are introduced, and development of the high frequency substrate composite as well as some suggestions on future research are presented.

Key words Polymer, High frequency substrate composite, Property

1 前言

高频是指 300 MHz 以上的频率范围,应用在此频率范围内的电路基片复合材料称为高频基片复合材料,主要应用于移动电话、功率放大器、直接广播系统中低噪声变频器组、各种组合天线等射频和微波设备,同时也应用于高性能高速的数字电路。随着信号传输的高频化和信息处理的高速化,传统的依赖于环氧树脂 FR-4 基片难以满足高频条件下电路基片的性能要求,必须寻求介电性能优异的高性能新型基片。以树脂为基添加无机相粒子复合而成的高频基片复合材料,具有优异的介电、耐热、可机加工等综合性能,非常适用于高频电路基片中的应用。高频基片复合材料已成为引人注目的研究热点,各国都在致力于新型树脂体系和增强材料在高频领域的研究开发工作。本文介绍了电路组装技术对高频电路基片的性能要求、性能影响因素及高频

基片的设计原则;评述了高频基片复合材料的发展现状,并指出进一步研究工作的重点。

2 高频基片的性能要求

微组装和布线基片要求基片材料具有优异的介电性能,较高的抗弯曲和抗拉脱强度、耐湿性及耐腐蚀性,此外要求基片与电子元器件相匹配的热膨胀系数(CTE)和较高的玻璃化转变温度(T_g)。

2.1 介电常数(ϵ)和介电损耗($\tan \delta$)

对于高频用高性能的基片用两个重要的参数来描述^[1]:介电常数 ϵ 和介电损耗 $\tan \delta$ 。信号传输速度^[2] $v = c/\sqrt{\epsilon}$ (c 是光速), ϵ 越少,信号延迟越小,信号传输就越快;电路中信号的传输损失^[2]

$\sqrt{f \tan \delta}$ (f 是传播频率),传输损失与 $\tan \delta$ 成正比, $\tan \delta$ 越小,基片吸收高频电磁波越少,传输的效率就越高^[3]。为了使印制电路板(PCB)工作稳定,和 $\tan \delta$ 不但要小,且在较宽的频率、温度范围内还要有

收稿日期:2001-06-08;修回日期:2002-01-28

王亚明,1978年出生,博士研究生,主要从事陶瓷复合材料及陶瓷涂层的研究工作

优异的稳定性。

2.2 热膨胀系数(CTE)

以树脂为基体的高频基片复合材料,树脂产生的热膨胀会降低材料的 ,也会使力学性能恶化^[4]。另外电子元器件需直接焊接到电路基片上,由于基片与电子元器件的 CTE 不同,在焊点处就产生一种应力,若热循环次数过多,会导致焊点断裂失效。由电子元器件的功耗引起的元器件和电路基片间的温差也可造成焊点失效。为此在制备基片时,要使基片材料的 CTE 尽量小,同时要使其与电子元器件的 CTE 相匹配。

2.3 玻璃化转变温度(T_g)

对于树脂基基片复合材料,当基片温度处于高于其材料的 T_g 温度时,其抗弯强度大大降低(如图 1)。当温度低于 T_g 时,对基片施加压力 F ,基片产生 d_1 的变形量,如果温度在 T_g 以上,对基片施加同样的压力 F ,基片会产生一个比 d_1 大得多的变形量 d_2 。在微组装工艺过程中,电路基片要经过一些高温工艺,如:为去掉吸附水分而进行的烘干,波峰焊或再流焊之前进行的预热,电路基片元器件的修理、返工等。再流焊时,操作温度达 230 左右,波峰焊时温度更高,如果基片的 T_g 低于此温度,焊点就会因为基片的膨胀量过大而造成翘曲变形,对焊点产生应力,严重时会使焊点开裂,致使电路无法正常工作。因此基片必须具有较高的 T_g 和耐热冲击性能。

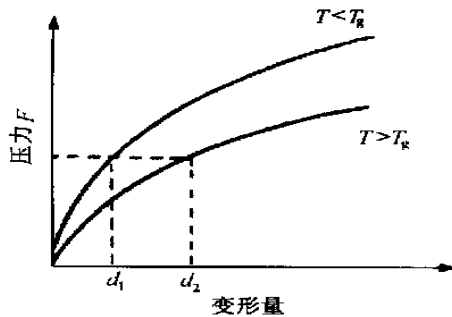


图 1 不同温度下同一压力对基板产生的变形量^[5]

Fig. 1 Deforming values of substrate at same pressure and different temperatures

3 性能影响因素

影响高频基片复合材料性能的因素很多,分别从基体材料、增强材料、制备工艺及微观结构等方面讨论对性能的影响。

3.1 聚合物基体

宇航材料工艺 2002 年 第 3 期

聚合物基体在复合材料中起连接相作用,它的各项性能参数直接影响复合材料的电学、力学性能。聚合物因所含极性基团的极性强弱不同、含量不同、结构不同,极化时引起的损耗差别较大。对于非极性聚合物如聚乙烯、聚四氟乙烯,它们单体偶极矩为 0,聚合物无极性,这类聚合物在外电场作用下,只产生电子极化,损耗很小,可忽略不计,通常非极性聚合物的 ϵ' 和 $\tan \delta$ 都比较小, ϵ' 值范围在 2.0~2.4,而 $\tan \delta$ 值在 0.0003 以下。基体聚合物含有极性基团,在高频电场下,除产生电子极化外,还有偶极式极化,极化对外电场能量损耗较大,通常极性聚合物的 ϵ' 和 $\tan \delta$ 都很大。对于力学性能,热固性聚合物基体复合材料的力学性能一般优于热塑性树脂。

3.2 无机添加相的含量

无机添加相作为功能体,其含量是直接影响复合材料性能的重要因素;但无机添加相的加入,要以其不影响基片的电学性能为前提。复合材料的 ϵ' 随玻璃纤维或陶瓷相含量的增加而增大,这也符合复合材料的介质混合法则。

3.3 制备工艺

不同的工艺将影响复合材料的微观结构,从而影响复合材料的性能。采用适当的材料混合工艺,使无机粒子在聚合物基体中分散均匀,避免发生较大的团聚,改善复合材料的电学与力学性能。采用空心微珠填充聚合物的特殊材料工艺,降低复合材料的 ϵ' 和 $\tan \delta$,使复合材料基片应用于高频;增加成型压力,使材料组织更致密,减少空气对 ϵ' 的作用;烧结及热处理工艺中,适当增加保温时间,促使挥发物充分逸出,更稳定。

3.4 水分及杂质对复合材料性能的影响

水分或其它低分子量物质浸入复合材料会导致强度损失;水分进入树脂基体会降低 T_g ,这使得分子运动容易发生并增加了冲击强度,估计环氧树脂吸收 1% 的水分会使 T_g 降低 10^[6]。水分浸入复合材料的“空隙”,也会使复合材料的 ϵ' 和 $\tan \delta$ 增加,复合材料在烧结过程中或多或少的总会有低分子量残留挥发物逸出,从而在基片材料中留下“空隙”,空隙具有活性,可吸附水分子。另外复合材料各组分中弱极性和极性分子均可以吸收水分子,在相对温度不同时,贮存水分子量不同,导致 ϵ' 和 $\tan \delta$ 在某一范围内发生变化。Banks^[6]等详细讨论了吸附水分对介电性能及力学性能等的影响,关于水分

对介电性能的影响时有报道^[7~9],在常温下复合材料的 ϵ' 和 $\tan \delta$ 取决于树脂基体、无机粒子、水、空气和杂质的相对含量,这些因素又取决于复合材料成型过程中各种工艺参数和环境条件,如各组分含量、压制密度、烧结工艺制度及环境温度^[10]。

4 高频基片设计原则

设计高频基片时要考虑上述诸多影响因素,力求在保证性能的前提下降低成本。现仅讨论几个关键性问题。

4.1 原材料的选择

(1) 增强材料的选择

增强材料加入聚合物基体中可提高基片硬度、耐热性和模量,降低收缩率、吸水性和成本。无机材料的发展方向有两个:纤维和陶瓷微粉^[11]。玻璃纤维是增强材料中用得最多的,具有高强度、优良的介电性能、吸潮小和尺寸稳定等优点。其中,石英玻璃纤维的介电性能最好。介电性能优良的陶瓷微粉如氧化铝、氧化镁、二氧化硅、二氧化钛、九钛酸钡等也做为增强材料获得应用。周洪庆^[12]等制备了以 PTFE 为基,充填精细陶瓷(氧化铝、二氧化硅和二氧化钛)获得了综合性能较佳的微波基片材料。另外,有些情况下也采用玻璃纤维或编织玻璃布与陶瓷共同增强树脂基体。

(2) 基体材料的选择

用于基片材料的树脂有:环氧树脂、聚酰亚胺 PI、TPPO、PTFE、TPPE、BT、聚苯丙咪唑 PBI 等。它们介电性能优良, $\tan \delta$ 小,且在很大的温度范围内几乎保持不变。其中 PTFE、PI 和 PBI 具有突出的耐热性,PTFE 可在 260℃ 长期使用,而 PI、PBI 可在 300℃ 以上长期工作,PBI 短期工作温度可达 650℃。但这几种树脂较环氧树脂价格昂贵,具体应用时应根据实际性能要求而选用适当的树脂。为了改善某

项性能,也可多种聚合物共混来做为基体材料。例如为提高 PTFE 的加工性,可使其与聚苯硫醚、聚芳脂或液晶高分子等共混^[13],这些高分子的加入,既提高了加工性能,又保持了基片较好的电性能。

4.2 热匹配问题

增强材料的加入,在一定程度上减小树脂基体的 CTE,可改善基片与铜箔或电子元器件的不匹配,但要有效解决不匹配问题,还需从基片的结构设计考虑^[5]:一是在基片中间夹上一层 CTE 极低的过渡层,形成夹层结构,用它来调节基片的 CTE;二是在普通基片外加一层未经增强的树脂层(不含增强材料)作为柔性层,柔性层在电子元器件与基片间起缓冲作用;三是减小基片厚度提高电路可靠性,但基片过薄则失去机械支撑作用,因此可将双面覆铜极薄基片粘贴在金属支撑板上,金属板起散热作用。

4.3 散热问题

能否保证良好散热是电路可靠工作的关键。温度升高,基片中的各组分材料以不同的速度膨胀,这在基片内部和基片与电子元器件的连接处均会产生热应力。应力集中会产生破坏,基片设计时采用有效的散热方法非常重要。目前多采用导热率较高的单、双面敷铜 [$386 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]或敷 SiC [$270 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]基片来解决散热问题^[14]。为减小基片局部过热,基板内设置散热通道做为热扩散的渠道,这种通道连接于外部散热体或在铜箔内表面。

5 发展现状

美国从 20 世纪 60 年代就开始了高频基片复合材料的研究。目前,美国生产高频片复合材料的公司有 Rogers、Taconic、Arcon、GIL 和 Poydad 等,其中 Rogers 公司已成为世界上高频基片的主要供应商,产品销售网络遍及世界。表 1 列出了美国用于无线通讯市场的主要高频材料及其介电性能。

表 1 美国无线通讯用高频基片复合材料及介电性能

Tab. 1 High frequency substrate composite used in wireless communication in U. S.

材料	生产厂家	复合材料	ϵ'	$\tan \delta$
RO3003	Rogers	聚四氟乙烯/陶瓷	3.0 ± 0.04 (10 GHz)	0.0013 (10 GHz)
RO4003	Rogers	热固性树脂/玻璃纤维/陶瓷	3.38 ± 0.05 (10 GHz)	0.0027 (10 GHz)
RO4350	Rogers	热固性树脂/玻璃纤维/陶瓷	3.48 ± 0.05 (10 GHz)	0.004 (10 GHz)
TLC-30	Taconic	聚四氟乙烯/玻璃纤维	3.0 ± 0.05 (10 GHz)	0.003 (10 GHz)
RF35	Taconic	聚四氟乙烯/玻璃纤维/陶瓷	3.5 ± 0.05 (10 GHz)	0.0018 (10 GHz)
25N	Arlon	热固性树脂/玻璃纤维/陶瓷	3.25 ± 0.05 (10 GHz)	0.0024 (10 GHz)
GML1000	GIL	树脂/玻璃纤维	3.05 ± 0.05 (10 GHz)	0.005 (10 GHz)
PCL-226	Polydad	环氧树脂/玻璃纤维	4.5 (1 MHz)	0.019 (1 MHz)

* 资料来源于产品说明书。

一些体系的基片材料已经实现商品化,但是基片复合材料的介电性能还没有达到令人满意的地步,仍然可以通过开发新的树脂体系、对树脂进行改性、对陶瓷颗粒或玻璃纤维进行表面处理、采用各种复合工艺(0-3型等)、优化最佳配合比例、改进加工制作过程等来改善其性能。下面分别从树脂体系、制备工艺、介电性能评测手段及介电参数的拟合分析等方面讨论近来的研究情况。

5.1 开发新型树脂体系

高频基片复合材料要求具有优异的介电性能,目前获得良好介电性能主要有两种途径:一是选用介电性能优异的增强材料;二是选用低 ϵ' 和 $\tan\delta$ 、耐高温的高性能树脂作为电路基片的基体树脂。从表1分析可知,目前成功的技术路线是开发应用高性能的新型树脂体系。

5.2 制备工艺优化

(1) 纳米无机粒子在聚合物基体中的分散工艺

由于纳米粒子高表面能,直接添加到聚合物过程中粒子往往团聚严重,一种解决方法是选择合适的混合条件(如选用极性溶剂,利用形成的双电层产生静电斥力,可获得良好的分散性);二是对粒子进行表面改性,在粒子表面包覆一层低分子量的表面活性剂或聚合物稳定剂如PVA、DDP(二烷基二硫代磷酸盐)^[15]、A-151(乙烯基三乙氧硅烷)^[16],使其获得稳定分散。吴松全^[16]采用超声法、界面改性法并首次采用高能球磨法、超声-界面改性法、超声-球磨法对 PbTiO_3 粒子在PVDF中的分散性进行研究,确定了最佳超声时间、偶联剂用量、球磨时间等参数。Zhang^[17]等采用超声4h对PLCT-P(VDF-TrEE)进行分散,结果表明陶瓷相分布均匀,没有大的团聚出现。

(2) 寻求新的材料工艺,降低复合材料的 ϵ' 和 $\tan\delta$

将空气作为填料的形式均匀地引入基体当中,这样得到材料的 ϵ' 不升反降,因为空气的 ϵ' 接近于真空的,远低于任何高分子材料的 ϵ' 。引入微气泡形成蜂窝状多微孔结构,降低材料的 ϵ' ,目前主要有两种方法:一种是将特殊的空心微珠填料,与聚合物形成组合物使用;另一种方法是直接利用聚合物材料经特殊工艺成型多微孔泡沫基材。Bleay^[18]等采用价格低廉的空心玻璃来增强树脂,获得良好的介

电性能,又降低了成本。以这两种方法都能得到极低的基片材料,但是由于材料的限制及基片工艺的特别要求,广泛的实际应用尚需进一步技术突破。

(3) 寻求合适的成型工艺

成型形状简单的基片材料,可选用冷压、热压、等静压、流延成型工艺,冷压、热压成型简单易行,但缺点是结构和强度各向异性,为解决这一问题,采用等静压成型。等静压成型压力易调节,坯体均匀致密,烧结收缩特别小,各向均匀一致,烧成的样品具有高的力学性能,但缺点是设备复杂。流延法中摸索流延条件较为复杂,需优化分散剂、pH值及流延成型中刀片的运动速度等条件,影响因素较多,适合于规模化生产。实际应用中,要视具体情况选择合适的成型工艺。王小群^[19]在制备高速宽频带导弹天线罩复合材料时,考虑PIFE的特殊元素组分和分子结构,在传统的制作过程中,一般采用冷压、烧结工艺,但是当制备PIFE复合材料时,过低的压力将影响PIFE的密度和强度,过高的压力可能破坏玻璃纤维的完整性,所以在模压过程中,采用不锈钢模具在热电耦控制下加热至200℃。这样,在较低的压力下即可降低孔隙含量,同时保持了玻纤的完整性。

5.3 介质参数估测及方程拟合分析

介电参数的精确测量需要用微波扫描仪、微波网络分析仪等昂贵的微波测试仪器与装置,辅以 TE_{01m} 模式 TE_{01} 型的介质谐振器及精密控温恒温器等测试装置,在微波下用谐振法加以测定,且对测试条件和测量技术要求很高。目前,国内只有电子科技大学微波中心实验室能对此作较精确的测量。由于测试费用昂贵及该中心科研任务繁忙难于对外服务,所以介电性能的测试成为国内微波介质材料研究中的主要困难^[20]。鉴于此,用易于实现的测试与评估手段来研究材料在高频下的介电性能,也不失为是加快高频介电材料研究的一种有效途径。张绪礼、金霞^[21]等通过易于实现的低频($10^3\text{ Hz} \sim 10^7\text{ Hz}$)介质测量来估测材料的微波介电特性,已取得了较好的结果。叶龙^[22]等验证了用低频介电测量数据估算微波介质陶瓷材料介电性质的可行性。

此外,对介质参数的方程拟合分析受到重视。将复合材料看作均匀介质材料,应用介质混合法则来研究复合材料,在一些假设和近似处理下,得出许

多以聚合物为基体的复合材料介电性能参数的数学模拟方程:对于双组分复合材料提出了许多方程、公式模型预测介电性质,F. G. Shin 等对其内在的关系进行了比较和探讨^[23,24];Tsangaris^[25]则提出了三组分复合材料的模型方程。值得一提的是,因影响因素复杂,在众多的模拟方程中,都有一定的适用条件,偏离条件则会产生错误结果。例如添加相粒子尺寸、粒子在基体中的分布状态以及团聚体的存在都将影响复合材料的电学性能^[26~28]。根据具体的复合材料体系及材料特征,建立有效的模拟方程,优化材料设计,仍是今后努力的方向。Gershon^[29]综合考虑了复合材料各组分的、体积分数、微观组织结构对有效的影响,运用介质混合法则对复合材料的介电性能进行了估测,并用有限元法建立静电学模型,对有效进行更加准确的估计。

6 展望

高频基片复合材料因其特殊的使用环境和独特的性能优势,引起了人们的广泛关注,也取得了实质性进展,但研究工作仍有待于进一步深入,主要表现在以下几个方面:无机纳米粒子在聚合物基体中的均匀分散;开发新的树脂体系,优化介电与耐热性能,拓宽材料使用范围;探索低成本的基片制备工艺方法;探讨精度更高、测试效率更好的高频介电性能测试系统及评估方法。这些问题迅速的解决,将极大促进高频基片材料的研究工作。

参考文献

- 1 赵磊等. 氰酸脂树脂在高性能印刷电路板中的应用. 绝缘材料通讯, 1999; (3): 7~9
- 2 片寄照雄. 热硬化型 PPE の特徴 と低誘電率銅張積層板への应用 (そのⅠ). プラスチックスチー ジ, 1997; 43 (2): 137~142
- 3 Crum S. Wirelsss devices set new criteria for high frequency materials. Electronic Packaging Production, 1999; 39 (4): 32~35
- 4 Traut G R. Clad substrates of PTFE composites for microwave antennas. Microwave Journal, 1980; (9): 47~51
- 5 赵磊等. 适合于 SMT 的印制电路板. 绝缘材料通讯, 1999; (5): 40~43
- 6 Banks W M et al. Dielectric and mechanical assessment of water ingress into carbon fiber. Composites and Structure, 2000; 76: 43~55
- 7 Kraszewski A W et al. Use of microwave cavity for sensing

dielectric properties of arbitrarily shaped biological objects. IEEE MTT, 1990; 38(7): 858~863

- 8 Achour M E et al. Electric properties of carbon black-epoxy resin composites at microwave frequencies. J. Appl. Polymer Sci., 1996; 61: 2 009~2 013
- 9 Molla J et al. Effect of humidity on microwave dielectric losses of porous alumina. J. Appl. Phys., 1999; 85(3): 1 727~1 730
- 10 姜卫陵等. 高硅氧玻璃纤维布增强聚四氟乙烯 (PTFE) 复合材料介电性能研究. 宇航材料工艺, 2000; (1): 34~36
- 11 蔡长庚等. 聚四氟乙烯覆铜板. 绝缘材料通讯, 1999; (5): 32~35
- 12 周洪庆等. 微波复合介质制备及性能研究. 功能材料, 1997; 28(1): 78~80
- 13 黄淑辉等. 低磨耗自润滑新型氟塑料合金的研制. 中国塑料, 1995; 9(6): 21~26
- 14 Keating J. Transition of MCMC applications to McML using rigid flex substrates. Microelectronics Reliability, 1999; 39: 1 399~1 406
- 15 Xu T et al. Study on the structure of surface-modified MoS₂ Nanoparticles. Mater. Res. Bull., 1996; (4): 345~349
- 16 吴松全. 纳米钛酸铅与聚偏氟乙烯复合均匀性研究. 哈尔滨工业大学硕士论文, 1999: 39
- 17 Zhang Q Q et al. Dielectric and pyroelectric properties of P(VDF-TrFE) and PCLT-P(VDF-TrEE) 0-3 nanocomposite films. Composites: Part A, 1999; 30: 163~167
- 18 Bleay S M et al. Mechanical and electrical assessment of hybrid composites containing hollow glass resinforcement. Composites Science and Technology, 1999; 59: 1 321~1 329
- 19 王小群等. 高速宽频带导弹天线罩的耐烧蚀透波材料研究. 复合材料学报, 1999; 16(3): 12~18
- 20 宋英. BaO-TiO₂ 系纤维的合成及 BaTi₄O₉ 纤维复合陶瓷的研究. 哈尔滨工业大学博士论文, 2000: 52~53
- 21 金霞等. 微波介质陶瓷的低频介电特性. 华中理工大学学报, 1998; (2): 91~93
- 22 叶龙等. Pb 掺杂 BaO-Nd₂O₃-TiO₂ 系列微波介质陶瓷及其低频测量方法的研究. 功能材料, 1998; 29(1): 75~78
- 23 Shin F G et al. Dielectric constant of binary mixtures. J. Mat. Sci. Lett., 1989; 8: 1 383~1 389
- 24 Shin F G et al. Symmetrization of dielectric binary mixture formulae. J. Mat. Sci. Lett., 1990; 9: 1 002~1 009
- 25 Tsangaris G M et al. The dielectric response of a polymeric three-component composite. J. Mat. Sci., 1999; 34: 2 151~2

26 Achour M E et al. Microwave properties of carbon black-epoxy resin composites and their simulation by means of mixture laws. Journal. Appl. Poly. Sci, 1999; 73:969 ~ 973

27 Lee H G et al. Ceramic particle size dependence of dielectric and piezoelectric properties of piezoelectric ceramic-polymer composites. J. Appl. Phys, 1990; 67(4) :2 024 ~ 2 028

28 Ogitani S. Factors influence the permittivity of polymer/

ceramic composites for embedded capacitors. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2000; 23(2) :313 ~ 322

29 Gershon D L. Complex permittivity measurements and mixing laws of ceramic materials and application to microwave processing. Doctor thesis. University of Maryland college park, 1999:3 ~ 5

(编辑 李洪泉)

第四届全国航空航天装备失效分析学术研讨会 征文通知

中国航空学会拟定于 2003 年 5 月在福建省武夷山市召开“全国第四届航空航天装备失效分析学术研讨会”。会议将邀请颜鸣皋、柯伟、徐滨士、杜善义和钟群鹏等院士及一些著名专家到会并作特邀报告。现将会议有关事项通知如下。

一 征文范围

- 失效分析理论与发展
- 失效分析方法及技术
- 材料、电子元器件的失效机理
- 失效预测预防和控制技术
- 失效的模拟与再现技术
- 机械及电子产品的失效案例分析
- 疲劳断裂及其工程应用研究
- 环境断裂及其工程应用研究
- 磨损失效分析及其机理研究
- 复合材料的损伤、断裂与失效分析
- 新材料的损伤行为研究
- 机械与电子产品的寿命预测、可靠性与安全评估

二 征文要求

- 1 应征论文未在国内正式刊物上发表过及未被全国性会议文集收录过。
- 2 论文作者需提交 5000 字以下的论文全文,包括论文题目、作者姓名、作者单位名称、邮编与通讯地址、摘要、关键词及正文。论文格式参考《材料工程》杂志,论文用 A4 纸打印。
- 3 提交论文的截止日期为 2002 年 11 月 30 日,应征论文请寄:北京市 81 信箱 4 分箱(100095)刘高远、李运菊收。电话:(010)62456622 - 5046(5040),传真:(010)62456212,E-mail:lg780407@263.net。
- 4 2003 年元月将向录用论文作者发出第二轮通知。
- 5 录用论文将于 2003 年 5 月在会前以《材料工程》(EI 检索)增刊正式出版。
- 6 会议期间欢迎相关单位展示科研成果、新产品、新技术。