

文章编号: 1673-5196(2020)03-0028-06

## 静电纺丝法制备 YAG-ZrO<sub>2</sub> 复合纳米纤维

何 玲<sup>1,2</sup>, 秦兴文<sup>1,2</sup>, 冯玉洁<sup>3</sup>, 潘莉莉<sup>1,2</sup>, 孙卫民<sup>1</sup>, 李文生<sup>1,2</sup>

(1. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 3. 上海蓝滨石化设和轩有限责任公司, 上海 201518)

**摘要:** 运用静电纺丝技术结合热处理工艺成功制备了形貌光滑、尺寸均匀的 YAG-ZrO<sub>2</sub> 复合纳米纤维. 采用 XRD、FT-IR 和 SEM 探索了电压与浓度对复合纤维物相及形貌的影响. 结果表明: 电压为 25 kV、PVA 质量分数为 11% 时得到表面光滑、尺寸均一的复合纤维前驱体. 前驱体纤维经过 1 200 °C 煅烧 5 h 后, 具有较高的结晶度, 直径约为 500 nm 且比较均匀. 为了使 YAG-ZrO<sub>2</sub> 纤维增强的复合材料具有自检性, 研究了 YAG-ZrO<sub>2</sub> 纤维的发光性能. 发现用 290 nm 紫外光激发 YAG-ZrO<sub>2</sub>:Tb<sup>3+</sup> 复合纳米纤维, 在 581 nm 处出现明显的发射峰, 并发出绿光, 这一现象属于 Tb<sup>3+</sup> 的 <sup>4</sup>D<sub>4</sub>→<sup>7</sup>F<sub>4</sub> 跃迁. 应力-发光实验结果表明, YAG-ZrO<sub>2</sub>:Tb<sup>3+</sup> 纤维可以实现对铝基复合材料应力-应变的检测.

**关键词:** 静电纺丝技术; YAG-ZrO<sub>2</sub> 纳米纤维; 发光性能

中图分类号: TB34 文献标志码: A

## Preparation of YAG-ZrO<sub>2</sub> composite nanofibers by electrospinning

HE Ling<sup>1,2</sup>, QIN Xing-wen<sup>1,2</sup>, FENG Yu-jie<sup>3</sup>, PAN Li-li<sup>1,2</sup>, SUN Wei-min<sup>1</sup>, LI Wen-sheng<sup>1,2</sup>

(1. College of Materials Engineering, Lanzhou Inst. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 3. LANPEC Technologies Limited, Shanghai 201518, China)

**Abstract:** YAG-ZrO<sub>2</sub> composite nano-fibers with smooth morphology and uniform size were successfully prepared by electrospinning and heat treatment. Effects of voltage and concentration on the phase and morphology of composite fibers were studied by XRD, FT-IR and SEM in this research. Obtained results show that the composite fiber has a smooth surface and uniform size if voltage of 25 kV and the PVA content of 11% applied. After annealing at 1 200 °C for 5 h, the precursor fiber has a higher crystallinity and a uniform diameter of about 500 nm. In order to make the YAG-ZrO<sub>2</sub> fiber reinforced composites, which possesses the function of self-testing, the luminescence properties of YAG-ZrO<sub>2</sub> fibers were also investigated. It was found that sharp emission peaks at 581 nm were detected when YAG-ZrO<sub>2</sub>:Tb<sup>3+</sup> composite nanofibers were excited by 290 nm UV light, emitting green light as well. This phenomenon belongs to the <sup>4</sup>D<sub>4</sub>→<sup>7</sup>F<sub>4</sub> transition of Tb<sup>3+</sup>. Stress-luminescence experiment results show that YAG-ZrO<sub>2</sub>:Tb<sup>3+</sup> fiber could detect the stress and strain of aluminum matrix composites.

**Key words:** electrospinning technology; YAG-ZrO<sub>2</sub> nanofibers; luminescence properties

纳米纤维具有大的比表面积和长径比以及极强的渗透性等优点, 已成为目前研究的热点之一<sup>[1]</sup>. 钇铝石榴石(化学式为 Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>, 简称 YAG)纤维具有耐高温, 强度高, 抗高温蠕变性能优异的特性<sup>[2-3]</sup>. 在激光材料<sup>[4]</sup>, 绝热耐火材料<sup>[5]</sup>, 增强金属和陶瓷

基材料<sup>[6-7]</sup>等领域有着广泛的应用. 氧化锆(ZrO<sub>2</sub>)纤维具有高熔点、高强度、耐高温等优点<sup>[8-10]</sup>, 是一种综合性能优良的材料. 目前, 许多学者尝试用定向凝聚法和共沉淀法制备 YAG-ZrO<sub>2</sub> 材料. 如 Jose M. Calderon-Moreno 等<sup>[11]</sup>采用快速凝固法制备了结晶度高、组织均匀、颗粒细小的 YAG-ZrO<sub>2</sub> 复合材料, 但此法成本较高、操作很复杂. Georg Puchas 用共沉淀法获得 YAG-ZrO<sub>2</sub> 复合纤维, 制造了具有同种特

收稿日期: 2019-05-13

基金项目: 甘肃省重点研发计划项目(17JR7GA014)

作者简介: 何 玲(1976-), 女, 甘肃天水人, 教授.

性和微纳米范畴的共晶组织.然而沉淀剂会使溶液分布不均匀,导致其组成有很大的偏差<sup>[12]</sup>.近年来,用静电纺丝制备纳微米纤维的方法被广泛研究,该方法方便、高效、操控简单、成本低,目前静电纺丝法多用于制备有机高分子聚合物<sup>[13]</sup>,迄今为止,鲜有关于静电纺丝法制备 YAG-ZrO<sub>2</sub> 复合纤维的文献报道.Zhao<sup>[14]</sup>研究了具有发光特性的增强相 CdS@ZnS,添加到基体中可以实现复合材料的自检.为了得到集增强和自检为一体的 YAG-ZrO<sub>2</sub> 复合纤维,制备了 Tb<sup>3+</sup> 掺杂的 YAG-ZrO<sub>2</sub> 纤维,该纤维不仅可以提高基体材料的强韧性,而且还有可能实现复合材料的自敏检测.本文用静电纺丝法成功制备了 YAG-ZrO<sub>2</sub> 前驱体纤维,经热处理后获得长径比约为 50 : 1、表面光滑的复合纤维,并系统研究了电压、浓度等因素对纤维形貌和结构的影响,并在纤维中添加 Tb<sup>3+</sup> 离子研究其发光性能.

## 1 实验过程

### 1.1 前驱体溶胶的配制

实验原料:氧化钇(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>),乙醇(CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH),硝酸铝(Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> · 9H<sub>2</sub>O),柠檬酸(C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub> · H<sub>2</sub>O,分析纯),硝酸(HNO<sub>3</sub>,分析纯),聚乙烯醇([C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O]<sub>n</sub>, M<sub>w</sub> = 65 000),氯化锆(ZrCl<sub>2</sub> · 8H<sub>2</sub>O),氧化铽(Tb<sub>4</sub>O<sub>7</sub>),蒸馏水.

称取聚乙烯醇(PVA)和蒸馏水倒入锥心瓶中,在 90 °C 恒温水浴磁力搅拌器中搅拌,直到聚乙烯醇充分溶解成为透明溶胶,其中:PVA 的质量分数是 9%~11%;蒸馏水的体积分数为 60%~70%.称取 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Tb<sub>4</sub>O<sub>7</sub> 倒入烧杯中,Tb<sup>3+</sup> 和 Y<sup>3+</sup> 摩尔比为 1 : 28,加入硝酸充分溶解,蒸发除去过量的硝酸.按 Al<sup>3+</sup> : Zr<sup>4+</sup> : Y<sup>3+</sup> 摩尔比 23 : 1 : 14,称取 Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> · 9H<sub>2</sub>O、ZrOCl<sub>2</sub> · 8H<sub>2</sub>O 加入其中;再称取柠檬酸、无水乙醇加入到上述烧杯中形成混合溶液,将该溶液放置在磁力搅拌器上搅拌 4 h 使溶液混合均匀,之后加到 PVA 溶胶中,搅拌使其成为具有一定黏度、均匀的溶胶,即为前驱体溶胶.

### 1.2 YAG-ZrO<sub>2</sub> 复合纳米前驱体纤维的制备

将前驱体溶胶装入注射器中(注射针为 21 型号),喷嘴与水平面夹角约为 15°,喷嘴与接收器的距离为 16 cm;施加的直流电压为 15~25 kV;相对湿度为 55%~58%;室内温度为 25~30 °C;供给速率为 5 mL/h;高压正极连接喷嘴,负极连接接收器,通电进行纺丝,在接收器上收集前驱体纤维.

### 1.3 YAG-ZrO<sub>2</sub> 复合纳米纤维的制备

将制备好的前驱体纤维装入坩埚中,在恒温箱

中 80 °C 干燥 4 h,然后在马弗炉中 500 °C 保温 4 h,进行预烧,除去碳、氢等元素,最后在充有氮气和氢气的管式炉中不同温度下保温 5 h,升温速率为 1 °C/min,最后得到 YAG-ZrO<sub>2</sub> : Tb<sup>3+</sup> 复合纳米纤维.

### 1.4 YAG-ZrO<sub>2</sub> : Tb<sup>3+</sup> 发光纤维铝基复合材料制备

按质量比 1 : 100 分别称取 Tb 质量分数为 5% 的 YAG-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : Tb 发光纳米纤维和 2024 铝合金粉末.量取酒精倒入烧杯中,酒精与金属粉末的质量比为 1 : 1,之后放入超声分散器中,边分散边向烧杯中加入称量好的纤维.待纤维添加完毕后,再超声分散 5 min,最后加入铝合金粉末.间隔 5 min 搅拌一次,超声 20 min.将分散好的混合粉末放入干燥箱内,60 °C 保温 40 min,用 300 目的筛子进行筛粉.将混合均匀的粉末装入设计好的石墨模具中,通过真空热压的方法制备复合材料.

## 2 测试方法

采用 X 衍射仪为 D8 ADVA NCE 型,阳极靶是 Cu-Kα<sub>1</sub>,波长是 0.151 78 nm,管电流为 80 mA,管电压为 60 kV,在 10°~70°进行扫描.采用 6700F 型扫描电子显微镜,电压为 0.5~30 kV,电镜分辨率为 1.0~2.2 nm,放大倍数为 25~650 倍.采用 Perkin-Elmer spectrum GX 型光谱仪,波长为 4 000~400 cm<sup>-1</sup>,光谱分辨率 4 cm<sup>-1</sup>,扫描信号累加 16 次.采用 F97Pro 型荧光光度计进行荧光性能分析,以 150 W 氙灯作为光源,可发出 200~900 nm 连续波长的光.信噪比为 S/N ≥ 150(P-P),波长准确性为 ± 1.0 nm.

## 3 结果与讨论

### 3.1 YAG-ZrO<sub>2</sub> 纤维的物相分析

图 1 为 YAG/ZrO<sub>2</sub> 前驱体纤维在不同热处理温度下保温 5 h 的 XRD 图.由图 1 可知,随着退火温度的升高,YAG-ZrO<sub>2</sub> 复合纤维的结晶度也在逐渐增高.当退火温度为 1 000 °C 时,复合纤维中除了 YAG、ZrO<sub>2</sub> 相,还有 YAlO<sub>3</sub> 杂质相生成.当温度升到 1 200 °C 时,通过与 YAGJCPDS(33-0040)和 ZrO<sub>2</sub>JCPDS(42-1164)的标准卡片对比,衍射峰与标准卡片吻合,复合纤维中除了 YAG 和 ZrO<sub>2</sub> 相外,无其他杂质相出现,说明复合纤维相纯度较高.YAG-ZrO<sub>2</sub> 前驱体纤维在 1 200 °C 的 XRD 衍射峰相对于 900、1 000、1 100 °C 更高,表明 YAG-ZrO<sub>2</sub> 前驱体纤维在 1 200 °C 保温 5 h 后,具有良好的结晶度.因此,选择在 1 200 °C 退火的复合纤维用于进

一步分析.

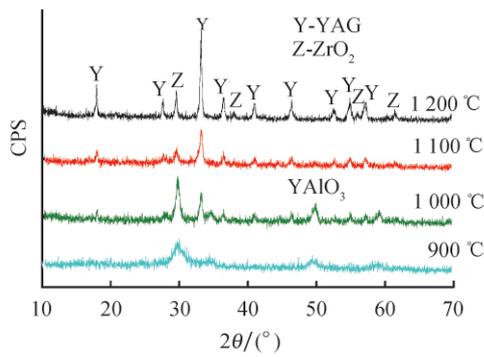


图 1 YAG-ZrO<sub>2</sub> 前驱体纤维在不同热处理温度下保温 5 h 的 XRD 图

Fig.1 XRD pattern of YAG-ZrO<sub>2</sub> precursor fiber incubated at different heat treatment temperatures for 5 h

### 3.2 YAG-ZrO<sub>2</sub> 纤维的显微形貌分析

#### 3.2.1 PVA 质量分数对纤维形貌的影响

图 2 为 YAG-ZrO<sub>2</sub> 前驱体纤维的不同 PVA 含量下的表面形貌.随着 PVA 质量分数的增加,YAG-ZrO<sub>2</sub> 复合纤维直径先减小后增大,如图 2f 所示,在 PVA 质量分数为 11% 时,纤维直径细小,约为 2.5 μm,且形态均匀,如图 2c 所示.这因为溶胶

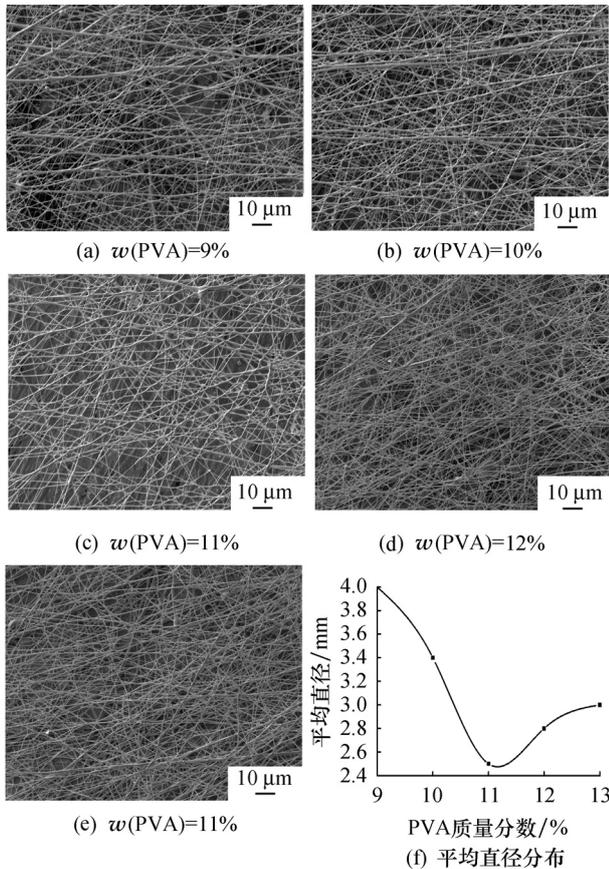


图 2 YAG-ZrO<sub>2</sub> 前驱体纤维在不同 PVA 含量下的 SEM 照片  
Fig.2 SEM photographs of YAG-ZrO<sub>2</sub> precursor fibers with different PVA contents

黏度适中表面张力与电场力近似平衡而使纤维受力较为均匀,所形成的纤维细小且均匀.当 PVA 质量分数小于 11% 时,黏度较低,表面张力小于电场力,纤维在形成中容易粘连在一起,所形成的纤维形态较粗大,如图 2a 和图 2b 所示.当 PVA 质量分数大于 11% 时,黏度较高,表面张力大于电场力,纤维在形成过程中不易分叉细化,纤维形态也较为粗大,如图 2d 和图 2e 所示.综合考虑纤维直径以及纺丝工艺的顺畅性,纺丝最佳 PVA 质量分数为 11%,有利于保持纤维形貌的均匀性,达到最佳效果.

#### 3.2.2 电压对纤维形貌的影响

图 3 为不同电压下 YAG-ZrO<sub>2</sub> 前驱体纤维的表面形貌.当电压为 15 kV 时,前驱体纤维之间存在一定的粘连,如图 3a 所示,其平均直径约为 2 μm,如图 3e 所示.因为施加的电压太小,尽管电场力克服了溶液的表面张力,形成射流,但电荷密度太低,分化能力弱,导致纤维直径粗大;当施加电压增加到 20 kV 时,在纤维表面没有观察到粘结现象,纤维形态良好,如图 3b 所示,其平均直径约为 950 nm,如图 3e 所示.因为施加电压增大,电场力也增大,复合纤维所受到的拉力也增大,得到的纤维较细;当施加电压继续增加时,由于溶液所带电荷较

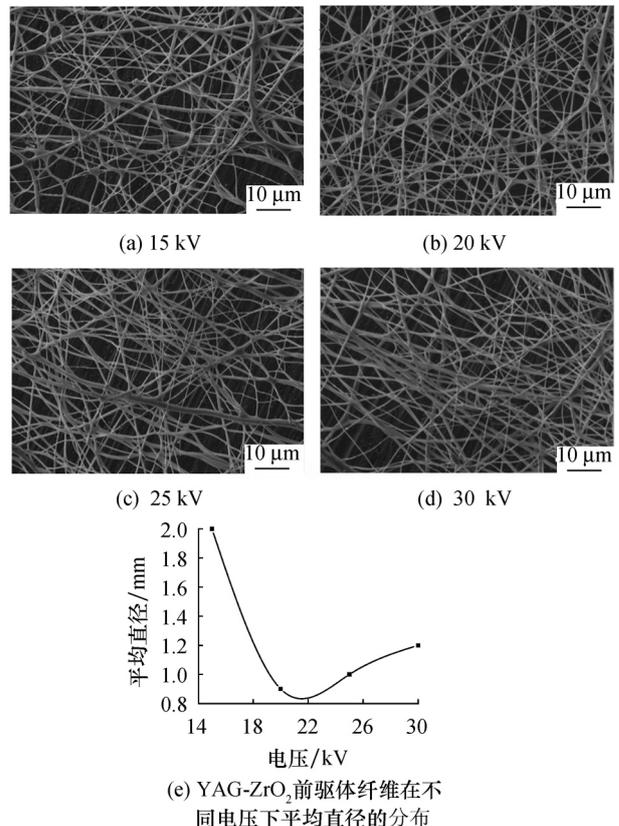


图 3 不同电压下 YAG-ZrO<sub>2</sub> 前驱体纤维的 SEM 照片  
Fig.3 SEM photograph of YAG-ZrO<sub>2</sub> precursor fiber at different voltages

多,相互排斥,纤维具有较大的直径,如图 3d 所示.因此,纺丝电压为 20 kV 时,YAG-ZrO<sub>2</sub> 复合纳米纤维的尺寸较均匀,纺丝较流畅.

### 3.2.3 不同热处理温度条件下复合纤维的形貌

图 4 是在最佳工艺条件下制备的 YAG-ZrO<sub>2</sub> 复合纤维前驱体在不同退火温度下的 SEM 图.随着退火温度的升高,复合纳米纤维的直径在逐渐减小,因为退火温度较高,有机物溶剂,碳、氮化物等完全挥发.经 1 200 °C 退火后的复合纳米纤维的表面较光滑且直径较均匀,其平均值约为 500 nm,如图 4e 所示.由此可知,用静电纺丝法制备的纤维经过 1 200 °C 退火后,其形貌较为均匀且光滑.

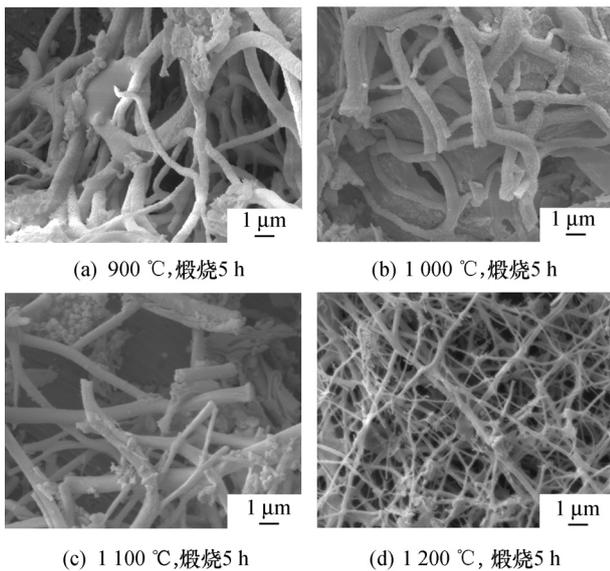


图 4 YAG-ZrO<sub>2</sub> 复合纳米纤维退火后的 SEM 照片  
Fig.4 SEM photograph of YAG-ZrO<sub>2</sub> composite nanofibers after annealing

### 3.3 YAG-ZrO<sub>2</sub> 纤维的透射电镜(TEM)分析

图 5 为 YAG-ZrO<sub>2</sub> 纤维的 TEM 图.由图 5a 可知,YAG-ZrO<sub>2</sub> 复合纤维由不同形态的纳米颗粒组成.HRTEM 分析可知复合纤维中有 YAG、ZrO<sub>2</sub> 两种晶格出现,直接测量间距  $d$  值为 0.26、0.24 nm,分别对应于 YAG(211)、(400)晶面<sup>[15]</sup>和 ZrO<sub>2</sub>(101)、(102)晶面<sup>[16]</sup>,如图 5c 所示.由图 5c 可知,纤维的衍射由衍射斑点和衍射环组成,且衍射环不太明显,有宽化现象,说明该纤维有单晶 YAG 和多晶 ZrO<sub>2</sub> 两种晶态存在,且组成的晶粒细小,有利于材料在增强和发光性能方向上的应用.由图 5d 可知, $w(O) = 35.9\%$ , $w(Al) = 23.7\%$ , $w(Y) = 20.9\%$ , $w(Zr) = 19.5\%$ ,纤维 A 部位含有 O、Al、Zr、Y 四种元素,结合前面分析可知,该复合纤维由 YAG 和 ZrO<sub>2</sub> 相随机混合组成.

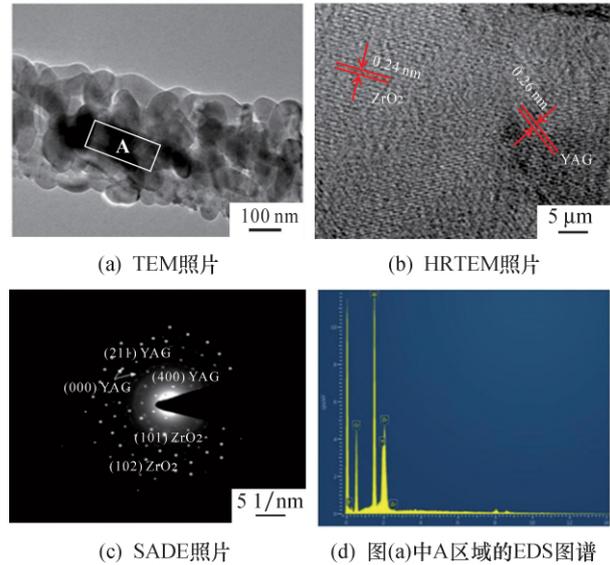


图 5 YAG-ZrO<sub>2</sub> 复合纤维的 TEM 图

Fig.5 TEM image of YAG-ZrO<sub>2</sub> composite fiber

### 3.4 YAG-ZrO<sub>2</sub> 纤维的红外光谱(FT-IR)分析

图 6 为 YAG-ZrO<sub>2</sub> 复合纳米纤维的 FT-IR 图.由图 6a 可知,3 261 cm<sup>-1</sup> 是 YAG-ZrO<sub>2</sub> 前驱体纤维中羟基的伸缩振动峰<sup>[17]</sup>;1 643 cm<sup>-1</sup> 处出现水的吸收峰<sup>[18]</sup>;2 659、2 360、1 316、1 046、826、749 cm<sup>-1</sup> 处的吸收峰是 PVA 中的 C—H、C—C、C=O 及 O—H 键的吸收峰<sup>[19]</sup>.由图 6b 可知,在 3 434 cm<sup>-1</sup> 处是水合羟基的伸缩振动峰;2 919 cm<sup>-1</sup> 处出现了

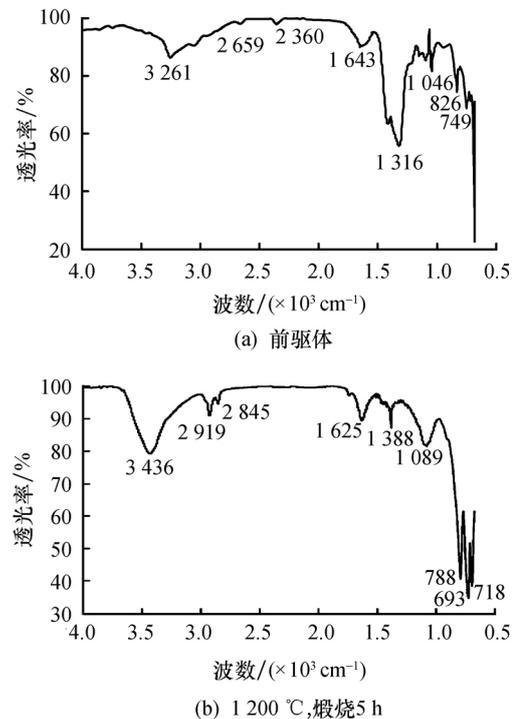


图 6 YAG-ZrO<sub>2</sub> 复合纳米纤维的 FT-IR 图谱

Fig.6 FT-IR spectrum of YAG-ZrO<sub>2</sub> composite nanofibers

ZrO<sub>2</sub> 的特征峰<sup>[20]</sup>, 在 2 845 cm<sup>-1</sup> 处出现了 Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> 的吸收峰<sup>[21]</sup>. 在 788、693、718 cm<sup>-1</sup> 处的峰分别是由于 O—Al 和 O—Y 的吸收振动产生的. 表明 YAG-ZrO<sub>2</sub> 前驱体纤维经过 1 200 °C 热处理后, 保留在该纤维中只有 YAG、ZrO<sub>2</sub>, 这与 XRD 结果相符合.

### 3.5 YAG-ZrO<sub>2</sub>:Tb<sup>3+</sup> 纤维的发光性能研究

图 7 是 YAG-ZrO<sub>2</sub>:Tb<sup>3+</sup> 复合纳米纤维的激发与发射光谱. 当监测波长为 581 nm, YAG-ZrO<sub>2</sub>:Tb<sup>3+</sup> 纳米纤维的激发光谱有两个强的锐线激发峰分别位于 274、290 nm, 宽谱带对应电荷由 O<sup>2-</sup> 转移至 Tb<sup>3+</sup> 的跃迁吸收. 位于 324 nm 附近的弱激发峰属于 Tb<sup>3+</sup> 的内部结构 f→f 的跃迁吸收. YAG-ZrO<sub>2</sub>:Tb<sup>3+</sup> 纳米纤维在波长为 274 nm 紫外光激发下, 在 421、467 nm 的发射峰对应 Tb<sup>3+</sup> 的蓝光发射, 来自于<sup>5</sup>D<sub>3</sub>→<sup>7</sup>F<sub>5</sub> 及<sup>5</sup>D<sub>3</sub>→<sup>7</sup>F<sub>4</sub> 的跃迁吸收; 在 489、542、581 和 627 的发射峰对应于 Tb<sup>3+</sup> 的绿光发射, 分别属于<sup>5</sup>D<sub>4</sub> 到<sup>7</sup>F<sub>6</sub>、<sup>7</sup>F<sub>5</sub>、<sup>7</sup>F<sub>4</sub> 和<sup>7</sup>F<sub>3</sub> 的跃迁. 说明 YAG-ZrO<sub>2</sub>:Tb<sup>3+</sup> 复合纳米纤维具有发光性能, 有可能用于复合材料的自敏检测.

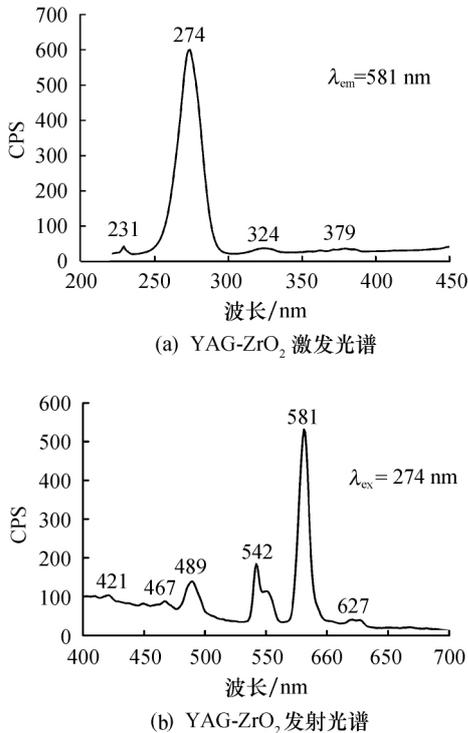


图 7 YAG-ZrO<sub>2</sub>:Tb<sup>3+</sup> 纤维的激发与发射光谱  
Fig.7 Excitation and emission spectra of YAG-ZrO<sub>2</sub>:Tb<sup>3+</sup> fiber

### 3.6 YAG-ZrO<sub>2</sub>:Tb<sup>3+</sup> 发光纤维对铝基复合材料的发光性能

为了研究 YAG-ZrO<sub>2</sub>:Tb<sup>3+</sup> 发光纤维对复合材

料的自敏检测作用, 采用真空热压烧结技术成功制备了 YAG-ZrO<sub>2</sub>:Tb<sup>3+</sup> 发光纤维增强的铝基复合材料. 探究了拉应力对复合材料荧光峰值的影响, 复合材料受力前后的荧光光谱如图 8 所示, 表 1 为复合材料峰值变化数值.

表 1 不同应力对应的发光峰谱线值

Tab.1 Luminescence peak line values corresponding to different stresses

应力/MPa	载荷/N	荧光谱线值/nm
0	0	547
200	1 457.02	546

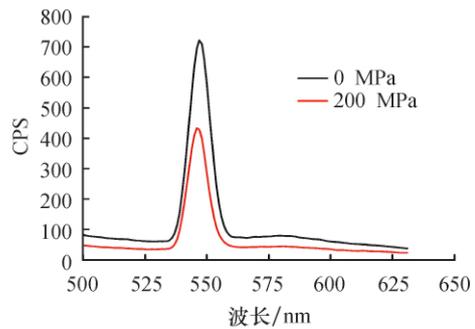


图 8 拉应力作用下复合材料的发射光谱图

Fig.8 Emission spectrum of composite under tensile stress

由图 8 和表 1 可知, 在外力作用下, 复合材料荧光峰的特征峰值波长发生了偏移, 即荧光频移, 其偏移量为 1 nm. 复合材料在受力过程中, 施加的外力会扭曲复合材料的晶格点阵<sup>[22]</sup>, 改变了电子云膨胀效应<sup>[23]</sup>, 使得荧光频率发生变化, 最终表现为荧光峰的特征峰值波长发生偏移, 从而实现对复合材料应力-应变的检测. 因此采用静电纺丝法制备的 YAG-ZrO<sub>2</sub>:Tb<sup>3+</sup> 发光纤维对复合材料应力-应变的无损检测是可以实现的.

## 4 结论

1) 用静电纺丝法制备了 YAG-ZrO<sub>2</sub> 复合纳米纤维, 通过分析纤维的直径尺寸及均匀程度, 得出了最佳的 PVA 质量分数为 11%, 电压为 25 kV.

2) 热处理工艺为 500 °C 预热 4 h, 然后 1 200 °C 保温 5 h 时, 获得了结晶度良好的 YAG-ZrO<sub>2</sub> 复合纳米纤维. 该纤维的表面较为光滑、尺寸较均匀, 约为 500 nm.

3) 以 290 nm 为激发波长时, YAG-ZrO<sub>2</sub>:Tb<sup>3+</sup> 纤维具有明显的绿色发射峰, 对应于 Tb<sup>3+</sup> 的<sup>4</sup>D<sub>4</sub>→<sup>7</sup>F<sub>4</sub> 跃迁. 因此 Tb<sup>3+</sup> 的掺杂实现了 YAG-ZrO<sub>2</sub> 纤维的发光特性, 有可能用于增强复合材料的自敏检测.

4) 拉应力作用下 YAG-ZrO<sub>2</sub>:Tb<sup>3+</sup> 增强的铝基复合材料荧光特征峰值发生了偏移,可以实现 YAG-ZrO<sub>2</sub>:Tb<sup>3+</sup> 对铝基复合材料应力-应变的检测。

致谢:本文得到沈阳材料科学国家研究中心-有色金属加工与再利用国家重点实验室联合基金项目(18LHPY006)的资助,在此表示感谢。

#### 参考文献:

- [1] 朱彩红,石培峰,吕张飞,等.静电纺丝纳米纤维的制备研究[J].无线互联科技,2018,5(3):102-103.
- [2] 王彩霞,郭从盛,谭宏斌.多晶钇铝石榴石纤维的制备工艺研究[J].稀有金属与硬质合金,2014,42(1):29-37.
- [3] BERA S, NIE C D, SOSKIND M G, *et al.* Growth and lasing of single crystal YAG fibers with different HO<sup>3+</sup> concentrations [J]. *Optical Materials*, 2018, 75(5): 44-48.
- [4] CHEN Xingtao, WU Yiquan, WEI Nian, *et al.* Fabrication, photoluminescence and terahertz absorption properties of Yb: YAG transparent ceramics with various Yb dopant concentrations [J]. *Optical Materials*, 2018, 85(6): 106-112.
- [5] 乔健,刘和义,朱玉龙,等.溶胶-凝胶法制备 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (YAG) 复相纤维 [J].耐火材料,2015,49(1):48-51.
- [6] 王彩霞,赵月明,谭宏斌,等.钇铝石榴石纤维的应用前景及制备进展 [J].中国陶瓷,2012,48(9):5-7.
- [7] KIM H J, FAIR G E, HART A M, *et al.* Development of polycrystalline yttrium aluminum garnet (YAG) fibers [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2015, 35(15): 4251-4258.
- [8] 王婕,高玲.ZrO<sub>2</sub> 的制备及其光催化性能研究 [J].西安工业大学学报,2018,38(3):199-204.
- [9] GAN Xinzhu, YU Zhichao, YUAN Kangkang, *et al.* Preparation of a CeO<sub>2</sub>-nanoparticle thermal radiation shield coating on ZrO<sub>2</sub> fibers via a hydrothermal method [J]. *Ceramics International*, 2017, 43(16): 14183-14191.
- [10] 张成贺,袁玉珍,李呈顺,等.氧化锆纤维对纳米 SiO<sub>2</sub> 复合绝热材料性能的影响 [J].无机盐工业,2015,47(2):39-41.
- [11] JCALDERON-MORENO J M, YOSHIMURA M. Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> (YAG)-ZrO<sub>2</sub> binary eutectic composites obtained by melt quenching [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 37(5): 1250-1254.
- [12] PUCHAS G, KNOHL S, KRENKEL W, *et al.* Joining and testing of alumina fibre reinforced YAG-ZrO<sub>2</sub> matrix composites [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, 38(5): 1802-1811.
- [13] 王永鹏,刘梦竹,路大勇.用静电纺丝法制备可交联高性能聚合物纳米纤维 [J].纺织学报,2018,39(1):6-10.
- [14] ZHAO Ziming, LUAN Weiling, YIN Shaofeng, *et al.* Metal crack propagation monitoring by photoluminescence enhancement of quantum dots [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(21): 6498-6501.
- [15] LI J, ZHU S. High-peak-power short-pulse laser using a Yb: YAG/Cr<sub>1+</sub>: YAG/YAG composite crystal [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2019, 176(9): 630-635.
- [16] SHI X, LIU X, ZENG H. ZrO<sub>2</sub> quantum dots/graphene phototransistors for deep UV detection [J]. *Materials Research Bulletin*, 2017, 96(4): 458-462.
- [17] HU Feiliu, YANG Qin, ZHU Huajie. Theoretical investigation of differences of optical rotation, electronic circular dichroism and vibrational circular dichroism of  $\alpha$ -hydroxyl cyclic ketones and esters as monomers or dimers in solution [J]. *Tetrahedron*, 2018, 74(29): 4020-4028.
- [18] KOSOWER E M. Negative infrared bands—A new phenomenon in the vibrational spectroscopy of water oligomers [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2018, 205(5): 251-257.
- [19] ZIDAN H M, ABDELRAZEK E M. Characterization and some physical studies of PVA/PVP filled with MWCNTs [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2018, 13(4): 1-10.
- [20] JUAREZA C H J S, VAZQUEZ R C C, MONREAL A, *et al.* After glow based detection and dosimetry of beta particle irradiated ZrO<sub>2</sub> [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2018, 138(8): 6-9.
- [21] KHALIL K A, ALMAJID A A, EI-DANAF E A, *et al.* Direct fabrication of yttrium aluminium garnet nanofibers by electrospinning [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2012, 34(7): 12218-12226.
- [22] 张巍巍,李朝,王国耀,等.宽带荧光应力传感的特性研究及应用 [J].仪表技术与传感器,2016,23(11):23-26.
- [23] ZHANG W W, QIN C F, SHI J L, *et al.* Shear stress response and fluorescence piezo-spectroscopic properties of SrSiAlN<sub>3</sub>: Eu<sup>2+</sup>/epoxy composite [J]. *Journal of Luminescence*, 2019, 26(8): 240-243.