

Cu/TiBN 电接触材料的导电性及抗电弧侵蚀机理

张秋涛¹, 刘双宇¹, 陆萍², 刘梦冉¹, 刘学然³, 张福隆¹, Vasilieva Tatiana Mikhailovna⁴

(1. 盐城工学院 机械工程学院, 江苏 盐城 224051)

(2. 盐城工学院 汽车工程学院, 江苏 盐城 224051)

(3. 盐城工学院 材料科学与工程学院, 江苏 盐城 224051)

(4. 莫斯科物理技术学院, 俄罗斯 莫斯科 141700)

摘要: 采用渗硼烧结合成了一种新型 TiBN 粉体材料, 它兼有陶瓷性和金属性, 电阻率为 $2.6 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 。以 TiBN 和 TiN 为增强相, 采用粉末冶金法制备了 Cu/TiBN 和 Cu/TiN 电接触材料, 研究了不同含量 TiBN 和 TiN 的电接触材料的微观结构和物理性能。结果表明, 与 TiN 相比, TiBN 增强相能明显改善 Cu 基电接触材料的导电性能、抗氧化性能、硬度和抗电弧侵蚀性能。当含量为 5% (质量分数) 时, Cu/TiBN 电接触材料的抗电弧侵蚀能力最好, 质量损失仅为 1.5 mg。电弧侵蚀时, 在 Cu/TiBN 表面生成 Ti_xO_y 、 B_2O_3 和 N_2 等产物, 这些产物能明显改善 Cu/TiBN 电接触材料的抗电弧侵蚀能力。新开发的 Cu/TiBN 电接触材料具有优异的物理性能和抗电弧侵蚀性能, 在电接触行业中拥有广阔的应用前景。

关键词: TiBN 导电陶瓷; Cu/TiBN 电接触材料; 粉末冶金法; 抗电弧侵蚀

中图分类号: TM501+.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2024)01-0188-09

电接触材料广泛用于低压断路器、接触器和开关等电器组件中, 它的性能主要取决于导电性、导热性以及抗电弧侵蚀性能^[1-3]。铜具有优良的导电性和导热性, 因而被广泛地应用于电接触材料, 但纯铜的硬度低、耐磨性差, 容易引起电接触失效^[4,5]。为了提高电接触材料的使用寿命, 通常采用 W^[6]、 Ti_2AlC ^[7]、 Ti_3SiC_2 ^[8-10]、TiN^[11-12] 和石墨烯^[13-14] 等增强相来提高电接触材料的综合性能。Cu/W 电接触材料广泛用于电气和电子领域, 因为它结合了 W 的低热膨胀系数 ($4.5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$) 和高熔点 (3410 °C), 以及 Cu 的高导热性和导电性的优点^[15-16]。Yang 等^[17] 提出了一种提高 Cu/W 电接触材料性能的三步法, 通过再烧结热处理恢复加工硬化提高硬度; 通过致密化降低孔隙率提高导电性, 但没有考虑 Cu/W 电接触材料的抗电弧侵蚀性能。Yang 等^[18] 研究了 Cu/W 合金的抗电弧侵蚀性能。结果表明, 由于铜的熔点低于钨, 当高温和真空电弧作用于 Cu/W 接触材料表面时, 铜首先会发生熔化和飞溅现象, 导致电弧烧蚀表面不均匀, 触头材料失效。另外, 由于 Cu 和 W 密度和熔点差异大, 互溶性差, 在平衡条件下不形成其它相, 因此难以形成冶金结合的 Cu/W 界面^[19-21]。又由于 W 和 Cu 的热膨胀系数和弹性模量差异很大, 导致 Cu/W 界面处的热应力和机械应力较高, 容易出现裂纹。随着高性能电接触组

件的不断发展, 要求电接触材料能够承受超高电压和更大的容量, 传统的 Cu/W 电接触材料已不能满足电接触组件的需求^[22-24]。因此, 需要开发一种新的电接触材料代替 Cu/W 电接触材料。

MAX 相是一类新型层状三元化合物, 其分子式为 $\text{M}_{n+1}\text{AX}_n$ ($n=1-3$, 缩写为 MAX)。MAX 相具有独特的层状堆叠结构, 兼具陶瓷性能和金属性能。MAX 相中 M 和 X 之间以强共价键以及离子键相结合, M 和 M 之间靠金属键结合, 而 M-A 之间是由弱共价键和金属键相结合。这种化学键结构赋予了 MAX 相优异的导电性能。此外, MAX 具有良好的电学性能和热学性能, 逐渐成为铜基电接触材料重要的增强材料^[25-27]。 Ti_2AlC 和 Ti_3SiC_2 是 MAX 相的典型代表。Mazaheri^[7] 将 Ti_2AlC 纳米颗粒用于开发纯铜基体表面纳米复合材料, 发现 Cu/ Ti_2AlC 纳米复合材料的硬度、拉伸强度和耐磨性都得到了很大改善, 但 Ti_2AlC 对铜基材料导电性和抗电弧侵蚀性没有提及。Yang 等^[9] 制备了 Cu/ Ti_3SiC_2 复合材料, 由于 Cu 的添加, 共连续复合材料显著提高了 Ti_3SiC_2 的抗弯强度和电导率, 电导率高达 $5.73 \times 10^3 \text{S/cm}$, 但 Ti_3SiC_2 对铜基材料抗电弧侵蚀性能的影响没有提及。随着研究的深入, Zhang 等^[10] 采用粉末冶金法制备了 Cu/ Ti_3SiC_2 复合材料, 考察了 Cu/ Ti_3SiC_2 复合材料抗电弧

收稿日期: 2023-01-14

基金项目: 盐城工学院校级科研项目 (XJR2020033); 江苏省“双创人才”项目 (JSSRC2021545)

作者简介: 张秋涛, 男, 1995 年生, 硕士, 盐城工学院机械工程学院, 江苏 盐城 224501, E-mail: 1113133929@qq.com

侵蚀能力。在真空电弧作用下, 大的蚀坑主要在 Ti_3SiC_2 颗粒上形成, 表明 Ti_3SiC_2 颗粒比 Cu 基体更容易受到真空电弧的侵蚀, 从而保护了 Cu 基体, 但电解 Ti_3SiC_2 产生的 TiC_x 对 Cu 基体寿命的影响并未说明。

TiN 作为典型的过渡金属氮化物, 具有优异的电导率($4 \times 10^3 \sim 6 \times 10^4$ S/cm)和机械稳定性, 可以提供快速的电荷转移和高效的电荷收集^[28]。因此, TiN 作为高性能超级电容器的新电极材料引起了极大的兴趣^[29-30]。Shi 等^[12]通过直流磁控溅射将 TiN 沉积到蚀刻的 Si 纳米线上制备了硅纳米线/氮化钛电极 (Si NWs/TiN), TiN 表面结构、晶格缺陷和表面化学成分的差异将改变 Si NWs/TiN 电极的电容性能和电荷存储机制, 提高电极稳定性, 这表明 TiN 具有优异的电学性能。

本工作以 TiN 和自制的 TiBN 为增强相, 采用粉末冶金法制备了 Cu/TiN 和 Cu/TiBN 电接触材料。探究了 TiBN 粉体材料的导电性能以及含量对铜基电接触材料的微观组织、力学性能和抗电弧侵蚀性能的影响规律, 为制备高性能电接触器件提供新材料。

1 实验

采用铜粉(纯度大于 99.5%, $\leq 74 \mu m$)、TiN(纯度大于 99.5%, $\leq 5 \mu m$)和自制的 TiBN(纯度大于 99.5%, $\leq 6 \mu m$)制备 Cu/TiN 和 Cu/TiBN 电接触材料。TiBN 粉体材料的制备过程参考文献^[31]。将铜粉与 TiN、TiBN 粉末按指定质量分数在行星球磨机中混合, 球料比为 1:1, 转速 400 r/min, 球磨时间 2 h。将混合后的粉末放入直径 10 mm 的模具中, 采用电动压片机在 380 MPa 压力, 保压 2 min, 制成压坯。在氩气炉下加热到 920 °C, 保温 1 h, 加热速度 10 °C/min, 然后冷却至室温。预烧结完成后在 900 MPa 压力下复压, 并进行复烧, 条件与初烧相同。具体过程如图 1 所示。

将复压复烧后的铜基电接触材料研磨和抛光, 制备

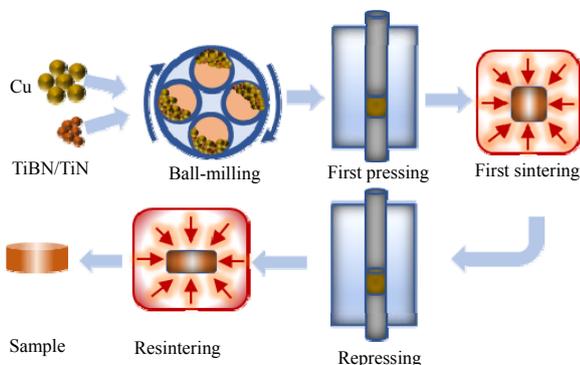


图 1 电接触材料制备示意图

Fig.1 Schematic diagram of the preparation of electrical contact materials

成金相试样。采用扫描电子显微镜 SEM(型号为 FEI200, FEI 公司, 美国)观察界面结构。采用 X 射线衍射 (XRD)(型号为 X PERT3 POWDER, 帕纳科公司, 荷兰)检测相结构。衍射仪窗口角度 $2.12^\circ(2\theta)$, Cu $K\alpha$ 靶 (40 kV, 250 mA), 扫描 2θ 范围为 $20^\circ \sim 80^\circ$, 扫描速度 $2^\circ/\text{min}$ 。将铜基电接触材料放入箱式电阻炉中, 在空气条件下氧化, 氧化温度 400 °C, 氧化 20 h。采用精度为 0.1 mg 的 BSM 系列电子天平, 测量氧化增重情况。使用数字式显微硬度计(HVS-1000)测量铜基电接触材料的硬度, 测试压力 100 g, 保压时间 15 s。

采用 ST2722-SD 型四端子粉末电阻率测试仪(苏州晶格电子有限公司)测量粉体电阻率, 测试原理如图 2 所示。采用 ST2253 四探针电阻探测仪测量块体电阻率。采用电弧侵蚀装置测试铜基电接触材料的抗电弧侵蚀性能, 工作原理如图 3 所示。将待测样品清洗, 并固定在铜支架上, 调节阳极和阴极之间的间隙为 0.3 mm。然后, 在阴极与阳极之间施加 150 V 直流电压, 电流约为 60 A, 电弧时间设置为 12 h。放电的电弧电流和电弧电压由 DS2100CA 数字存储示波器记录, 具体试验参数如表 1 所示。在电弧侵蚀后, 用电子天平测量铜基电接触材料的质量损失。

2 实验结果

2.1 TiBN 粉末电导性

图 4 为不同压强下 TiBN 和 TiN 粉体材料的电阻率变化曲线。与 TiN 相比, TiBN 在不同压强下电阻率变化不大, 电阻率为 $2.6 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ 。测试结果表明 TiBN 具有较低的电阻率和稳定性, 可能成为制备高性能铜基电接触材料的理想增强相。

2.2 TiBN 含量对 Cu 基电接触材料导电性能的影响

Cu/TiBN 和 Cu/TiN 电接触材料密度相近, 相差

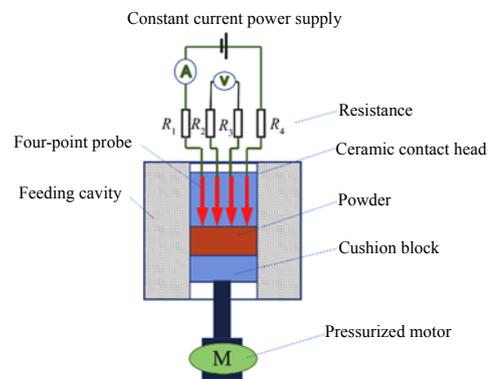


图 2 ST2722-SD 型四端子法粉末电阻率测试仪原理图

Fig.2 Principle of ST2722-SD four terminal method powder resistivity tester

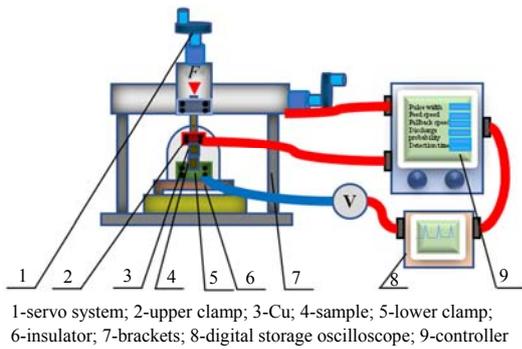


图 3 电弧侵蚀装置
Fig.3 Arc erosion device

表 1 电弧侵蚀试验参数

Table 1 Arc erosion test parameters

Test parameter	Numerical value
Circuit status	150 V, 60 A
Pulse width/ μs	10
Feed speed/ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	200
Fallback speed/ $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	20
Discharge probability	70
Detection times/ $\text{times}\cdot\text{min}^{-1}$	1000
Ambient temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Room temperature

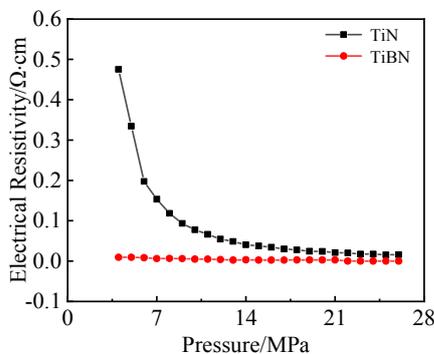


图 4 不同压强下 TiBN 和 TiN 粉末的电阻率变化
Fig.4 Resistivity changes of TiBN and TiN powders at different pressures

超过 $\pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ 。图 5 给出 TiBN、TiN 含量对 Cu 基电接触材料电阻率的影响曲线。随着 TiBN 和 TiN 含量的增加, 2 种电接触材料的电阻率都会升高, 但 Cu/TiBN 电接触材料电阻率明显小于 Cu/TiN 电接触材料。当增强相含量为 5% 时, Cu/TiBN 电阻率为 $0.79 \times 10^{-4} \Omega\cdot\text{cm}$, 约为 Cu/TiN 的 60%, Cu/TiBN 电阻率较低的主要原因是 TiBN 的电阻率小于 TiN 的电阻率。

2.3 TiBN 含量对 Cu 基电接触材料显微硬度的影响

图 6 为 TiBN、TiN 含量对 Cu 基电接触材料显微硬

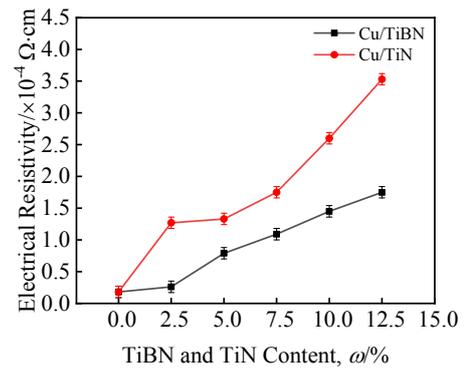


图 5 不同含量 TiBN 和 TiN 的 Cu 基电接触材料的电阻率
Fig.5 Resistivity of Cu-based electrical contact materials with different contents of TiBN and TiN

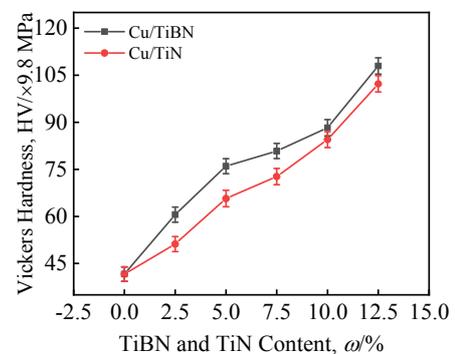


图 6 不同含量 TiBN 和 TiN 的 Cu 基电接触材料的显微硬度
Fig.6 Microhardness of Cu-based electrical contact materials with different contents of TiBN and TiN

度的影响曲线。当增强相的质量分数从 2.5% 增加到 12.5% 时, 电接触材料硬度呈现上升趋势。根据混合规律^[32], 如果增强体均匀分布在基体中, 增强体可以提升电接触材料的硬度。从图中可以明显看出, Cu/TiBN 电接触材料的硬度大于 Cu/TiN 电接触材料的硬度。

2.4 TiBN 含量对 Cu 基电接触材料抗氧化性能的影响

从图 7 可以看出随着 TiBN 和 TiN 含量的增加, 电接触材料氧化增重呈现先下降后增加的趋势, 但始终低于纯铜, 说明增强相会改善铜的抗氧化性能。与 TiN 相比, 含有 TiBN 的铜基电接触材料有更高的抗氧化能力。铜基材料的氧化过程是氧原子向材料内部扩散并与铜反应, 以及金属原子向外扩散的过程。增强相形成的金属间化合物分布在晶界处, 阻止氧进入材料内部与铜反应, 可以有效提高铜的抗氧化性。随着增强相含量的进一步增加, 铜基电接触材料的抗氧化性逐渐降低, 其主要原因是 TiBN 含量逐渐增加, 出现增强相团聚现象, 阻碍了增强相与基体的结合, 氧原子容易进入材料间隙导致其抗氧化能力降低^[33-35]。从图中可以看出, 当增强

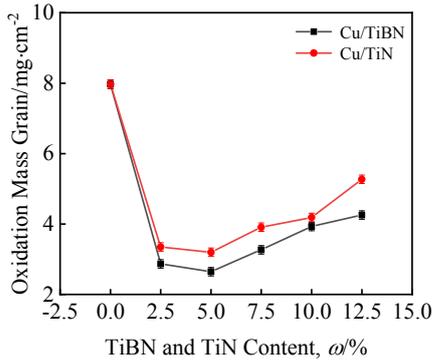


图 7 不同含量 TiBN 和 TiN 的 Cu 基电接触材料氧化增重
Fig.7 Oxidation mass gain of Cu-based electrical contact materials with different contents of TiBN and TiN

相含量为 5% 时, Cu/TiBN 和 Cu/TiN 电接触材料抗氧化性最好。

3 分析与讨论

3.1 TiBN 粉末的 XPS 分析

图 8 为 TiBN 粉末的 SEM 图像, 从图中可以看出通过渗硼烧结法制备的 TiBN 粉末明显发生细化。TiBN 的形成经历的形核与长大过程, 生成更细小的颗粒。

图 9a~9d 分别为 TiBN 粉末的 XPS 的 Ti 2p, N 1s, O 1s 和 B 1s 结合能峰标定结果。图 9a 显示了 TiBN 粉

末的 Ti 2p_{1/2} 的 461.20 eV 与 TiN 的 460.90 eV 相接近; TiBN 粉末的 Ti 2p_{3/2} 的 455.10 eV 与 TiN 的 454.90 eV 相接近, 说明合成的粉末中包含有 Ti-N 键。图 9b 中观察到的 N 1s 峰由 396.25, 397.25, 398.30 eV 3 个结合能峰值组成, 其中的 397.25, 398.30 eV 与 TiN 的 397.4 eV 相接近, 也与 BN 的 398.4 eV 相近。可以确认粉末的主相是 TiBN, 还有 BN 和 B₂O₃ 杂相。文献[36]报道 N-B 键的结合能为 398 eV, 与本研究中 N 1s 的 398.30 eV 结合能相接近, 说明 TiBN 的电子结合状态。图 9c 显示 O 1s 的结合能峰位置在 530.10 和 531.60 eV, 与文献[37]所报道的 TiO₂ 的 Ti 2p_{2/3} 的 530.40 和 531.20 eV 结合能峰位置相近, 说明 TiBN 有氧化现象, 但 TiO₂ 的产生也可能是由空气污染所致。图 9d 中观察到的 B 1s 峰由

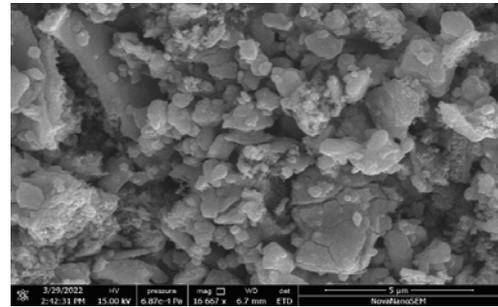


图 8 TiBN 粉末的 SEM 图像
Fig.8 SEM image of TiBN powder

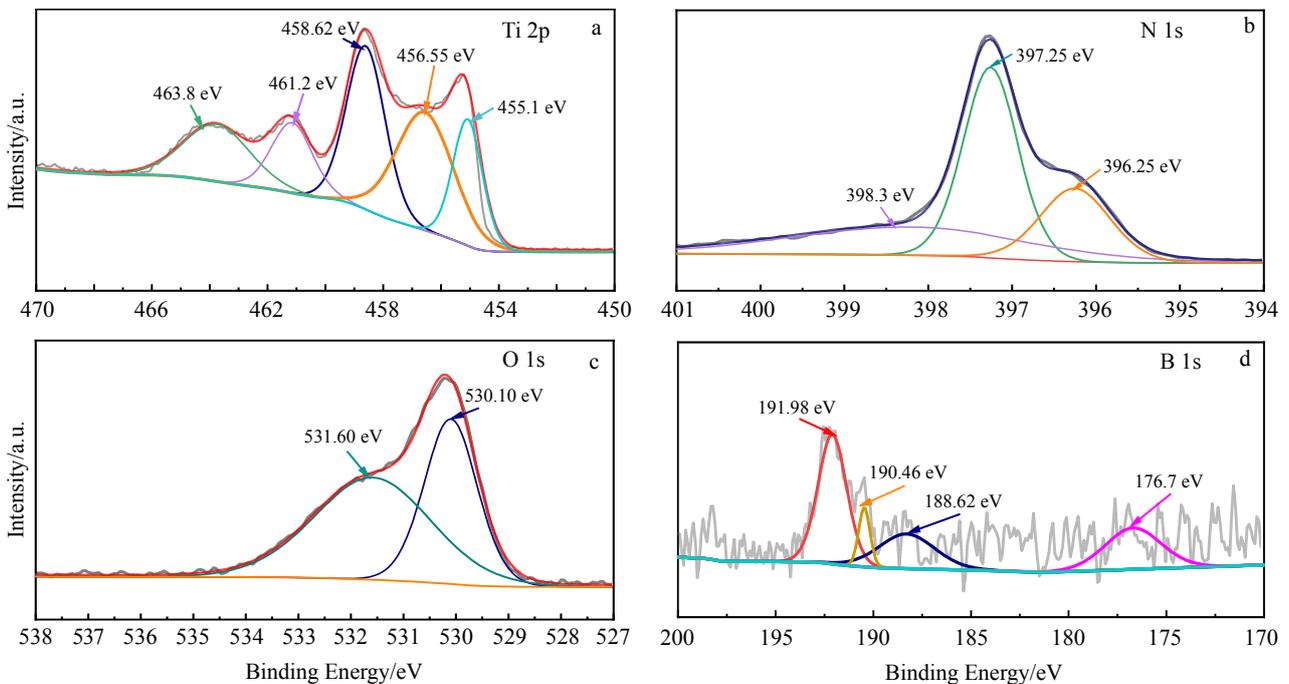


图 9 TiBN 粉末的 XPS 图谱

Fig.9 XPS spectra of TiBN powder (synthesis condition 850 °C/1 h): (a) Ti 2P, (b) N 1s, (c) O 1s, and (d) B 1s

176.7、188.62、190.46、191.98 eV 4 个峰组成。B 1s 的 2 个低结合能峰值 176.7 和 188.62 eV 对应于 TiB₂ 中的 B-Ti, 这与文献[38]的结果相符。B 1s 的 190.46 eV 极为接近 BN 的 190.5 eV^[39], 而 191.98 eV 位于 BN 的 190.5 eV 和 B₂O₃ 的 193.1 eV 之间, 所以, TiBN 粉末包含 BN 以及还可能含有 B₂O₃ 杂相。上述分析结果表明在 TiBN 粉末中存在 B 元素。

3.2 Cu/TiBN 和 Cu/TiN 电接触材料的界面反应

图 10 给出 Cu/TiBN 和 Cu/TiN 界面的 SEM 照片和元素分布结果。结果表明, Cu 和 TiBN 之间没有明显的界面反应, 如图 10a; 而在 Cu/TiN 中, 明显观察到 Cu 扩散到 TiN 颗粒中, 表明 Cu 和 TiN 之间存在强烈的界面反应, 可能形成 Cu-Ti 化合物^[18,26]。文献[40]报道在 Cu/Ti/TiN/Si 样品中的薄层电阻值归因于高电阻率的 Cu-Ti 金属间化合物层的形成。由于组成金属化合物, 原子间的金属键部分改换成了共价键或离子键, 使有效自由电子数减少, 故 Cu/TiN 的电阻率高。

3.3 Cu/TiBN 电接触材料的抗电弧侵蚀机理

图 11a~11c 分别显示了纯铜、Cu/TiBN 和 Cu/TiN 电接触材料电弧侵蚀后的 SEM 照片。在图 11a 和 11a₁ 中, 纯铜电接触材料遭受到严重的电弧侵蚀, 在其表

面观察到长度为 140~150 μm 裂纹, 直径为 30~35 μm 孔洞, 还有许多纳米和微米尺寸的铜颗粒和熔池形貌。在电弧侵蚀过程中, 电弧的温度达到 5000 K 左右^[27], 从而引起 Cu 的熔化、蒸发, 随后沉积形成不同尺度 Cu 颗粒。在图 11b 中可以观察到, Cu/TiBN 电接触材料表面形成少许直径为 4~6 μm 小孔洞和铜液滴, 长度为 32~36 μm 细小的微裂纹, 整个表面形成了大片的熔池。在图 11c 中可以观察到, Cu/TiN 电接触材料表面存在一些直径为 16~18 μm 孔洞、长度为 90~95 μm 细小的裂纹、液滴和大熔池区域。图 11b₁ 和图 11c₁ 显示了 Cu/TiBN 和 Cu/TiN 电接触材料表面存在铜球, 但是不存在纳米尺寸的铜颗粒。这表明增强体提高了铜基电接触材料的熔点, 减少 Cu 的蒸发和沉积。表 2 给出电弧侵蚀表面的元素含量结果。结果表明在高温电弧作用下, Cu、Cu/TiBN 和 Cu/TiN 电接触材料表面形成了铜和钛的氧化物, 且 Cu/TiBN 电接触材料 Ti 元素损失量小于 Cu/TiN 电接触材料。

我们将电弧侵蚀过程分为 4 个阶段, 如图 12 所示。在第 1 阶段, 当正负电极逐渐靠近时, 两电极之间的气体会在电极电场的作用下产生等离子体弧, 随着两电极间距的减小, 电场强度增加, 等离子体电子密度和电子温度增加, 等离子弧产生的热量使铜表面熔化、

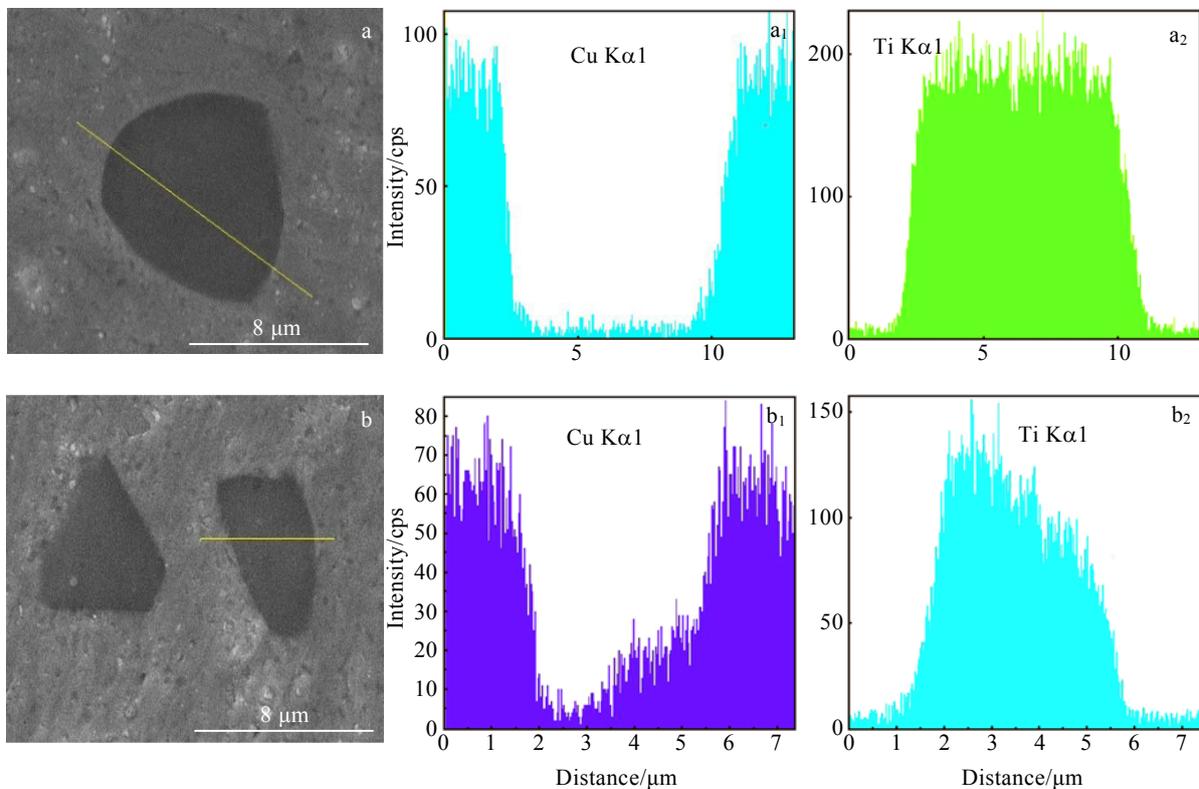


图 10 Cu/TiBN 和 Cu/TiN 电接触材料的 SEM 图像与元素分布

Fig.10 SEM images and elemental distribution of Cu/TiBN (a) and Cu/TiN (b) electric contact materials

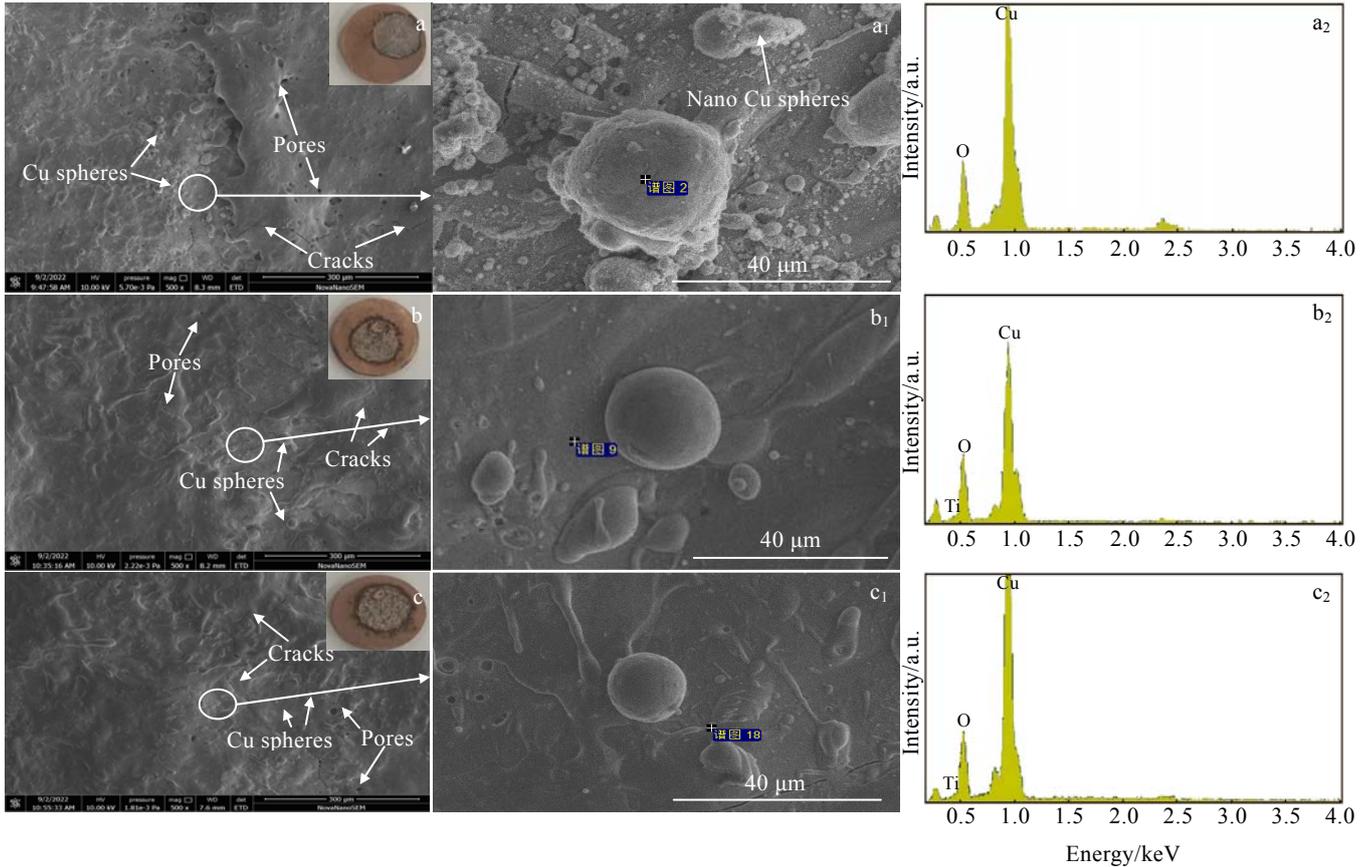


图 11 电弧侵蚀后纯铜、Cu/TiBN 和 Cu/TiN 电接触材料的 SEM 图像及 EDS 图谱

Fig.11 SEM images and EDS spectra of Cu (a), Cu/TiBN (b) and Cu/TiN (c) electric contact materials after arc erosion

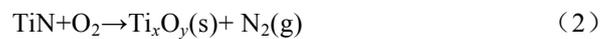
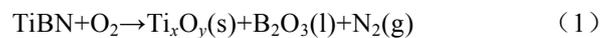
表 2 电弧侵蚀表面的化学成分

Table 2 Chemical composition of surface eroded by arc

Sample	Cu:Ti:O (atomic ratio)
Cu	51.53:0.00:48.47
Cu/TiBN	38.07:7.07:54.86
Cu/TiN	51.68:4.46:43.86

蒸发, 产生电子和阳离子, 如图 12a 和 12b 所示。在第 2 阶段, 正负电极相互接触实现电流的导通, 如图 12c 所示。在第 3 阶段, 正负电极逐渐分离。在电极分离初期, 由于在极小电极间隙内产生高温高压电弧, 在它的作用下铜熔化并产生金属蒸汽, 在电极离开时金属蒸汽喷射后形成表面孔洞和微纳尺度的铜液滴。另外, 采用粉末冶金法制备的电接触材料, 其内部存在残留部分气体的孔隙, 在电弧热的作用下电接触材料表面形成熔池, 空隙内部残留的部分气体受热膨胀从熔池中喷射逸出, 形成孔洞, 如图 12d。在电极分离中后期, 熔池在电弧电磁力^[27]的作用下产生流动,

导致熔池中低密度的 TiBN/TiN 增强相上浮, 最后聚集在熔池表面, 并与表面的氧发生氧化反应, 如图 12e。在 Cu/TiBN 和 Cu/TiN 的侵蚀表面可以检测到 CuO、TiO₂ 和 Ti₃O₅ 等氧化产物, 如图 13 所示。在空气中, 电弧侵蚀 Cu、Cu/TiBN、Cu/TiN 时, TiBN 和 TiN 都经历了“分解-氧化”过程, 主要被氧化成 Ti_xO_y 和 B₂O₃, 可能发生的反应如下:



方程式中的 s、l 和 g 分别代表固体、液体和气体。氧化产物 Ti_xO_y 越多表明受到电弧侵蚀形成的 TiBN 和 TiN 漂浮颗粒越多。在 Cu/TiBN 材料中 TiO₂ 和 Ti₃O₅ 的衍射强度比 Cu/TiN 中弱, 说明 Cu/TiBN 抗电弧侵蚀能力比 Cu/TiN 和 Cu 优异。同时由公式(1)可知 TiBN 氧化产生 B₂O₃, B₂O₃ 的熔点(450 °C)和沸点(2065 °C)较低, 产生的液相可能形成氧化膜, 阻止氧与 TiBN 发生反应。另外, 在电弧冲击下 B₂O₃ 蒸发, 带走热量, 降低熔池温度。同时, TiBN 和 TiN 在电弧作用下产生

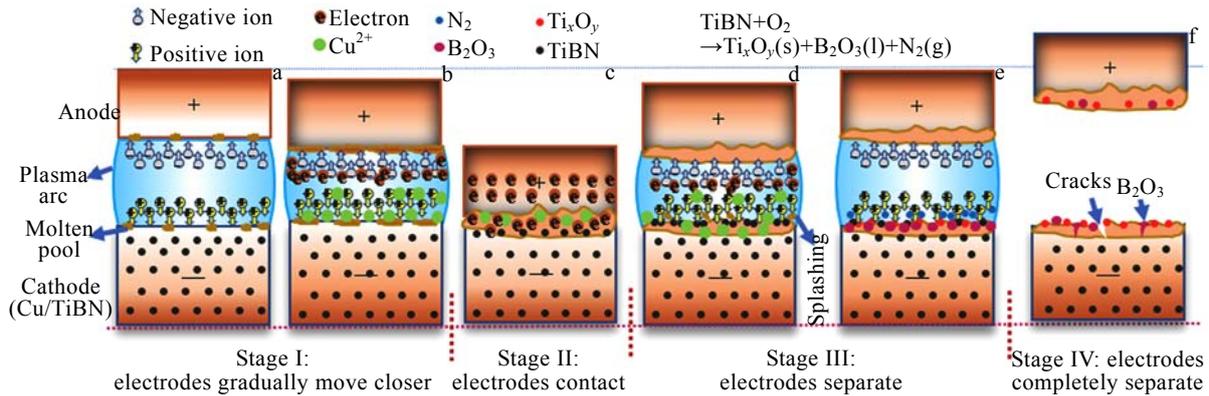


图 12 电弧侵蚀机理

Fig.12 Mechanism of arc erosion

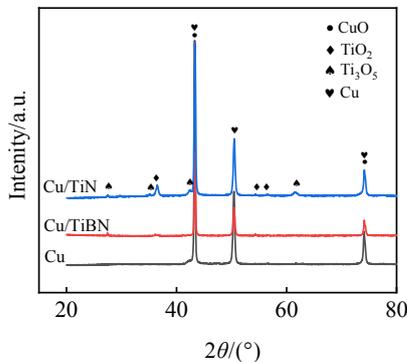


图 13 电弧侵蚀后表面的 XRD 图谱

Fig.13 XRD patterns of the surface after electric arc erosion

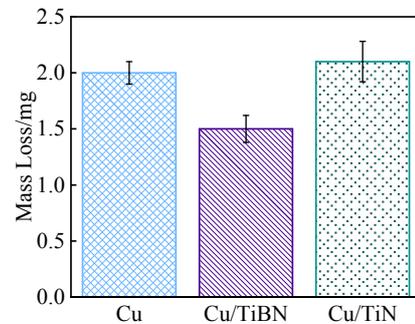


图 14 电弧侵蚀 12 h 后 Cu, Cu/TiBN 和 Cu/TiN 电接触材料的质量损失

Fig.14 Mass loss of Cu, Cu/TiBN and Cu/TiN electric contact materials after arc erosion for 12 h

的 N_2 , N_2 属于惰性气体, 具有较高的电离能, 具有保护电极作用。

质量损失是电触点内材料转移的主要指标, 它反映了电接触材料抵抗电弧侵蚀的能力。3 种电接触材料在电弧侵蚀 12 h 后质量均下降, 如图 14 所示。Cu/TiBN 电接触材料的质量损失仅为 1.5 mg, 小于 Cu 和 Cu/TiN 电接触材料, 表明 Cu/TiBN 抗电弧侵蚀性能优于其他 2 组材料, 这与上面分析的结果一致。

在第 4 阶段, 正负电极完全分离, 电弧逐渐熄灭。在电弧燃烧过程中, 与电弧直接接触的材料在热应力的作用下随着温度的升高而膨胀, 随温度的降低而收缩, 在这种相反的推拉应力作用下, 材料在弱结合的晶界或相界面处很容易形成裂纹。另外, 由于电接触材料中各相之间存在热膨胀系数的差异, 相之间的应变也不同, 从而导致相之间的相对滑移, 最终形成裂纹。因此, 在图 11a 和 11c 中均观察到凝固表面存在

大尺度裂纹。

4 结 论

1) Cu/TiBN 电接触材料电阻率明显优于 Cu/TiN 电接触材料, 当增强相含量为 5% 时, Cu/TiBN 电阻率为 $0.79 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$, 约为 Cu/TiN 的 60%。

2) 当 TiBN 含量为 5% 时, Cu/TiBN 电接触材料的电弧侵蚀质量损失最小, 损失量为 1.5 mg。

3) TiBN 与 Cu 不易形成金属间化合物, 因此 TiBN 在 Cu 基体中表现出较高的结构稳定性。

4) Cu/TiBN 电接触材料表现出良好的抗电弧侵蚀能力。在电弧热作用下电接触材料与氧发生冶金反应, 生成的 Ti_xO_y 、 B_2O_3 和 N_2 产物对电极具有保护作用。

5) TiBN 是制备高性能铜基电接触材料的理想增强相, Cu/TiBN 电接触材料是一种有前途的电接触材料。

参考文献 References

- [1] Hidalgo-Manrique Paloma, Lei Xianzhang, Xu Ruoyu *et al. Materials Science*[J], 2019, 54(19): 12236
- [2] Li Tiejun, Wang Yaoqi, Yang Ming *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2021, 826(9): 141983
- [3] Lang Haojie, Xu Yimeng, Zhu Pengzhe *et al. Carbon*[J], 2021, 183: 53
- [4] Dong L L, Ahangarkani M, Chen W G *et al. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*[J], 2018, 75: 30
- [5] Liu Xinlong, Cai Zhenbing, Xiao Qian *et al. International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2020, 184: 105703
- [6] Dong Longlong, Chen Wenge, Nan Deng *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 696: 923
- [7] Mazaheri Y, Bahiraei M, Jalilvand M M *et al. Materials Chemistry and Physics*[J], 2021, 270: 124790
- [8] Shu Rui, Jiang Xiaosong, Liu Wanxia *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2019, 755: 128
- [9] Yang Dexuan, Zhou Yu, Yan Xingheng *et al. Journal of Advanced Ceramics*[J], 2020, 9(1): 83
- [10] Zhang Peng, Leo Ngai Tungwai, Wang Andi *et al. Vacuum*[J], 2017, 141: 235
- [11] Shi Jing, Jiang Bailing, Li Cong *et al. Vacuum*[J], 2022, 198: 110893
- [12] Shi Jing, Jiang Bailing, Liu Zheng *et al. Ceramics International*[J], 2021, 47(19): 26758
- [13] Asgharzadeh Hamed, Eslami Samira. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 806: 553
- [14] Khobragade Nidhi, Sikdar Koushik, Kumar Binod *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2018, 776: 123
- [15] Zhou Y X, Xue Y L, Zhou K. *Vacuum*[J], 2019, 164: 390
- [16] Magdalena Valentina Lungu. *Oriental Journal of Chemistry* [J], 2019, 35(2): 491
- [17] Yang N, Wang Z, Chen L *et al. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*[J], 2010, 28(2): 198
- [18] Yang Xiaohong, Zhao Yipeng, Kang Dandan *et al. Engineering Failure Analysis*[J], 2020, 118: 104865
- [19] Modal A, Upadhyaya A, Agrawal D. *Materials Research Innovations*[J], 2010, 14(5): 355
- [20] Kong Yi, Pi Jingwu, Xiao Shidi *et al. Calphad*[J], 2016, 53: 116
- [21] Zhou Qiang, Chen Pengwan. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2016, 657: 215
- [22] Mahdavinejad R A, Khajefazali M. *Metals and Materials International*[J], 2021, 27(11): 4730
- [23] Zhang Xiaohui, Zhang Yi, Tian Baohong *et al. Vacuum*[J], 2019, 164: 361
- [24] Zhou Honglei, Chen Xiaohong, Liu Ping *et al. Vacuum*[J], 2021, 188: 110180
- [25] Ding J, Tian W B, Zhang P *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2018, 740: 669
- [26] Huang Xiaochen, Feng Yi, Qian Gang *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 727: 419
- [27] Wang Dandan, Tian Wubian, Lu Chengjie *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2020, 857(3): 157588
- [28] Zhou Xinhong, Shang Chaoqun, Gu Lin *et al. ACS Applied Materials & Interfaces*[J], 2011, 3(8): 3058
- [29] Sun Peng, Lin Rui, Wang Zilong *et al. Nano Energy*[J], 2017, 31: 432
- [30] Gonzalez Z, Yus J, Moratalla R *et al. Electrochimica Acta*[J], 2021, 369: 137654
- [31] Liu Shuangyu, Lu Ping, Zhang Qiutao *et al. Ceramics International*[J], 2022, 48(7): 10079
- [32] Jiang Xiaosong, Liu Wanxia, Li Yanjun *et al. Composites Part B: Engineering*[J], 2018, 141: 203
- [33] Zhu Yongfu, Wang Yaru, Zhang Jian *et al. De Gruyter*[J], 2020, 38(6): 529
- [34] Fujii Kazumi, Kobayashi Shiro, Iijima Katumi *et al. Denki Kagaku Oyobi Kogyo Butsuri Kagaku*[J], 1995, 63(6): 524
- [35] Tian Baohong(田保红), Cheng Xinle(程新乐), Zhang Yi(张毅) *et al. Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2018, 47(3): 943
- [36] Ruby C, Ott R, Huang F *et al. Surface and Interface Analysis*[J], 2000, 29: 823
- [37] Kresse G, Hafner J. *Physical Review B*[J], 1994, 49(20): 14251
- [38] Lu Xiaona, Tian Baozhu, Chen Feng *et al. Thin Solid Films* [J], 2010, 519(1): 111
- [39] Quesada-Gonzalez M, Williamson B A D, Sotelo-Vazquez C *et al. The Journal of Physical Chemistry C*[J], 2018, 122(1): 714
- [40] Chen J S, Lu K Y. *Thin Solid Films*[J], 2001, 396(1): 205

Electrical Conductivity and Arc Erosion Resistance of New Type Cu/TiBN Electrical Contact Materials

Zhang Qiutao¹, Liu Shuangyu¹, Lu Ping², Liu Mengran¹, Liu Xueran³, Zhang Fulong¹, Vasilieva Tatiana Mikhailovna⁴

(1. College of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

(2. College of Automotive Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

(3. College of Materials Science and Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

(4. Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow 141700, Russia)

Abstract: A new type of TiBN powder material was synthesized by boronizing sintering method, which was both ceramic and metallic, with a resistivity of $2.6 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$. Cu/TiBN and Cu/TiN electrical contact materials were prepared by powder metallurgy using TiBN and TiN as reinforced phases, respectively. The microstructure and physical properties of electrical contact materials with different contents of TiBN and TiN were investigated. The results demonstrate that compared with TiN reinforced phase, the TiBN reinforced phase can significantly improve the electrical conductivity, oxidation resistance, hardness, and arc erosion resistance of Cu-based electrical contact materials. When the content (mass fraction) of TiBN is 5%, the arc erosion resistance of Cu/TiBN is the best, and the mass loss is only 1.5 mg. During arc erosion, products such as Ti_xO_y , B_2O_3 and N_2 form on the surface of Cu/TiBN. These products can significantly improve the arc erosion resistance of Cu/TiBN electrical contact materials. The newly developed Cu/TiBN electrical contact materials have excellent mechanical properties and resistance to arc erosion, and have a broad application prospect in the electrical contact industry.

Key words: TiBN conductive ceramics; Cu/TiBN electrical contact materials; powder metallurgy method; anti-arc erosion

Corresponding author: Liu Shuangyu, Ph. D., Professor, College of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224501, P. R. China, E-mail: liushuangyu@ycit.edu.cn