

燃烧法快速合成乳白色棒状纳米氧化锌及其光催化研究

Rapid Synthesis and Photocatalytic Performance
of Milky and Rod-like Nanometer Zinc
Oxide by Combustion Method

赵荣祥¹, 李秀萍²

(1 辽宁石油化工大学 石油化工学院, 辽宁 抚顺 113001;

2 辽宁石油化工大学 化学与材料科学学院, 辽宁 抚顺 113001)

ZHAO Rong-xiang¹, LI Xiu-ping²

(1 School of Petrochemical Engineering, Liaoning University of

Petroleum & Chemical Technology, Fushun 113001, Liaoning, China;

2 School of Chemistry & Material, Liaoning University of Petroleum &

Chemical Technology, Fushun 113001, Liaoning, China)

摘要: 以硝酸锌为氧化剂, 抗坏血酸为还原剂和燃烧剂, 采用燃烧法快速制备乳白色棒状纳米氧化锌。用 XRD, IR, UV, SEM 等技术手段进行了表征。以罗丹明 B 为目标降解物, 考察了不同样品、光照时间、催化剂用量、双氧水加入量、pH 值、离心机转速对罗丹明 B 催化效果的影响。最佳的光催化条件为: 硝酸锌与抗坏血酸摩尔比为 1 : 3、催化剂用量为 0.4g/50 L、双氧水用量为 0.2mL/50mL、pH 为 8、转速为 2500r/min, 在 150min 内罗丹明 B 褪为无色。

关键词: 氧化锌; 燃烧法; 光催化; 棒状

中图分类号: O643.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2012)11-0042-05

Abstract: Zinc nitrate as the oxidant, ascorbic acid as reducing agent and combustion agent, milky and rod-like zinc oxide rapid synthesized by combustion method. The sample was characterized by XRD, IR, UV, SEM. The Rhodamine B acted as target of degradation, the experiment inspected various sample, illumination time, dosage of zinc oxide, dosage of H_2O_2 , pH value and rotation speed of centrifuge impact on photocatalytic degradation of Rhodamine B. The optimal experiment conditions: zinc nitrate: ascorbic acid is 1 : 3, ZnO of 0.4g/50mL, H_2O_2 of 0.2mL/50mL, pH value 8, rotating at 2500r/min, Rhodamine B faded to colorless in 150min.

Key words: ZnO; combustion method; photocatalytic; rod-like

近年来, 半导体光催化技术引起人们的广泛关注, 该技术在环保、水质处理、有机物降解等方面有重要的应用^[1-3]。作为一种重要的多功能半导体材料, 氧化锌的禁带宽度为 3.37eV, 激子结合能 60 meV, 具有很高的导电导热性能和有良好的紫外吸收性能。在波长小于 387nm 的紫外光照射下, 可激发产生光生电子-空穴对, 电子具有较强还原性, 空穴具有氧化性可以使溶液中的羟基和含氧基团生成 $\cdot OH^-$ 和 $\cdot O^{2-}$ 等具有极强氧化还原能力的高活性基团, 这些高活性基团可将水中有机污染物最终氧化为 CO_2 和 H_2O 等无机物^[4-7]。氧化锌的制备方法包括沉淀法、溶胶-凝胶

法、喷雾热解法、超声辐射沉淀法、水热法、氧化热爆分解法、微乳液法、固相法和燃烧法等^[8-12]。燃烧法是利用可燃物燃烧所放出的热量来完成合成纳米材料所需的能量, 具有反应温度低, 环境友好, 所合成的纳米材料尺度均一等优点, 目前已有燃烧法制备氧化锌的报道^[13-16]。本工作采用抗坏血酸作为燃烧剂与硝酸锌发生氧化还原反应, 在加热的条件下自蔓延燃烧生成乳白色棒状氧化锌。采用 XRD, 电子扫描电镜, 红外光谱, 紫外-可见吸收光谱等手段对样品进行了表征, 对氧化锌光催化条件进行考察研究, 并对氧化锌光催化反应的机理进行了研究。

1 实验

1.1 试剂

硝酸锌($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 分析纯); 抗坏血酸($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$, 分析纯); 无水乙醇($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$, 分析纯); 去离子水。

1.2 催化剂的制备

硝酸锌、抗坏血酸按照一定的摩尔比置于研钵中研磨至混合均匀, 然后将药品转移到烧杯中加入少量的水使之溶解。将烧杯放在加热套上加热。当烧杯中的水大部分蒸发掉, 溶液开始发泡, 膨胀, 变成黑色黏稠液体, 继续加热开始固化并发生缓慢的自蔓延燃烧反应, 得到乳白色的粉状固体物质。用蒸馏水和无水乙醇各洗涤 3 次, 放入干燥箱中干燥 3h, 然后在马弗炉中 600°C 下煅烧 3h, 冷却至室温, 即可得到氧化锌。同样方法制得不同配比和煅烧温度的催化剂。

1.3 催化剂的表征

催化剂的晶相结构在 D/max-RB-12kW 转靶 X 射线衍射(XRD)仪进行测定, (扫描范围为 $10\sim 70^\circ$, 管电压 30kV, 管电流 15mA, 入射光为 CuK_α , $\lambda = 0.154\text{nm}$); LEO 型扫描电子显微镜对样品的形貌进行测定; 采用 WQF-520 傅里叶变换红外光谱(FT-IR)仪对样品中残留有机物和结合基团进行测定, KBr 压片; 采用 UV-VIS1100 Spectrophotometer 分光光度计测定氧化锌的紫外-可见吸收性能; 采用 7200 型分光光度计考察氧化锌的光催化性能。

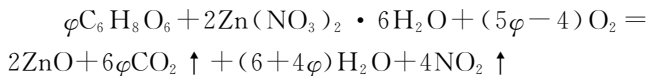
1.4 光催化实验

光催化反应在 400mL 烧杯中进行, 光源为 250W 高压汞灯, 与液面距离为 15cm。一定量罗丹明 B 溶液和光催化剂加入烧杯中, 在暗处搅拌 30min 达到吸附平衡。打开紫外灯, 照射一定时间后, 取 1~2mL 溶液过滤, 所得滤液在 553nm 处测吸光度, 罗丹明 B 降解率用脱色率(D)来表示: $D = (C_0 - C_t) / C_0 \times 100\% = (A_0 - A_t) / A_0 \times 100\%$ 。式中, C_0, C_t, A_0, A_t 分别表示光照前试样浓度、光照时间为 t 时试样浓度、光照前试样吸光度、光照时间为 t 时试样吸光度。

2 结果与讨论

2.1 燃烧剂用量考察

改变硝酸锌和抗坏血酸加入量之比, 所得样品的 XRD 见图 1, 从图中可以看出, 样品的结晶度以配比为 1:3 时最佳, 其他配比时相对较差。从如下的燃烧反应方程式可以看出: 当 O_2 系数为“0”时, 即 $\varphi = 4/5$, 硝酸锌中的氧可与抗坏血酸完全反应而无需外界氧气的供给。



一般把燃料/氧化剂 $> 5/6$ 的反应称富燃反应, 把燃料/氧化剂 $< 5/6$ 的反应称贫燃反应。本研究通过对不同 φ 值理论燃烧火焰温度的热力学分析来确定实验中燃料与氧化剂的配比, 进而研究不同配比下燃烧产物的性能变化。虽然 $\varphi = 1, 2, 3$ 时分别为贫燃反应、富燃反应和燃烧剂剩余, 但是 $\varphi = 1, 2$ 样品晶化度较 $\varphi = 3$ 时差。这可能是由于 $\varphi = 3$ 时燃烧剂过量在氧气充足时会使燃烧更加充分带走更多的热量从而使样品的晶化度变得更好。相比较而言 $\varphi = 1, 2$ 时反应速率较慢, 没有实质性的火焰, 热量的释放不足, 环境温度较低, 减缓了反应速率, 所以反应所生成样品的结晶度较差。此外, 当燃料过剩时, 燃烧反应需要另外提供氧, 由于动力学因素, 氧是以扩散的方式进入反应区, 发生燃烧并生成大量气体, 带走大量的热量, 反应速度和温度下降, 有利于样品进行晶格排列, 提高样品的结晶度, 从而使氧化锌结晶度变好。所以本工作选择燃烧剂用量为 1:3。

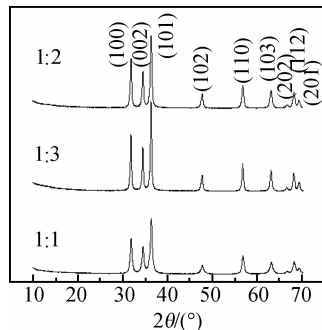


图 1 燃烧剂用量考察

Fig. 1 Burning dosage inspect

2.2 煅烧温度考察

由于燃烧后的样品可能含有未燃净的硝酸锌或抗坏血酸以及其他杂质, 所以本实验对燃烧后的样品进行煅烧温度考察, 由图 2 可知, ZnO 样品在 (100),

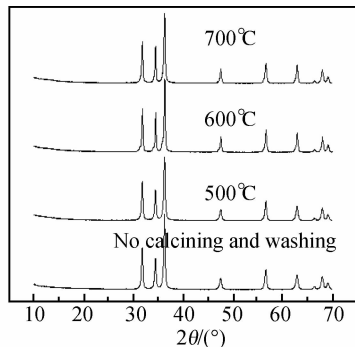


图 2 煅烧及煅烧温度的影响

Fig. 2 Calcined and calcination temperature effect on sample

(002) 和 (101) 等晶面出现的衍射峰与标准谱图 (JCPDS Card No. 36-1451) 一致, 表明产物为六方晶系纤锌矿结构的 ZnO。衍射峰峰型较为尖锐, 且半峰宽较窄, 表明该样品具有很高的结晶度。无其他的杂质峰, 表明样品较纯。从图中还可以看出煅烧前和煅烧后的样品的结晶度基本一致, 说明氧化锌的自燃烧较为彻底。

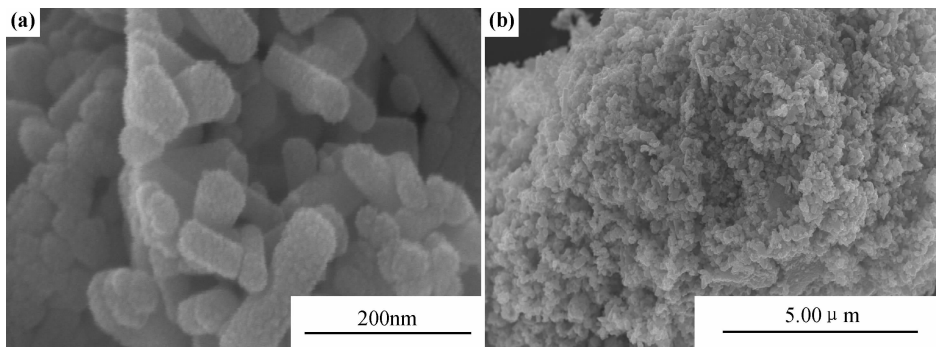


图 3 氧化锌 SEM 扫描电镜

Fig. 3 SEM of zinc oxide

宽(弧度); θ 为布拉格角($^\circ$))。

2.4 氧化锌的光谱分析

对 600 $^\circ\text{C}$ 煅烧样品进行红外光谱测定, 结果见图 4。3400 cm^{-1} 处为氧化锌与水的羟基伸缩振动峰, 经高温煅烧此吸收峰并未消失表明氧化锌表面吸附的水已经与氧化锌形成了化学键 $\text{O}-\text{Zn}-\text{O}-\text{H}-\text{O}-$ 。1384, 1619 cm^{-1} 为 $\text{O}-\text{C}=\text{O}$ [17] 的红外吸收峰, 图中在 1700~1800 cm^{-1} 未出现红外吸收峰说明氧化锌在经过燃烧之后并不吸附 CO_2 , 而是表面的 $\text{O}-\text{Zn}-$ 对 $-\text{O}-\text{C}=\text{O}$ 形成 $\text{O}-\text{Zn}-\text{O}-\text{C}=\text{O}$ 键或者是 $\text{O}-\text{Zn}-\text{O}-\text{C}-\text{O}-$, 经高温加热并未消失, 表明两者具有较高的稳定性。400 cm^{-1} 左右峰为氧化锌的吸收峰, 经煅烧后该峰变得更加尖锐, 表明红外吸收变得更好。2400, 2800 cm^{-1} 左右两个非常弱的吸收峰为杂质峰, 在经煅烧后明显减小甚至消失。图 5 为氧化锌的紫外吸收谱图, 374 nm 为氧化锌的紫外特征吸收, 由图可以看出氧化锌在 400~200 nm 波长范围内有强的紫外吸收峰, 说明氧化锌在紫外范围内有较强的吸收。

2.5 不同样品对光催化的影响

在燃烧法制备氧化锌样品时由于加热时间缩短且在反应过程中只加入少量的水, 可能致使反应物溶解不完全, 可加入强电解质氯化钾助溶。本实验选择四个样品进行光催化降解罗丹明 B 实验: 1 号样品为硝酸锌: 抗坏血酸 = 1 : 2; 2 号样品为硝酸锌: 抗坏血酸 = 1 : 3; 3 号样品为硝酸锌: 抗坏血酸: KCl = 1 : 3 : 0.05; 4 号样品为硝酸锌: 抗坏血酸: KCl = 1 :

2.3 氧化锌的 SEM 表征

对 $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和抗坏血酸摩尔比为 1 : 3, 煅烧温度为 600 $^\circ\text{C}$ 下制备的纳米氧化锌进行形貌分析。由图 3 可知所得样品为棒状, 平均粒径为 23 nm 。与 Scherrer 公式所得 21 nm 基本一致。(Scherrer: $D = KA/B\cos\theta$ 。式中: D 为平均晶粒尺寸(nm); K 为常数 0.89; A 为入射线波长 0.1541 nm ; B 为半高峰

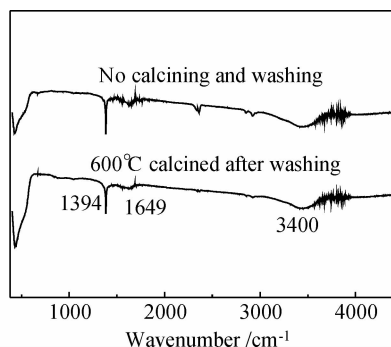


图 4 氧化锌红外吸收光谱图

Fig. 4 Infrared absorption spectra of zinc oxide

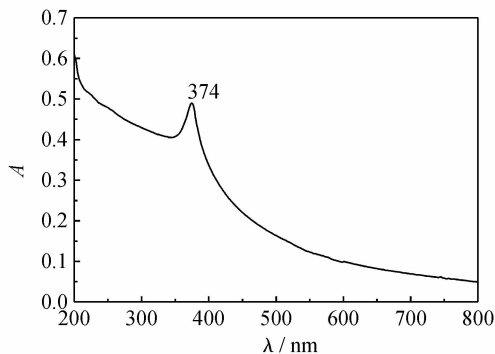


图 5 氧化锌紫外吸收光谱图

Fig. 5 UV absorption spectrum of zinc oxide

3 : 0.01。实验结果见图 6。通过对图 6 的分析可知, 加有 1 号样品与 2 号样品的罗丹明 B 溶液其吸光值变

化最为明显,表明具有较好的光催化效果,150min 的降解率为 76%。从罗丹明 B 降解的趋势来看,1 号样品的光催化性能略强于 2 号样品。3 号和 4 号样品在 150min 的降解率为 42% 和 13%,说明加入盐助溶剂会降低催化剂的催化效果甚至会使催化剂失去催化活性。这表明氯化钾作为强电解质在增大溶液的溶解度同时也会降低催化剂的催化活性。

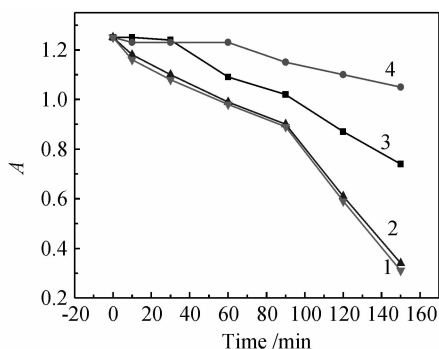


图 6 不同样品对光催化的影响

Fig. 6 The various samples impact on photo-catalyst

2.6 ZnO 加入量对光催化性能的影响

将不同质量的催化剂加入到 50mL, 0.01mol/L 罗丹明 B 溶液中考察催化剂加入量对光催化性能的影响,结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出氧化锌的加入量为 0.02, 0.04g 时,氧化锌加入量越大其吸光值下降幅度越大,但当氧化锌加入量为 0.06g 时溶液的吸光值先大幅下降后缓慢下降,80min 后催化剂的光降解效果反而弱于 0.04g,这可以解释为较高浓度的催化剂具有较多的活性位所以光催化的效果较好,但当催化剂的浓度过高时会造成了光的散射,溶液对紫外光的吸收率降低,降解效果提高不大。在相同的时间内,0.04g 的氧化锌降解罗丹明 B 更完全,所以本实验选择催化剂用量为 0.04g。

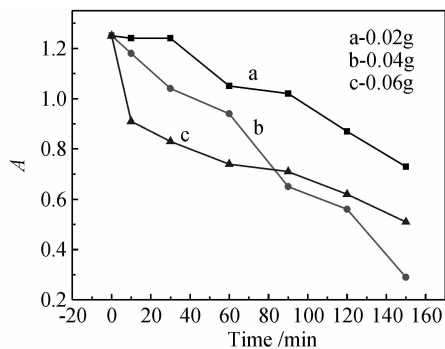


图 7 ZnO 用量对光催化的影响

Fig. 7 The amount of ZnO impact on photo-catalyst

2.7 H₂O₂ 对光催化性能影响

图 8 为加入不同量双氧水于 50mL 罗丹明 B 溶液

中的光催化效果图,由图中可以看出无论市售的氧化锌还是自制的氧化锌在加入双氧水后,罗丹明 B 的吸光值都发生较明显下降。可见双氧水对 ZnO 的光催化起到促进作用。另外,从图中还可以看出自制氧化锌加入双氧水 0.2mL 和市售氧化锌加 0.4mL 双氧水后光催化效果相差不大。说明尽管自制氧化锌键合的羟基与羧基提供了 $\cdot\text{OH}^-$ 和 $\cdot\text{O}^{2-}$ 等高活性自由基,但是还不能满足罗丹明 B 反应所需氧化剂的量,需要另外提供氧。但与市售氧化锌相比需外界供量的氧量要少得多,自制氧化锌表面确实键合一种能够提供氧源的物质即羟基和羧基,此结论与红外谱图分析一致。

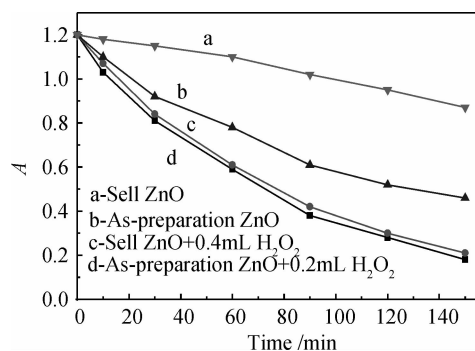


图 8 H₂O₂ 对光催化的影响

Fig. 8 The amount of H₂O₂ effect on photo-catalyst

2.8 pH 值对光催化影响

图 9 是溶液的 pH 值对光催化效果的影响,由图 9 中可以看出氧化锌的光催化效果随着 pH 值增大催化效果变好,在溶液的 pH 值为 8 时达到极限继续增加 pH 值效果不明显,所以本实验选择 pH 值等于 8,由此实验也可以看出氧化锌在弱碱性催化活性较高。这可能是由于氧化锌为两性物质在弱碱性条件下可以表现出较好的催化活性。

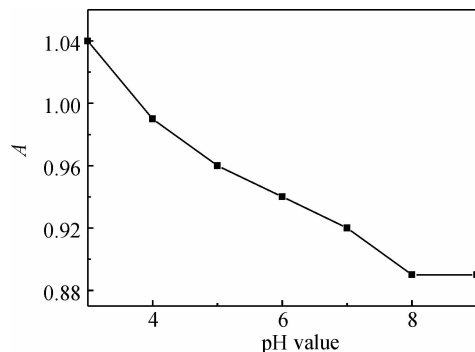


图 9 pH 值对光催化的影响

Fig. 9 pH value effect on photo-catalyst

2.9 离心机转速的影响

图 10 为离心机的转速对光催化效果的影响,由图

10 中可以看出吸光值随着转速增大而减小,当转速达到 2500r/min 吸光值达到最小,转数再增加吸光值不再发生明显变化。说明催化剂在离心机转速达到 2500r/min 已接近分离完全,未分离的催化剂对吸光值的影响已不再显著,所以本实验选择转速为 2500r/min。

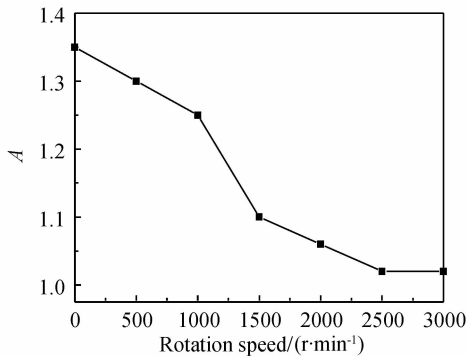


图 10 转数对光催化的影响

Fig. 10 The rotation effected on photo-catalyst

2.10 光照时间的影响

图 11 为 2 号催化剂的光照时间对光催化效果的影响。反应条件如下:在罗丹明 B 溶液中加入 0.2mL 的双氧水、0.4g 催化剂、pH 为 8、转数为 2500r/min。由图可以看出罗丹明 B 的特征峰随着时间的增长变平,表明罗丹明 B 的浓度在减小。在 30min 以前光催化效果并不明显,这可能归结为氧化锌的吸附脱色,三十分钟以后脱色效果明显变好,属于氧化锌的光催化脱色,150min 后 e,f 吸收曲线基本重合脱色完全。纳米 ZnO 光催化降解染料的原理如下:其一,由于小尺寸效应,表面效应,纳米微粒表面原子配位不全等导致表面的活性位置增加,且随着粒径的减小,表面光滑程度变差,形成了凹凸不平的原子台阶,这就增加了纳米材料的吸附性和化学反应的接触面,可以更好地吸附染料分子。其二,纳米 ZnO 受到紫外光的辐射后,会

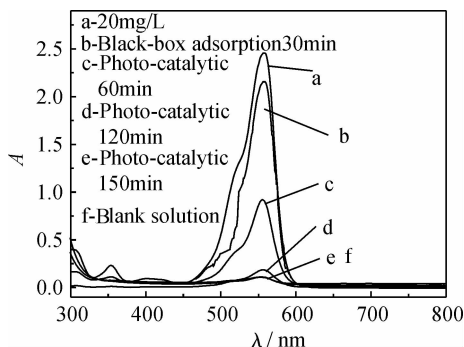


图 11 催化时间对罗丹明 B 紫外扫描的影响

Fig. 11 Catalytic time effects UV scanning of Rhodamine B

产生电子-空穴对,电子-空穴对将吸附在 ZnO 颗粒表面的 OH^- , $\text{O}=\text{C}=\text{O}$, $\text{O}-\text{C}-\text{O}-$ 和 H_2O 分子氧化生成 $\cdot\text{OH}$, $\cdot\text{O}^{2-}$ 自由基,缔合在 Zn^{2+} 表面 $\cdot\text{OH}$, $\cdot\text{O}^{2-}$ 为强氧化剂,可以扩散到液相中氧化有机物,通过一系列的氧化过程把各种有机物最终氧化成 CO_2 和 H_2O ,从而完成对有机物的降解。

3 结论

(1)采用燃烧法快速制备了白色棒状纳米氧化锌,当氧化剂与染料比为 1 : 3 时样品具有最高的结晶度。

(2)当催化剂用量为 0.04g、双氧水用量为 0.2mL、pH 值为 8、转速为 2500r/min 时,在 150min 时间内可将罗丹明 B 降解完全。

参考文献

- [1] 贺北平,王占生,张锡辉. 半导体光催化氧化有机物研究现状及发展趋势[J]. 环境科学, 1994, 15(3): 80-83.
- [2] 吴海宝,董晓东. 太阳能-TiO₂ 非均相光催化氧化染料污水脱色研究[J]. 中国环境科学, 1997, 17(1): 93-96.
- [3] 刘建东,易保华,肖卓炳,等. 液相法制备纳米氧化锌的研究[J]. 吉首大学学报, 2000, 21(2): 9-11.
- [4] 李长全,罗来涛,熊光伟. ZnO 纳米管的光学性质及其对甲基橙降解的光催化活性[J]. 催化学报, 2009, 30: 1058-1062.
- [5] 徐波,王树林. 纳米 Zn/ ZnO 复合结构的光催化活性[J]. 功能材料, 2010, 41(2): 307-310.
- [6] 李越湘,王添辉,彭绍琴,等. Eu³⁺、Si⁴⁺ 共掺杂 TiO₂ 光催化剂的协同效应[J]. 物理化学学报, 2004, 20: 1434-1439.
- [7] 许平昌,柳阳,魏建红,等. 溶剂热法制备 Ag/TiO₂ 纳米材料及其光催化性能[J]. 物理化学学报, 2010, 26: 2261-2266.
- [8] MONDELAERS D, VANHOYLAND G, VAN R H, et al. Synthesis of ZnO nanopowder via an aqueous acetate-citrate gelation [J]. Materials Research Bulletin, 2002, 37(4): 901-914.
- [9] SVETOZAR M, DURDICA D, MIROSLAVA M, et al. Influence of chemical synthesis on the crystallization and properties of zinc oxide [J]. Materials Chemistry and Physics, 2002, 7(6): 521-530.
- [10] 徐甲强,潘庆谊,孙雨安,等. 纳米氧化锌的乳液合成、结构表征与气敏性能[J]. 无机化学学报, 1998, 9(3): 355-357.
- [10] XU J Q, PAN Q Y, SHUN Y A, et al. Emulsion synthesis microstructure and gas sensing properties of nanometer ZnO ceramics [J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 1998, 9(3): 355-357.
- [11] 李文军,施尔畏,田民原,等. 水热法制备氧化锌纤维及纳米粉体[J]. 中国科学: E 辑, 1998, 28(3): 212-219.
- [12] 周益明,忻新泉. 低热固相合成化学[J]. 无机化学学报, 1999, 15(3): 273-292.
- [13] 周国华,廖世焱,万端极. 燃烧法制备纳米 ZnO 及光催化降解甲基橙的研究[J]. 化学工程师, 2009, (1): 16-19.

由以上分析可以看出,采用断续时效工艺时,二次时效温度不能太低。主要因为:①低温二次时效虽然促进了 θ' 相的析出,但却抑制了具有良好热稳定性的 Ω 相的析出,这样势必会影响合金的在高温条件下的性能;②由于时效温度较低,合金需要经过较长时间才能达到峰值硬度,工业生产周期较长,成本较高。而采用较高的二次时效温度不仅可以降低工业生产成本,还可以促进 Ω 相的析出。与T6态合金相比, Ω 相尺寸更加细小,合金强度有所提高,并且合金晶界析出相形貌也得到了改善,从而使合金塑性有所提高。本实验得到适宜的断续时效制度为 $185^{\circ}\text{C}/2\text{h}+150^{\circ}\text{C}/6\text{h}$,经此时效制度处理后,Al-Cu-Mg-Ag合金的抗拉强度为518MPa,屈服强度为436MPa,伸长率为13.8%。

4 结论

(1)低温二次时效能够促进 θ' 相的析出,抑制 Ω 相的析出,降低合金强度,提高合金的伸长率。

(2)高温二次时效能够促进 Ω 相的析出,抑制 θ' 相的析出,细化 Ω 相的尺寸,并且能够改善强化相在晶界的分布,从而提高合金的强度和伸长率。

(3)合金适宜的断续时效制度为 $185^{\circ}\text{C}/2\text{h}+150^{\circ}\text{C}/6\text{h}$,经此时效制度处理后,合金的抗拉强度为518MPa,屈服强度为436MPa,伸长率为13.8%。

参考文献

- [1] SUKUMARAN K, RAVIKUMAR K K, PILLAI S G K, et al. Studies on squeeze casting of Al 2124 alloy and 2124-10% SiCp metal matrix composite[J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 490(1-2): 235-241.
- [2] NAGA R P, SRINIVASA R K, REDDY G M, et al. Microstructure and high temperature stability of age hardenable AA2219 aluminium alloy modified by Sc, Mg and Zr additions[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 464(1-2): 192-201.
- [3] WANG J, YI D, SU X, et al. Influence of deformation ageing treatment on microstructure and properties of aluminum alloy

2618[J]. Materials Characterization, 2008, 59(7): 965-968.

- [4] YU K, LI W, LI S, et al. Mechanical properties and microstructure of aluminum alloy 2618 with Al3(Sc, Zr) phases[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 368(1-2): 88-93.
- [5] CHANG C H, LEE S L, LIN J C, et al. Effect of Ag content and heat treatment on the stress corrosion cracking of Al-4.6Cu-0.3Mg alloy[J]. Materials Chemistry and Physics, 2005, 91(2-3): 454-462.
- [6] XIAO D H, WANG J N, DING D Y, et al. Effect of Cu content on the mechanical properties of an Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2002, 343(1-2): 77-81.
- [7] 肖代红, 宋致, 陈康华, 等. 热处理对含Ag耐热铝合金组织与性能影响[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(1): 75-79.
- [8] LUMLEY R N, POLMEAR I J. The effect of long term creep exposure on the microstructure and properties of an underaged Al-Cu-Mg-Ag alloy[J]. Scripta Materialia, 2004, 50(9): 1227-1231.
- [9] LUMLEY R N, POLMEAR I J, MORTON A J. Heat treatment of age-hardenable aluminum alloys [P]. United States: US7025839B2, 2006.
- [10] MACCHIC E, SOMOZA A, DEPASQUIER A, et al. Secondary precipitation in Al-Zn-Mg-(Ag) alloys[J]. Acta Materialia, 2003, 51(17): 5151-5158.
- [11] BUHA J, LUMLEY R N, CROSKY A G. Secondary ageing in an aluminium alloy 7050[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 492(1-2): 1-10.
- [12] 李海, 郑子樵, 王芝秀. 7055 铝合金二次时效特征研究-(I)力学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(7): 1029-1032.
- [13] 周古为, 郑子樵, 李海. 基于人工神经网络的 7055 铝合金二次时效性能预测[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(9): 1583-1588.
- [14] 张坤, 戴圣龙, 黄敏, 等. 高纯 Al-Cu-Mg-Ag 合金的断续时效工艺研究[J]. 航空材料学报, 2007, 27(4): 1-5.

基金项目:中南大学优秀博士学位论文扶植基金项目(2008yb012)

收稿日期:2011-05-03;修订日期:2012-03-25

作者简介:潘清林(1964—),男,教授,博导,研究方向为高性能铝合金,联系地址:中南大学材料科学与工程学院(410083),E-mail:pql@mail.csu.edu.cn

(上接第46页)

- [14] 吴佳卿,郑敏. 燃烧合成法制备氮掺杂粉色氧化锌纳米晶[J]. 无机材料学报, 2008, 23(6): 1277-1282.
- [15] 陈亮,宋武林,谢长生,等. 熔融燃烧法制备四针状纳米氧化锌[J]. 功能材料, 2007, 38(3): 495-498.
- [16] 周忠诚,阮建明,黄伯云,等. 用燃烧合成法制备纳米氧化锌[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2008, 11(4): 229-233.
- [17] 李阳,卢俊瑞,辛春伟,等. N-(5-氯-2-羟基苯基)氨基酸衍生物

及其金属配合物的合成、表征及抑菌活性[J]. 应用化学, 2011, 28(6): 645-651.

收稿日期:2011-11-01;修订日期:2012-08-20

作者简介:赵荣祥(1971—),男,副教授,主要从事纳米材料的制备与应用研究,联系地址:辽宁省抚顺市望花区丹东路西段一号,辽宁石油化工大学石油化学院(113001),E-mail:zyhlzrx@126.com