

2195/2219 异种材料搅拌摩擦焊接头的组织与性能

房 湛¹, 王 凡¹, 尹玉环², 董丰波², 徐 琛¹, 张 聃², 陈 科¹, 单爱党¹

(1. 上海交通大学, 上海 200240)

(2. 上海航天设备制造总厂, 上海 200245)

摘 要: 对 2195-T8 与 2219-T6 薄板进行了搅拌摩擦焊接 (FSW) 试验。在恒定转速 (TRS) 的条件下, 研究了接头性能与焊接走速 (TS) 和不同前进侧材料之间的关系。结果表明, 在研究采用的参数范围内提高焊接走速有助于增强接头的力学性能; 将 2195 置于前进侧的接头性能要优于 2219 作为前进侧, 而无论何种材料为前进侧, 断裂始终发生在 2219 一侧的焊核边界; 纵向拉伸的结果显示, 焊核的力学性能强于 2219 一侧焊核边界材料。同时结合焊缝组织演化, 对接头力学性能的演化规律做出了分析。

关键词: 2219/2195 异种材料; FSW; 力学性能; 前进侧材料

中图分类号: TG146.2⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)07-2017-05

铝铜合金一直是航天工业中采用的主要结构材料, 2219 就是其中的典型代表, 早在 20 世纪 70 年代 NASA 等机构就围绕该材料开展了一系列研究与评估。作为最成熟的航天用高强铝合金之一, 2219 取得了十分广泛的应用, 而减轻航天器自重一直是航天工业中的重要课题。锂是最轻的金属, 是轻型铝合金理想的合金元素, 每添加 1% 的锂, 铝合金的密度可降低 3%, 刚度提高 6%, 以铝锂合金代替传统的铝铜合金, 航天器整体减重可达 10%~15%^[1]。2195 作为第 3 代铝锂合金的典型代表, 虽然问世较晚, 但凭借其优异的性能, 在近年来受到了广泛的关注^[2,3]。然而 2195 成本高昂、成品率低, 目前难以大量生产加工, 故而将其与 2219 这样的成熟合金联合使用能够有效提高航天器性能, 节约生产成本。目前, 对高强铝合金进行焊接最为有效的方式即为英国焊接研究所于 20 世纪 90 年代发明的搅拌摩擦焊接 (FSW) 技术^[4]。作为固态焊接的新技术, FSW 具有工艺简单、节能环保、焊接效率高、尺寸稳定性好等优点, 自问世之日就吸引了大量的研究, 近年来也越来越受到国内科研单位和企业的重视。美国洛克希德-马丁公司已经成功将 2195/2219 异种 FSW 应用在其生产的火箭外挂燃料贮箱上, 但针对这一课题的公开研究并不多见。

本研究选取 2195-T8 与 2219-T6 合金为研究对象, 对在选择不同材料作为前进侧时焊接参数对接头性能

的影响进行了分析, 研究了接头组织对焊缝性能的影响。研究表明, 随着走速的提高, 接头力学性能相应提高; 以 2195 为前进侧时的接头力学性能更优越, 而接头的断裂位置始终位于 2219 一侧, 与前进侧材料无关; 焊缝组织的纵向拉伸实验则表明, 焊缝组织材料具有良好的强度与塑性。

1 实 验

实验所选用 2195-T8 和 2219-T6 板材均为 2 mm 厚, 母材的基本力学参数如表 1 所示。

实验所选用搅拌头搅拌针为三截面外形, 长 1.85 mm, 顶端直径 2.8 mm, 搅拌针母线与垂直方向夹角为 8°, 轴肩直径 8 mm, 向内倾斜 7°。实验分别以 2219-T6 和 2195-T8 为前进侧进行了焊接。其中 A 系列以 2219 为前进侧 (AS)、2195 为后退侧 (RS); B 系列以 2195 为前进侧、2219 为后退侧。焊接方向平行于板材轧向, 转速均为 1000 r/min, 焊接过程中走速恒定。样品及焊接条件见表 2。

表 1 实验用母材的力学性能

Table 1 Mechanical properties of the base material

Base material	Yield strength /MPa	Ultimate tensile strength/MPa	Elongation/%
2195-T8	533.4±2.5	580.7±2.2	9.7±0.1
2219-T6	313.0±7.7	431.0±5.8	9.1±0.5

收稿日期: 2016-07-10

基金项目: 上海航天技术研究院-上海交大航天先进技术联合研究中心资助项目 (USCAST2012-12); 国家自然科学基金项目 (51204108); 教育部博士点基金 (20120072120120)

作者简介: 房 湛, 男, 1990 年生, 硕士生, 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200240, 电话: 021-54748974, E-mail: fangzhan@sjtu.edu.cn

表 2 样品及焊接条件

Table 2 Specimens and welding parameters		
Specimen	AS material	Travelling speed/mm min ⁻¹
A1	2219-T6	100
A2	2219-T6	200
A3	2219-T6	300
A4	2219-T6	400
A5	2219-T6	500
B1	2195-T8	100
B2	2195-T8	200
B3	2195-T8	300
B4	2195-T8	400
B5	2195-T8	500

实验中拉伸试样和金相试样取自焊缝中段稳定部分。拉伸试样依据 ASTM E8/E8M-09 小型尺寸试样标准, 分别沿垂直焊缝方向和焊缝方向通过线切割截取, 拉伸速率为 2 mm/min。金相试样抛光后采用 Keller 试剂 (190 mL H₂O, 3 mL HCl, 5 mL HNO₃, 2 mL HF) 进行腐蚀, 腐蚀时间约为 10 s。

2 结果与讨论

2.1 接头组织与演化

典型的 2195/2219 接头组织金相如图 1 所示。从图 1 中可知, 在焊接区域内 2 种材料并未发生完全的混合, 而是保留着相对清晰的界面。其中, 前进侧焊核 (WNZ) 与热机械影响区 (TMAZ) 的界面清晰, 而在后退侧部分为发生动态再结晶的材料在变形协同作用下进入焊核区域内, 故在后退侧焊核箭头所指示的区域内可以观察到动态再结晶不完全的变形晶粒。

接头组织的形貌随走速变化而发生一定变化, 以 A 系列样品 (2219 为前进侧) 为例, 图 2 给出的是以 2219-T6 为前进侧 A1-A5 的接头金相照片。在焊接过程中, 前进侧与后退侧的材料虽然没有完全混合, 但分别有部分材料会随着搅拌头的机械作用越过材料的原始界面进入对侧, 如焊核底部的材料主要来自前进侧。在

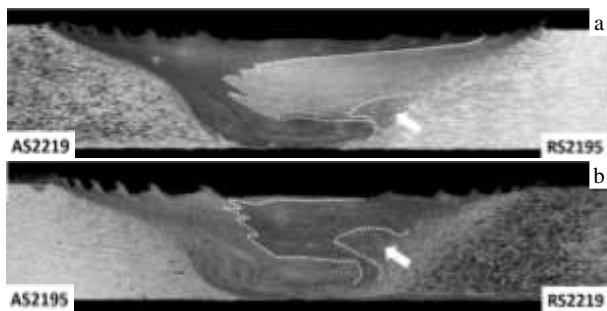


图 1 典型焊缝金相组织

Fig.1 Typical metallographic images of the specimens: (a) A4 AS2219 (1000×400) and (b) B4 AS2195 (1000×400)

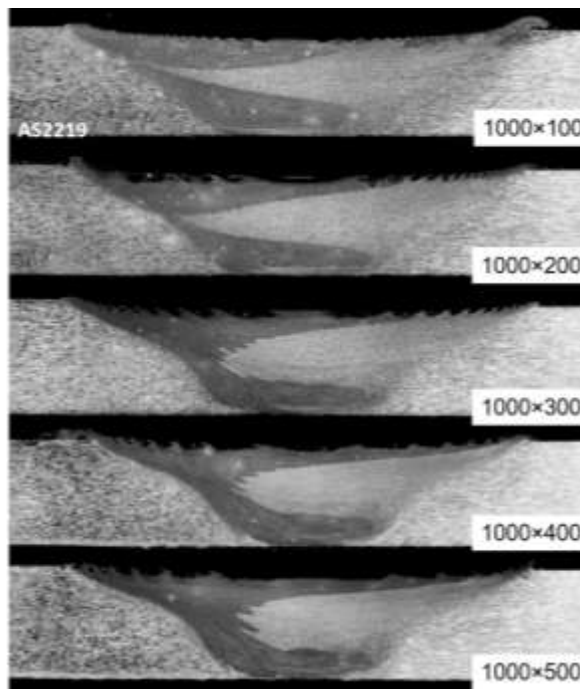


图 2 焊缝组织随走速变化的演化过程

Fig.2 Evolution of the welding zone with traveling speed

较低的焊接走速下, 两侧材料在焊接区域内的交错更为显著, 如图 2 所示 A1、A2 后退侧材料最大延伸范围可以接近前进侧的焊核边界, 且界面较为平滑。而走速越高, 后退侧材料越过原始界面的距离越来越短, 且界面由低走速下的平滑状逐渐转变为崎岖的撕裂状。

2.2 横向拉伸

2.2.1 力学性能

对 A、B 系列样品分别进行横向拉伸测试, 表 3 为 2 组样品的测试结果。

当以 2219-T6 为前进侧时, 其他样品随走速的提高, 屈服强度明显增大, 最高达到 235.8 MPa; 而抗拉

表 3 接头横向拉伸性能

Table 3 Transverse tensile test results				
Specimen	Yield strength/MPa	Ultimate tensile strength/MPa	Elongation/%	Joining efficiency/%
A1	224.0±2.5	323.8±1.9	3.4±0.1	75.1
A2	228.4±0.9	327.8±2.3	3.2±0.1	76.1
A3	230.3±2.4	325.0±5.3	2.9±0.2	75.4
A4	232.1±2.7	307.2±4.2	2.2±0.4	71.3
A5	235.8±2.8	322.7±1.0	2.7±0.1	74.9
B1	229.4±2.6	318.9±1.5	3.8±0.1	74.0
B2	231.2±2.8	325.4±2.3	3.5±0.2	75.5
B3	232.1±5.9	313.2±2.8	3.6±0.1	72.7
B4	238.3±2.4	327.6±3.7	3.7±0.2	76.0

B5	247.3±2.7	332.4±1.1	3.6±0.1	77.1
----	-----------	-----------	---------	------

强度与延伸率的变化规律并不明显, A2 抗拉强度最高, 达到 327.8 MPa。A4 样品的抗拉强度最低, 与 A2 相差 6.5%, 延伸率也仅有 2.2% 且标准差很大, 表明该样品内部很可能存在缺陷。当以 2195-T8 为前进侧, 总体上随焊接走速的提高, 接头的抗拉强度与屈服强度均有所增强, B5 的屈服强度与抗拉强度分别达到了 247.3 与 332.4 MPa, 各组样品的延伸率均在 3.5% 以上 (而 A 组最高为 3.4%)。

以 2195 为前进侧的 B 组焊接样品总体延伸率要高于以 2219 为前进侧的 A 组材料, 且性能相对稳定, 考虑到拉伸样品的塑形变形主要集中在焊缝区域, 实际上这种塑性差异十分显著; 而 B 组样品最高 77.1% 的强度系数也优于 A 组 (最高 76.1%), 可以认为在 2219/2195 的异种搅拌摩擦焊接中, 以 2195 作为前进侧可以取得更好的力学性能。

有研究提出^[5], 置于前进侧的 2219, 会承受较高的热输入量, 因而力学性能会有损失。这同样可以对本研究中 AB 2 组样品的性能差异做出解释。焊缝截面中部的显微硬度测试结果 (图 3) 表明, 在同样的走速条件下置于前进侧的 2219 (A4) 相比与置于后退侧的 2219 (B4) 硬度最低值更低。图 3 中以 0 刻度为焊缝中心线, 左侧为 2195, 右侧为 2219。A4 的 2195 位于后退侧 (RS), B4 的 2195 位于前进侧 (AS)。而 2195-AS 的硬度要低于 2195-RS 的硬度。这表明前进侧材料确实会承受较大的热损伤。而且, A4 低硬度区域范围较窄, 而 B4 低硬度区域范围较宽。这表明 A 系列塑性变形倾向于集中在一个较小的范围内, 而 B 系列变形则会相对均匀地分布在一段较宽材料之中。因此, B 系列样品表现出了更好的塑性。

2.2.2 断口分析

图 4 为 A、B 2 个系列拉伸样品断裂后典型的金相照片, 断裂发生的位置位于焊核靠近 2219 一侧的边界位置, 与前进侧材料的选择无关。这表明 2219 一侧的

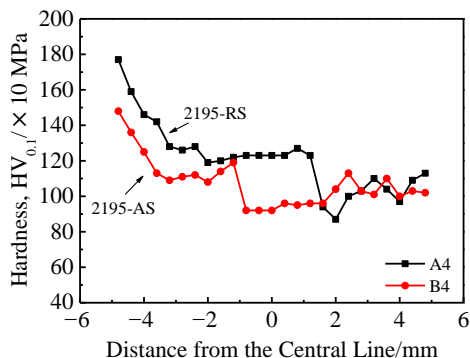


图 3 A4 与 B4 的显微硬度分布

Fig.3 Microhardness of A4 and B4

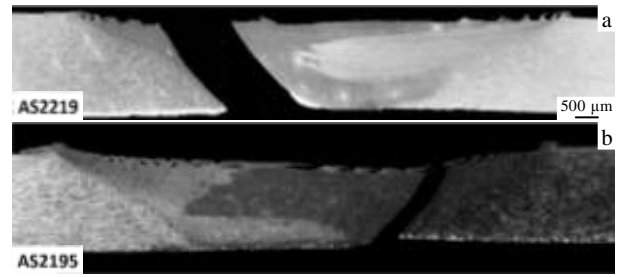


图 4 断口金相照片

Fig.4 Metallographic image of fractured specimen: (a) A5 and (b) B1

焊核边界是整个接头组织最为薄弱的区域。

2219-T6 中主要的强化相是 θ' 相, 在经历过搅拌摩擦之后, 焊核和热机械影响区内的 θ' 会转变为 θ 相, 并发生一定程度的粗化, 引起材料强度的弱化^[6]。而 2195 中的析出相如 T_1 等即使在 FSW 的热机械影响区和热影响区中发生了一定程度的粗化, 仍然能够对材料起到很强的弥散强化作用^[7]。因此, 2219 一侧的性能最为薄弱。而随着走速的提高, 材料受到的热输入也相应降低, 2219 中析出相的转变和粗化受抑制, 故接头强度随走速提高而改善。

由于 2195/2219FSW 典型断裂都发生在 2219 一侧, 其断口本质上是 2219-T6FSW 接头的断口, 而此前 Xu 等人在 2219-T6 同种 FSW 中报道了 71%-80% 的焊接强度系数^[8], 与本研究中的结果相符。图 5b 为扫描电镜下的 FSW 接头断口形貌。可见, 断口为典型的韧性断口, 表面均布韧窝结构, 与图 5a 中 2219 母材断口的形貌相似。图 5b 中在部分韧窝的底部可以观察到析出相颗粒的痕迹, 表明 2219 中的脆性析出相^[9]很可能是断裂发生时的裂纹源。

2.3 纵向拉伸

为了研究沿焊缝方向的接头性能, 选取横向拉伸测试中性能更好的 B1-B5 样品进行了纵向拉伸的力学性能测试和断口分析。

2.3.1 力学性能

表 4 为纵向拉伸力学性能数据。可见, 不同参数样品屈服强度与延伸率变化规律并不明显且波动较大, 但抗拉强度随走速的变化趋势保持着较高的一致性, 随走速的提高接头的纵向抗拉强度也不断提高。

对比横向拉伸与纵向拉伸的数据, 可以发现纵向拉伸样品的抗拉强度高于同样参数的横向拉伸样品。这是

由于一方面，纵向断面中包含一部分 2195 提高了样品的平均强度；另一方面，焊缝组织在经过动态再结晶后与 TMAZ、HAZ 区域的材料相比具有更好的力学性能

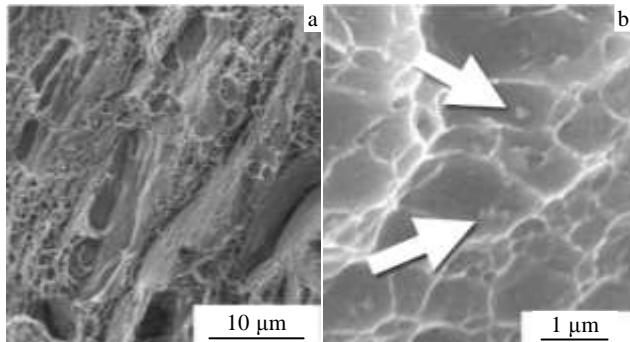


图 5 2219 母材断口及 B5 2195AS 断口 SEM 照片
Fig.5 SEM images of fracture surface: (a) 2219 BM and (b) B5 2195AS 1000×500

图 7c、图 7d 分别为 2195 母材的断口与 FSW 焊缝纵向拉伸断面中的 2195 部分。2195 的母材断口表现出一种混合型的断裂模式，断裂表面除了穿晶断裂的韧窝结构外还有沿晶断面；而焊缝纵向拉伸断面中的 2195

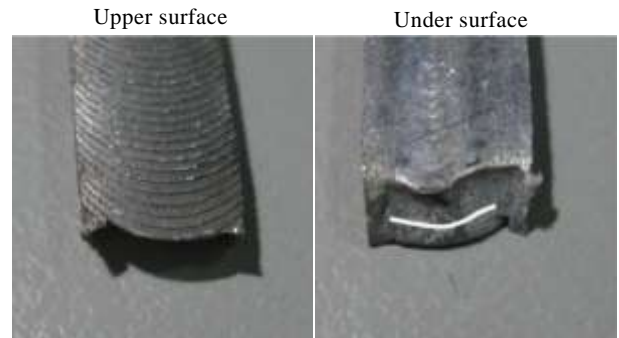


图 6 B4 纵向拉伸的宏观断口
Fig.6 Longitudinal tensile fracture sample of B4

表 4 纵向拉伸性能
Table 4 Longitudinal tensile test results

Specimen	Yield strength/ MPa	Ultimate tensile strength/MPa	Elongation/ %
B1	224.2±6.1	315.9±5.2	14.6±0.7
B2	241.8±11.9	327.0±4.0	9.6±2.4
B3	219.0±12.7	338.6±4.5	8.6±0.3
B4	215.4±3.5	356.1±4.3	11.7±1.2

(横向拉伸试验的断裂位置也证明了这一点)。

2.3.2 断口分析

纵向拉伸样品的宏观断口的一个显著特征是其断面呈圆弧形，并沿着搅拌摩擦过程中材料流动的轨迹断裂，如图 6 所示。这表明在焊缝组织中，焊接过程中发生流动的材料层与层之间结合的部位是相对薄弱的部分，在承受载荷时裂纹倾向于优先沿着层间路径进行扩展，与焊缝组织中 2 种材料的分布无关。

如前所述，在焊核内部前进侧与后退侧的材料并未发生充分的混合，故其断面可以分为 2219 与 2195 2 个部分，分别表现出 2 种材料搅拌摩擦焊后组织不同的断裂性质。

图 7a、图 7b 分别为 2219 母材的拉伸断口与 B3 焊缝纵向拉伸样断口的 2219 部分。对比可见，2219 在经过搅拌摩擦焊接之后，断裂模式并没有发生根本性的改变，同样为典型的韧性断裂，表面为韧窝结构。母材中部分韧窝底部可见较大的脆性颗粒断面；而在焊核中的 2219 部分，析出相大颗粒已经被打碎，断面上韧窝组织变得更为均匀。

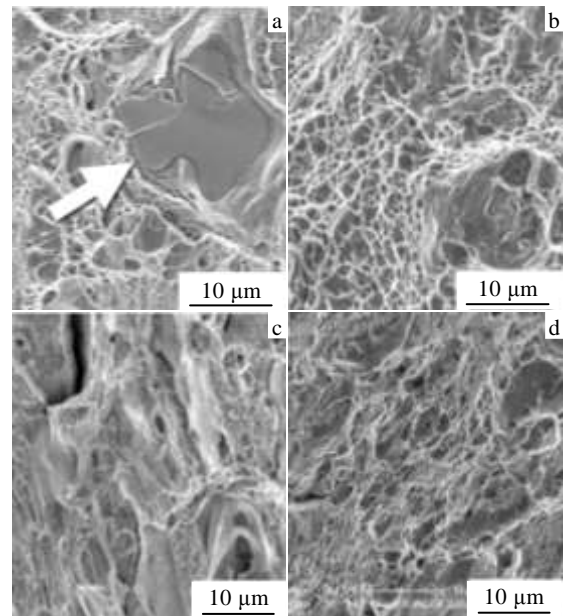


图 7 母材与纵向拉伸断口
Fig.7 Fracture surface of BM and longitudinal tensile test: (a) base material of 2219; (b) 2219 of B3 AS2195 1000×300; (c) base material of 2195; (d) 2195 of B3 AS2195 1000×300

则表现为完全的韧性断裂，表面全部为韧窝结构，这表明搅拌摩擦焊接引入的动态再结晶与动态回复，使 2195 的组织结构更加均匀，各向异性^[10]减弱，改变了 2195 的断裂模式。

3 结 论

1) 2195-T8 与 2219-T6 间异种材料搅拌摩擦焊接

可以实现性能良好的无缺陷焊接, 但焊核内 2 种材料并未发生完全混合。随走速的提高, 在焊接过程中越过原始界面的材料越少。

2) 随走速的提高, 接头的横向与纵向力学性能均随之增强, 这是由于较低的热输入抑制了 2219 中析出相的转变与粗化。由于 2 种母材性能和对热输入敏感性的差异, 在横向拉伸中, 断裂始终发生在 2219 一侧焊核边界位置。

3) 虽然纵向断面内 2 种材料力学性能相差较大, 在发生断裂时焊缝组织倾向沿 FSW 过程中材料的流动界面开裂, 与界面内材料的分布无关。

4) FSW 过程中的动态回复和再结晶改变了 2195-T8 的断裂模式, 而 2219 的断裂模式则不受影响。

参考文献 References

- [1] Zhou Rongchang(周昌荣), Pan Qinglin(潘青林), Zhu Zhao-ming(朱朝明) *et al. Materials Review(材料导报)*[J], 2004, 18(5): 30
- [2] Shu Biao(束彪), Guo Xuming(国旭明), Zhang Chunxu(张春旭). *Journal of Aeronautical Materials(航空材料学报)*[J], 2010, 30(4): 12
- [3] Carney K S, Hatamelh O, Simth J *et al. International Journal of Structural Integrity*[J], 2011, 2(1): 62
- [4] Mishra R S, Ma Z. *Materials Science and Engineering: R: Reports*[J], 2005, 50(1): 1
- [5] Luo Chuanhong(罗传红), Peng Weiping(彭卫平), Guo Lijie(郭立杰). *Journal of Chongqing Institute of Technology(重庆理工大学学报, 自然科学版)*[J], 2014, 28(10): 38
- [6] Chen Y, Feng J, Liu H. *Materials Characterization*[J], 2009, 60(6): 476
- [7] Fonda R, Bingert J. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2006, 37(12): 3593
- [8] Xu W, Liu J, Luan G *et al. Materials & Design*[J], 2009, 30(9): 3460
- [9] Dong Yongjun(董勇军), Wang Jianwei(王建伟), Huang Chunde(黄纯德) *et al. Chinese Journal for Rare Metals(稀有金属)*[J], 2014, 38(6): 1060
- [10] Li Hongying(李红英), Ou Ling(欧玲), Zheng Ziqiao(郑子樵). *Journal of Materials Engineering(材料工程)*[J], 2005(10): 31

Microstructure and Properties of 2195/2219 Dissimilar Alloy by FSW

Fang Zhan¹, Wang Fan¹, Yin Yuhuan², Dong Fengbo², Xu Chen¹, Zhang Dan², Chen Ke¹, Shan Aidang¹

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

(2. Shanghai Spaceflight Manufacture (Group) Co., Ltd, Shanghai 200245, China)

Abstract: 2195-T8 and 2219-T6 sheets were welded by friction stir welding (FSW). With constant tool rotation speed (TRS), effects of travelling speed (TS) and advancing side material (AS material) on the mechanical properties of the joint were studied. The results show that higher travelling speed improves the mechanical properties of the FSW joint. Whichever the AS material is, fracture always occurs at the boundary of the welding nugget zone (WNZ)/thermomechanical affected zone (TMAZ) to the 2219 side. Longitudinal tensile tests indicate that mechanical property of the WNZ is better than that at the boundary of WNZ/TMAZ to the 2219 side.

Key words: 2219/2195 dissimilar alloy; FSW; mechanical properties; AS material

Corresponding author: Chen Ke, Ph. D., Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, P. R. China, Tel: 0086-21-54748974, E-mail: chenke83@sjtu.edu.cn