

活塞用 Cu 和 Ni 增强型铝合金的组织与性能

谢长钊^{1,2}, 王振生¹, 彭真¹, 苏新¹

(1. 湖南科技大学 机电工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 中国长安汽车集团股份有限公司湖南江滨活塞分公司, 湖南 湘潭 411102)

摘要: 本文对比研究了一种新型活塞用 B 型铝合金与 ZL109 的组织与力学性能。研究表明, ZL109 的组织由 Al, Si, Al₆Mn 和 Al₅FeNi 的相组成, B 型铝合金由 Al, Si, Al₆Mn, Al₂Cu, Al_{1.9}CuMg_{4.1}Si_{3.3}(Q 相), AlNiCu 和更多的 Al₅FeNi 组成; 源于 B 型铝合金中的 α 铁相呈现鱼骨状和块状, 减轻了 ZL109 组织中针片状 β 铁相对基体的割裂作用, La 和 Ce 元素的 AlNiCu 相高温下可起到阻碍晶界滑动和阻碍基体变形的作用, 并且组织中还生成了 Al₂Cu, Al₅FeNi 和 Al_{1.9}CuMg_{4.1}Si_{3.3} 强化相; 因而, B 型铝合金的力学性能优于 ZL109, 且受活塞缸径尺寸规格的影响较小; B 型铝合金的断裂类型为准解理断裂, 呈现韧窝、舌状花样以及撕裂棱特征。

关键词: 活塞; B 型铝合金; ZL109; 强度; 断口

中图分类号: TG146.2⁺1; TG113.12; TG113.25⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2017)02-0035-05

Microstructure and properties of Cu and Ni reinforced aluminum alloys for piston

Xie Changzhao^{1,2}, Wang Zhensheng¹, Peng Zhen¹, Su Xin¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Changan Automobile Group Co., Ltd. Hunan Jiangbin Piston Branch, Xiangtan 411102, China)

Abstract: The microstructures and mechanical properties of a new type of piston type B aluminum alloy and ZL109 were compared. The results show that the composition of Al, Si, Al₆Mn and Al₅FeNi of ZL109 is composed of Al, Si, Al₆Mn, Al₂Cu, Al_{1.9}CuMg_{4.1}Si_{3.3}(Q phase), AlNiCu and more Al₅FeNi. The α -iron phase in the B-type aluminum alloy showed fish bones and lumps, which reduce the cleavage of the needle-like β -iron in the ZL109 tissue. The AlNiCu phase of La and Ce elements can block the grain boundary, and the role of matrix deformation, and the organization also produce Al₂Cu, Al₅FeNi and Al_{1.9}CuMg_{4.1}Si_{3.3} enhanced phase; therefore, B-type aluminum alloy mechanical properties is better than ZL109, and by the piston bore size specifications is less affected. The fracture type of B type aluminum alloy is quasi-cleavage fracture, showing dimple, tongue pattern and tearing edge.

Keywords: piston; B type aluminum alloy; ZL109; strength; fracture

活塞作为汽车发动机中接受能量的重要零件,对材料具有特殊的要求。主要包括热膨胀系数小、密度小、热传导性好;并要求具有合适的高温强度、耐腐蚀性、耐磨性、尺寸稳定性等特点^[1-2]。在用于制造发动机活塞的各种材料中,铸造铝合金高温力学性能良好,质量小,且便于回收利用^[3-5],因而成为目前大多数柴油机活塞材料的主要选择^[3-6]。

ZL109 为典型的 Al-Si 合金,用于柴油机活塞,特点是强度较高,耐蚀性和焊接性能好且适用于各种铸造方法,在活塞行业得到广泛使用^[7-8].目前,随着客户要求的提高,ZL109 在硬度和抗拉强度上难以继续提高,已无法满足技术要求.为了克服 ZL109 在硬度和抗拉强度方面的不足,在 ZL109 的基础上进行改良,增加了 Cu, Ni, Re 元素,制备了型号为 B 的铝合金,满足了客户的要求.为了揭示 B 型铝合金的强化机理,研究了其组织和力学性能.

1 实验材料及方法

采用 ZL109 和 B 型铝合金(化学成分见表 1),分别制备了 3 种不同直径(<90 mm, 90~125 mm 和 >125 mm)的活塞.铝合金活塞的制备工艺如下:熔化铝锭-合金化-变质处理-毛坯铸造-水淬-锯浇冒口-初加工(粗车外圆、锯冒口)-时效处理-机加工-表面处理-包装入库,从铝合金活塞本体上切取力学性能试样和金相试样,拉伸试样按照 GB/T228—2002 进行加工,而金相试样则用砂纸进行打磨后抛光、侵蚀后烘干.

采用 CMT-7105 电子万能材料试验机测试拉伸性能,拉伸速度为 2 mm/min,每组规格进行 5 次试验,取 5 次实验结果的平均值.采用 OLYMPUS-1 金相显微镜进行金相试验,采用 D/Maz-2550 PC-X 射线衍射仪(XRD)分析合金的相组成,采用配置能谱仪的 S-3400N 扫描电镜(SEM)观察合金的组织 and 拉伸试样断口形貌.

表 1 ZL109 和 B 型铝合金的化学成分

	Si	Cu	Ni	Mg	Fe	Mn	Ti	Zn	B
ZL109	11~13	0.8~1.5	0.8~1.3	0.8~1.3	≤0.7	<0.3	<0.2	<0.3	<0.05
B 型	11~13	2.8~4.0	2.0~3.0	0.6~1.2	≤0.7	0.15~0.25	0.06~0.15	<0.3	<0.05
	Cr	Pb	Sn	Ca	Re	其余单个杂质	其余杂质总量	Al	
ZL109	<0.05	<0.05	<0.05	<0.01	/	<0.05	<0.15	其余	
B 型	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.15~0.25	<0.05	<0.15	其余	

2 实验结果及讨论

2.1 力学性能

表 2 为不同直径 ZL109 和 B 型铝合金活塞的力学性能.B 型铝合金的室温抗拉强度为 244~257 MPa,比 ZL109(抗拉强度为 212~224 MPa)约高 13.8%;300 °C 下,根据公式 $\frac{fuT}{fT} = 0.95569 + 9.96525 \times 10^{-4}T - 7.99159 \times 10^{-6}T^2 + 5.75441 \times 10^{-9}T^3$ ($10 \text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 550 \text{ }^\circ\text{C}$)^[9], B 型铝合金的抗拉强度为 96.8 MPa,比 ZL109(抗拉强度为 79.6~82.2 MPa)约高 19.4%;360 °C 下, B 型铝合金的抗拉强度为 73.1 MPa,比 ZL109(抗拉强度为 60.1~62.1 MPa)约高 19.4%.活塞的直径对 B 型铝合金和 ZL109 的抗拉强度没有明显的影响, B 型铝合金的抗拉强度优于 ZL109 铝合金,在高温下优势更加明显.

表 2 ZL109 和 B 型铝合金的力学性能

活塞直径 /mm	室温强度/MPa		高温强度/MPa(300 °C)		高温强度/MPa(360 °C)	
	ZL109	B	ZL109	B	ZL109	B
<90	222.0	244.0	79.6	105.4	60.1	74.2
90~125	224.0	257.0	82.2	97.7	62.1	73.8
>125	212.0	248.0	81.6	94.6	61.6	71.4
平均	219.3	249.6	81.1	96.8	61.2	73.1

2.2 组织形貌与相组成的分析

图 1 为 ZL109 和 B 型铝合金低倍下的组织形貌.可以看出,2 种材料的金相组织均以 Al-Si 共晶组织为基体,ZL109 组织中分布有大量的针片状 β 铁相以及少量的块状 α 铁相,针片状 β 铁相显然割裂基体,对合金的力学性能、机加工性能有破坏的影响^[10].由于 Ni 的加入能够改变 β 铁相的形态,并随着加入量的增加,逐渐由块状转变为鱼骨状^[11],因而, B 型铝合金组织中分布有大量的鱼骨状 α 铁相和少量的块状 α 铁相.

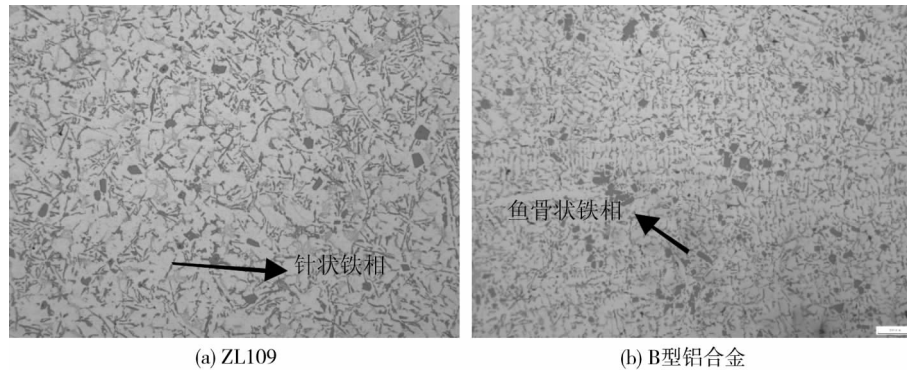


图 1 低倍下 ZL109 和 B 型铝合金的组织形貌

图 2 为 ZL109 和 B 型铝合金相组成的 XRD 图谱. ZL109 的组织由 Al, Si, Al₆Mn 和 Al₅FeNi 的相组成, B 型铝合金由 Al, Si, Al₆Mn, Al₂Cu, Al_{1.9}CuMg_{4.1}Si_{3.3} (Q 相) 和更多的 Al₅FeNi 组成.

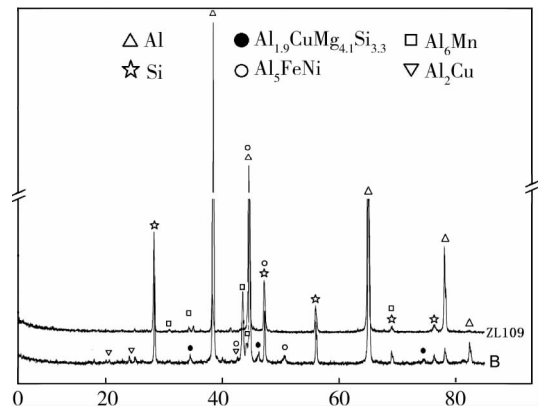


图 2 B 型铝合金和 ZL109 相组成的 XRD 图谱

图 3 为 ZL109 和 B 型铝合金的高倍 SEM 组织形貌. 可以看出, ZL109 中灰色基体组织为 Al 相, 黑色相为 Si 相, 呈块状或片状均匀分布于基体组织间 (图 3 (a)). 另外, 还有大量的针片状 β 铁相以及少量的块状 α 铁相和枝状 Al₆Mn 相存在 (图 3 (b)). B 型铝合金中灰色基体组织为 Al 相, EDS 分析表明, Al 相中含有少量的 Mg 和 Si 元素, 说明 Al 相中有少量 Mg₂Si 固溶其中; 黑色相为 Si 相, 呈块状或片状均匀分布于基体组织间; 条状白色组织为 Al-Ni 相, 结合后面的 XRD 分析结果, 认为是 Al₅FeNi 组织 (图 3 (c)).

除了鱼骨状 α 铁相、块状 α 铁相以及枝状的 Al₆Mn 相之外, 还分布有白色的块状相和骨状相 (图 3 (d)). EDS 分析表明, 块状相中含有较多的 Al, Si, Ni, Cu 和 Mn 元素, 可能为 Al₂Cu 相; 骨状相中含有较多的 Al, Si, Ni, Cu, La 和 Ce 元素, 可能为溶入了 La 和 Ce 元素的 AlNiCu 相, 由于 AlNiCu 相数量很少, XRD 分析未能检测到该相. 由于 AlNiCu 相中溶入了 La 和 Ce 元素, 并取代溶入位置的部分 Ni 元素, 起到合金化作用, 高温下这种耐热相可起到阻碍晶界滑动和阻碍基体变形的作用, 从而使合金的高温强度得以提高^[12].

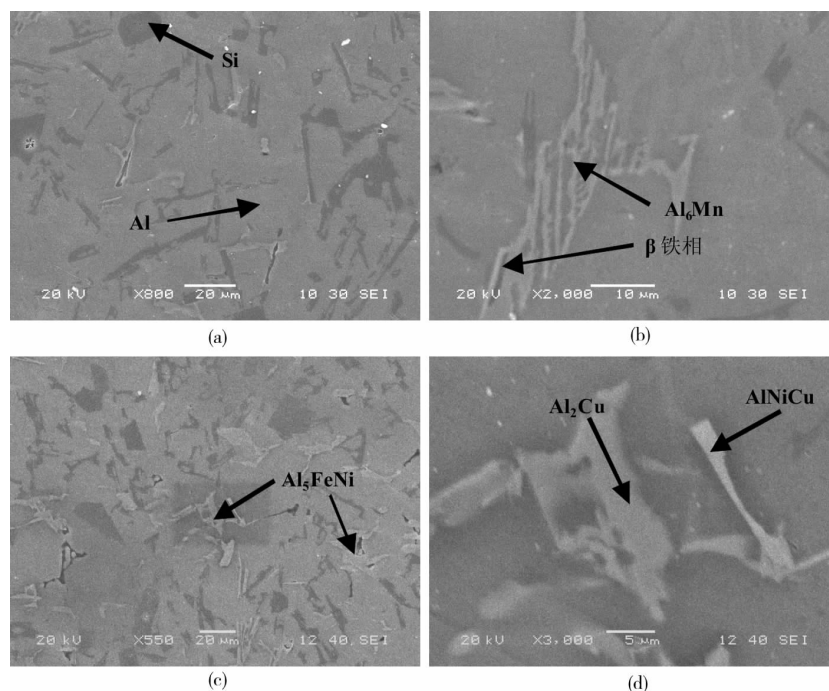


图 3 高倍下 B 型铝合金和 ZL109 的组织形貌

由于 Ni 的加入使 β 铁相的形态由针片状变为块状和鱼骨状,减轻了针片状 β 铁相对基体的割裂作用^[10]; Al_2Cu 可以有效增加材料的强度^[13]; Al_5FeNi 有着优异的热稳定性; $\text{Al}_{1.9}\text{CuMg}_{4.1}\text{Si}_{3.3}$ 可降低材料线膨胀系数,且在高温作业环境下可弥散出强化相^[14]; 溶入了 La 和 Ce 元素的 AlNiCu 相在高温下可起到阻碍晶界滑动和阻碍基体变形的作用^[12]. 因而, B 型铝合金的力学性能优于 ZL109.

2.3 断口形貌分析

图 4 是 ZL109 和 B 型铝合金的拉伸试样断口的 SEM 图片,分别如图 4 中的(a),(b),(c)和图(d),(e),(f)所示. 2 种材料在断口形貌上比较类似,均为典型的准解理断裂特征,可见韧窝、舌状花样以及撕裂棱等. 韧窝分布于较大的凹坑内,呈圆形或椭圆形; 舌状花样以较多的舌状小平面对平行分布于断口表面,小平面对相交处可见台阶; 撕裂棱出现在舌状花样之间,呈细条状紧密分布,并伴随较多的撕裂碎片. 在断口的表面可见明显的裂纹源、裂纹穿晶扩展以及二次裂纹特征. 由于两种材料的构成相中均存在块状初晶硅相和细片状共晶硅相,试样拉伸过程中,裂纹萌生于共晶硅粒子与基体结合处,并沿枝晶胞之间的共晶区域进行扩展,当裂纹遇到与前进方位不一致的共晶硅粒子时,裂纹将截断共晶硅粒子^[10].

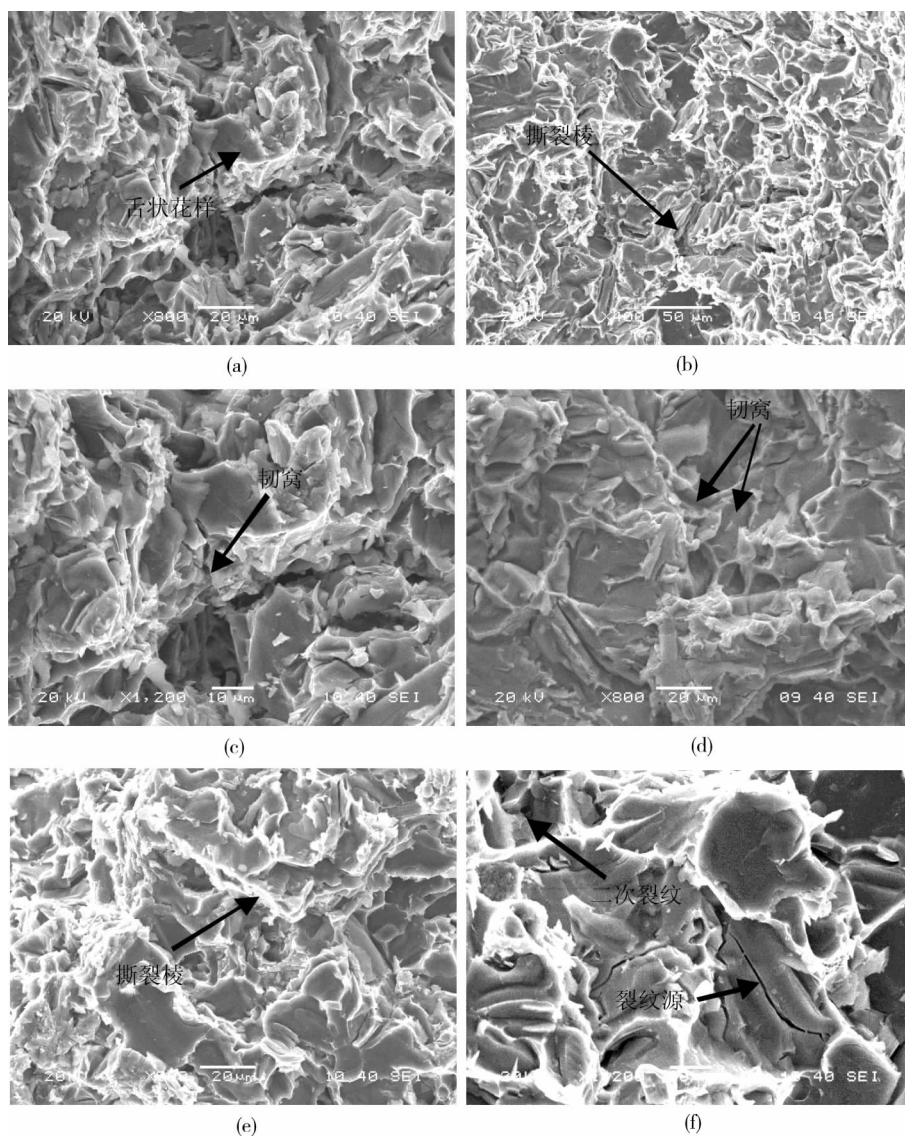


图 4 拉伸试样断口形貌(SEM,低倍)

3 讨论

根据 XRD 实验结果可以看出,相比 ZL109, B 型铝合金主要多出了 Al_2Cu , Al_5FeNi 和 $\text{Al}_{1.9}\text{CuMg}_{4.1}\text{Si}_{3.3}$ (Q 相,文献^[14]认为是 $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$). 其中, Al_2Cu 属于金属间化合物,拥有较高的强度^[15], EDS 分析发现, Al_2Cu 也会呈带状分布在 Si 相四周及晶界上(图 5),其元素成分见表 3. Al_2Cu 相是一种强化相,能极大地提高铝硅系合金的强度,因而,提高了 B 型铝合金的抗拉强度. B 型铝合金 Cu 含量上限为 4%, Cu 含量

进一步增加会导致铝合金结晶温度范围变宽,容易产生缩松等缺陷,也会对合金的力学性能产生影响,对性能的提升效果也有所减弱^[16]. Al_5FeNi 是一种树枝状耐热相,合金中 Mn 大部分融入该相^[13],其热稳定性达 $350\sim 400\text{ }^\circ\text{C}$.而 Q 相主要以颗粒状的形态分布^[14],作为强化相可降低合金的线膨胀系数,进一步提升其力学性能.同时,该相耐热温度为 $200\sim 250\text{ }^\circ\text{C}$,在活塞工作状态下可逐渐分解,弥散析出 Al_2Cu 和 CuMgAl_2 的亚稳定相^[17]. Al_5FeNi 和 Q 相相对 B 型铝合金高温性能提升起到了关键性作用,也是其高温下抗拉强度明显优于 ZL109 的原因.

目前,B 型铝合金已广泛应用于技术要求较高的柴油发动机活塞制造,通过实验性能和实际使用效果对比,形成了企业生产的技术规范(表 3).因而,已经可根据客户技术要求选择相应的材料.

表 3 技术要求

材料	硬度/HB	常温 R_m/MPa	高温 R_m/MPa
ZL109	90~125	≥ 196	$\geq 78.4(300\text{ }^\circ\text{C})$
B 型铝合金	110~140	≥ 220	$\geq 70(360\text{ }^\circ\text{C})$

4 结论

1) B 型铝合金的力学性能优于 ZL109,且受活塞缸径尺寸规格的影响较小.

2) B 型铝合金中的 α 铁相呈现鱼骨状和块状,减轻了 ZL109 组织中针片状 β 铁相对基体的割裂作用;La 和 Ce 元素的 AlNiCu 相高温下可起到阻碍晶界滑动和阻碍基体变形的作用;并且组织中还生成了 Al_2Cu , Al_5FeNi 和 $\text{Al}_{1.9}\text{CuMg}_{4.1}\text{Si}_{3.3}$ 强化相,因而,B 型铝合金的力学性能优于 ZL109.

3) B 型铝合金的断裂类型为准解理断裂,呈现韧窝、舌状花样以及撕裂棱特征.

参考文献:

- [1] 陈琪云. 铝合金活塞材料的研发与应用进展[J]. 合肥学院学报(自然科学版), 2012, 22(3): 46-49.
- [2] 陈长江,王渠东. 内燃机活塞材料的研究进展[J]. 材料导报, 2009, 23(8): 62-65.
- [3] Siaminwe L, Clegg A J. Effect of processing variable on structure and tensile properties of investment cast Al-Si-Mg casting alloy[J]. Material Science and Technology, 1999, 15(7): 812-820.
- [4] Qian Z, Liu X F, Zhao D G, et al. Effects of trace Mn addition on the elevated temperature tensile strength and microstructure of a low-iron Al-Si alloy[J]. Materials Letters, 2008, 62(14): 2146-2149.
- [5] Dinnis C M, Taylor J A, Dahl A K. Interaction between iron, manganese and the Al-Si eutectic in hypoeutectic Al-Si alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006, 37(11): 263-283.
- [6] 吴亮,金青林,蒋业华. 铁相形貌对铝硅合金高温拉伸断裂机制的影响[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(4): 51-56.
- [7] 郭学锋,杨文朋,宋佩维. 往复挤压 Mg-Al-Si 合金的高温拉伸性能[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(2): 7-11.
- [8] Belmares-perales S, Castro-roman M, Herrera-trejo M, et al. Effect of cooling rate and Fe/Mn weight ratio on volume fractions of α -AlFeSi and β -AlFeSi phase in Al-7.3Si-3.5Cu alloy[J]. Metals and Materials International, 2008, 14(3): 307-314.
- [9] 彭航,蒋首超,赵媛媛. 建筑用 6061-T6 系铝合金高温下力学性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(7): 46-49.
- [10] 武玉英,宋建岗,刘相法,等. 镍对 ZL109 合金中铁相的影响[J]. 铸造, 2006, 55(11): 1178-1180.
- [11] 冉广,周敬恩,王永芳. 铸造 A356 铝合金的拉伸性能及其断口分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(10): 1620-1624.
- [12] 张士林,任颂赞. 简明铝合金手册[M]. 上海:上海科学技术文献出版社, 2001.
- [13] 朱姝晴. 高 Cu 铝硅压铸合金及其热处理研究[D]. 重庆:重庆大学, 2015.
- [14] 胥涛. 几种 Al-Si13 系活塞合金的凝固特性与组织演变研究[D]. 西安:西安工业大学, 2016.
- [15] 黄志其,尹志民. 两种易切削 Al-Cu 合金的组织与性能[J]. 轻合金加工技术, 2007, 35(1): 40-42.
- [16] 钱钊. 高强耐热 Al-Si 活塞合金的研究[D]. 山东:山东大学, 2009.
- [17] 刘宏,刘艳华,赵刚,等. Mn 对 Al-Mg-Si-Cu 铝合金结晶相的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004, 11(14): 1906-1911.

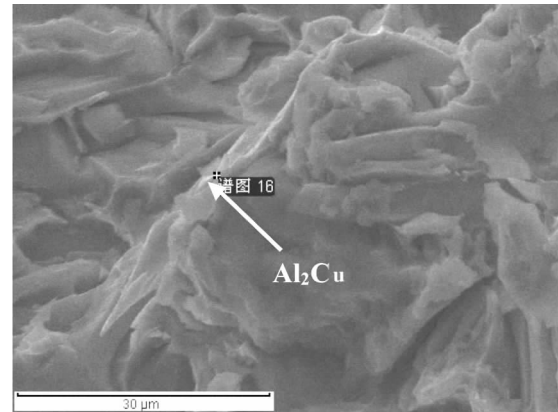


图 5 B 型铝合金断口组织形貌