DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.06.004

Sn、Bi 微合金化对 6026 铝合金组织、力学与切削性能的影响

牛艳萍[1],石常亮[1],唐维学[1],张大鹏[2],覃建波[2]

(1.广东省工业分析检测中心,广东 广州 510650; 2.广东领胜新材料科技有限公司,广东 佛山 528031)

摘　要:以 Sn、Bi 替代 Pb,制备了无 Pb 易切削 6026 铝合金。利用光学显微镜、扫描电镜、拉伸试验机和高速车床,研究了 Sn、Bi 微合金化对 6026 铝合金显微组织、力学性能与切削性能的影响。结果表明,单独添加 Bi 元素的 6026 铝合金由 α-Al 基体、Mg_2Si 和 $CuAl_2$ 强化相以及低熔点单质 Bi 相组成; 复合添加 Sn、Bi 元素的 6026 铝合金由 α-Al 基体、Mg_2Si 和 $CuAl_2$ 强化相以及低熔点 SnBi 共晶相组成,且铝合金具有更好的切削加工性能,切屑尺寸更细小,抗拉强度,屈服强度和伸长率分别为 358.3 MPa,295.7 MPa 和 13.9%。

关键词:6026 铝合金;切削性能;挤压;无铅

中图分类号:TG146.2; TG113　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)06-0522-03

Effect of Sn and Bi Microalloying on Microstructure, Mechanical Properties and Cutting Performance of 6026 Aluminum Alloy

NIU Yanping[1], SHI Changliang[1], TANG Weixue[1], ZHANG Dapeng[2], QIN Jianbo[2]

(1. Guangdong Center of Industrial Analysis and Testing, Guangzhou 510650, China; 2. Guangdong Lingsheng New Materials Technology Co., Ltd., Foshan 528031, China)

Abstract: The lead and cutting free 6026 aluminum alloy were prepared by Sn and Bi instead of Pb. The effect of Sn and Bi microalloying on microstructure, mechanical properties and cutting performance of 6026 aluminum alloy were studied by means of optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), tensile testing machine and high-speed lathe. The results show that the microstructure of 6026 aluminum alloy with Bi element is composed of α-Al, Mg_2Si, $CuAl_2$ and Bi phases. The microstructure of 6026 aluminum alloy with Sn and Bi elements is composed of α-Al, Mg_2Si, $CuAl_2$ and SnBi eutectic. The composite addition Sn and Bi elements makes 6026 aluminum alloy have better cutting performance, smaller chip size, tensile strength, yield strength and elongation are 358.3 MPa, 295.7 MPa and 13.9%, respectively.

Key words: 6026 aluminum alloy; cutting performance; extrusion; lead-free

大量的铝合金零部件,如传动阀、压缩机活塞、导风轮、轮盘、铆钉、螺栓等在生产制造过程中都需要经过车、铣、刨、钻等切削加工[1-5]。易切削铝合金可以采用更高的切削速度或者更大的进刀量进行加工,显著提高切削加工的生产效率,同时也有利于获得表面更光洁、尺寸精度更高的精密铝合金零部件[6-8]。传统易切削铝合金主要通过添加低熔点金属 Pb 来提高铝合金的切削加工性能,但 Pb 是有毒性的重金属元素,对人体健康和生态环境有危害作用。随着人们生活水平的提高和环境保护意识的增强,国际上许多国家开始对含 Pb 的铝合金零部件设置严格的技术壁垒,欧盟已经禁止生产、销售含有 Pb、Cd、Hg 等有害物质的电子电器产品[9]。因此,迫切需要开发无 Pb 的环保型易切削铝合金。

金属 Sn 和 Bi 均属于无毒性的低熔点元素,不会对人体健康和生态环境带来危害。本文以 Sn、Bi 替代 Pb 制备了无 Pb 的易切削 6026 铝合金,研究了 Sn、Bi 微合金化对 6026 铝合金显微组织、力学性能与切削性能的影响。

1　试验材料与方法

采用工业纯铝锭、镁锭、锡锭、铋锭、Al-20Si 合金和 Al-50Cu 合金熔炼配制无 Pb 易切削 6026 铝合金。熔炼试验设备为 5 kg 坩埚熔铝炉,将铝锭放入坩埚熔铝炉中加热熔化;升温到 760 ℃后,加入镁锭、锡锭、铋锭、Al-10Mn 合金、Al-20Si 合金和

收稿日期:2020-03-21

基金项目:广东省科技厅公益研究与能力建设项目(2017A07070 1021)资助

作者简介:牛艳萍(1980-),女,满族,辽宁抚顺人,本科,工程师.主要从事铝合金新材料的研究与分析测试.

电话:020-37238441,E-mail:niuyanping1980@sina.com

Al-50Cu 合金，搅拌熔化成铝合金液；用铝合金精炼剂和高纯氮气对铝合金液喷吹精炼 10 min 进行除气除杂处理，扒去铝合金液表面的浮渣后，再静置 20 min；最后分别用金属型模具铸造成直径 100 mm 的 6026 铝合金圆棒，浇注温度为 710 ℃，模具预热温度为 250 ℃。经 ARL-4460 型光电直读光谱仪测定，6026 铝合金圆棒的成分如表 1 所示。表中 1 号合金为单独添加 Bi 元素的 6026 铝合金，2 号合金为复合添加 Sn、Bi 元素的 6026 铝合金。

表1 6026铝合金的化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical composition of 6026 aluminum alloy

合金编号	Si	Fe	Cu	Mg	Sn	Bi	Al
1	1.14	0.15	0.42	0.83	—	0.67	余量
2	1.15	0.14	0.41	0.82	0.29	0.67	余量

挤压试验设备为 630 t 挤压机。将 6026 铝合金圆棒去皮后，加热到 430 ℃，再分别放入挤压筒内挤压成直径 40 mm 的棒材，挤压筒温度为 440 ℃，挤压速度为 0.6 m/min。试验完成后，在挤压棒材上取样，试样经磨制、抛光和腐蚀后，在莱卡 DM4000M 型金相显微镜、日立 SU8220 型高分辨场发射扫描电子显微镜上进行微观组织观察和能谱分析。在 JGK-550S 型高速车床上进行切削加工试验，进刀量为 0.5 mm，转速为 2500 r/min，切削速度为 0.5 m/min。将 6026 铝合金挤压棒材在 535 ℃固溶 2 h，水淬后在 170 ℃时效 8 h。在热处理后的 6026 铝合金挤压棒材上取样，将试样加工成标准拉伸试样(图 1)，在 DNS200 型电子拉伸试验机上进行室温拉伸试验，拉伸速度为 2 mm/min。

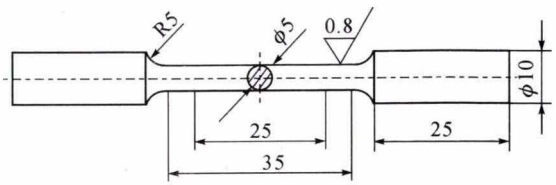
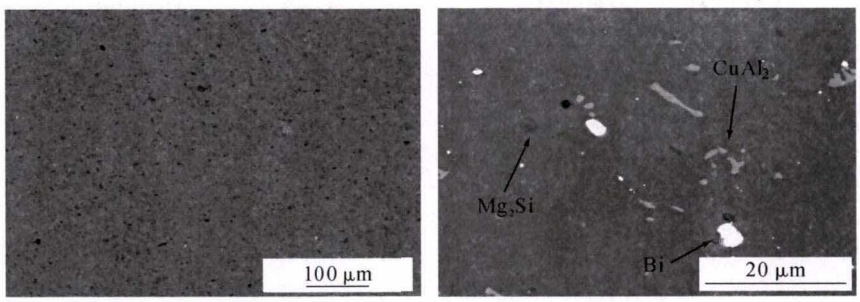


图 1 拉伸试样的形状尺寸
Fig.1 Shape and size of tensile sample

2 试验结果与分析

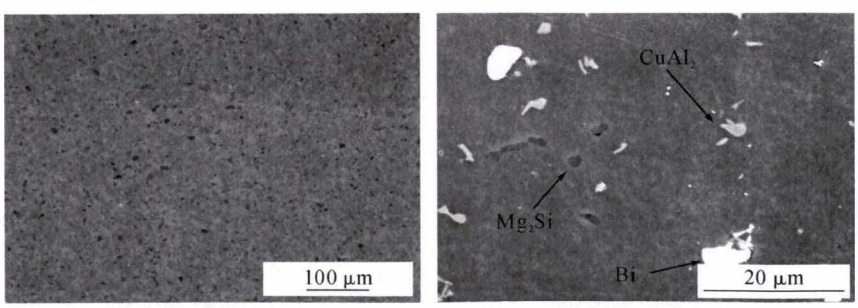
2.1 显微组织

图 2 和图 3 分别为单独添加 Bi 元素和复合添加 Sn、Bi 元素后 6026 铝合金挤压棒材的显微组织。从图 2(a)和图 3(a)可看到，在挤压过程中发生的塑性变形使铸态 6026 铝合金圆棒的 α-Al 晶粒发生破碎细化，第二相化合物均匀弥散分布在 α-Al 基体上。结合扫描电镜能谱分析结果可知，单独添加 Bi 元素的 6026 铝合金挤压棒材的显微组织由 α-Al 基体、Mg_2Si 和 $CuAl_2$ 强化相以及低熔点单质 Bi 相组成，而复合添加 Sn、Bi 元素的 6026 铝合金挤压棒材的显微组织由 α-Al 基体、Mg_2Si 和 $CuAl_2$ 强化相以及低熔点 SnBi 共晶相组成。如图 2(b)和图 3(b)所示，Mg_2Si 强化相呈黑色颗粒状，$CuAl_2$ 强化相呈灰色条状或方块状，低熔点单质 Bi 相和 SnBi 共晶相则呈亮白色颗粒状。



(a)光学显微镜组织　　(b)扫描电镜显微组织

图 2 添加 Bi 元素的 6026 铝合金挤压棒材的显微组织
Fig.2 Microstructure of 6026 aluminum alloy extruded bar with Bi element



(a)光学显微镜组织　　(b)扫描电镜显微组织

图 3 复合添加 Sn、Bi 元素的 6026 铝合金挤压棒材的显微组织
Fig.3 Microstructure of 6026 aluminum alloy extruded bar with Sn and Bi elements

2.2 切削性能

图 4 和图 5 分别为单独添加 Bi 元素和复合添加 Sn、Bi 元素的 6026 铝合金挤压棒材的车屑形貌。由于 Sn、Bi 元素与 Al 均互不相溶，在 6026 铝合金中单独添加 Bi 元素后，Bi 元素以单质 Bi 形式存在于挤压棒材中；而复合添加 Sn、Bi 元素后，Sn、Bi 元素以 SnBi 共晶相形式存在于挤压棒材中。Bi 元素的熔点为 271.3 ℃，Sn 元素的熔点为 231.9 ℃，而 SnBi 共晶相的熔点为 139 ℃[10]。在高速切削加工时，铝合金挤压棒材与刀具之间的高速摩擦使机械能转变成热能，导致挤压棒材的温度升高。当与刀具接触点附近的铝合金切屑温度达到或接近低熔点单质 Bi 或 SnBi 共晶相的熔点时，这些低熔点组元发生软化甚至熔化，从而使铝合金切屑发生断裂，达到切屑不粘刀、不缠刀、排屑方便的效果[10]。从图 4 可看到，单独添加 Bi 元素后的 6026 铝合金挤压棒材的切屑呈条状，表明挤压棒材的切削加工性能较差。从图 5 可看到，复合添加 Sn、Bi 元素的 6026 铝合金挤压棒材的切屑呈细小的颗粒状，这是由于 SnBi 共晶相的熔点比单质 Bi 元素的熔点低，使复合添加 Sn、Bi 元素的 6026 铝合金挤压棒材比单独添加 Bi 元素的 6026 铝合金挤压棒材具有更好的切削加工性能。具有优异切削加工性能的铝合金，可以采用更高的速度或者更大的进刀量进行加工，从而显著提高切削加工的生产效率，获得表面光洁、尺寸精度高的精密铝合金零部件。

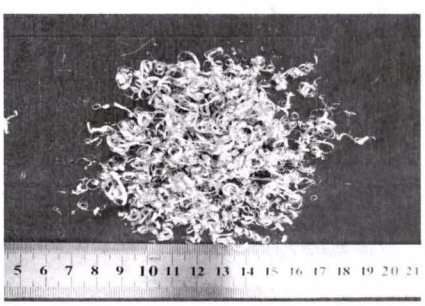


图 4 添加 Bi 元素 6026 铝合金挤压棒材的车屑形貌
Fig.4 Chip morphology of 6026 aluminum alloy extruded bar with Bi element

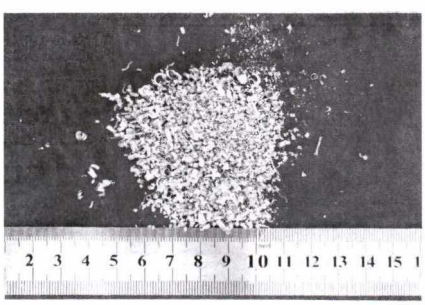


图 5 复合添加 Sn、Bi 元素 6026 铝合金挤压棒材的车屑形貌
Fig.5 Chip morphology of 6026 aluminum alloy extruded bar with Sn and Bi elements

2.3 力学性能

表 2 为 6026 铝合金挤压棒材的拉伸力学性能。从表 2 可看到，铝合金挤压棒材具有较高的拉伸力学性能。单独添加 Bi 元素的 6026 铝合金的抗拉强度为 364.5 MPa，屈服强度为 302.1 MPa，伸长率为 13.3%；复合添加 Sn、Bi 元素 6026 铝合金的抗拉强度为 358.3 MPa，屈服强度为 295.7 MPa，伸长率为 13.9%。

表2 6026铝合金挤压棒材的拉伸力学性能
Tab.2 Tensile properties of 6026 aluminum alloy extruded bar

合金编号	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率(%)
1	364.5	302.1	13.3
2	358.3	295.7	13.9

3 结论

(1)单独添加 Bi 元素 6026 铝合金挤压棒材由 α-Al、Mg_2Si、$CuAl_2$ 和单质 Bi 相组成，复合添加 Sn、Bi 元素 6026 铝合金挤压棒材由 α-Al、Mg_2Si、$CuAl_2$ 和 SnBi 共晶相组成。

(2)Sn、Bi 微合金化可以改善 6026 铝合金的切削性能，复合添加 Sn、Bi 元素比单独添加 Bi 元素的 6026 铝合金具有更好的切削性能，车屑更加细小。

(3)单独添加 Bi 元素 6026 铝合金的抗拉强度为 364.5 MPa，屈服强度为 302.1 MPa，伸长率为 13.3%。复合添加 Sn、Bi 元素 6026 铝合金的抗拉强度为 358.3 MPa，屈服强度为 295.7 MPa，伸长率为 13.9%。

参考文献：

[1] 邓运来，张新明. 铝及铝合金材料进展[J]. 中国有色金属学报，2019，29(9): 2115-2141.

[2] 王国军，王祝堂. 铝合金在中国民用航空器上的应用[J]. 轻合金加工技术，2017，45(11): 1-11.

[3] 师润平，韩春钰，韩彦良. 3C 产品铝合金外壳精饰表面切削加工技术研究[J]. 轻合金加工技术，2016，44(9): 50-55.

[4] 王凌云，黄红辉，谢志江. 航空铝合金薄壁零件高速加工铣削力[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2017，48(7): 1756-1761.

[5] 刘文辉，杨迅雷，张平，等. T6 和 T6I4 时效工艺对 7055 铝合金切削加工性能的影响[J]. 材料热处理学报，2016，37(12): 30-35.

[6] 刘鑫，田国富，王涛. 切削用量对铣削铝合金表面质量的影响分析[J]. 机械制造，2017，55(11): 9-11.

[7] 谢黎明，张威，靳岚. 6061 铝合金高速铣削切削参数对表面粗糙度的影响分析[J]. 机械设计与制造工程，2018，47(3): 56-60.

[8] 常艳艳，孙涛，梁保奇. 铝合金 2024-T3 超精密车削仿真与切屑观察[J]. 工具技术，2018，52(3): 15-20.

[9] 黄志其，尹志民. 无铅易切削铝合金[J]. 材料导报，2006，20(12): 62-65.