DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.3313

细化处理对铸造铋黄铜组织和切削性能的影响

谢　康[1],任卡卢比[1],代丽鑫[1],肖　柱[1,2],贾延琳[1,2]

(1. 中南大学 材料科学与工程学院,湖南 长沙 410083;2. 中南大学 粉末冶金国家重点实验室,湖南 长沙 410083)

摘　要:无铅易切削铋黄铜具有环保、力学性能良好、导热良好的特点,是 5G 光学模块垫片的首选材料。晶粒组织粗大和铋相分布不均匀会导致切削一致性较差,染黑后出现毛刺加深、着色不均等问题。B、Ti、Zr 是工业上常用的细化变质剂,可以细化晶粒和组织,从而提高铋黄铜的切削性能。本文采用铋黄铜(成分为 58.3% Cu、40.85% Zn、0.07% P、0.7% Bi、0.08% Sn),分别添加 0.1%(质量分数)的 B、Ti、Zr,采用宏观、微观、SEM 对晶粒、组织、铋相粒子进行比较分析。结果表明,添加 0.1%(质量分数)的 B、Ti、Zr 对铸造铋黄铜晶粒尺寸都有较为显著的细化效果。无添加变质剂样品无等轴晶,而 0.1%(质量分数)的 B、Ti、Zr 等轴晶尺寸为 1.43、0.95、0.71 mm,故添加 Zr 的细化效果优于 Ti,Ti的细化效果略优于 B。同时 B、Ti、Zr 的添加对于晶内 α+β 双相组织也有细化效果,Zr 的细化效果优于 Ti,Ti 的细化效果略微优于 B。且加入 B、Ti、Zr 有助于消除薄膜状分布的趋势,改善铋相的分布。其中 B 的效果优于 Ti 和 Zr。而 4 种样品切削性能排序为:B>Zr>Ti>无添加变质剂,影响切削性能的因素包括铋相和 β 相数密度。

关键词:铋黄铜;细化处理;显微组织;铋相粒子;切削性能

中图分类号:TG146.11　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)01-0050-06

Effect of Refinement Treatment on the Microstructure and Cutting Properties of Cast Bismuth Brasses

XIE Kang[1], REN Kalubi[1], DAI Lixin[1], XIAO Zhu[1,2], JIA Yanlin[1,2]

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Lead-free easy-cutting bismuth brass, which is the preferred material for 5G optical module gaskets, has the characteristics of environmental friendliness, good mechanical properties, good thermal conductivity and easy cutting. A coarse grain size and uneven distribution of the bismuth phase lead to poor cutting consistency, deep burrs and uneven colouration after dyeing black, etc. B, Ti, and Zr are commonly used refining modifiers in industry and can refine grains and microstructures, thus improving the cutting performance of bismuth brass. In this paper, a bismuth brass with a composition of 58.3wt.% Cu, 40.85wt.% Zn, 0.07wt.% P, 0.7wt.% Bi, and 0.08wt.% Sn was taken as the research subject, from which 0.1wt.% B, Ti or Zr was added. Macroscopic metallography, microscopic metallography and SEM were used to analyse the grains, microstructure and bismuth phase particles. The results show that the addition of 0.1wt.% B, Ti, or Zr has a significant refining effect on the grain size of the cast bismuth brass. The modifier-free sample has no equiaxial crystal, while the samples with 0.1wt.% added B, Ti, or Zr have equiaxial crystal sizes of 1.43, 0.95 and 0.71 mm, respectively. Therefore, the refining effect of adding Ti is slightly better than that of B but poorer than that of Zr. Moreover, the addition of B, Ti, and Zr also refines the intracrystalline α+β biphasic structure, with the refining effect of Zr being better than that of Ti and that of Ti being slightly better than that of B. In addition, the addition of B, Ti and Zr helps to eliminate the tendency of the bismuth phase to form film and improve the distribution of the bismuth phase. Among them, the effect of B is better than that of Ti or Zr. The cutting performance of the four samples decreases in the order B>Zr>Ti> modifier-free, the influencing factors of which include the bismuth phase and beta phase number density.

Key words: bismuth brass; refinement; microstructure; bismuth phase particles; cutting performance

收稿日期:2023-12-23

基金项目:宁波市科技创新 2025 重大专项(2022Z104);湖南创新型省份建设专项(2021GK2016)

作者简介:谢　康,2000 年生,硕士生.研究方向为高性能铜合金制备.Email: 1458733808@qq.com

通讯作者:贾延琳,1982 年生,博士,特聘副教授.研究方向为高性能铜合金制备和相变.Email: jiayanlin@csu.edu.cn

引用格式:谢康,任卡卢比,代丽鑫,等.细化处理对铸造铋黄铜组织和切削性能的影响[J].铸造技术,铸造技术,2024, 45(1): 50-55.
XIE K, REN K, DAI L X, et al. Effect of refinement treatment on the microstructure and cutting properties of cast bismuth brasses[J]. Foundry Technology, 2024, 45(1): 50-55.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

铅黄铜具有优越的铸造性能和切削性能，制造难度和成本较低，在水管系统和轴承及阀门领域[1-2]应用广泛。但铅是一种对人体和环境有害的物质，且极易从铅黄铜中析出[3]。所以，在保证切削性能的同时，需要用一种无害的元素去替代有毒的铅。

铋与铅的元素周期表位置相近，部分化学性质和物理性质比较相似，而且是一种相对环保的元素，在一定程度上可以很好地替代铅[4]。铋几乎不溶于铜和锌中，所以在铋黄铜中都以单质存在。但由于铋和铜具有很好的润湿性，所以可能会出现沿晶界分布的薄膜状铋相[5]，铋的熔点低，且具有脆性，热加工时晶界受热，则薄膜状铋相熔化，导致热脆；冷加工时薄膜状铋相容易受力产生脆性开裂，导致冷脆[6-7]，故需要添加其他合金元素改变铋和铜之间的表面张力[8]，从而改善铋和铜的润湿性，使铋相以球状分布在晶界上。添加 Sn 可明显消除铋相偏析，减少铋相的薄膜状分布[9-10]，但对于铸态组织的细化作用有限。

尽管对铋黄铜已有大量研究，并取得了一些进展，但其在一些高端应用场景应用仍较少。5G 光学模块是 5G 光学摄像系统的关键部件，应用于手机通讯、无人驾驶汽车等，对 5G 融合应用有着重要意义。当前 5G 光学模块向多功能化、轻便化、小型化发展，对模块用材料性能要求提高。以光学镜头用垫片为例，其设计趋向更薄、结构更复杂、加工精度要求更高。无铅易切削铋黄铜是 5G 手机镜头用垫片的首选材料，当前均采用日本和韩国进口材料，对国外材料依赖性较高。国产铋黄铜由于组织较为粗大，且铋相的尺寸和分布不均匀，切削性能难以保证精密加工及其后续染色工艺尺寸精确度需求。

普通连铸工艺制备的铋黄铜铸态组织粗大，组织均匀性差，对后续的冷、热加工有遗传影响作用[11-12]，需加入精炼变质剂进行细化处理，改善铋黄铜的冷、热加工性能，同时改变铋的析出形态与分布，获得组织成分均匀且铋元素以细小游离形式均匀孤立分布于基体的铸锭，改善最终成品的切削性能。

B、Ti、Zr 是工业上常用的细化变质剂，但在铜合金中添加的细化效果研究较少。刘志学等[13]研究了 B、Ti、Zr 混合添加对铅黄铜晶粒细化的影响，取得了一定的效果。本文在铋黄铜熔炼时通过分别添加 0.1%(质量分数，下同)的 B、Ti、Zr 作为细化变质剂，对比研究了不同元素对铋黄铜的宏观晶粒、微观组织和铋相分布的影响规律，并对不同细化处理后铸态样品的切削性能进行了研究。

1　实验材料与方法

铸造铋黄铜采用的原料为电解铜、工业纯锌、工业纯铋、工业纯锡、铜磷中间合金、氟硼酸钾、氟钛酸钾、氟锆酸钾，其中氟硼酸钾、氟钛酸钾、氟锆酸钾为铋黄铜细化变质剂，合金成分见表 1。采用高频感应炉加热熔炼，将电解铜放入炉中石墨坩埚内，进行缓慢升温，待电解铜完全熔化后，加入木炭覆盖。将工业纯锌分成小块，并用铜箔包裹，分批次加入铜液里。随后依次加入工业纯锡、铜磷中间合金、工业纯铋，并将温度升至 950 ℃保温 3 min，再分别把用铜箔包好的氟硼酸钾、氟钛酸钾或氟锆酸钾粉末加入石墨坩埚内，随后立即用石墨棒将其压入液面以下，充分搅拌，避免其浮到铜液表面氧化。待搅拌完成后，将铜液浇入方形石墨模具中冷却，模具预热温度为 100 ℃。

采用线切割将铸锭沿图 1a 所示的红线位置切开，获得一块铸锭切片，再在铸锭切片芯部和底部取 10 mm×10 mm×3 mm 小试样(图 1b)。为观察晶内组织，铸态样品在 600 ℃下时效 1 h 后空冷。将剖开的铸锭和小试样依次用 600、1 000、1 500 目的水磨砂纸，2 000 目的金相砂纸，再用 MP-1B 单盘无级变速磨抛机对其进行抛光，最后用金相腐蚀液(5 g $FeCl_3$+10 mL 12 mol/L 盐酸+100 mL 酒精)腐蚀。采用数码相机拍摄宏观金相照片，通过 Leica DM6000M 金相显微镜观察显微组织。采用 TESCAN 扫描电镜对样品进行 SEM 观察，使用牛津仪器 One Max 20 型能谱仪进行成分分析。

表 1 不同变质剂处理的铋黄铜成分含量配比

Tab.1 Component content ratios of bismuth brass under different modifier treatments

(mass fraction/%)

Sample number	Cu	P	Bi	Sn	Zn	B	Ti	Zr
1	58.3	0.07	0.7	0.08	Margin			
2	58.3	0.07	0.7	0.08	Margin	0.1		
3	58.3	0.07	0.7	0.08	Margin		0.1	
4	58.3	0.07	0.7	0.08	Margin			0.1

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

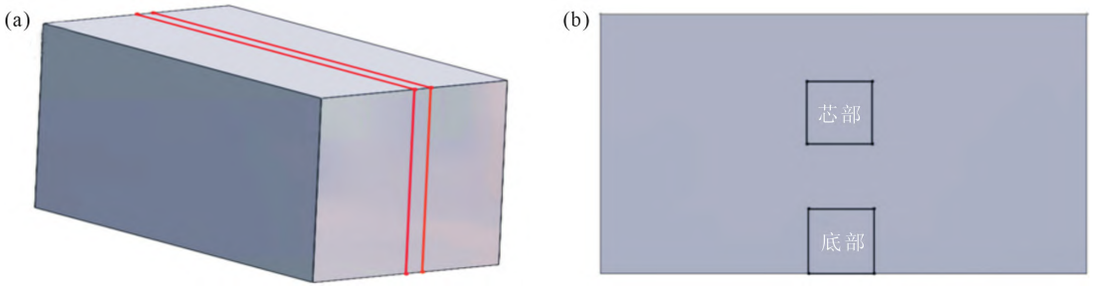


图 1 铸锭和切片示意图:(a) 铸锭,(b) 铸锭切片
Fig.1 Schematic diagram of ingot casting and slicing: (a) ingot casting, (b) ingot slicing

2 实验结果及讨论

2.1 不同变质剂对铋黄铜晶粒尺寸的影响

图 2 为不同变质剂下铸态铋黄铜的宏观金相。其中,未添加细化变质剂的 1 号样品全部为粗大的柱状晶组织,几乎观察不到等轴晶组织。1 号样品由于未添加细化变质剂,结晶核较少,凝固过程中形成了粗大的柱状晶组织。而其他 3 个添加了细化变质剂的样品,其铸态组织以细小的等轴晶为主,柱状晶仅分布在距离底部和边部 5~10 mm 范围内,且尺寸较小。可见 B、Ti、Zr 都可以对铋黄铜产生良好的细化效果。

表 2 为铸态铋黄铜等轴晶宏观晶粒尺寸,由于 1 号样没有等轴晶,故不计入统计。从表 2 中可见,对比 3 种元素的细化效果,在 0.1%的添加量下,Zr 的细化效果最好,Ti 的细化效果次之,B 的细化效果较弱。3 种细化变质剂添加至铋黄铜熔体中,均会产生高熔点的化合物或氧化物,这些质点在凝固过程中可以作为结晶核,极大地提高凝固过程的形核数量,从而产生细化晶粒的效果。但三者所产生的化合物或氧化物有差异,因此对晶粒细化的效果也有不同。B 会与铋黄铜熔体中微量的 P、Fe、Al 等杂质元素形成高熔点杂质相[14],凝固时结晶核会依附在杂质相上,形成非均匀形核,增大形核速度,从而细化铋黄铜晶粒。而 Ti 和 Zr 在熔体中会与铜形成 Cu_2Ti[15]、Cu_3Zr、Cu_5Zr[16]等难熔质点,这些质点可作为非均匀形核核心,增加晶核数量[17],起到细化铋黄铜的组织和晶粒的作用。由于熔体中杂质元素的含量很少,故 B 形成的形核质点要少于 Ti 和 Zr,因此细化效果最差。而 Ti 可以与 2 个铜原子结合,Zr 可以与 3 个铜原子结合,形成相同体积的难熔质点所需的细化剂数量不同,且 Ti 比 Zr 更加活泼,烧损速度大于 Zr,故导致 Zr 的细化效果比 Ti 略好。

表 2 铸态铋黄铜等轴晶宏观晶粒尺寸
Tab.2 Macrograin size diameter of the cast bismuth brass

Sample number	1	2	3	4
Grain size/mm	-	1.43	0.95	0.71

2.2 不同变质剂对铋黄铜金相组织的影响

图 3 给出了不同变质剂下铸态铋黄铜的显微组织。图中白色组织是铜 α 相,黄色或暗黄色组织是铜 β 相。由图 3a 可知,无添加变质剂的样品中双相组织分布不均匀,且 α 相生长方向没有明显规律,形

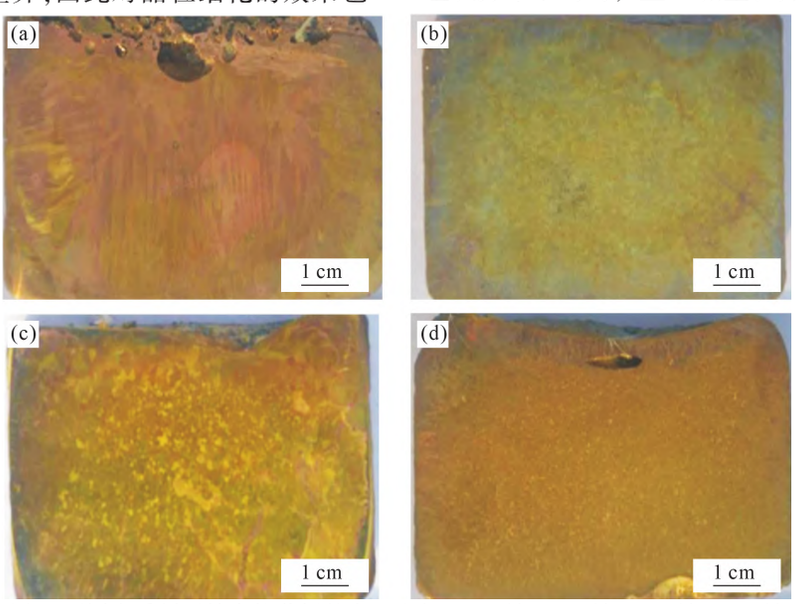


图 2 不同变质剂下铸态铋黄铜的宏观金相:(a) 1 号,(b) 2 号,(c) 3 号,(d) 4 号
Fig.2 Macroscopic metallography of as-cast bismuth brasses modified with different modifiers: (a) No.1, (b) No.2, (c) No.3, (d) No.4

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

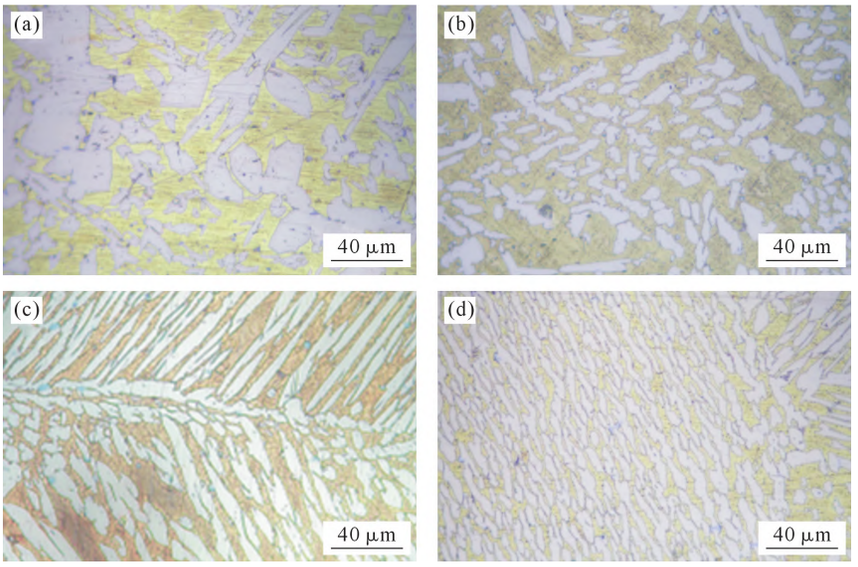


图 3　不同变质剂下铸态铋黄铜的显微组织：(a) 1 号，(b) 2 号，(c) 3 号，(d) 4 号

Fig.3　Microstructures of as-cast bismuth brasses modified with different modifiers: (a) No. 1, (b) No. 2, (c) No. 3, (d) No. 4

貌主要呈粗大的板条状、短片状。由图 3b 可知，加入 0.1%B 后，其 α 相分布较为均匀，但没有明显的择优取向，主要呈板条状、短片状，说明微量 B 元素的添加一定程度上起到了细化 α 相组织的效果。

由图 3c 可知，对于加入 0.1%Ti 的铸造铋黄铜，其 α 相以针片状形貌为主，生长方向出现了明显择优性，单侧晶粒中的 α 相生长方向趋近一致。但 α 相的尺寸与添加 0.1%B 样品中的没有明显差异。由图 3d 可知，添加 0.1%Zr 的组织是最细的，分布最均匀。与添加 0.1%Ti 的样品相似，在晶粒内部 α 相的生长方向一致较高，呈细条状。同样添加 0.1%的细化变质剂，对比 α 相的细化效果，添加 Zr 优于添加 Ti，而添加 Ti 略微优于添加 B。

2.3　不同变质剂对铋黄铜铋相形貌的影响

2.3.1　无添加变质剂铋黄铜组织分布

图 4 和表 3 分别给出了无添加变质剂铋黄铜的扫描电镜观察和能谱分析结果。结合图 4 的背散射电子 SEM 图及表 3 点扫能谱分析元素含量分析，验证了图 3 中白色组织为凸起的是 α 相，黄色或暗黄色组织是基体 β 相。由于铋的原子序数大，背散射电子对原子序数大的元素较为敏感，故图 4 中的亮色组织为铋相。从图中可以看得出，铋相大部分存在于 α 相之内，只有小部分存在于 β 相之内，且基本上都分布在 α 相与 β 相之间的边界处。

2.3.2　不同变质剂对铋相形状及尺寸的影响

图 5 给出了添加不同细化变质剂对铋黄铜铸态组织的 SEM 观察结果。整体来看，4 种样品中的 Bi 相主要为球形和近球形，且均没有观察到在晶界处连续分布的薄膜状 Bi 相。进一步比较铋相的尺寸和分布发现，无添加变质剂的铋相粒子尺寸较大，

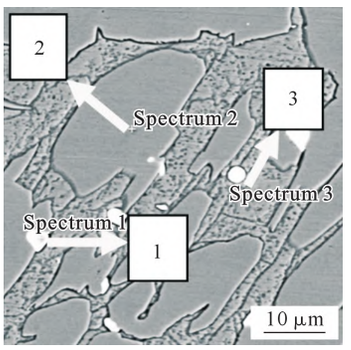


图 4　无添加变质剂铋黄铜 SEM 图

Fig.4　SEM image of bismuth brass without added modifier

表 3　点扫能谱分析元素含量

Tab.3 Elemental content analysed by point-scan energy spectroscopy

(mass fraction/%)

Spectrum number	Cu	Zn	Bi	Sn	P
1	6.54	5.35	87.91	0.13	0.07
2	64.36	35.46	0.00	0.14	0.04
3	57.19	42.70	0.06	0.01	0.04

分布最不均匀，部分铋相粒子靠的较近，有连成铋线形成薄膜状分布的趋势；0.1%B 的铋相粒子尺寸最小，分布最为均匀；0.1%Ti 的铋相尺寸最粗，分布较不均匀；0.1%Zr 的铋相粒子较粗，分布较为均匀。进一步放大观察，发现 Bi 相主要分布在 α 相和 β 相的相界处，少量 Bi 相被包裹在 α 相内。无添加变质剂样品中的铋相呈椭圆形、弧形；添加 0.1%B 样品中的铋相呈现圆形、椭圆形；0.1%Ti 的铋相大部分近似圆形；0.1%Zr 的铋相呈长条形、弧形。

在铸锭凝固时，铜基体首先形成 BCC 结构的 β 相，而低熔点的 Bi 相被包裹在铜基体中[18]。在冷却时随着锌在铜中固溶度的降低，β 相的铜基体在 700 ℃左右开始析出 FCC 结构的 α 相。当 α 相继续

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

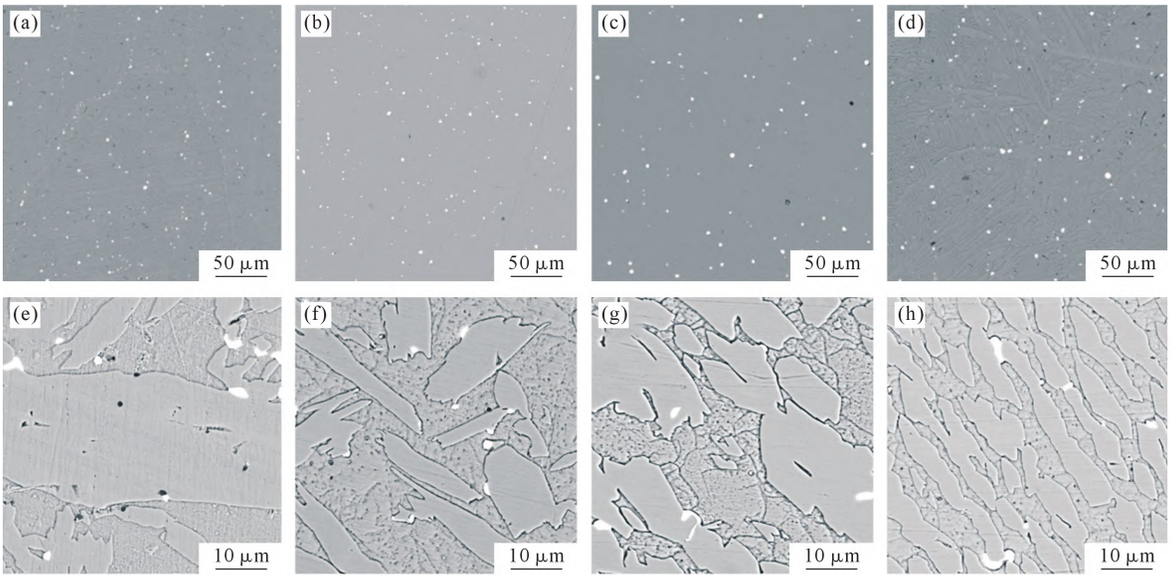


图 5 不同变质剂下铋黄铜 SEM 图:(a, e) 1 号,(b, f) 2 号,(c, g) 3 号,(d, h) 4 号

Fig.5 SEM images of bismuth brasses modified with different modifiers: (a, e) No. 1, (b, f) No. 2, (c, g) No. 3, (d, h) No. 4

生长遇到液态的 Bi 相时，通常只能绕过 Bi 相的位置。由于本实验合金的 Zn 含量为 41%,缓慢冷却至室温时 α 相的体积分数大于 β 相,所以最终样品中观察到的 Bi 相主要分布在 α 相和 β 相的相界处,少量的 Bi 相是被 α 相完全包裹。

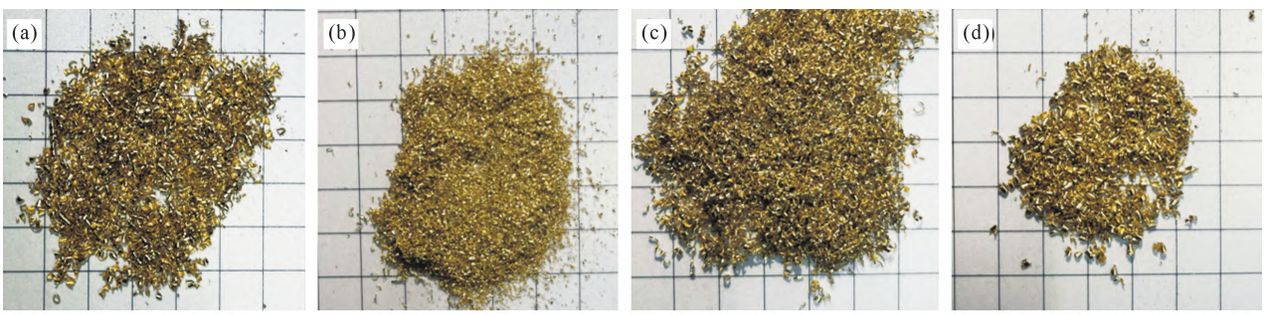
2.4 不同变质剂对切削性能的影响

我们对不同条件下制备的铸锭进行了切削性能试验,图 6 为不同样品的车屑。由图可见,无添加变质剂的车屑最为粗大，呈细线状+扇装+长卷装,尺寸大小分布不均匀；添加 0.1%B 的车屑最为细小,呈细线状,尺寸大小分布最为均匀;添加 0.1%Ti 的车屑较为粗大,开始呈卷状,尺寸大小分布较为均匀;添加 0.1%Zr 的车屑较为细小,呈扇状,尺寸大小分布较为均匀。车削性能排序为:添加 B>添加 Zr>添加 Ti>无添加变质剂。

铋相和 β 相是脆性相,铋黄铜车屑的断裂主要依靠铋相和 β 相[19-20],但铋相比 β 更脆,更容易断裂,铋相粒子数密度越高,则断裂概率越大,车屑尺寸越小;当铋相粒子数密度差距不大时,β 相数密度越大,则断裂概率越大,车屑尺寸越小。铋黄铜主要由 α 相和 β 相组成,且 β 相为母相,α 相在后续热处理中析出,并分割母相 β 相,故 β 相数密度与 α 相存在一定的联系,即 α 相的尺寸越小和分布越均匀,β 相的分布就越均匀,则 β 相数密度越大。由图 5a、e 可见,在整个 SEM 图区域内，无添加变质剂整体铋相密度较高,但是由于 α 相过于粗大，且铋相粒子基本位于 α 相和 β 相边界处,导致铋相密度分布不均,所以会出现车屑形状呈细线状+扇装+长卷装。由图 5b、f 可见,0.1% B 整体铋相密度最高,且 β 相比较细小,所以铋相分布最为细小弥散,车屑形状呈细线状,尺寸最小。由图 5c~d、g~h 可见,0.1%Ti 和 0.1%B 的试样整体铋相密度都比较稀疏，但由于 0.1%Ti 的 β 相比 0.1%Zr 更为粗大,故其车屑尺寸更大,呈卷状,而 0.1%Ti 的车屑尺寸更小,呈扇装。综上,铋黄铜的切削性能与 Bi 相数密度有关,即铋相尺寸越细小,分布越均匀,数密度越大,切削性能越好;同时也和 α 相的数密度有关,即当 Bi 相的分布情况相近时,α 相的尺寸越小、分布越均匀,则 β 相的分布越均匀,数密度越大,切削性能越好。

3 结论

(1)添加 0.1%的 B、Ti、Zr 对铸造铋黄铜都有较为显著的细化效果。其中添加 Zr 的细化效果优于 Ti,Ti



网格长宽均为1 cm

图 6 不同变质剂下铋黄铜车屑:(a) 1 号,(b) 2 号,(c) 3 号,(d) 4 号

Fig.6 Bismuth brass turnings with different modifiers: (a) No. 1, (b) No. 2, (c) No. 3, (d) No. 4

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的细化效果略微优于 B。同时 B、Ti、Zr 的添加对于晶内 α+β 双相组织也有细化效果，Zr 的细化效果优于 Ti，Ti 的细化效果略微优于 B。

(2)加入 B、Ti、Zr 有助于消除薄膜状分布的趋势，改善铋相的分布。其中 B 的效果优于 Ti 和 Zr。

(3)4 种样品切削性能排序为：B>Zr>Ti>无添加变质剂，影响切削性能的因素包括铋相和 β 相数密度。

参考文献：

[1] 胡斌. 无铅易切削黄铜的组织与性能研究[D]. 西安：西安理工大学，2018.
HU B. Research on microstructures and properties of lead free and free cutting brass[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.

[2] 彭海健，林亮华. 低压铸造铋黄铜阀体零件开裂原因分析[J]. 特种铸造及有色合金，2020, 40(12): 1357-1358.
PENG H J, LIN L H. Analysis of cracking causes of the low pressure casting bismuth-brass valve body part[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2020, 40(12): 1357-1358.

[3] 张建益，董晟全，梁艳峰. 变质处理对高锌无铅黄铜组织与性能的影响[J]. 铸造技术，2011, 32(2): 203-205.
ZHANG J Y, DONG M Q, LIANG Y F. Effect of modification on the microstructure and properties of lead-free brass with high zinc content[J]. Foundry Technology, 2011, 32(2): 203-205.

[4] 党龙. 细化处理对铸造无铅黄铜组织和性能的影响[D]. 西安：西安工业大学，2014.
DANG L. Effect of modification on the microstructure and properties of lead-free brass casting[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2014.

[5] 韩和兵，黄新民，吴玉程，等. 单相无铅 Bi 黄铜的组织和性能[J]. 材料热处理学报，2012, 33(12): 68-71.
HAN H B, HUANG X M, WU Y C, et al. Microstructure and properties of single-phase lead free Bi-containing brass[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(12): 68-71.

[6] 闫静. 环境友好无铅易切削黄铜的开发及性能研究[D]. 成都：四川大学，2007.
YAN J. The research and development of the environmental friendly unleaded free-cutting brass and its property investigation [D]. Chengdu: Sichuan University, 2007.

[7] 张琪，刘新宽，刘平，等. 稀土对再生铋黄铜组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金，2019, 39(4): 460-464.
ZHANG Q, LIU X K, LIU P, et al. Effects of rare earth on microstructure and properties of regenerated Bi-brass[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(4): 460-464.

[8] 覃静丽. 无铅易切削铋黄铜的制备及腐蚀、切削性能研究[D]. 长沙：中南大学，2008.
QIN J L. Preparation and corrosion and cutting properties of lead-free free-cutting bismuth brasses[D]. Changsha: Central South University, 2008.

[9] 刘彦. 微量元素 Sn 对含 Bi、Mg 无铅易切削黄铜组织与性能的影响[D]. 长沙：中南大学，2011.
LIU Y. Effect of trace element Sn on the organization and properties of lead-free free-cutting brasses containing Bi and Mg[D]. Changsha: Central South University, 2011.

[10] 张旭东，刘平，刘新宽，等. Al 和 Sn 对再生铋黄铜腐蚀及切削性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金，2019, 39(12): 1388-1392.
ZHNAG X D, LIU P, LIU X K, et al. Effects of Al and Sn on corrosion and cutting performance of regenerated Bi brass[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(12): 1388-1392.

[11] 程巨强，刘志学，倪自飞，等. 稀土和硼细化处理对铸造铅黄铜组织和脱锌腐蚀性能的影响[J]. 铸造，2008, 57(4): 378-380.
CHENG J Q, LIU Z X, NI Z F, et al. Effects of RE and boron refining on microstructure and dezincification corrosion properties of casting lead brass[J]. Foundry, 2008, 57(4): 378-380.

[12] 刘明洋. H68 黄铜的晶粒细化及对组织和性能的影响[D]. 大连：大连理工大学，2017.
LIU M Y. Effect of grain refinement on the microstructure and properties of H68 brass alloy[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.

[13] 刘志学，程巨强，倪自飞，等. 新型铜合金细化添加剂对铸造铅黄铜变质处理效果的影响[J]. 铸造，2009, 58(9): 891-893.
LIU Z X, CHENG J Q, NI Z F, et al. Effect of new type copper alloys refinement additive on modification of cast lead brass[J]. Foundry, 2009, 58(9): 891-893.

[14] 倪自飞，程巨强，刘志学. B 变质对 HPb59-1 黄铜组织细化的影响[J]. 特种铸造及有色合金，2007, 27(1): 70-72.
NI Z F, CHENG J Q, LIU Z X. Effects of B modification on microstructure of HPb59-1 brass[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2007, 27(1): 70-72.

[15] 程巨强，刘志学，胡垚. Ti 变质对 ZCuZn40Pb2 组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金，2009, 29(1): 91-93, 16.
CHENG J Q, LIU Z X, HU Y. Effects of Ti modification on as-cast microstructure and mechanical properties of ZCuZn40Pb2 alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2009, 29(1): 91-93, 16.

[16] 程巨强，刘志学，胡垚. 锆变质处理对铸造 ZCuZn40Pb2 合金铸态组织和性能的影响[J]. 铸造，2008, 57(8): 780-782.
CHENG J Q, LIU Z X, HU Y. Effects of zirconium modification on as-cast microstructure and mechanical properties of ZCuZn40Pb2 alloy[J]. Foundry, 2008, 57(8): 780-782.

[17] 钱小兵，陈乐平，周全. 铜合金组织细化研究现状[J]. 铸造技术，2012, 33(9): 1022-1024.
QIAN X B, CHEN L P, ZHOU Q. Present research status on microstructure refinement of copper alloy[J]. Foundry Technology, 2012, 33(9): 1022-1024.

[18] 薛松柏，钱乙余，胡晓萍，等. 铋在银基钎料中的行为和影响[J]. 焊接学报，1998(4): 9-14.
XUE S B, QIAN Y Y, HU X P, et al. Behavior and effects of bismuth in silver-based brazing materials[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1998(4): 9-14.

[19] 何勤求，谢邵辉，夏卿坤，等. 铋含量对黄铜切削性能的影响[J]. 轻工科技，2016, 32(2): 52-53, 58.
HE Q Q, XIE S H, XIA Q K, et al. Effect of bismuth content on the cutting performance of brasses[J]. Light Industry Science and Technology, 2016, 32(2): 52-53, 58.

[20] 庞晋山，肖寅昕. 无铅易切削黄铜的研究[J]. 广东工业大学学报，2001(3): 63-66.
PANG J S, XIAO Y X. Study of nonleaded easy-cutting brass[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2001(3): 63-66.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net