

Bi 对铝基滑动轴承合金力学及抗咬合性能的影响

李聪敏¹ 尹延国¹ 曹 刚¹ 许 明¹ 张国涛² 马志伟³ 刘 聪¹ 李蓉蓉¹

(1.合肥工业大学机械工程学院; 2.安徽工业大学机械工程学院; 3.合肥波林新材料股份有限公司)

摘 要 以 Al-Cu-Mg 合金为基体,研究了添加低熔点组元 Bi 后合金的微观组织、力学性能及抗咬合性能。采用 XRD 分析了材料的物相组成,利用 SEM 和 EDS 观察了合金的微观组织、断口形貌、磨损界面形貌。结果发现,添加低熔点组元 Bi 后,合金中出现球状富 Bi 相,当富 Bi 相颗粒较小时,其基本由 Mg_3Bi_2 相组成;当富 Bi 相颗粒较大时,其以 Mg_3Bi_2 为核,外部包裹一层 Bi,形成了核壳组织。抗拉强度及硬度检测发现,添加 2.6% 的 Bi 后合金抗拉强度降低了 10%,伸长率降低了 21%,硬度降低了 8.5%,说明 Bi 对合金力学性能具有一定的削弱作用。摩擦磨损试验发现,添加 Bi 后合金抗咬合能力明显提升,承载力从 1 700 N 增加到 5 500 N,且在磨损表面发现带状富 Bi 相涂覆在磨损表面,起到减摩自润滑作用。

关键词 低熔点组元;富 Bi 相; Mg_3Bi_2 相;核壳组织;自润滑

中图分类号 TG146.21;TG113.25

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.09.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effect of Bi on Mechanical and Anti-seizure Properties of Al-based Sliding Bearing Alloy

Li Congmin¹, Yin Yanguo¹, Cao Gang¹, Xu Ming¹, Zhang Guotao², Ma Zhiwei³, Liu Cong¹, Li Rongrong¹

(1.School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology; 2.School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology; 3.Hefei Bolin Advanced Materials Co., Ltd.)

Abstract: The microstructure, mechanical properties and anti-seizure properties of Al-Cu-Mg alloy with low melting point component Bi were investigated. The phase composition of the alloy was observed by XRD, and the microstructure, fracture morphology and wear surface of the alloy were observed by SEM and EDS. The results reveal that with the Bi addition of 2%, the distribution of spherical Bi-rich phase appears in the alloy, which is basically composed of Mg_3Bi_2 with small size. However, the core/shell structure with Mg_3Bi_2 core and Bi shell was observed at Bi-rich phase particles with large size. The tensile strength, elongation and hardness of the alloy are decreased by 10%, 21% and 8.5%, respectively, after adding 2.6% Bi, indicating that Bi has a certain weakening effect on the mechanical properties of the alloy. Friction and wear experiments expound that the anti-seizure ability of the alloy is greatly improved after adding Bi, where the load bearing capacity is increased from 1 700 N to 5 500 N. Moreover, the banded Bi-rich phase is smeared on the worn surface, playing a role of self-lubrication.

Key Words: Low Melting Point Component, Bi-rich Phase, Mg_3Bi_2 Phase, Core/Shell Structure, Self-lubrication

随着新能源汽车、发动机、航空航天等领域对滑动轴承日益提高的性能要求,具有高承载、轻量化、低摩擦因数及优异的抗咬合性能的铝基滑动轴承合金成为研究的热点^[1]。Al-Cu-Mg 合金具有较高的抗拉强度、韧性和疲劳强度,良好的耐热性、加工性能及可焊接性,目前被广泛应用于航空航天、发动机及兵器工业中,是铝基滑动轴承的首选基体材料^[2~4]。除了较高的强度性能,滑动轴承需要具有优良的抗咬合性能,防止磨损表

面因严重的粘着和焊合导致磨损失效。在正常工作条件下,滑动轴承与对磨件间具有完整的润滑油膜,阻止摩擦界面间直接接触。但是在重载、高温或供油不足时,润滑油膜因过载而破裂,导致摩擦界面剧烈磨损并咬合,最终导致磨损失效^[5]。

为了解决滑动轴承在边界润滑条件下易咬合问题,研究者在合金中添加低熔点组元(Sn、Pb 等),可有效提高其摩擦磨损性能^[6~8]。在摩擦磨损过程中,Al-Cu-

收稿日期:2021-02-25;修改稿收到日期:2021-04-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575151);安徽省自然科学基金资助项目(1908085QE195)

第一作者简介:李聪敏,男,1988 年出生,博士研究生,合肥(230009),E-mail:licongmin_ahut@163.com

通信作者:尹延国,男,1964 年出生,教授,合肥(230009),E-mail:abyin@sina.com

引用格式:李聪敏,尹延国,曹刚,等. Bi 对铝基滑动轴承合金力学及抗咬合性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(9): 1 069-1 073.

LI C M, YIN Y G, CAO G, et al. Effect of Bi on mechanical and anti-seizure properties of Al-based sliding bearing alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(9): 1 069-1 073.

Mg 合金承载对磨件挤压及剪切作用,提升合金的承载能力;低熔点组元在摩擦热和挤压作用下熔化并析出至摩擦表面,防止材料间剧烈磨损和咬合,起到固体自润滑作用^[9,10]。然而,Pb 由于对环境有害而逐渐被取代^[11],网状分布的 Sn 严重削弱晶粒间结合强度而应用受限^[12],因此开发新型高强、抗咬合性能好的铝基轴承合金成为研究热点。与 Pb 类似,Bi 也是低熔点组元,呈球状分布在 Al 基体中,对 Al 晶粒间结合力削弱作用较小。同时,Bi 属于环保材料,对环境影响较小,且硬度(HB)要显著高于 Pb(Al 为 245,Pb 为 38.3,Bi 为 94.2)^[8],是铝基滑动轴承合金的首选材料。REYES R V 等^[13]采用定向凝固工艺制备出 Bi 相均匀分布的 Al-3.2Bi-3.0Cu 合金,利用环块摩擦磨损试验机研究了合金的摩擦磨损性能。研究发现,磨损表面具有富 Bi 相自润滑层,阻止了金属材料的直接接触,避免发生粘着磨损。KAWACHI T 等^[14]研究发现,在磨损过程中 Bi 相涂覆在磨损表面,并形成金字塔状的富 Bi 相自润滑层,改善了表面材料的润湿性能,提高了材料的抗咬合性能。本课题以高强度 Al-Cu-Mg 合金为基体,加入适量 Bi 后,研究了合金的微观组织、力学和抗咬合性能,分析了 Bi 提高 Al-Cu-Mg 合金抗咬合性能的机理,为铝基高强抗咬合自润滑合金研究提供参考。

1 试验方法

1.1 试验材料

以高纯 Al、Cu、Bi、Al-Mg 中间合金为原材料分别制备 Al-4.5Cu-0.6Mg 和 Al-4.5Cu-0.6Mg-2.6Bi 合金铸锭,合金成分由 SPECTROMAXX 成分分析仪测得,见表 1。

表 1 Al-4.5Cu-0.6Mg-2.6Bi 合金化学成分

Tab.1 Chemical composition of Al-4.5Cu-0.6Mg-2.6Bi alloy %						
wt%						
Cu	Bi	Mg	Si	Mn	Zr	Al
4.51	2.6	0.61	0.07	0.05	0.03	余量

1.2 试验过程

首先,将纯 Al 加入坩埚中升温至 800 ℃,待 Al 完全熔化后依次加入适量 Cu 块、Al-Mg 中间合金和 Bi 块,保温 30 min 后用石墨搅拌器搅拌 15 min,搅拌器转速为 200 r/min,搅拌过程中在坩埚底部通入氩气除气 15 min。随后,采用石墨勺去除熔体表面浮渣,保温 15 min 后将熔体倒入模具中。最后,将铸件在 495 ℃下固溶 6 h,在 200 ℃时效 4 h,在距离铸件底部 10 mm 处截取试样,精磨和抛光后观察显微组织。图 1 为拉伸试样和摩擦磨损试验示意图。

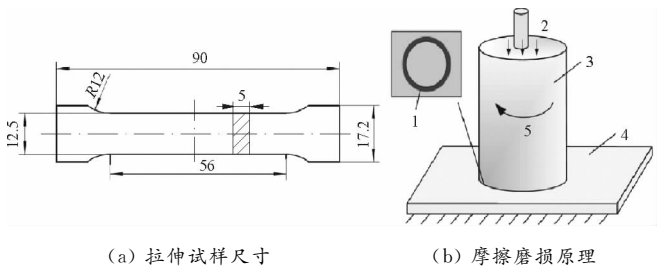


图 1 拉伸试样和摩擦磨损试验示意图
Fig.1 Schematic diagram of tensile and friction wear specimens
1.磨痕 2.负荷 3.上试样 4.接触试样 5.旋转方向

1.3 试验分析

采用 JSM-6490LV 型钨灯丝扫描电镜(SEM)观测试样及磨痕微观结构,采用 X 射线能谱分析(EDS)检测材料元素组成;利用 WDW-100M 型万能试验机检测合金的抗拉强度;利用 HB-3000 型布氏硬度计测量合金的硬度;采用 HDM-20 型端面摩擦磨损试验机测量合金的摩擦因数,其中摩擦形式见图 1b。摩擦副为 Cr12,经淬火后硬度(HRC)达到 55~60,对磨面是尺寸为 34 mm×34 mm×5 mm 的平板,其表面粗糙度 Ra=0.6 μm。试样为 Al-4.5Cu-1.2Mg-xBi 合金,直径为 46 mm,厚度为 5 mm,表面粗糙度 Ra=0.6 μm。试验初始载荷为 100 N,转速为 1.6 m/s,每隔 2 min 加载 100 N,采用 32 号抗磨液压油润滑,当摩擦因数急剧增大时停止试验。

2 试验结果与分析

2.1 Al-Cu-Mg-Bi 合金微观组织

图 2 为 Al-Cu-Mg 合金和 Al-Cu-Mg-Bi 合金 XRD 分析。可以看出,Al-Cu-Mg 合金中主要含有 Al、Al₂Cu 和 Al₂CuMg 相,Al-Cu-Mg-Bi 合金除上述相外,还发现 Mg₃Bi₂ 相。由于金属元素间电负性相差越大,两者越容易组成金属间化合物。Mg、Al、Cu、和 Bi 的电负性分别为 1.31、1.61、1.90 和 2.02,而且 Mg 元素比较活泼,容易与其他元素形成金属间化合物,因此当合金中存在 Bi 时,会形成金属间化合物 Mg₃Bi₂^[15]。

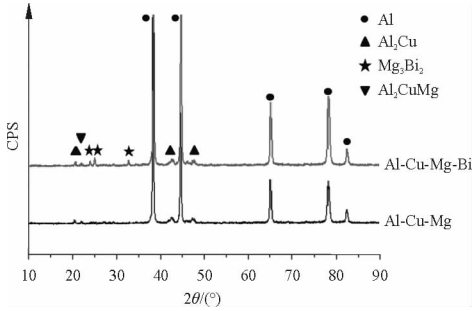


图 2 Al-Cu-Mg 合金和 Al-Cu-Mg-Bi 合金的 XRD 图
Fig.2 XRD analysis of Al-Cu-Mg and Al-Cu-Mg-Bi alloys

图 3 为 Al-Cu-Mg 合金和 Al-Cu-Mg-Bi 合金的 SEM 图。由图 3a 可见,黑色物质为 Al 基体,呈网状分布在晶界间的灰白色物质为 Al_2Cu 相。富 Bi 相以球状分布在合金中,尺寸为 $5\sim 20\ \mu\text{m}$,见图 3b。经 EDS 检

测发现,颗粒较小的富 Bi 相由 Mg_3Bi_2 相组成,而颗粒较大的富 Bi 相形成了由 Mg_3Bi_2 核和 Bi 壳组成的核壳结构,见图 3c、图 3d。由于 Bi 相含量极低,因此 XRD 未检测到 Bi 相存在。

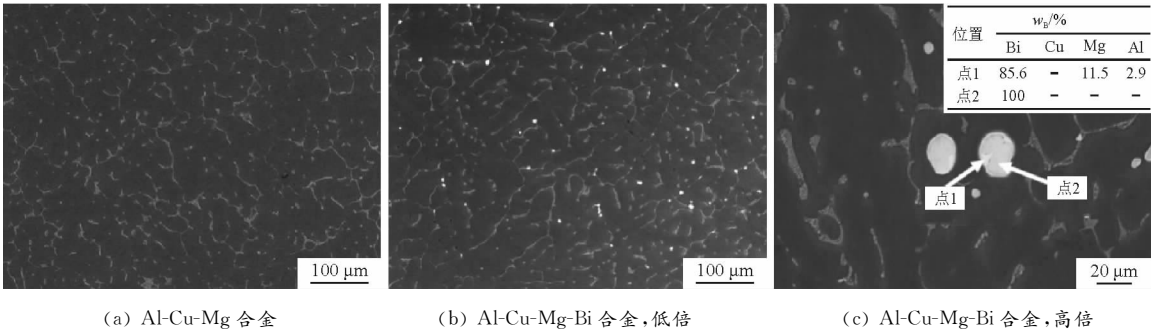


图 3 Al-Cu-Mg 和 Al-Cu-Mg-Bi 合金的微观组织

Fig.3 The microstructure of Al-Cu-Mg and Al-Cu-Mg-Bi alloys

2.2 Al-Cu-Mg-Bi 合金硬度及强度

图 4 为 Al-Cu-Mg 合金和 Al-Cu-Mg-Bi 合金的力学性能。可以看出,Al-Cu-Mg、Al-Cu-Mg-Bi 合金的抗拉强度、伸长率、硬度(HB)分别为 345 MPa、7.0%、129 和 311 MPa、5.5%、118,说明低熔点组元 Bi 对合金强度及硬度具有一定的削弱作用。

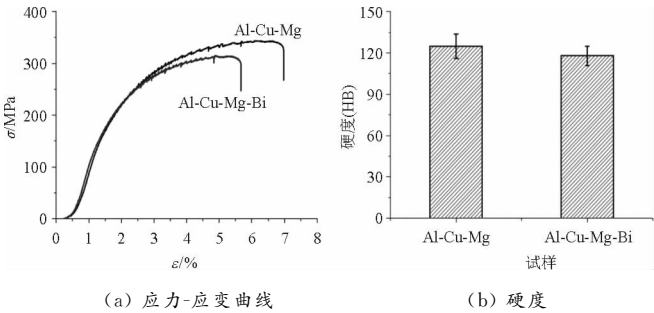


图 4 Al-Cu-Mg 合金和 Al-Cu-Mg-Bi 合金的力学性能

Fig.4 Mechanical properties of Al-Cu-Mg and Al-Cu-Mg-Bi alloys

图 5 为 Al-Cu-Mg 合金和 Al-Cu-Mg-Bi 合金拉伸试样断口形貌。可以看出,Al-Cu-Mg 合金断口中分布着均匀、细小的韧窝,说明合金具有较强的塑性,抗拉强度也较高。Al-Cu-Mg-Bi 合金中也具有较多韧窝,但尺

寸大小不一,很多韧窝中分布有断裂的富 Bi 相颗粒。
富 Bi 相属于软质低熔点组元,其强度和硬度远低于 Al-Cu-Mg 合金基体。在拉伸过程中,随着应力增加,材料中富 Bi 相首先达到承受极限而断裂,形成裂纹源。在拉应力作用下,裂纹沿晶界拓展并与其他裂纹连通,最终导致材料整体断裂。因此,当 Al-Cu-Mg 合金中存在一定的 Bi 时,合金抗拉性能会降低。

2.3 摩擦磨损性能

图 6 为 Al-Cu-Mg 和 Al-Cu-Mg-Bi 合金摩擦因数随载荷变化曲线。可以看出,载荷为 $0\sim 1\ 000\ \text{N}$ 时,摩擦副摩擦因数从 0.16(Al-Cu-Mg-Bi)、0.14(Al-Cu-Mg)降低到 0.03 左右后开始平稳,Al-Cu-Mg 合金摩擦副在试验加载到 1 700 N 时,摩擦因数开始急剧上升,载荷升为 2 100 N 时摩擦因数超过 0.2,摩擦试样磨损失效;Al-Cu-Mg-Bi 合金摩擦副当载荷升至 2 300~2 700 N 时,摩擦因数有一波动变化过程,从 0.032 增加到 0.075 后逐渐下降并维持在 0.041 左右平稳运行,载荷达到 5 500 N 后摩擦副摩擦因数急剧上升,磨损失效。因此,Al-Cu-Mg 和 Al-Cu-Mg-Bi 合金的端面摩擦磨损承受极限载荷分别为 1 700 N 和 5 500 N。

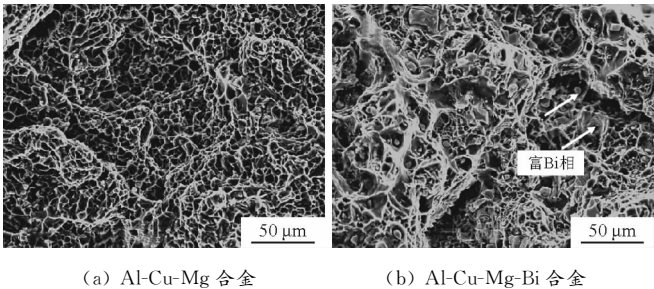


图 5 Al-Cu-Mg 合金和 Al-Cu-Mg-Bi 合金拉伸试样断口形貌

Fig.5 The fracture morphologies of Al-Cu-Mg and Al-Cu-Mg-Bi alloys

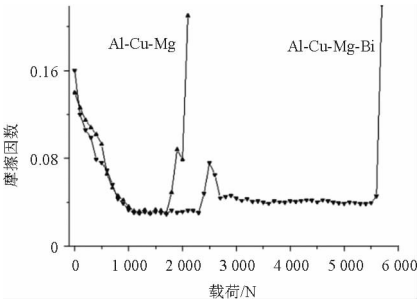


图 6 Al-Cu-Mg 和 Al-Cu-Mg-Bi 合金摩擦磨损曲线

Fig.6 The friction wear curve of Al-Cu-Mg and Al-Cu-Mg-Bi alloys

图 7 为 Al-Cu-Mg 和 Al-Cu-Mg-Bi 合金磨损形貌及 EDS 分析结果。可以看出, Al-Cu-Mg 合金磨痕微观上的特征主要为沿滑动方向的犁沟, 表面分布有较多 $2\ \mu\text{m}$ 左右的 Al_2Cu 颗粒, 为典型的沿滑动方向发生磨粒

磨损的迹象。犁沟内部观察到材料剥落迹象, 表明在形成犁沟的过程中, 在与对磨面相对滑动的犁沟内发生了材料分离。Al-Cu-Mg-Bi 合金磨痕表面出现细小犁沟和带状白色物质, 经 EDS 检测发现白色物质为富 Bi

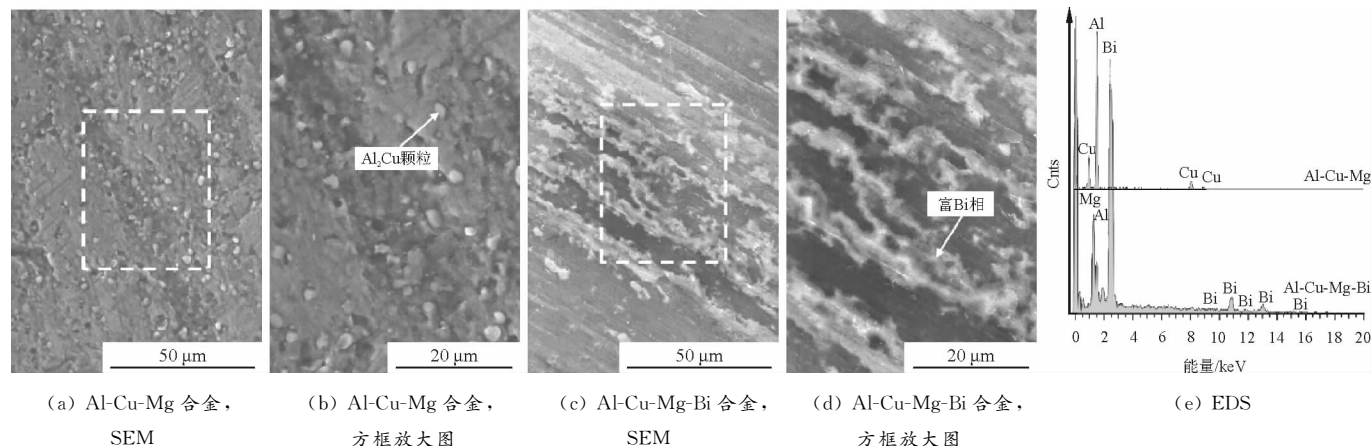


图 7 Al-Cu-Mg 和 Al-Cu-Mg-Bi 合金磨损形貌及 EDS 分析

Fig.7 Morphology of worn surfaces and EDS analysis of Al-Cu-Mg and Al-Cu-Mg-Bi alloys

相。

磨损一般经历表面接触(跑和)、表面破坏和磨料脱落过程^[16,17]。在表面跑和阶段, 对磨件粗糙峰相互接触、剪切并最终被磨平, 有利于润滑油铺展和维持, 因此在磨损开始的初始阶段摩擦因数急剧下降, 见图 6。对于 Al-Cu-Mg 合金, 分布在基体中的 Al_2Cu 颗粒具有较高的硬度, 在摩擦磨损过程中可以承受载荷。但是, 随着载荷增加, 摩擦界面逐渐进入边界润滑状态, 在此状态下 Al_2Cu 颗粒容易从基体中剪切、剥落并沿滑动方向运动, 形成剥落坑和犁沟, 破坏平整的磨损表面和润滑油膜, 使得基体材料裸露在磨损界面中, 在挤压作用下材料剪切严重并最终咬合, 导致磨损失效, 见图 7a、图 7b。

当基体中含有 Bi 时, 由软质相 Mg_3Bi_2 和低熔点组元 Bi 组成的富 Bi 相在磨损过程中起到了自润滑作用。一方面, 由于合金硬度及强度较低, 从基体中剪切剥落的 Al_2Cu 颗粒在挤压作用下容易嵌入磨损表面, 对磨损表面破坏作用小, 因此未发现较大较深的犁沟; 另一方面, 在剧烈磨损过程中, 富 Bi 相受到剧烈挤压、剪切和较高摩擦热作用下容易脱落, 然后沿运动方向挤碎并涂覆在磨损表面, 保护了基体材料, 稳定了润滑油膜, 起到减摩自润滑作用。载荷为 $2\ 300\sim 2\ 700\ \text{N}$ 时, 摩擦副摩擦因数出现的波动过程见图 6, 表明此时的试验载荷超过润滑油膜承载极限, 油膜破裂导致摩擦因数升高, 由于富 Bi 相的减摩自润滑作用, 摩擦副间的润滑油膜逐渐修复与完善而形成液固复合润滑膜, 使摩擦副摩擦因数又逐渐下降并趋于稳定, 原部分流体润滑区域转变为自润滑区域, 因此摩擦因数又趋于稳定。

3 结 论

(1) Al-Cu-Mg-Bi 合金中发现球状富 Bi 相分布。当富 Bi 相颗粒较小时, 其基本由 Mg_3Bi_2 相组成; 当富 Bi 相颗粒较大时, 其以 Mg_3Bi_2 为核, 外部包裹一层 Bi, 形成了核壳组织。

(2) Al-Cu-Mg 合金中添加 2.6% 的 Bi 后合金抗拉强度、伸长率和硬度等性能降低, 说明低熔点组元对合金力学性能具有削弱作用。

(3) Al-Cu-Mg 合金中添加 Bi 后抗咬合能力大大提升, 承载力从 $1\ 700\ \text{N}$ 增加到 $5\ 500\ \text{N}$, 且在磨损表面发现带状富 Bi 相涂覆在磨损表面, 起到自润滑作用。

参 考 文 献

- [1] BRAVO A E, DURAN H A, JACOBO V H, et al. Towards new formulations for bearing alloys[J]. Wear, 2013, 302(1-2): 1 528-1 535.
- [2] KAMP N, GAO N, STARINK M J, et al. Influence of grain structure and slip planarity on fatigue crack growth in low alloying artificially aged 2xxx aluminium alloys[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(5): 869-878.
- [3] WILLIAMS J C, STARKE A E. Progress in structural materials for aerospace systems[J]. Acta Materialia, 2003, 51(19): 5 775-5 799.
- [4] RAVINDRANATHAN S P, KASHYAP K T, KUMAR S R, et al. Effect of delayed aging on mechanical properties of an Al-Cu-Mg alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2000 (9): 24-27.
- [5] GEBRETSADIK D W, HARDELL J, PRAKASH B. Seizure behaviour of some selected Pb-free engine bearing materials under lubricated condition[J]. Tribology International, 2017, 111: 265-275.

钢锭中缩孔与缩松缺陷的研究现状及进展

俞占扬¹ 张 慧¹ 王明林¹ 王学兵¹ 张开发¹ 王 飞²

(1.钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心; 2.抚顺特钢股份有限公司技术中心)

摘 要 近几十年来,研究者对钢锭铸造过程中缩松和缩孔缺陷进行了预测和控制研究。阐述了钢锭中缩松和缩孔缺陷分布形式和形成机理,总结了多种预测缩松、缩孔分布的判据,介绍了缩松、缩孔缺陷的控制措施。对钢锭缩松、缩孔形成判据的发展进行了展望,并对缩松、缩孔缺陷的控制难题进行了归纳。

关键词 钢锭;凝固;缩松;缩孔;判据

中图分类号 TG245;G353.11 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.09.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Status and Progress of Shrinkage Porosity and Cavity Defects in Steel Ingots

Yu Zhanyang¹, Zhang Hui¹, Wang Minglin¹, Wang Xuebing¹, Zhang Kaifa¹, Wang fei²

(1.National Engineering and Research Center for Continuous Casting Technology, Center Iron and Steel Research Institute; 2.Fushun Technology Center, Fushun Special Steel Group Co., Ltd.)

Abstract: In recent decades, the prediction and control of shrinkage porosity and cavity defects in ingot were investigated. The distribution forms and formation mechanism of shrinkage porosity and cavity defects in steel ingot were expounded. Various criteria to predict the distribution of shrinkage porosity and cavity was summarized in detail, and the control measures were introduced. The development of the criterion of shrinkage porosity and cavity in ingot casting was prospected, and the issues of controlling shrinkage porosity and cavity defects were concluded.

Key Words: Steel Ingot, Solidification, Shrinkage Porosity, Cavity, Criteria

收稿日期:2021-01-14;修改稿收到日期:2021-02-22

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0304802)

第一作者简介:俞占扬,男,1988 年出生,博士研究生,北京(100081),E-mail:15842028530@163.com

引用格式:俞占扬,张慧,王明林,等. 钢锭中缩孔与缩松缺陷的研究现状及进展[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(9):1 073-1 078.

YU Z Y, ZHANG H, WANG M L, et al. Research status and progress of shrinkage porosity and cavity defects in steel ingots[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(9):1 073-1 078.

[6] LU Z C, GAO Y, ZENG M Q, et al. Improving wear performance of dual-scale Al-Sn alloys: the role of Mg addition in enhancing Sn distribution and tribo-layer stability[J]. Wear, 2014, 309 (1-2): 216-225.

[7] PATHAK J P, MOHAN S. Tribological behaviour of conventional Al-Sn and equivalent Al-Pb alloys under lubrication[J]. Bulletin of Materials Science, 2003, 26: 315-320.

[8] FREITAS E S, SILVA A P, SPINELLI J E, et al. Inter-relation of microstructural features and dry sliding wear behavior of monotectic Al-Bi and Al-Pb alloys[J]. Tribology Letters, 2014, 55: 111-120.

[9] YADAV S, KUMAR A, BISWAS K. Wear behavior of high entropy alloys containing soft dispersoids (Pb, Bi)[J]. Materials Chemistry and Physics, 2018, 210: 222-232.

[10] CUI H B, GUO J J, SU Y Q, et al. Effect of Cr addition on microstructure and wear resistance of hypomonotectic Cu-Pb alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2007, A448(1-2): 49-55.

[11] GEBRETSADIK D W, HARDELL J, PRAKASH B. Friction and wear characteristics of different Pb-free bearing materials in mixed and boundary lubrication regimes[J]. Wear, 2015, 340-341: 63-72.

[12] BHAT J, PINTO R, SATYANARAYA N. A review on effect of alloying elements and heat treatment on properties of Al-Sn alloy[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 35(3): 340-343.

[13] REYES R V, PINOTTI V E, AFONSO C R M, et al. Processing, as-cast microstructure and wear characteristics of a monotectic Al-Bi-Cu alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28: 1 201-1 212.

[14] KAWACHI T, TAKAYANAGI S, ASAKURA H, et al. Development of lead free overlay for three layer bearings of highly loaded engines[A]. SAE Technical Paper[C]. Detroit, Michigan, 2004.

[15] WANG B, CHEN X H, PAN F S, et, al. Effects of Sn addition on microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Al alloys[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2017, 27(6): 695-702.

[16] ALFAIA M A, OLIVEIRA R, LIMA T S, et al. Effects of cooling rate and microstructure scale on wear resistance of unidirectionally solidified Al-3.2% Bi-(1~3) % Pb alloys[J]. Materials Today Communications, 2020, 25: 101 659.

[17] GEBRETSADIK D W, HARDELL J, PRAKASH B. Friction and wear characteristics of different Pb-free bearing materials in mixed and boundary lubrication regimes[J]. Wear, 2015, 340-341: 63-72.

(编辑:栗万仲)