

制备工艺对铝基复合材料活塞性能的影响

徐 英 陈大辉 张 将 洪晓露 朱鸿磊 刘永强 周沛瑜 彭银江
(中国兵器科学研究院宁波分院)

摘 要 采用复合热处理工艺,结合水冷模具和合金超声技术,研究了复合热处理工艺与特种铸造技术对 TiB₂ 颗粒增强铝基复合材料活塞力学性能的影响。结果表明,复合热处理技术可以明显改善复合材料的力学性能,并获得了较优热处理工艺;水冷模具可以提高材料的凝固速率,细化晶粒,有效提高活塞试样的力学性能,制备的活塞试样具有较好的室温和 350 ℃ 高温力学性能;超声处理可以改善 TiB₂ 颗粒的分布和晶相组织,与未施加超声相比,活塞的高温抗拉强度提升了 16.3%。

关键词 颗粒增强;铝基复合材料;超声技术;热处理

中图分类号 TG292;TB333

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.08.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Preparation Process on the Properties of Aluminum Matrix Composite Piston

Xu Ying, Chen Dahui, Zhang Jiang, Hong Xiaolu, Zhu Honglei, Liu Yongqiang, Zhou Peiyu, Peng Yinjiang
(Ningbo Branch of China Academy of Ordnance Sciences)

Abstract: The influence of compound heat treatment and special casting on the mechanical properties of TiB₂ particle reinforced aluminum-based composite was investigated by compound heat treatment process, combined with the water-cooled die and ultrasonic treatment technology. The results indicate that compound heat treatment technology can significantly improve the mechanical properties of composites, and optimal heat treatment process is presented. Water-cooled molds can raise the solidification speed of materials and refine grain, effectively improving the mechanical properties of the piston specimens, which exhibits desirable room temperature and mechanical properties at 350 ℃. Ultrasound treatment can improve the distribution of TiB₂ particles and crystalline phase, increasing the high-temperature tensile strength by 16.3% compared with the one without ultrasound treatment.

Key Words: Particle Enhancement, Aluminum Matrix Composites, Ultrasonic, Heat Treatment

随着高速增压柴油机应用日趋广泛,对活塞的性能要求越来越高,单一铝合金活塞已难以承受高功率柴油机恶劣的工况,急需开发具有更高性能的活塞产品。目前在铝合金活塞中,应用较多的是 Al-Si 合金^[1],其中共晶 Al-Si 合金因其拥有较优的铸造性能、流动性能、高温性能等而被大量应用^[2],但是其力学性能、耐高温性能等提升难度很大^[3]。

随着铸造工艺、热处理工艺技术的发展,铝基复合材料应用技术逐渐成熟,其应用场景已扩展到活塞行业。铝基复合材料按增强材料类型可分为连续纤维增强铝基复合材料、非连续增强铝基复合材料、颗粒增强复合材料、自身增强铝基复合材料等。其中,颗粒增强铝基复合材料因有较好的铸造特性,易于与铝液混合、价格低廉、制备流程简单^[4,5]等特点,适用于制备复杂形状零件,特别适用于活塞制造,可用于整体活塞增强

或者局部增强活塞环槽、活塞顶部等部位,用于提升活塞的力学性能和抗磨损性能^[6]。目前用做颗粒增强铝基复合材料强化相的陶瓷颗粒主要有 TiC、TiB₂、ZrB₂、AlN、Al₂O₃、SiC、ZrC 等,其具有高强度、高硬度以及优异的抗氧化性能,其中 TiB₂ 颗粒具有较高的弹性模量和较低的密度,从而综合力学性能较好^[7]。

本课题选用 TiB₂ 颗粒作为增强相,研究复合热处理工艺、水冷模具技术和合金超声技术对 TiB₂ 颗粒增强铝基复合材料活塞性能的影响,以期推动 TiB₂ 颗粒增强铝基复合材料在高功率柴油机活塞上的应用。

1 试验材料及方法

1.1 试样制备及处理

采用电阻炉熔炼,坩埚为石墨-碳化硅坩埚,原材料

收稿日期:2022-01-23;修改稿收到日期:2022-03-02

基金项目:宁波市重大专项基金资助项目(2019B10099)

第一作者简介:徐英,女,1969 年出生,副研究员,浙江宁波(315010),E-mail:1252487314@qq.com

引用格式:徐英,陈大辉,张将,等. 制备工艺对铝基复合材料活塞性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(8):1 024-1 027.

XU Y, CHEN D H, ZHANG J, et al. Effects of preparation process on the properties of aluminum matrix composite piston[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(8):1 024-1 027.

采用 6% 的(质量分数) TiB₂ 增强铝基复合材料锭、Al-5Cr、Al-5Er、Al-10Zr、Al-10V、Al-20Fe 中间合金和纯镁(Mg 质量分数≥99.97%)。

熔炼过程: TiB₂/Al 复合材料锭升温、Al-20Fe 熔化→分次加入 Al-5Cr、Al-5Er 中间合金→800 ℃下精炼→升温至 800~820 ℃,加入 0.6% 的 ZS-ABP10 磷变质处理→加入 Al-10Zr、Al-10V 中间合金和纯镁,铝液温度从 760 ℃升至 780~800 ℃,用体积分数为 99.999% 氩气旋转喷吹除气 20 min→静置 20 min 后扒渣→850 ℃浇注。

铸造过程:用 YT32-500B 四柱液压机挤压铸造复合材料试样和活塞试样,增压压力为 100 MPa,保压 3 min。模具为不带水冷系统、带水冷系统的 φ150 mm 活塞模具和 φ140 mm 圆饼模具。

热处理:试样选用了两种热处理工艺,1 号工艺为水淬(水温 80 ℃)+人工时效 215 ℃×8 h;2 号工艺为固溶处理 510 ℃×2 h+水淬+人工时效 205 ℃×8 h。活塞选用 3 种热处理工艺:3 号工艺为固溶处理 495 ℃×6 h+水淬+人工时效 205 ℃×8 h;其他两种处理工艺和挤压铸造试样一致。

复合材料化学成分见表 1,计算得到 TiB₂ 的质量分数为 2.14%。

表 1 TiB₂ 增强铝基复合材料的化学成分
Tab.1 Chemical composition of TiB₂ reinforced aluminum

matrix composites											%
w _B											
Ti	B	Si	Cu	Ni	Fe	Cr	Zr	V	Mg	Al	
1.51	0.63	9.94	4.32	2.57	0.54	0.348	0.108	0.070	0.88	余量	

1.2 测试方法

用 FEI-Quanta 650 场发射扫描电镜进行微观形貌观察;使用 SANS-CMT4000 电子式万能试验机进行常温与高温拉伸试验,加载速率为 1 mm/min,高温性能测试温度为 350 ℃,保温 10 min,拉伸试样按 GB6397-86 加工成 φ6 mm×36 mm 的标准试样。活塞试样尺寸为 φ140 mm×50 mm,活塞直径为 φ150 mm,取样部位为活塞的厚大部位,用 Zeiss Axio Observer 倒置金相显微镜进行观察,金相试样尺寸为 φ15mm×15 mm。

2 试验结果与分析

2.1 热处理工艺对力学性能的影响

不同热处理工艺条件下,TiB₂ 增强铝基复合材料试样和活塞试样室温性能和 350 ℃高温性能见表 2。可以看出,试样的室温及高温性能均整体上优于活塞,这是因为试样的凝固速度更快,组织更为致密,晶粒更小。由位错塞积公式 $\sigma = \frac{\sigma_h}{n}$ (式中,σ 为外加应力;σ_h 为

位错终端颗粒处切应力,n 为位错塞积的晶粒数)可知,在颗粒受到相同的切应力以及外加应力相同的条件下,晶粒越细小,晶粒数目越多,宏观上表现为材料的塑性变好,明显增强材料的综合性能^[8]。

表 2 复合材料试样和活塞试样在不同热处理工艺下的力学性能
Tab.2 Mechanical properties of composite specimens and piston specimens under different heat treatment processes

试样	热处理 编号	室温		350 ℃	
		抗拉强度/ MPa	伸长率/ %	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %
铸造 试样	1	254	1.0	101	5.3
	2	341	1.5	92.3	5.5
	3	231	0.5	89	2.5
活塞	4	262	1.3	83	8.0
	5	265	0.5	94	3.0

对于试样来说,1 号工艺的 350 ℃高温强度更高,达到了 101 MPa,但室温强度较低,仅为 254 MPa;2 号工艺具有较高的室温强度,达到 341 MPa,高温强度为 92.3 MPa。对比活塞试样的 3 种热处理工艺,5 号工艺的室温及高温性能最佳,室温强度达到了 265 MPa,高温强度达到了 94 MPa。

2.2 成形工艺对力学性能的影响

2.2.1 水冷模具技术

在空冷模具中试样在 350 ℃下的抗拉强度超 100 MPa,而活塞试样的只有 90 MPa 左右。这是因为试样较小,其凝固速度较快,有利于减小枝晶臂间距^[9~12],从而细化晶粒,而活塞试样体积较大,不利于凝固,形成的晶粒粗大。为此,设计水冷模具,在活塞芯头、外模和上模均增加水冷通道,以提高活塞毛坯的凝固速率。

采用水冷模具制备活塞试样,浇注温度为 780 ℃,保压压力为 100 MPa,保压 150 s,合模加压后立即通水冷却,活塞芯头通水时间为 120 s,外模通水时间为 80 s,上模通水时间为 120 s。通过水冷模具技术制备的活塞,力学性能见表 3。与表 2 相比,其力学性能得到较大提高。

表 3 水冷模具技术制备 TiB₂/Al 复合材料活塞的力学性能
Tab.3 Mechanical properties of TiB₂ reinforced aluminum matrix composite piston prepared by water-cooled die technology

室温		350 ℃	
抗拉强度/MPa	伸长率/%	抗拉强度/MPa	伸长率/%
342	1.0	110	6.5

TiB₂ 增强铝基复合材料试样、活塞样件不同部位在空冷模具及水冷模具铸造下的微观组织见图 1。可以看出,凝固速率提高均有利于提高室温和高温性能。在空冷条件下,晶粒尺寸从大到小为活塞顶部>复合材料试样>活塞裙部(见图 1a、图 1c、图 1d),这是由于活塞裙部是薄壁结构,与复合试样一样,其凝固速度比较快,

晶体生长时间较短,所形成的晶粒比较细小,而活塞顶部是厚大的结构,凝固速度较慢,晶粒有更多时间生长,因此形成了比较粗大的晶粒。在水冷条件下,活塞的凝固速度得到了较大的提高,与空冷条件相比,无论活塞

顶部(见图 1a、图 1b),还是活塞裙部(见图 1d、图 1e),晶粒都得到了有效细化。其中活塞裙部的晶粒已经显著小于复合材料试样的晶粒,活塞顶部的晶粒也已接近试样(见图 1b、图 1c)。

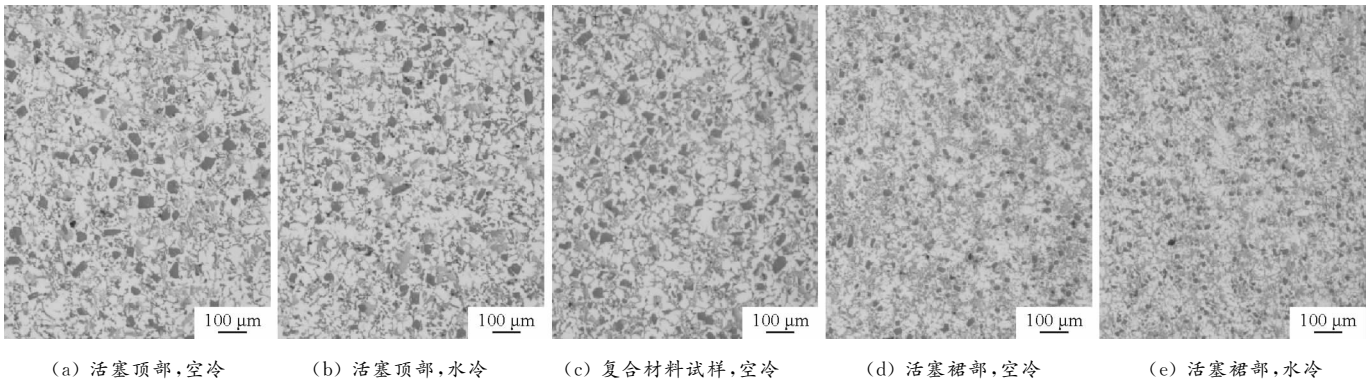


图 1 TiB₂ 增强铝基复合材料及活塞的微观组织

Fig.1 Microstructure of TiB₂ reinforced aluminum matrix composites and piston

根据 Hall-Petch 公式^[13],在同等位错材料条件下,合金的晶粒尺寸越小,强度越高,这与表 2 的结果一致。

2.2.2 合金超声技术

合金超声技术被广泛应用于生产制造轻质、耐高温的高强韧合金铸件^[14],为了改善 TiB₂ 颗粒相分布特性,在浇注前对浇包内铝液进行超声处理。超声处理采用容量为 30 kg 的石墨坩埚,熔液温度为 760 ℃,超声频率为 2 kHz,功率为 1 750 W,处理 120 s,在水冷模具中挤压,活塞试样的力学性能见表 4。

表 4 超声处理制备复合材料活塞的力学性能

Tab.4 Mechanical properties of composite piston prepared by ultrasonic treatment

热处理 工艺	室温		350 ℃	
	抗拉强度/MPa	伸长率/%	抗拉强度/MPa	伸长率/%
工艺 2	373	1.0	128	8.3

普通处理及超声处理后活塞试样微观组织见图 2。在超声处理前,TiB₂ 颗粒相在晶界上出现偏聚,且分布不均匀(见图 2a);超声处理后 TiB₂ 颗粒相较均匀弥散分布(见图 2b),这是因为铝液在交变声场作用下产生声流效应,使得铝液中的流动场、压力场等发生变化,有

利于提高超声振动对凝固的作用效果,使得铝合金组织晶粒与第二相得到细化,液相形核率得到提高^[15,16]。超声处理同时也使得颗粒得到有效分散,有利于活塞在受力时内部应力均匀化,避免因为颗粒偏聚引起的应力集中问题,而且颗粒分散后,材料内部应力的受力界面增大,应力分布更加均匀。通过超声处理可以提高活塞试样的力学性能,尤其是高温抗拉强度提高了 16.3%,伸长率提高了 27.7%。

超声处理作为一种新型的处理工艺,在进行批量生产时,还需注意超声功率与批量生产时的匹配性、附加搅拌工装设计与坩埚之间的匹配性以及颗粒分散程度与超声处理工艺的协调性等问题。需要结合批量生产具体情况进行试制试验,以获得合适的工艺。

3 结 论

(1)热处理可明显改善挤压铸造 TiB₂ 增强铝基复合材料的力学性能,其最佳热处理工艺为:510 ℃×2 h 固溶处理+205 ℃×8 h 人工时效。

(2)水冷模具挤压铸造可提高 TiB₂ 增强铝基复合材料凝固速度,细化晶粒,有效提高活塞试样的力学性能。制备的活塞试样室温抗拉强度为 342 MPa,伸长率为 1.0%,350 ℃ 高温抗拉强度为 110 MPa,伸长率为 6.5%。

(3)挤压铸造 TiB₂ 增强铝基复合材料经超声处理可改善 TiB₂ 颗粒的分布,改善晶相组织,使活塞的综合力学性能有了较大提升,其中高温抗拉强度提高了 16.3%,伸长率提高了 27.7%。

参 考 文 献

[1] 王杰芳,谢敬佩,刘忠侠,等.国内外铝硅活塞合金的研究及应用述评[J]. 铸造, 2005, 54(1): 24-27.

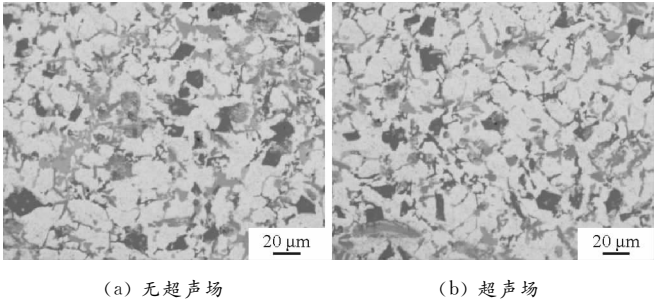


图 2 超声场处理对 TiB₂ 颗粒相分布及晶相组织的影响

Fig.2 Influence of ultrasonic field on TiB₂ particle phase distribution and crystal phase structure

铝镁微叠层复合材料制备与组织性能研究

左睿昊¹ 景 栋^{1,2} 孟令刚¹ 郭 倩¹ 周秉文^{1,2} 耿立国¹ 张兴国^{1,2}
(1.大连理工大学材料科学与工程学院; 2.大连理工大学宁波研究院)

摘 要 以 1060 铝合金片和 AZ31 镁合金片为原材料,制备了铝镁微叠层复合材料,研究了层厚比对复合材料组织与性能的影响。使用金相显微镜、X 射线衍射仪、场发射电子探针和扫描电镜对复合材料的组织结构、元素分布、裂纹扩展情况进行分析。结果表明,采用真空热压烧结技术制备的复合材料结合良好,力学性能呈先上升后下降的趋势。铝镁层厚比为 1 : 1.5 时复合材料性能最佳,其抗弯强度为 159 MPa,比强度为 7.4×10^4 N · m/kg,抗压强度为 310 MPa。

关键词 铝镁微叠层复合材料;真空热压;抗弯强度;抗压强度

中图分类号 TB331;TG146.21;TG146.22 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.08.022 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Preparation and Microstructure as well as Properties of Al-Mg
Microlaminated Composites

Zuo Ruihao¹, Jing Dong^{1,2}, Meng Linggang¹, Guo Qian¹, Zhou Bingwen^{1,2}, Geng Liguang¹, Zhang Xingguo^{1,2}
(1.School of Material Science and Engineering, Dalian University of Technology;
2.Ningbo Institute of Dalian University of Technology)

Abstract: Taking 1060Al and AZ31 magnesium alloy sheets as raw materials, the effects of layer thickness ratio on microstructure and properties of prepared Al-Mg microlaminated composites were investigated. The microstructure, element distribution and crack propagation of the composites were analyzed by metallographic microscope, X-ray diffractometer, field emission electron probe and scanning electron microscope. The results indicate that the composites prepared by vacuum hot pressing sintering is well-bonded, and the mechanical properties is increased firstly and then decreased. When the thickness ratio of Al-Mg layer is 1 : 1.5, the composites exhibit desirable properties, where the bending strength is 159 MPa, the specific strength is 7.4×10^4 N · m/kg, and the compressive strength is 310 MPa.

Key Words: Al-Mg Microlaminated Composites, Vacuum Hot Pressing, Bending Strength, Compressive Strength

收稿日期:2021-12-12;修改稿收到日期:2022-01-20
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFA0702903);国家自然科学基金资助项目(51971049)
第一作者简介:左睿昊,男,1996 年出生,硕士研究生,辽宁大连(116000),E-mail:376604957@qq.com
通信作者:张兴国,男,1960 年出生,教授,辽宁大连(116000),E-mail:zxgwj@dlut.edu.cn
引用格式:左睿昊,景栋,孟令刚,等. 铝镁微叠层复合材料制备与组织性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(8): 1 027-1 032.
ZUO R H, JING D, MENG L G, et al. Preparation and microstructure as well as properties of Al-Mg microlaminated composites[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(8): 1 027-1 032.

[2] 潘颜鹏. 高强韧铸造 Al-Si-Cu-Mg 合金组织性能研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2015.

[3] 王立东. 活塞用新型铝合金和 SiC_p/Al 复合材料的疲劳行为研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2006.

[4] 王宇鑫, 张瑜, 严鹏飞, 等. 铝基复合材料的研究[J]. 有色金属材料与工程, 2010, 31(4): 194-198.

[5] 郝斌, 段先进, 崔华, 等. 金属基复合材料的发展现状及展望[J]. 材料导报, 2005, 19(7): 64-68.

[6] 刘达利, 齐丕骧. 新型铝活塞[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.

[7] SONG I H, KIM D K, HAHN Y D, et al. Investigation of Ti₃ AlC₂ in the in situ TiC-Al composite prepared by the exothermic reaction process in liquid aluminum[J]. Materials Letters, 2004, 58(5): 593-597.

[8] 贺春林, 才庆魁. 铝金属基复合材料的腐蚀研究进展[J]. 材料导报, 2003, 17(1): 45-47.

[9] 李月珠. 快速凝固技术和材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.

[10] 陈光, 傅恒志. 非平衡凝固新型金属材料[M]. 北京: 科学出版社, 2004.

[11] 程天一, 章守华. 快速凝固技术与新型合金[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.

[12] 满佳乐. 凝固速度对铝基合金组织及性能的影响[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018.

[13] GUAN R G, TIE D. A review on grain refinement of aluminum alloys: Progresses, challenges and prospects[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 30(5): 409-432.

[14] LIN C, WU S S, LU S L, et al. Effects of ultrasonic vibration and manganese on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-Si alloys with 2% Fe[J]. Intermetallics, 2013, 32(3): 176-183.

[15] 张松利, 赵玉涛, 陈刚, 等. 熔体超声处理对 A356 合金铸态显微组织和力学性能的影响[J]. 机械工程材料, 2009, 33(7): 22-25.

[16] 潘蕾, 陈锋, 吴申庆, 等. 高能超声作用下金属基复合材料的制备[J]. 机械工程材料, 2003, 27(7): 1-2.