

陶瓷增强Al-Fe-Cu合金的制备及性能研究

陆艳红*, 白雨濛, 刘畅, 殷志豪, 周列金, 谢志强

成都工业学院材料与环境工程学院, 材料科学与工程教研室, 四川 成都

收稿日期: 2025年4月21日; 录用日期: 2025年5月20日; 发布日期: 2025年5月28日

摘要

采用光学显微镜与超景深显微镜观察了不同 Al_2O_3 添加量的 Al_2O_3 增强Al70Fe10Cu20合金微观组织, 利用X射线衍射仪、拉伸试验机、维氏硬度计、摩擦磨损试验机、密度计、电导率仪检测了 Al_2O_3 增强Al70Fe10Cu20合金力学性能、摩擦磨损性能、密度与电导率。结果表明, Al_2O_3 颗粒的添加量以及真空熔炼后 Al_2O_3 颗粒在Al70Fe10Cu20合金中的分布均匀性对复合材料的显微组织和性能影响较大。综合各项性能指标得出 Al_2O_3 最优添加量为0.1 wt%, 与不添加 Al_2O_3 的Al70Fe10Cu20合金相比添加0.1 wt% Al_2O_3 的Al70Fe10Cu20复合材料的密度和电导率降低幅度很小, 而硬度、抗压强度以及耐磨性却有显著提升。

关键词

Al-Fe-Cu合金, 陶瓷增强, 复合材料

Preparation and Properties of Ceramic Reinforced Al-Fe-Cu Alloys

Yanhong Lu*, Yumeng Bai, Chang Liu, Zhihao Yin, Liejin Zhou, Zhiqiang Xie

Department of Materials Science and Engineering, School of Materials and Environmental Engineering, Chengdu Technological University, Chengdu Sichuan

Received: Apr. 21st, 2025; accepted: May 20th, 2025; published: May 28th, 2025

Abstract

The microstructure of Al_2O_3 reinforced Al70Fe10Cu20 alloy with different Al_2O_3 additions was observed by optical microscope and super depth of field microscope. The mechanical properties, friction and wear properties, density and conductivity of Al_2O_3 reinforced Al70Fe10Cu20 alloy were detected by X-ray diffractometer, tensile testing machine, Vickers hardness tester, friction and wear

*通讯作者。

文章引用: 陆艳红, 白雨濛, 刘畅, 殷志豪, 周列金, 谢志强. 陶瓷增强 Al-Fe-Cu 合金的制备及性能研究[J]. 材料科学, 2025, 15(5): 1088-1098. DOI: 10.12677/ms.2025.155114

testing machine, density meter and conductivity meter. The results show that the addition amount of Al_2O_3 particles and the distribution uniformity of Al_2O_3 particles in Al70Fe10Cu20 alloy after vacuum melting have a great influence on the microstructure and properties of the composite material. The optimal addition amount of Al_2O_3 is 0.1 wt% based on various performance indicators. Compared with Al70Fe10Cu20 alloy without Al_2O_3 , the density and conductivity reduction of Al70Fe10Cu20 composite material with 0.1 wt% Al_2O_3 was very small, while the hardness, compressive strength and wear resistance were significantly improved.

Keywords

Al-Fe-Cu Alloys, Ceramic Reinforcements, Composite Materials

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

陶瓷增强金属基复合材料兼具陶瓷材料高硬度、高耐磨、耐腐蚀、耐高温、化学稳定性高[1]和金属材料较高强度和塑韧性的特点[2],其在工程船舶和航空航天领域应用广泛[3]。根据应用场景的不同,金属材料基体的选择具有多样性。镍基合金由于具有较好的高温强度、耐蚀性能,其在燃气轮机、喷气发动机等零部件中使用较广,陶瓷颗粒的加入使得合金耐磨和耐蚀性能进一步提高[4]。铜基复合材料因其具有较好的耐磨性广泛应用于高速列车刹车片中[5]。铝基复合材料由于具有低密度、高的比强度、导热性好等特点在涡轮叶片、汽车齿轮零部件以及电子封装材料领域应用较广[6]。Al-Fe-Cu合金不同于传统铝合金[7],通过Fe和Cu的加入,开发新型的Al-Fe和Al-Cu合金,拓展铝合金在电工行业的应用[8]。

陶瓷增强相的种类丰富,有 Al_2O_3 、TiC、SiC、WC等。而 Al_2O_3 具有高的化学稳定性、抗高温氧化性能且价格低廉,其与Al基体不易发生有害界面反应[9]。TiC颗粒硬度高、刚度高、耐磨性好,细化晶粒作用显著,但是从外界引入到铝基体中和铝基体润湿性较差[10]。此外还有高熵合金[11]增强铝基复合材料,它具有优异的力学性能,良好的导热性和加工性,但是制备工艺复杂,成本较高[12]。

氧化铝增强Al-Fe-Cu合金材料的制备方法很多,有微波烧结法[13],搅拌铸造法[14]、粉末冶金法等,粉末冶金法制备出来的样品存在较多缺陷,容易造成应力集中[9]。而原位合成法制备陶瓷增强铝基复合材料能够获得尺寸细小、分布均匀的增强颗粒,但生产成本较高[10]。氧化铝颗粒在铝基合金中分散均匀性、陶瓷颗粒和金属基体润湿性也影响了复合材料的最终力学性能。真空电弧熔炼法能够有效细化晶粒尺寸,其电磁搅拌功能可以提升陶瓷颗粒分布均匀性,真空环境也有助于避免由于其它杂质带入引起的反应。

为了进一步提升铝合金的应用范围和力学性能,本文拟采用真空电弧熔炼法制备氧化铝增强Al-Fe-Cu合金。

2. 试验材料及方法

2.1. 试验材料

试验材料为高纯铝(99.99%)、高纯铜(99.99%)、高纯铁(99.99%)以及氧化铝粉末(分析纯)。化学试剂为无水乙醇(分析纯)和Keller腐蚀液(2.5 ml HNO_3 、1.5 ml HCL、1 ml HF、95 ml H_2O)。

将上述材料按照Al70Fe10Cu20(原子比at%)称取,铝、铁和铜分别为25.335 g、7.506 g和17.158 g,共50 g的Al70Fe10Cu20原材料。将称量好的原材料放入烧杯中,烧杯内加入适量的无水乙醇浸没过原

材料表面，将烧杯放置于超声波清洗机中清洗 30 分钟后取出晾干后备用。

Al_2O_3 粉末的添加量按照上述 Al70Fe10Cu20 原材料质量分数的 0 wt%、0.1 wt%、0.3 wt%、1 wt%、1.5 wt% 称取。 Al_2O_3 粉末需要先用压片机压成薄片状试样，然后用刀片切取相应质量分数的 Al_2O_3 粉末块放入 Al70Fe10Cu20 原材料中。

2.2. 试验方法

将上述配备好的 5 组原材料分批次放进真空电弧炉中进行熔炼，当原材料完全熔化后开启电磁搅拌，每组材料至少熔炼 4~5 遍后取出。将原材料用线切割机切割成 10 mm*10 mm*5 mm 的小块状试样用于金相制备、摩擦磨损和 XRD 物相分析、电导率、密度测试。另外添加不同 Al_2O_3 质量分数的样品需要用线切割机切割成 3 块直径为 3 mm、高 7.5 mm 的力学性能测试试样(压缩试样)。

采用金相磨光机和抛光机对块状试样进行磨光和抛光，用 keller 试剂对抛光后的样品进行腐蚀，之后采用普通光学显微镜对试样进行显微组织观察。取抛光后未腐蚀的样品进行 XRD 物相分析，设备为 TD-3500 X 射线衍射仪。X 射线衍射使用连续扫描，起始角度设为 10° ，终止角度为 80° ，步宽角度 0.02° ，采集时间 0.5 s，管压 30 KV，管流 20 mA。磨光后的样品采用 HV-1000 A 维氏显微硬度计进行硬度测试，采用 GF-I 型高温往复摩擦磨损试验机对磨光后的试样进行摩擦磨损试验。磨损试验载荷 30 N、对磨材料氮化硅、电机转速 250 rpm、时间 10 min，磨损测试结束后采用 MT-500 探针式材料表面磨痕测量仪对磨痕进行测试。采用 AR-150ME 多功能密度测试仪对块状材料进行密度测试，用 Sigma2008 数字涡流电导仪对材料电导率进行测试。采用 TSE-105D 万能试验机对压缩试样进行压缩性能测试，压缩试验入口力 10 N、预加载速度 0.2 mm/min，试验结束条件：衰减幅度 40%、触发停机最小力 100 N。

3. 实验结果及分析

3.1. XRD 物相分析

图 1 为不同 Al_2O_3 添加量的 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金 XRD 物相分析图， Al_2O_3 的添加量分别为 0 wt%、0.1 wt%、0.3 wt%、1 wt%、1.5 wt%。由图 1 可知，不同 Al_2O_3 添加量的 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金都出现了 Al_2Cu 相，添加 0.1 wt% Al_2O_3 和 1 wt% Al_2O_3 的 Al70Fe10Cu20 合金中不仅有 Al_2Cu 相还出现了 Al_4Cu_9 相。

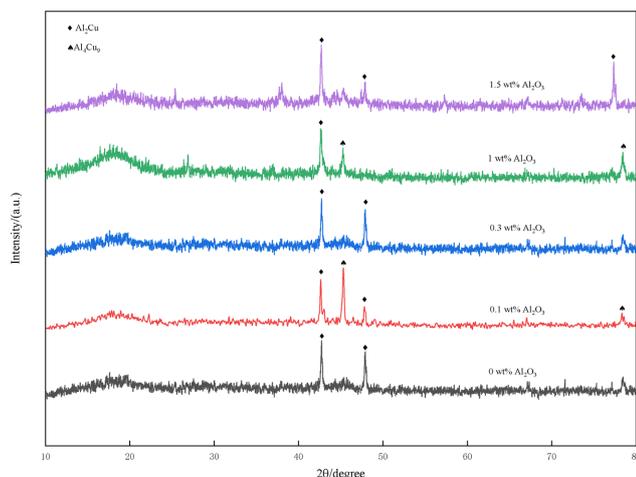


Figure 1. XRD plots of Al70Fe10Cu20 alloy with different Al_2O_3 additions
图 1. 不同 Al_2O_3 添加量的 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金 XRD 图

3.2. 金相显微组织

图 2 为不同 Al_2O_3 添加量的 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金的金相显微组织图, 图 2(a)~图 2(e) 中 Al_2O_3 的添加质量分数分别为 0 wt%、0.1 wt%、0.3 wt%、1 wt%、1.5 wt%。由图 2 可知添加不同质量分数 Al_2O_3 的 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金显微组织中都含有尺寸较为粗大的杆状组织, 且随着 Al_2O_3 质量分数的增加, 合金中杆状组织尺寸逐渐减小。可能与 Al_2O_3 含量增加, 提供了异质形核的质点有关。

结合 XRD 物相分析可知该杆状组织可能是 Al_2Cu 。添加 0.1 wt% Al_2O_3 (图 2(b)) 和添加 1 wt% Al_2O_3 (图 2(d)) 以及添加 1.5 wt% Al_2O_3 (图 2(e)) 的 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金显微组织中出现了白色箭头所示的尺寸较为细小的组织, 其中添加 1.5 wt% Al_2O_3 的 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金中该箭头所示细小组织数量相对较少, 尺寸也更加细小。结合 XRD 物相分析可知该组织可能是 Al_4Cu_9 。此外添加 0.3 wt% Al_2O_3 的 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金(图 2(c)) 显微组织中出现了箭头所示类似孔洞的缺陷。

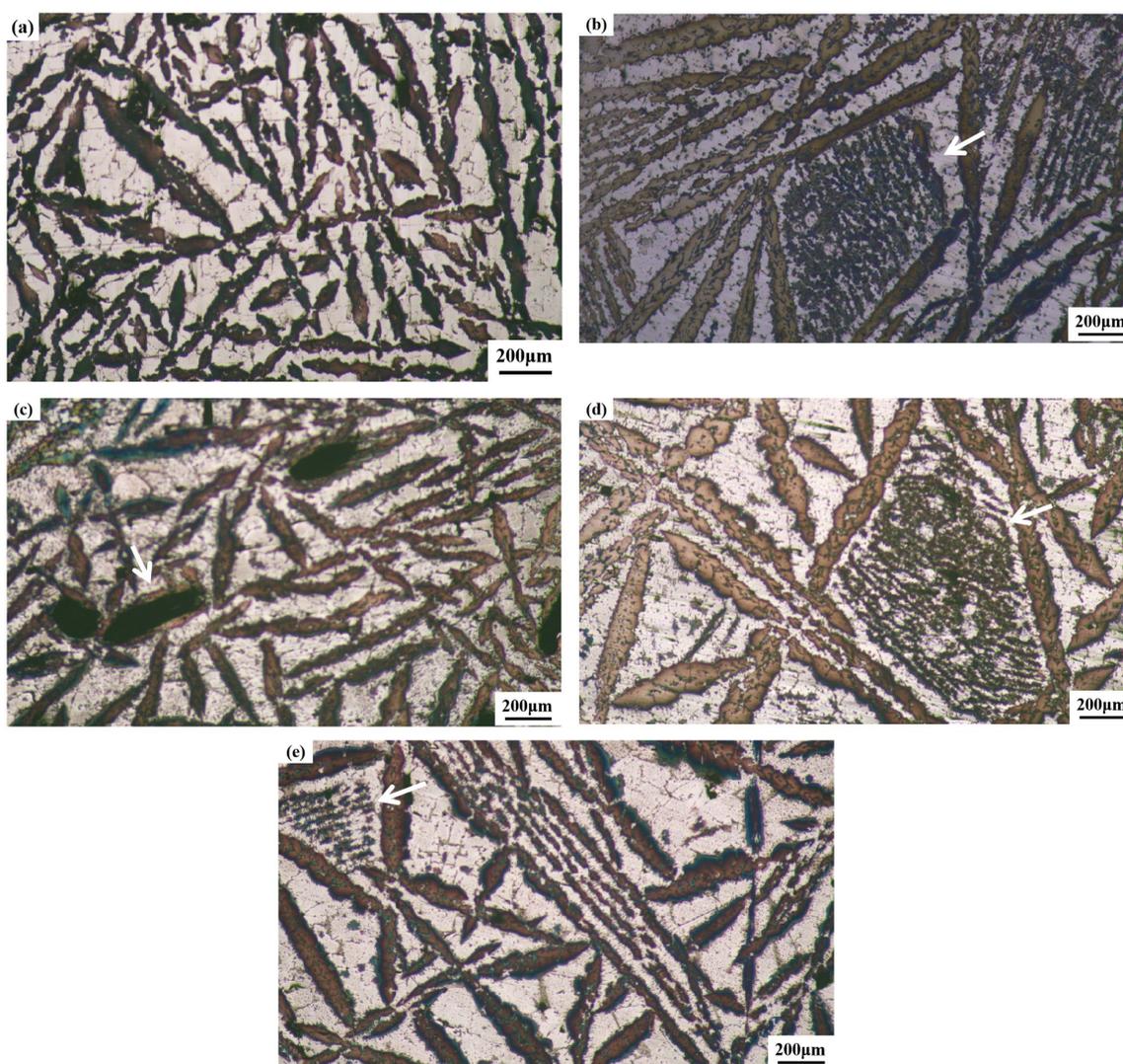


Figure 2. the organizations of Al_2O_3 reinforced Al70Fe10Cu20 alloys with different Al_2O_3 additions: (a) 0 wt% Al_2O_3 ; (b) 0.1 wt% Al_2O_3 ; (c) 0.3 wt% Al_2O_3 ; (d) 1 wt% Al_2O_3 ; (e) 1.5 wt% Al_2O_3

图 2. 不同 Al_2O_3 添加量的 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金组织: (a) 添加 0 wt% Al_2O_3 ; (b) 添加 0.1 wt% Al_2O_3 ; (c) 添加 0.3 wt% Al_2O_3 ; (d) 添加 1 wt% Al_2O_3 ; (e) 添加 1.5 wt% Al_2O_3

3.3. 密度

图 3 是不同 Al_2O_3 添加量的 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金密度, 从图中可以看出当 Al_2O_3 添加量为 0.1 wt%、1 wt% 和 1.5 wt% 时, 复合材料密度变化不大, 但添加 0.3 wt% Al_2O_3 时密度小幅度降低。当 Al_2O_3 添加量为 1.5 wt% 时复合材料密度稍高于未添加 Al_2O_3 时 Al70Fe10Cu20 合金密度。

由于 0.1 wt% 和 0.3 wt% Al_2O_3 添加量较少, 由于 Al_2O_3 颗粒和 Al70Fe10Cu20 合金界面润湿性较差而导致孔隙率增加, 复合材料密度逐渐降低。其中 Al_2O_3 添加量为 0.1 wt% 时降低幅度非常小, 几乎不变。针对 Al_2O_3 添加量为 0.3 wt% 的 Al70Fe10Cu20 合金, 结合金相组织观察可知, 该复合材料基体中有较多孔洞, 极大降低了复合材料整体密度。

随着 Al_2O_3 添加量进一步增加至 1 wt% 时, Al_2O_3 颗粒有团聚倾向。 Al_2O_3 颗粒和 Al70Fe10Cu20 合金界面润湿性差导致界面结合不紧密容易造成孔隙, 但 Al_2O_3 颗粒含量增加可以填充孔洞, 添加 1 wt% Al_2O_3 复合材料密度相对原始 Al70Fe10Cu20 合金密度有很小幅度降低。当 Al_2O_3 添加量为 1.5 wt% 时, Al_2O_3 颗粒含量增加填充孔洞导致密度变化占主导, 复合材料密度小幅度超过原始 Al70Fe10Cu20 合金密度。

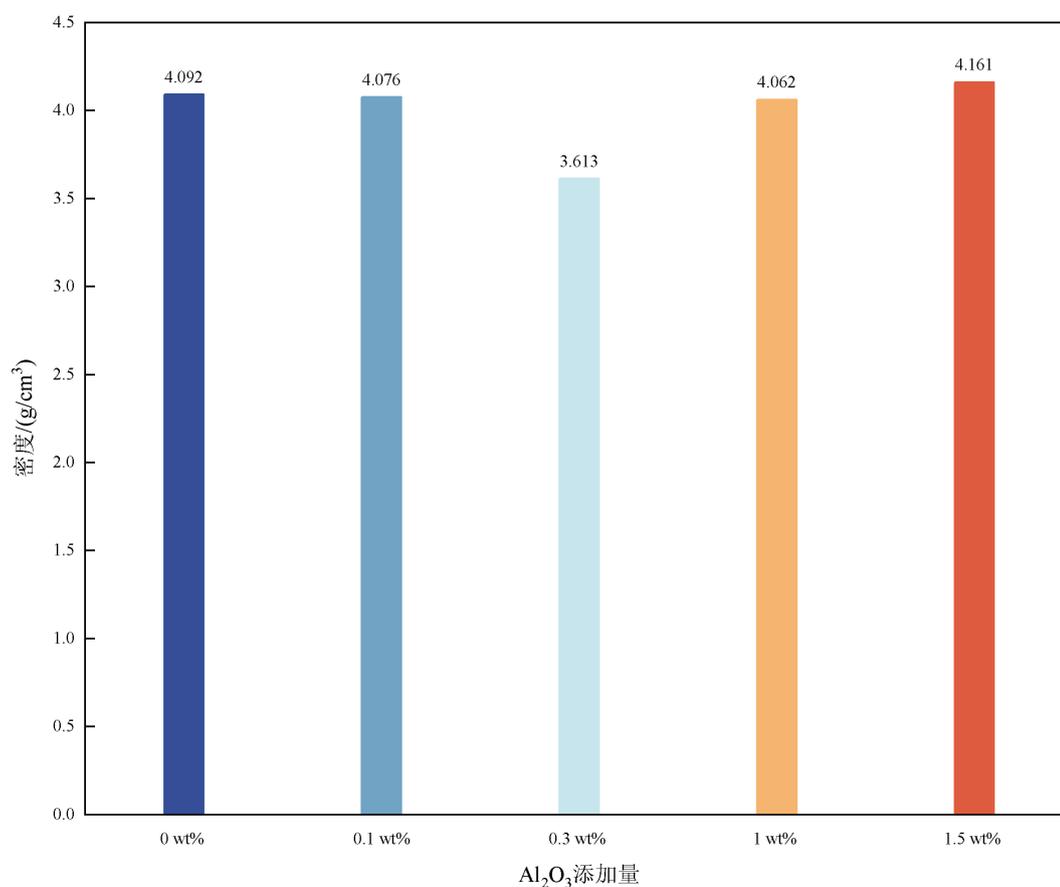


Figure 3. Density of Al_2O_3 reinforced Al70Fe10Cu20 alloy with different Al_2O_3 additions

图 3. 不同 Al_2O_3 添加量的 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金的密度

3.4. 硬度

图 4 是不同 Al_2O_3 添加量的 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金硬度, 从图中可以看出, 随着添加 Al_2O_3 质量分数的增加, Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金硬度逐渐增加, 但硬度增加幅度变缓。添加 0.1 wt%、

0.3 wt% Al_2O_3 的合金硬度增加幅度较大, 添加 1 wt% Al_2O_3 合金硬度增幅减缓, 添加 1 wt% Al_2O_3 和 1.5 wt% Al_2O_3 合金硬度相当。 Al_2O_3 颗粒作为第二相粒子加入到 Al70Fe10Cu20 合金中, 能够通过阻碍位错运动起到第二相强化效果。但是当 Al_2O_3 颗粒数量增加到 1.5 wt% 时, Al_2O_3 颗粒有团聚倾向, Al_2O_3 颗粒和 Al70Fe10Cu20 合金局部区域界面增多, 导致应力集中孔隙率增加, 降低第二相强化效果, 合金硬度随 Al_2O_3 添加显著增加效果不再明显。

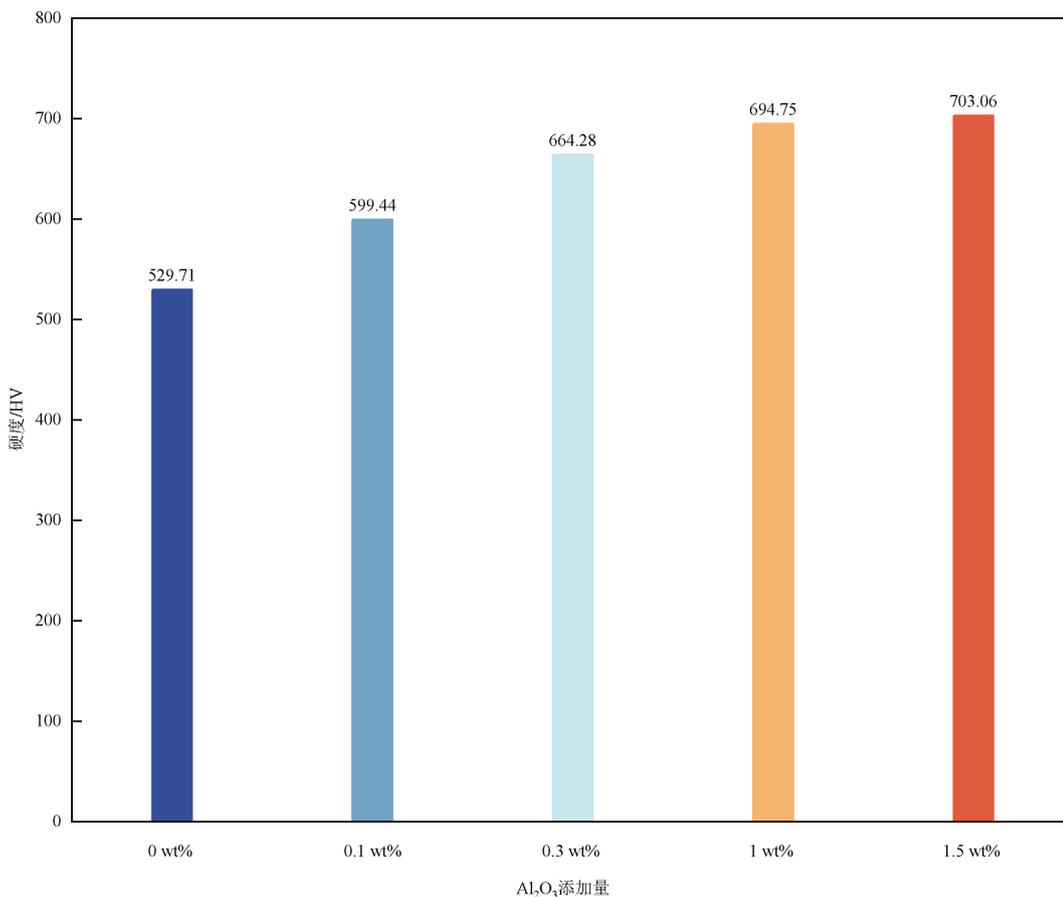


Figure 4. Hardness of Al_2O_3 reinforced Al70Fe10Cu20 alloy with different Al_2O_3 additions

图 4. 不同 Al_2O_3 添加量的 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金硬度

3.5. 抗压性能

图 5 是不同 Al_2O_3 添加量的 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金抗压强度。从图中可以看出当 Al_2O_3 添加量为 0.1 wt% 时, 复合材料抗压强度相比原始 Al70Fe10Cu20 合金有显著提升, 随着 Al_2O_3 添加量的进一步升高, Al_2O_3 添加量为 0.3 wt%、1 wt% 和 1.5 wt% 时, 复合材料抗压强度却显著降低, 而且这三种 Al_2O_3 添加量的复合材料抗压强度相差不大。由于 Al_2O_3 添加量为 0.1 wt% 时, Al_2O_3 颗粒在复合材料集体中作为强化相起到显著的第二相强化效果。随着 Al_2O_3 添加量从 0.3 wt% 增加至 1.5 wt%, 颗粒逐渐有团聚倾向且孔隙率上升, 容易引起应力集中并成为裂纹扩散快速通道。同时由于 Al_2O_3 颗粒和 Al70Fe10Cu20 合金界面润湿性较差, 较弱的结合面受力时更容易产生显微裂纹。 Al_2O_3 添加量为 0.3 wt%、1 wt%、1.5 wt% 时复合材料抗压强度都较低且数值接近, 推测 Al_2O_3 颗粒在三种材料中分布均匀性较差, 但 Al_2O_3 添加量为 1.5 wt% 时, Al_2O_3 颗粒分散均匀性在三种材料中又相对较好。

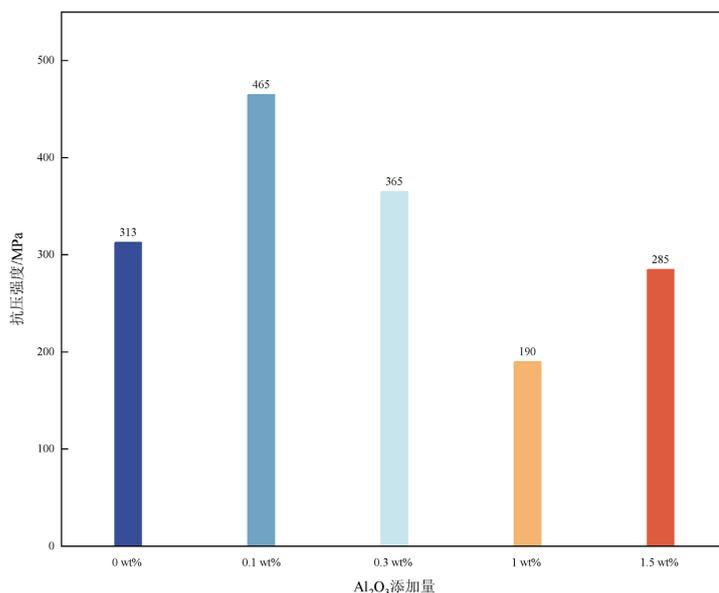


Figure 5. compressive strength of Al₂O₃ reinforced Al70Fe10Cu20 alloy with different Al₂O₃ additions
图 5. 不同 Al₂O₃ 添加量的 Al₂O₃ 增强 Al70Fe10Cu20 合金抗压强度

3.6. 摩擦磨损性能

图 6 是不同 Al₂O₃ 添加量的 Al₂O₃ 增强 Al70Fe10Cu20 合金摩擦系数均值图(图 6(a))和摩擦系数随时间变化图(图 6(b)), 从图 6 中可以看出 Al₂O₃ 添加量为 0 wt%和 1.5 wt%时最低, 其次 Al₂O₃ 添加量为 0.1 wt%和 1 wt%时较低, Al₂O₃ 添加量为 0.3 wt%时最高。由 Al₂O₃ 添加量为 0.3 wt%时金相组织观察可知, 该合金由于真空熔炼过程中陶瓷材料和金属材料的润湿性问题导致孔洞较多, 而孔洞的存在容易造成复合材料表面粗糙度的变化, 同时孔洞处受力产生裂纹导致材料剥落等原因提升材料的摩擦系数。Al₂O₃ 添加量为 1 wt%和 1.5 wt%时复合材料中含有较多的 Al₂O₃ 颗粒, 能起到较好地润滑效果, 有效地降低摩擦系数, 但是 Al₂O₃ 颗粒分布地均匀性又影响了后续复合材料的耐磨损性。Al₂O₃ 添加量为 0.1 wt%的复合材料也因 Al₂O₃ 颗粒较为均匀分散起到很好地润滑降低摩擦系数效果。而未添加 Al₂O₃ 的 Al70Fe10Cu20 合金本身摩擦系数较低, 可能与合金中 Fe 元素与 Cu 元素各自都形成了润滑层有关。

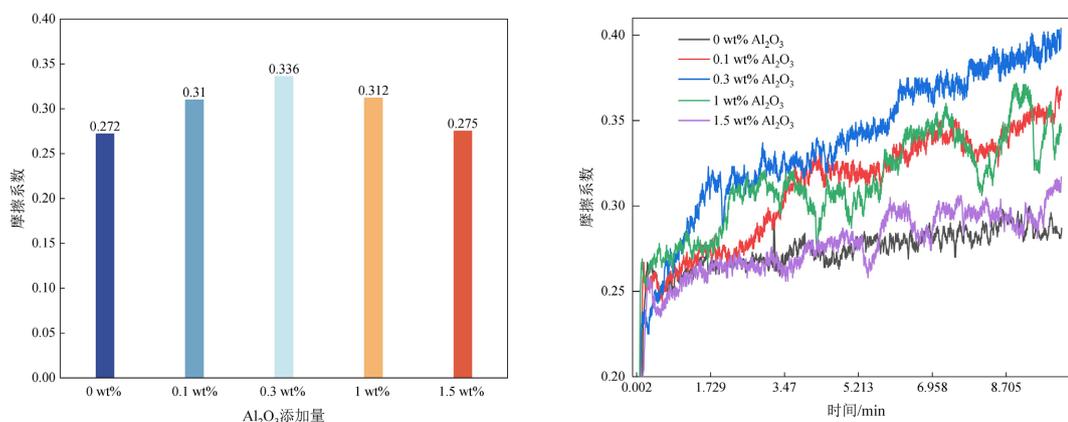


Figure 6. Friction coefficients of Al₂O₃ reinforced Al70Fe10Cu20 alloys with different Al₂O₃ additions: (a) mean friction coefficient; (b) friction coefficient variation with time

图 6. 不同 Al₂O₃ 添加量的 Al₂O₃ 增强 Al70Fe10Cu20 合金摩擦系数: (a) 摩擦系数均值; (b) 摩擦系数随时间变化

图 7 是不同 Al_2O_3 添加量的 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金经过摩擦磨损实验后在超景深显微镜显微组织图(图 7(a)~图 7(e))和不同 Al_2O_3 添加量的 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金磨损量图(图 7(f))。是从图 7(c)中可以看出 Al_2O_3 添加量为 0.3 wt% 的 Al70Fe10Cu20 合金磨损量最大, 这和材料内部孔洞等缺陷较多容易造成应力集中和显微裂纹形成有关, 加速了材料的磨损。 Al_2O_3 添加量为 1 wt%、1.5 wt% 的 Al70Fe10Cu20 合金磨损量接近, 主要是由于 Al_2O_3 颗粒含量较多造成颗粒团聚导致 Al_2O_3 颗粒分布不均匀性加剧。 Al_2O_3 颗粒团本身韧性较差, 受力后容易剥落造成磨粒磨损, 增加磨损量。而 Al_2O_3 添加量为 0 wt% 的 Al70Fe10Cu20 合金虽然本身摩擦系数较低, 但是由于基体金属硬度相对较低, 抵抗磨损能力较差, 故磨损量也相对较多。 Al_2O_3 添加量为 0.1 wt% 的 Al70Fe10Cu20 合金由于 Al_2O_3 颗粒添加量较少起到了弥散强化效果, 同时避免了大量颗粒团聚降低韧性和强度, 其抵抗磨损能力最好。

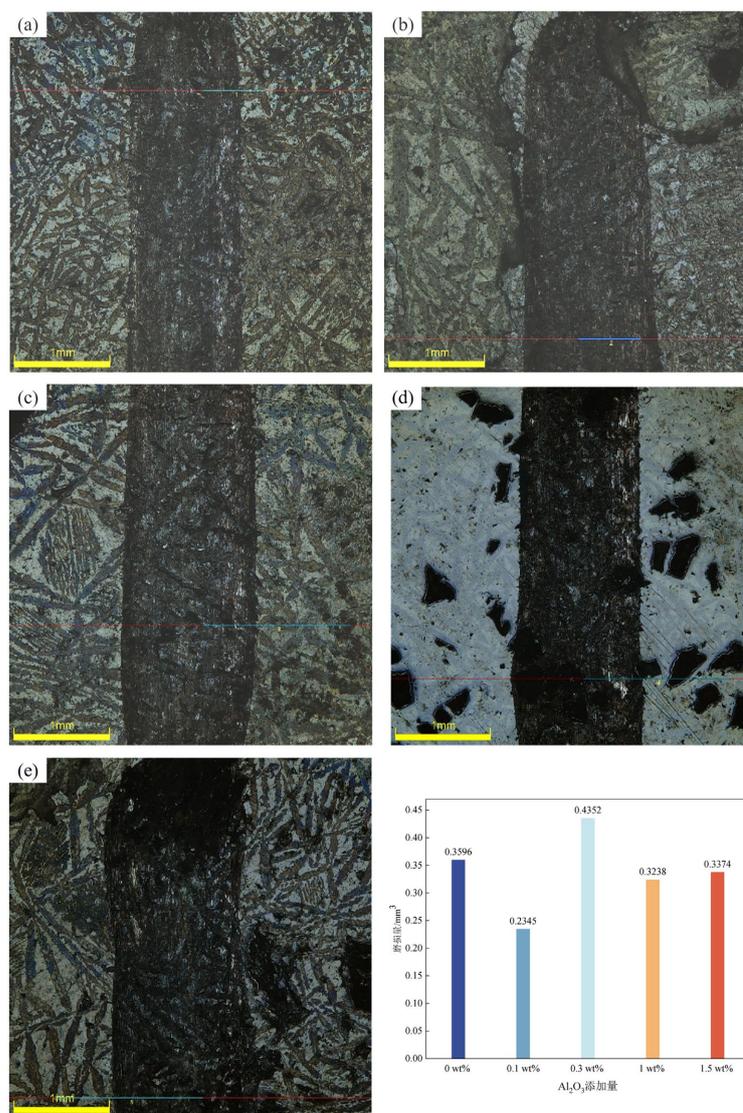


Figure 7. Microstructure and wear plots of Al_2O_3 reinforced Al70Fe10Cu20 alloy with different Al_2O_3 additions: (a) 0 wt% Al_2O_3 added; (b) 0.1 wt% Al_2O_3 added; (c) 0.3 wt% Al_2O_3 added; (d) 1 wt% Al_2O_3 added; (e) 1.5 wt% Al_2O_3 added (f) Wear plots

图 7. 不同 Al_2O_3 添加量的 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金显微组织图和磨损量图: (a) 添加 0 wt% Al_2O_3 ; (b) 添加 0.1 wt% Al_2O_3 ; (c) 添加 0.3 wt% Al_2O_3 ; (d) 添加 1 wt% Al_2O_3 ; (e) 添加 1.5 wt% Al_2O_3 ; (f) 磨损量图

3.7. 电导率

图 8 是不同 Al_2O_3 添加量的 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金电导率, 从图中可以看出随着 Al_2O_3 添加量的增加, 电导率整体呈现下降趋势, 但添加 0.3 wt% Al_2O_3 的 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金电导率下降较多。由于绝缘 Al_2O_3 的加入使得 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 复合材料的电导率下降, 而 Al_2O_3 在复合材料中加入的量和分布的均匀性以及 Al_2O_3 颗粒和 Al70Fe10Cu20 合金界面结合的状态、复合材料孔隙等缺陷的数量都会影响复合材料整体的导电性。绝缘 Al_2O_3 的添加量越多, 复合材料电导率降低越多。但对于添加 0.3 wt% Al_2O_3 的 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金, 结合图 2 所示金相显微组织以及该复合材料线切割时的难易程度可知, 复合材料组织中存在数量较多的孔洞, 同时 Al_2O_3 增强颗粒在复合材料中分布均匀性较差, 团聚现象较为严重, 导致电导率下降幅度较大。

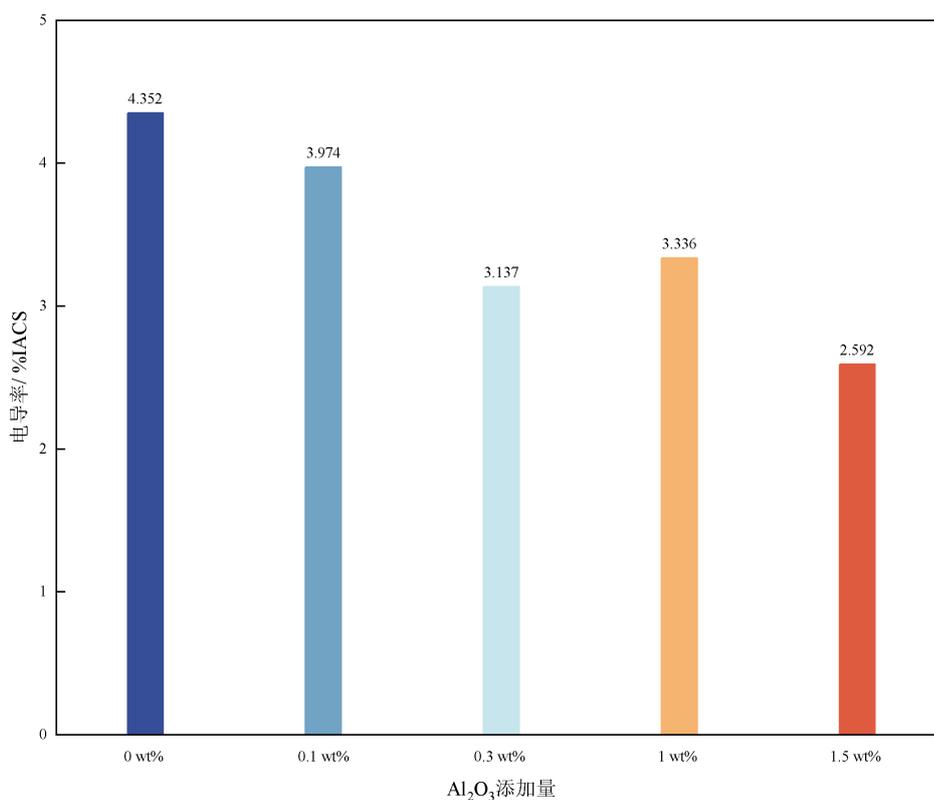


Figure 8. Electrical conductivity of Al_2O_3 reinforced Al70Fe10Cu20 alloy with different Al_2O_3 additions
图 8. 不同 Al_2O_3 添加量的 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金电导率

4. 结论

本文探究了真空熔炼法制备 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金, 并研究了不同 Al_2O_3 添加量对 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金物相、金相显微组织、密度、电导率、硬度、抗压强度、摩擦系数、磨损量等性能的影响规律。

(1) Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金的物相和金相组织随着 Al_2O_3 添加量而变化, Al70Fe10Cu20 合金中除了杆状 Al_2Cu 相之外还出现了细小的 Al_4Cu_9 相, 复合材料金相组织随着 Al_2O_3 添加量的增加逐渐细化。

(2) 随着 Al_2O_3 添加量的增加, Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金的密度变化不大, 但电导率总体呈降低

趋势,其中 Al_2O_3 添加量为 0.3 wt% 的合金电导率降低较多。复合材料硬度随 Al_2O_3 添加量增加逐渐升高,抗压强度除 0.1 wt% Al_2O_3 添加量合金升高外,其余复合材料抗压强度均低于未添加 Al_2O_3 的 Al70Fe10Cu20 合金。

(3) Al_2O_3 添加量为 0 wt% 和 1.5 wt% 的 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金摩擦系数最低, Al_2O_3 添加量为 0.1 wt% 和 1 wt% 的复合材料摩擦系数较低, Al_2O_3 添加量为 0.3 wt% 的复合材料摩擦系数和磨损量最大。 Al_2O_3 添加量为 0.1 wt% 的复合材料磨损量最小, Al_2O_3 添加量为 0 wt%、1 wt%、1.5 wt% 的复合材料磨损量相当。

综合以上结论得出当 Al_2O_3 添加量为 0.1 wt% 时,复合材料综合性能较好。其密度和电导率较不添加 Al_2O_3 的 Al70Fe10Cu20 合金有大幅度降低,同时硬度和抗压强度和耐磨性都有显著提升。从 Al_2O_3 添加量为 0.3 wt% 合金的性能研究中发现真空熔炼工艺对获得高性能 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金非常关键, Al_2O_3 在真空熔炼过程中分散均匀性以及孔隙率多少对合金性能影响较大。后续研究可以优化真空熔炼工艺,并研究提升 Al_2O_3 颗粒和 Al70Fe10Cu20 合金润湿性以及 Al_2O_3 颗粒分散均匀性的工艺方法,从而进一步提升 Al_2O_3 增强 Al70Fe10Cu20 合金的性能。

基金项目

成都工业院校级科研项目:多主元 CuFeAl 合金的制备及性能研究(2022ZR026),四川省大学生创新创业训练计划:TiC 增强铝基复合材料的制备及性能研究(S202311116063),成都工业学院实验室开放基金:时效处理对 7075 铝合金的性能影响研究。

参考文献

- [1] Akhtar, F. (2014) Ceramic Reinforced High Modulus Steel Composites: Processing, Microstructure and Properties. *Canadian Metallurgical Quarterly*, **53**, 253-263.
- [2] 王敏, 贾建刚, 郭铁明, 等. 碳纤维增强 Al_2O_3 -20%Ni 金属陶瓷复合材料的制备及组织性能[J]. 复合材料学报, 2017, 34(12): 2778-2784.
- [3] 师维, 汪勇. 陶瓷颗粒增强金属基复合材料的制备及应用[J]. 热加工工艺, 2024, 53(24): 17-21.
- [4] 石一凡, 张飞, 李祖来, 等. 热压烧结制备 WC 陶瓷颗粒增强 Ni 基复合材料的微观组织与力学性能[J/OL]. 复合材料学报, 2025, 1-12. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250305.003>, 2025-04-07.
- [5] 高宗龙, 吴佳琦, 李专, 等. 陶瓷增强铜基复合材料力学与摩擦学性能研究进展: 单组分和多组分协同机理分析(英文)[J]. 摩擦学学报(中英文), 2025, 45(1): 154-185.
- [6] 荣智崢. 纳米氧化铝颗粒增强 6061 铝基复合材料的高温力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州航空工业管理学院, 2023.
- [7] 宗立君, 吴亚平, 杜宝帅, 等. Be 对 Al-Fe-Cu 合金微观组织及时效性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(1): 99-103.
- [8] 邓显波, 江新洋, 王斌. 铁、铜含量对电缆用 Al-Fe-Cu 合金组织和性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2016, 44(12): 29-35.
- [9] 路国通, 王迎春, 马小民, 等. 氧化铝纤维增强铝基复合材料制备方法综述[J]. 铸造技术, 2024, 45(11): 1082-1092.
- [10] 庄伟彬, 覃龙健, 贾婧, 等. 原位合成 TiC 颗粒增强铝基复合材料研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(2): 473-489.
- [11] 喻海良, 罗开广. 高熵合金颗粒增强铝基复合材料研究进展[J]. 材料与冶金学报, 2024, 23(5): 411-426.
- [12] Li, Q., Zhao, S., Bao, X., Zhang, Y., Zhu, Y., Wang, C., et al. (2020) Effects of AlCoCrFeNi High-Entropy Alloy on Microstructure and Mechanical Properties of Pure Aluminum. *Journal of Materials Science & Technology*, **52**, 1-11.
- [13] Alem, S.A.A., Latifi, R., Angizi, S., Hassanaghaei, F., Aghaahmadi, M., Ghasali, E., et al. (2020) Microwave Sintering of Ceramic Reinforced Metal Matrix Composites and Their Properties: A Review. *Materials and Manufacturing Processes*, **35**, 303-327.

- [14] Gupta, R., Nanda, T. and Pandey, O.P. (2021) Comparison of Wear Behaviour of LM13 Al-Si Alloy Based Composites Reinforced with Synthetic (B₄C) and Natural (Ilmenite) Ceramic Particles. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **31**, 3613-3625.