DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3262

Fe 含量对 Al–Fe 压铸铝合金导电率及机械性能的影响

蒋嗣本,杨　阳,陆可馨
(比亚迪汽车工业有限公司,广东 深圳 518118)

摘　要:为实现汽车零部件对压铸铝合金导电性、强度、成型性和低成本的需求,以 Al-Fe 系合金为基础,研究了 Fe 含量对压铸铝合金导电率和机械性能的影响,进行了微观组织分析和高温性能稳定性验证,并探究了热处理工艺的影响。结果表明,Al-(0.25%~3.0%)Fe-0.02%B(质量分数)合金具有良好的压铸成型性,添加 Fe 可显著提升合金的强度且不造成导电率的大幅下降,Fe 含量从 0.25%增加到 3.0%(质量分数)后,抗拉强度增加 130%,导电率仅下降 17%。在高温工况下,材料导电率和抗拉强度仅略微下降,表现出较好的高温稳定性。时效处理后导电率提升约 1.4%IACS,强度提升约 7 MPa。Al-Fe 系合金是适合开发兼具高导电、中强度、低成本、可压铸等特点的合金体系。

关键词:Al-Fe 合金;压铸;导电率;机械强度;热处理

中图分类号:TG146.21　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2023)12-1139-05

Effect of Fe Content on the Electrical Conductivity and Mechanical Properties of Al–Fe Die–Casting Alloy

JIANG Siben, YANG Yang, LU Kexin
(BYD Auto Industry Co., Ltd., Shenzhen 518118, China)

Abstract: In response to the current technical problem of balancing electrical conductivity, mechanical properties, cost and die-casting fluidity of cast aluminum alloys, a novel Al-Fe alloy was investigated with gradient Fe contents to maximize mechanical properties while maintaining a high electrical conductivity. The microstructure, high-temperature stability and different heat treatment processes were also examined. The results suggest that Al-(0.25%~3.0%)Fe-0.02%B(mass fraction) alloys exhibit good casting fluidity. Adding Fe could significantly improve the mechanical properties but slightly lower the electrical conductivity, as the strength increases by 130%, but the electrical conductivity decreases by 17% when the Fe content varies from 0.25% to 3.0%. The electrical conductivity and mechanical strength both slightly decrease in a high-temperature environment with decent stability. Aging treatment slightly improves both the electrical conductivity and strength by approximately 1.4%IACS and 7 MPa, respectively. The Al-Fe alloy should be a promising candidate for a high conductivity, middle strength, low-cost die-casting material.

Key words: Al-Fe alloys; die-casting; electrical conductivity; mechanical properties; heat treatment

“双碳”背景下,新能源汽车渗透率快速提升,汽车减重将助力节能减排。铝合金密度低,“以铝代钢”“以铝代铜”是汽车轻量化、降本增效的重要课题[1]。压铸铝合金因成型方式简便高效、后加工量少,广泛应用于汽车、航空、3C 电子、电力电工等领域[2-4]。随着行业发展,铸铝转子、电力金具等零部件对铝及铝合金提出了高导电性和导热性、中等强度和高铸造性的要求,而传统商业压铸铝无法满足以上需求,因而需要深入研究新型铝合金。

根据金属强化理论[5]和马西森定律[6]可知,铝合金的导电性和强度存在固有矛盾, 合金元素的加入会产生晶格畸变、引入缺陷、增加晶界数量,从而降低材料导电性和导热性、提升材料强度[7-8]。合金元素种类、含量、固溶状态是影响导电性、流动成型性的关键因素,共晶成分的铝合金(如 Al-12Si)具有优异的流动性和抗热裂性,适合于压铸成型,但合金元素

收稿日期:2023-11-02

作者简介:蒋嗣本,1988 年生,博士.主要从事汽车轻量化材料的开发及应用方面的工作.Email: jiang.siben@byd.com

引用格式:蒋嗣本,杨阳,陆可馨.Fe 含量对 Al-Fe 压铸铝合金导电率及机械性能的影响[J].铸造技术,2023,44(12): 1139-1143.
JIANG S B, YANG Y, LU K X. Effect of Fe content on the electrical conductivity and mechanical properties of Al-Fe Die-casting alloy [J]. Foundry Technology, 2023, 44(12): 1139-1143.

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

的大量加入严重损伤了导电性能[9-11]。研究人员在开发新型合金时,应平衡导电和机械性能之间的矛盾关系,探索新的合金体系。。Al-Ni 系合金是高导电材料的体系之一,但 Ni 的价格高,因此研究低成本的合金体系对推动高导电材料规模化应用非常重要。Fe 元素成本低,可与铝元素生成 Al_3Fe 、Al_6Fe 等强化相,在提高强度的同时仅轻微降低导电率[12-13]。Al-Fe 合金共晶点为 1.8%(质量分数),低合金化即可达到共晶组织,实现好的铸造性能,提高压铸脱模性能,降低对模具钢的腐蚀[14]。本研究采用 Al-Fe 系合金实现高导电性、中强度、低成本和良好压铸性能的需求,系统地探究了不同 Fe 含量对材料微观组织、导电率和机械性能的影响规律,并验证了材料的高温性能和热处理作用。

1 实验材料与方法

本实验在 Al-Fe 系合金中加入 0.02%B 元素,研究 Fe 含量对 Al-*x*Fe-0.02B 合金性能的影响。在 0.25%~3.0%区间设置 7 个 Fe 含量成分梯度,采用真空水冷铜坩埚感应熔炼炉将纯铝及中间合金熔炼得到合金铸锭,采用直读光谱仪 SPECTRO MAXx07 测试其成分,Fe 元素名义含量及实测含量如表 1 所示。采用标准金相试样制备方法对试样表面进行打磨抛光腐蚀,用 Olympus DSX510 金相显微镜观察抛光后试样合金的显微组织。每个成分梯度取 3 个平行试样,采用 Sigma2008A 导电率测试仪测试试样导电率,采用 HVS200701 数字式维氏硬度计测试样品硬度,加载力为 1 N,维持 15 s 后卸力,取平均值得到最终数值。采用力劲 160 T 压铸机压铸力学标准拉伸试样棒(图 1),压铸压力 70~80 MPa,压铸温度为 700~720 ℃,压射速度为 2~3 m/s。每个成分点取 3 根 Al-*x*Fe-0.02B 压铸试棒于 CMT5105 万能试验机进行拉伸测试,拉伸速率为 2 mm/min,测试结果取平均值。

表 1 Al–*x*Fe–0.02B 合金 Fe 元素名义含量及实测含量
Tab.1 Nominal and measured Fe content of the Al–*x*Fe–0.02B alloys

(mass fraction/%)

No.	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#
Nominal	0.25	0.5	1	1.5	2	2.5	3
Measured	0.277	0.478	0.957	1.45	1.96	2.47	2.91

2 实验结果及讨论

2.1 显微组织

Al-*x*Fe-0.02B 合金的光学显微组织如图 2 所示。Fe 在 Al 中的固溶度非常低,几乎所有添加的 Fe 都以中间相的形式存在[13]。通过观测压铸后 1#~7# Al-*x*Fe-0.02B 样品心部显微组织发现,Fe 含量为 0.25%时,在显微镜下几乎观测不到 Al-Fe 中间相的存在,此时合金属于亚共晶范围[17],微观组织包含 α-Al 相和少量的初生 Al_3Fe 相。Fe 含量增加至 1.5%时,含量接近 Fe 的共晶成分点 1.8%[18],可以明显观测到铝合金基体内均匀分布细长的针状 Al_3Fe 相,长度约为 5~15 μm。随着 Fe 含量继续增加至 3.0%,合金处于过共晶状态,Al_3Fe 相的大小由细长针状变得粗大,长度进一步增加至 15~25 μm,且数量也随之增多。此时,如果 Fe 含量继续增大,将会在铝合金基体中观测到 Al_6Fe 相的生成[19-20]。

2.2 导电率及硬度

采用 3 点取平均值的方法得到不同 Fe 含量合金压铸后的导电率及硬度,如图 3 所示。Fe 含量在 0.25%~0.5%之间时,合金导电率与纯铝相当,Fe 含量增加导电率微微提升。当 Fe 含量区间为 0.5%~3.0%时,合金导电率线性下降,但 3.0%时依然保持较好的导电性,导电率为 50%IACS;当 Fe 含量为 0.25%~3.00%时,硬度与 Fe 含量呈正相关,Fe 含量>1%时,硬度显著提升。在纯 Al 中增加 3.0%的 Fe,硬度可提升至 1.5倍。

Al_3Fe 相的析出和形貌改变使导电率下降、硬度

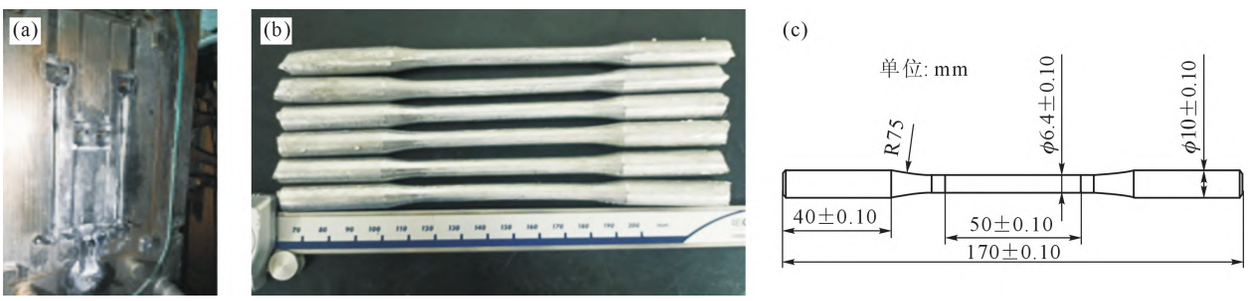

图 1 实验样品图:(a) 试棒压铸模具,(b) 压铸试样,(c) 试棒尺寸
Fig.1 Experimental sample images: (a) test bar die, (b) die-casted test bars, (c) test bar size

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

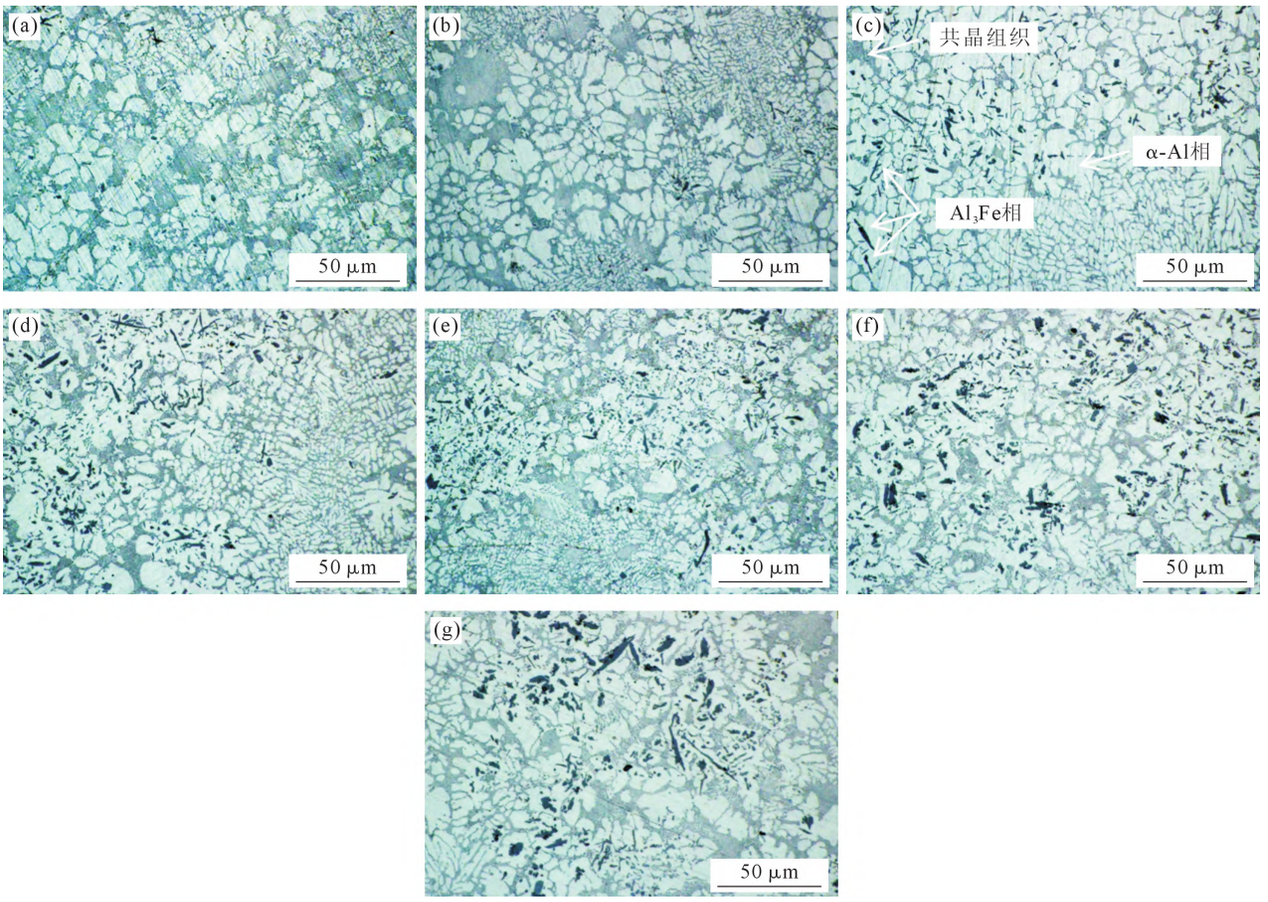

图 2　Al-*x*Fe-0.02B 压铸件微观组织：(a) 0.25%, (b) 0.5%, (c) 1.0%, (d) 1.5%, (e) 2.0%, (f) 2.5%, (g) 3.0%

Fig.2　Microstructure of die-casted Al-*x*Fe-0.02B alloys: (a) 0.25%, (b) 0.5%, (c) 1.0%, (d) 1.5%, (e) 2.0%, (f) 2.5%, (g) 3.0%

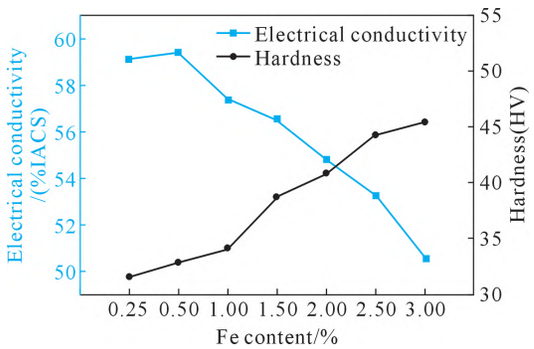

图 3　Al-*x*Fe-0.02B 压铸件的导电率及硬度

Fig.3　Electrical conductivity and hardness and of die-casted Al-*x*Fe-0.02B alloys

提升。随着 Fe 含量的增加，合金中长针状和鱼骨状 Al_3Fe 相的数量不断增多并变得粗大，逐渐连成网状结构。当铁含量>2.5%时，中间相的含量>30%。研究表明[21]，元素由固溶态转变为析出相可以降低晶格畸变，提升导电率。相比于细小弥散的中间相，大块、分支状的形貌对电子的散射作用更大，造成传导电子在传递过程中受到的阻碍剧增。随着 Fe 含量的提升，固溶态的 Fe 转变成中间 Al_3Fe 相提升导电率，与此同时中间相的增多和粗化则导致导电率下降，二者共同作用造成导电率先缓慢增加后线性下降的现象。硬质中间相的存在可以阻碍位错运动，提高材料硬度。

2.3　室温拉伸性能

Al-*x*Fe-0.02B 压铸拉伸试棒充型完整、脱模顺利，表现出良好的压铸成型性，其拉伸性能如图 4 所示。当 Fe 含量从 0.25%增加到 3.0%，其屈服强度从 41 MPa 提升至 91 MPa，抗拉强度从 72 MPa 提升至 166 MPa，强度增加至原来的 2.2~2.3 倍。与硬度的增加规律一致，硬质中间相的析出阻碍变形时位错在材料中的运动，中间相数量越多，变形的阻力越大，体现在宏观上即为强度的提升。另外，Al-Fe 共晶点低，少量 Fe 的加入即可提升 Al 基体的铸造流动性，在压铸过程材料中更易充型模腔，减少压铸缺

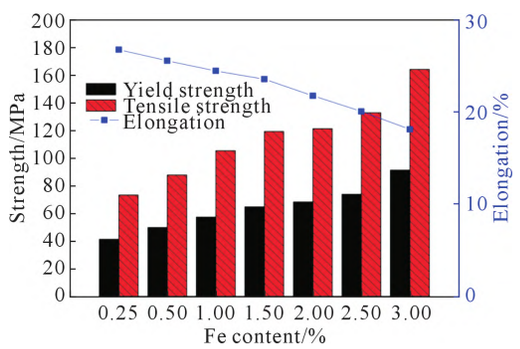

图 4　Al-*x*Fe-0.02B 压铸件的拉伸性能

Fig.4　Tensile properties of die-casted Al-*x*Fe-0.02B alloys

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

陷，对强度提升起到正向作用。Fe 的加入使合金伸长率有一定下降，这是因为 Al_3Fe 相由球状颗粒长大成为粗针状，在变形过程中割裂基体，导致材料塑性变差，但整体仍然维持>18%的高伸长率，再次验证了材料的压铸可行性。

2.4 高温拉伸性能

Al-*x*Fe-0.02B 应用于电机铸铝转子等零部件时，存在高温工况，其服役条件通常为室温至 200 ℃。在此条件下，材料有可能因受热而发生性能变化。为此，选取 6#、7# 样品分别在 100、150、200 ℃下研究温度对导电率和强度的影响。

如图 5 所示，当温度升高时，金属离子振动加剧，对自由电子的移动散射作用增大，导致材料导电性下降。6# 样品在 200 ℃时导电率由 53.3%IACS 下降至 49.4%IACS，7# 样品由 50.6%IACS 下降至 47.5%IACS，衰减率分别为 7.3%、6.1%。材料在高温服役条件下发生软化，6# 样品在 200 ℃时的抗拉强度下降 8 MPa，下降程度 5.9%；7# 样品在 200 ℃时的抗拉强度下降 17 MPa，下降程度 10%。总体而言，材料展示出较好的高温稳定性。

2.5 热处理对 Al–Fe 合金的影响

考虑到材料在高温长时服役时，内部可能发生组织形貌或析出相改变，该过程类似于铝合金的时效处理。选取 6#、7# 压铸样品分别在 150、180 ℃时效 1、2、3 h 后空冷至室温并测试其导电及力学变化，实验结果如图 6 所示。经过热处理后，材料中的主要强化相 AlFe 相几乎不随温度发生改变，而晶格内部空位等缺陷释放，对导电是有利因素[22]，时效后材料的强度及导电性能均发生轻微提升，抗拉强度最大提升 7 MPa，导电率最大提升 1.4%IACS。

3 结论

(1)Al-*x*Fe-0.02B 合金具有良好的压铸成型性，材料导电率为 50%IACS~60 %IACS，硬度 31~46 HV，屈服强度为 41~91 MPa，抗拉强度为 72~166 MPa，Al-Fe 系合金是适合开发兼具高导电、中强度、低成本、可压铸的合金体系。

(2)随着 Fe 含量的增加，合金中 Al_3Fe 相的数量不断增多并变得粗大，逐渐连成网状结构，增大电子散射，降低导电率，但提高材料机械性能。Fe 含量为 0.25%~0.5%时，Fe 含量的增加不会明显改变合金导电率，继续增加则会导致合金导电率线性下降。Fe 含量由 0.25%增加至 3.0%时，材料机械性能提升明显，硬度提升至 1.5 倍，强度提升至 2.2~2.3 倍。

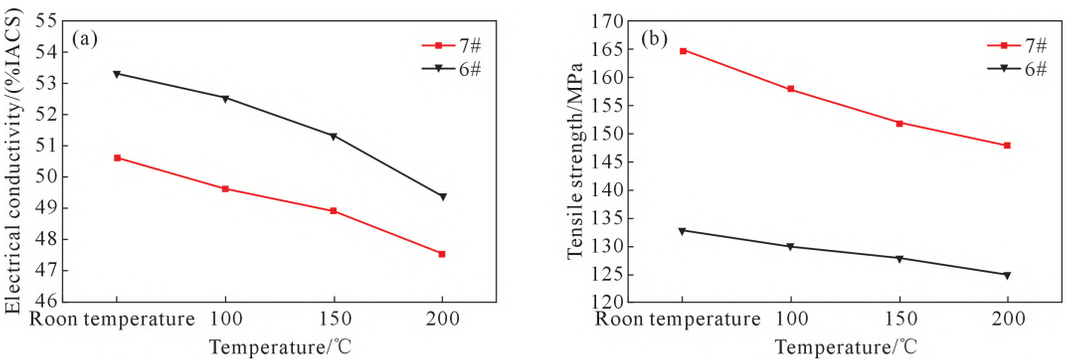

图 5 6#、7# 压铸件高温性能：(a) 导电率–温度曲线，(b) 抗拉强度–温度曲线

Fig.5 High temperature properties of 6#& 7# die-casted specimens: (a) electrical conductivity-temperature curve, (b) tensile strength-temperature curve

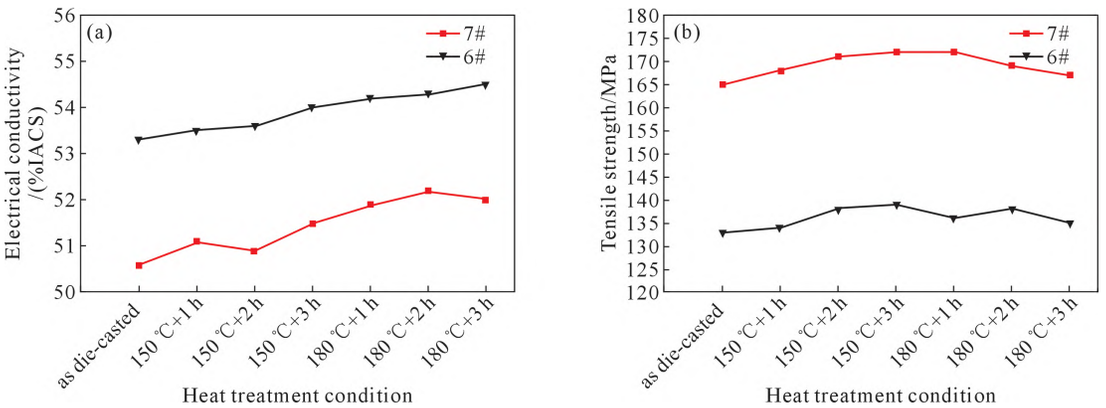

图 6 热处理对 6#、7# 压铸件性能的影响：(a) 导电率–时效制度曲线，(b) 抗拉强度–时效制度曲线

Fig.6 The effect of heat treatment on the properties of 6# & 7# die-casted specimens: (a) electrical conductivity-heat treatment condition curve, (b) tensile strength-heat treatment condition curve

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

(3)在高温工况下，Al-Fe 系合金的导电率和强度下降不明显，总体表现出较好的高温稳定性能。对 Al-Fe 系合金进行 150、180℃时效 1、2、3 h 后空冷至室温，可以轻微提升材料导电率和强度。

参考文献：

[1] 毕晓勤，张森，徐琴，等. 提高铝合金及铝基复合材料导电性方法的研究进展[J]. 铸造技术，2023, 44(6): 537-552.
BI X Q, ZHANG S, XU Q, et al. Research progress on the method of improving conductivity for aluminum alloy and aluminum matrix composites[J]. Foundry Technology, 2023, 44(6): 537-552.

[2] WANG L, MAKHLOUF M, APELIAN D. Aluminium die casting alloys: Alloy composition, microstructure, and properties-performance relationships[J]. International Materials Reviews, 1995, 40(6): 221-238.

[3] 薛斌，许忠斌，张小岩，等. 轻量化精密铸造成型技术在航空航天关键部件中的应用[J]. 铸造技术，2022, 43(4): 290-294.
XUE B, XU Z B, ZHANG X Y, et al. Application of lightweight precision casting technology in aerospace key components [J]. Foundry Technology, 2022, 43(4): 290-294.

[4] LI Y X, HU A, FU Y T, et al. Al alloys and casting processes for induction motor applications in battery-powered electric vehicles: A review[J]. Metals, 2022, 12(2): 216.

[5] 胡赓祥，蔡珣，戎咏华. 材料科学基础(第三版)[M]. 上海：上海交通大学出版社，2010.
HU G X, CAI X, RONG Y H. Fundamentals of materials science (3rd edition)[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2010.

[6] ROSSITER P L. The electrical resistivity of metals and alloys[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.

[7] ZOU C, ZHONG G, QIU C, et al. Microstructure characterization and properties of cast Al-Si-Fe-Zn alloys with high thermal conductivity[M]//CHESONIS C. The Minerals, Metals & Materials Series: Light Metals 2019. Cham: Springer, 2019: 487-492.

[8] WANG Y, ZHU L J, NIU G D, et al. Conductive Al alloys: The contradiction between strength and electrical conductivity[J]. Advanced Engineering Materials, 2021, 23(5): 2001249.

[9] CUBERO-SESIN J M, ARITA M, HORITA Z. High strength and electrical conductivity of Al-Fe alloys produced by synergistic combination of high-pressure torsion and aging[J]. Advanced Engineering Materials, 2015, 17(12): 1792-1803.

[10] PALANIVEL S, KUEHMANN C, STUCKI J R, et al. Aluminum alloys for die casting: U.S. Patent Application, 17/264,537[P]. 2021-9-23.

[11] VANDERSLUIS E, EMADI P, ANDILAB B, et al. The role of silicon morphology in the electrical conductivity and mechanical properties of as-cast B319 aluminum alloy[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2020, 51: 1874-1886.

[12] HOU J P, LI R, WANG Q, et al. Origin of abnormal strength-electrical conductivity relation for an Al-Fe alloy wire[J]. Materialia, 2019, 7: 100403.

[13] KOTIADIS S, ZIMMER A, ELSAYED A, et al. High electrical and thermal conductivity cast Al-Fe-Mg-Si alloys with Ni additions[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2020, 51: 4195-4214.

[14] 梁涛. 压铸铝合金中合金元素的作用及应用[J]. 硅谷，2012 (2): 150, 170.
LIANG T. The function and application of alloy elements in die casting aluminium alloy[J]. Silicon Valley, 2012(2): 150, 170.

[15] 周伟，莫宇飞，苏智琦，等. 硼化处理对 6101 铝合金挤压型材导电性能的影响[J]. 轻合金加工技术，2020, 48(4): 42-46.
ZHOU W, MO Y F, SU Z Q, et al. Effect of boronizing on electrical conductivity of 6101 aluminum alloy extrusion profile[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2020, 48(4): 42-46.

[16] CUI X L, WU Y Y, CUI H W, et al. The improvement of boron treatment efficiency and electrical conductivity of AA1070Al achieved by trace Ti assistant[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 735: 62-67.

[17] MBUYA T O, ODERA B O, NG'ANG'A S P. Influence of iron on castability and properties of aluminium silicon alloys: Literature review[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2003, 16(5): 451-465.

[18] SWEET L, ZHU S M, GAO S X, et al. The effect of iron content on the iron-containing intermetallic phases in a cast 6060 aluminum alloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2011, 42: 1737-1749.

[19] 罗干. 高导热 Al-Fe 基合金组织调控与性能研究[D]. 广州：华南理工大学，2021.
LUO G. Study on microstructure regulation and performance of Al-Fe based alloys with high thermal conductivity[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.

[20] OKAMOTO H. Phase diagrams for binary alloys[M]. America: ASM International, 2000.

[21] 王祝堂，田荣璋. 铝合金及其加工手册(第三版)[M]. 长沙：中南大学出版社，2000.
WANG Z T, TIAN R Z. Handbook of aluminum and its processing (3rd edition)[M]. Changsha: Central South University Press, 2000.

[22] 李梦妮，罗干，杜军. 合金元素与退火处理对 Al-7Si-0.8Fe 铸造铝合金导电和力学性能的协同影响[J].中国有色金属学报，2022, 32(6): 1571-1578.
LI M N, LUO G, DU J. Synergistic effects of alloy elements and annealing on electrical conductivity and mechanical properties of Al-7Si-0.8Fe casting aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(6): 1571-1578.

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