

挤压铸造铝铜合金的组织与力学性能研究

邱小云¹, 王冀恒²

(1. 南京科技职业学院 智能制造学院, 江苏南京 210048;

2. 江苏科技大学材料科学与工程学院, 江苏镇江 212000)

摘要: 采用金相显微镜、扫描电镜和拉伸试验机等手段, 研究了Mn/Fe比例和挤压压力对Al-Cu合金显微组织与力学性能的影响, 揭示了Al-Cu合金中富铁相的存在形式和作用机理。结果表明, T6热处理态Al-Cu合金中存在针状 β -Fe (Al_7Cu_2Fe)相和块状 $Al_7Cu_2(FeMn)$ 相; 随着Mn/Fe比例的增加, Al-Cu合金中块状 $Al_7Cu_2(FeMn)$ 相的体积分数逐渐增加, 而针状 β -Fe相的体积分数逐渐降低, 在Mn/Fe比例为1.2和1.5时合金中都为块状富铁相; 相较于挤压压力为0的Al-Cu合金, 在施加75 MPa挤压压力后, 相同Mn/Fe比例的Al-Cu合金中的富铁相都更为细小和分散; 当挤压压力为0时, Al-Cu合金在Mn/Fe比例为1.2时达到抗拉强度、屈服强度和断后伸长率的最大值; 当挤压压力为25 MPa和75 MPa时, Al-Cu合金在Mn/Fe比例为0.9时取得抗拉强度和屈服强度最大值, 而断后伸长率随着Mn/Fe比例增加而略有降低。

关键词: Al-Cu合金; 挤压压力; T6热处理; 富铁相; 力学性能

作者简介:

邱小云(1977-), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为有色金属铸造成形等。

E-mail: oldsmart@21cn.com

中图分类号: TG249.2;
TG113.12

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)03-0364-07

基金项目:

江苏省第五期“333工程”科研项目(BRA2020321); 江苏省高等教育高水平专业群建设项目[苏教职函(2021)1号]。

收稿日期:

2023-05-15 收到初稿,
2023-12-01 收到修订稿。

铸造Al-Cu合金由于比模量与比强度高特点在航空航天、交通运输等领域应用广泛。如1903年莱特兄弟用Al-Cu-Mn铸造合金制备飞机发动机的曲柄箱体, 并相继在商业飞机上大规模应用^[1]。为了提高铸造Al-Cu合金的综合性能, 国内外研究者从微合金化和热处理工艺角度做了大量工作, 并取得了较大的提升效果, 目前的研究热点主要集中在合金中杂质Fe的形成特点、存在形式及其作用机理上^[2]。虽然已经有部分科研工作者对铸造铝合金中富铁相进行过研究和报道, 但是研究多集中在Al-Si系合金中, 在铸造Al-Cu合金中的研究相对较少, 尤其是在特定铸造工艺条件下(如挤压铸造等)更是鲜有报道^[3]。在此基础上, 本文对比分析了重力铸造和挤压铸造条件下Al-Cu合金中富Fe相的变化规律并考察了不同Mn/Fe比例对Al-Cu合金组织和性能的影响规律及其作用机理, 结果可为高综合性能航空Al-Cu合金的开发与应用提供技术支撑。

1 试验方案

不同Mn/Fe比例的Al-Cu合金在井式坩埚电阻炉中熔炼, 试验原料包括99.96%的高纯铝锭、Al-48Cu、Al-5Fe和Al-10Mn中间合金, 所有原料在熔炼前都经过180 °C预热再置于坩埚中加热至725 °C, 完全熔化后进行搅拌和净化除杂, 静置12 min后进行浇注。在10 t立式液压机上对Al-Cu合金进行直接挤压铸造, 挤压压力分别为0(重力铸造)、25 MPa和75 MPa, 在挤压铸造过程中控制挤压速度在12~15 mm/s, 保压时间统一为0.5 min, 冷却方式为空冷。挤压铸造过程中所使用的模具的预热温度为235 °C, 脱模剂为石墨机油, 铸锭尺寸为 $\Phi 70$ mm \times 55 mm。之后对Al-Cu合金进行T6热处理^[4], 具体工艺为: 545 °C保温12 h, 水淬固溶处理+165 °C/10 h时效处理(空冷)。6种不同Mn/Fe比例的Al-Cu合金的实测化学成分如表1。

表1 试验合金的化学成分
Table 1 Chemical composition of test alloys $w_B/\%$

序号	Mn/Fe比例	Cu	Mn	Fe	Si	Al
1	0	7.01	0.01	0.51	0.11	余量
2	0.3	7.00	0.16	0.53	0.10	余量
3	0.6	6.02	0.31	0.49	0.09	余量
4	0.9	6.03	0.47	0.49	0.10	余量
5	1.2	7.05	0.63	0.50	0.09	余量
6	1.5	7.03	0.77	0.51	0.09	余量

采用 Nova™ NanoSEM 430型扫描电子显微镜和附带能谱仪进行显微形貌和拉伸断口形貌观察以及微区成分测试。不同Mn/Fe比例的Al-Cu合金的金相试样依次经过冷镶、砂纸打磨、金刚石研磨膏抛光和Keller's腐蚀剂(95 mL H₂O+2.5 mL HNO₃+1.5 mL HCl+1.0 mL HF)腐蚀后,置于蔡司Axio Imager M2m金相显微镜上观察,并用LMW 3.8.1图像分析软件对富铁相含量进行统计分析。透射电镜试样采用JEOL-2010透射电子显微镜上进行微观结构观察。采用Sans CMT5105电子万能拉伸试验机进行拉伸速度为2 mm/min的室温拉伸性能测试,最终结果取3组试样平均值,拉伸试样尺寸如图1所示。

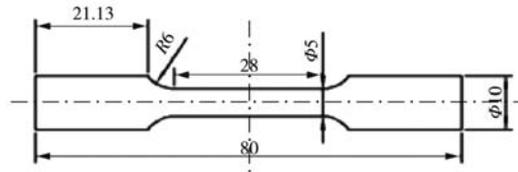
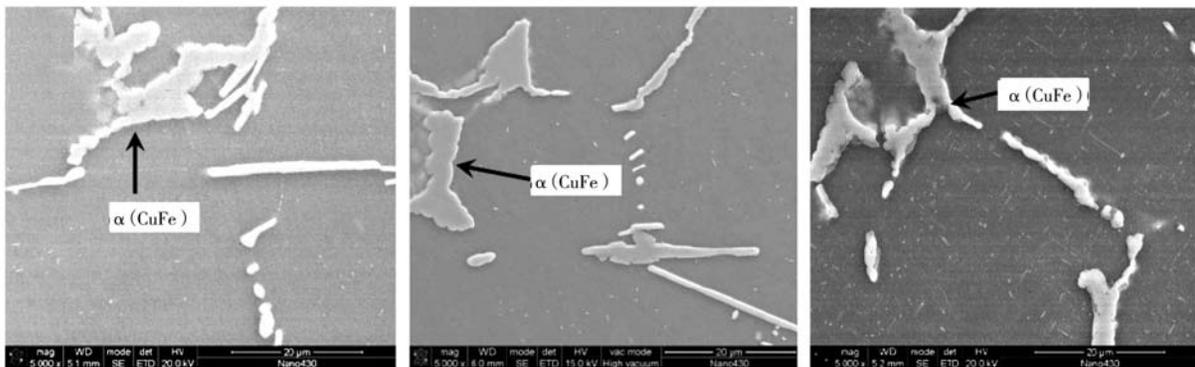


图1 拉伸试样尺寸示意图
Fig. 1 Schematic diagram of tensile specimen size

2 试验结果和分析

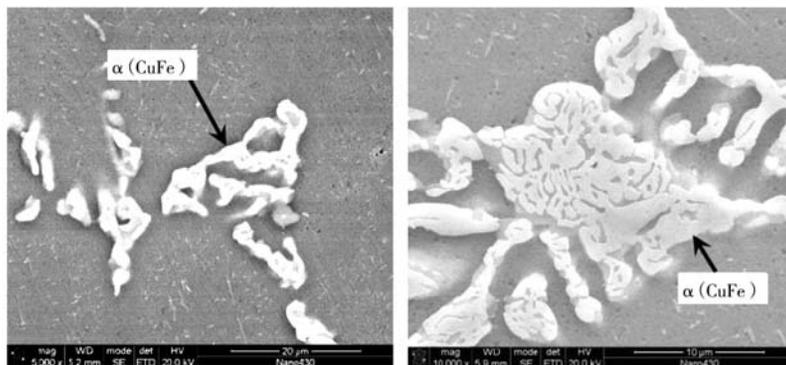
重力铸造和挤压铸造T6热处理态Al-Cu合金中富铁相的扫描电镜显微形貌如图2。可以发现,经过T6热处理后,Al-Cu合金中针状β-Fe相较为稳定,同时合金中出现了白色的块状富铁相α(CuFe)。在Mn/Fe比例为0~0.6时,合金中都可见针状β-Fe相和块状α(CuFe)富铁相,而当Mn/Fe比例上升至1.2和1.5时,合金中针状β-Fe相基本消失,而块状富铁相α(CuFe)的含量有所增加。微区能谱分析结果表明,当Mn/Fe比例为0时合金中Al、Cu和Fe元素的含量(原子分数,下同)分别为74.48%、16.91%和8.94%;当Mn/Fe比例为0.3时合金中Al、Cu、Mn和Fe元素的含量分别为74.32%、17.25%、0.55%和7.90%;当Mn/Fe比例为0.6时合金中Al、Cu、Mn和Fe元素的含量分别为74.59%、16.83%、



(a) Mn/Fe比例0

(b) Mn/Fe比例0.3

(c) Mn/Fe比例0.6



(d) Mn/Fe比例1.2

(e) Mn/Fe比例1.5

图2 不同Mn/Fe比例对挤压压力为0的Al-Cu合金富铁相的影响

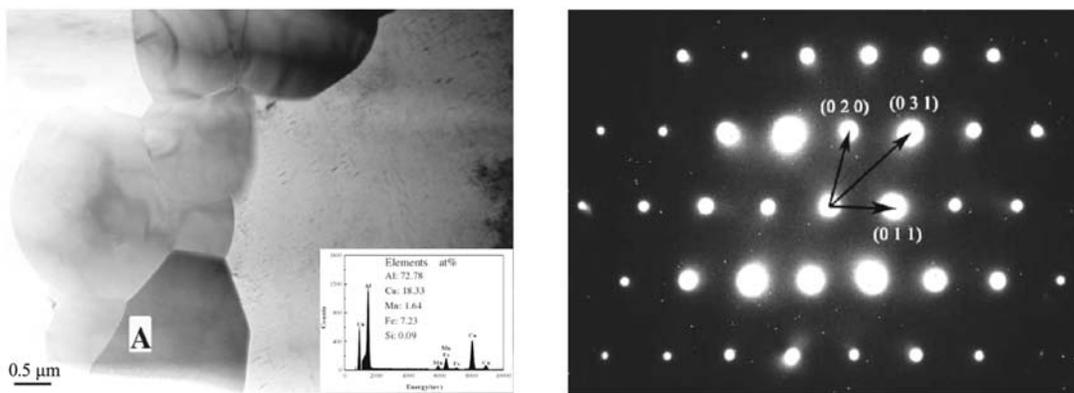
Fig. 2 Effect of different Mn/Fe ratio on iron rich phase of Al-Cu alloy with extrusion pressure of 0

1.33%和7.28%；当Mn/Fe比例为1.2时合金中Al、Cu、Mn和Fe元素的含量分别为73.24%、17.35%、2.05%和7.38%；当Mn/Fe比例为1.5时合金中Al、Cu、Mn和Fe元素的含量分别为74.96%、16.59%、2.35%和8.10%。由此可见，Al-Cu合金中Mn/Fe比例的增加会使得合金中针状 β -Fe富铁相向块状 α (CuFe)富铁相转变，合金中富铁相的种类和含量会发生改变并最终影响合金的力学性能。

对Mn/Fe比例为1.5的Al-Cu合金中块状富铁相进行透射电镜观察，结果如图3。合金中可见块状的第二

相存在，能谱分析结果表明，这种块状第二相中Al、Cu、Fe和Mn元素的原子百分比约为7:2:1:1，符合 $\text{Al}_7\text{Cu}_2(\text{FeMn})$ 相的化学式。结合选区电子衍射花样分析结果可知^[5]，这种块状第二相为四方晶体结构，电子衍射斑点标定表明点阵常数 $a=b=0.634\text{ nm}$ ，点阵常数 $c=1.488\text{ nm}$ ，由此进一步确定了这种块状相为 $\text{Al}_7\text{Cu}_2(\text{FeMn})$ 富铁相。

重力铸造条件下，不同Mn/Fe比例Al-Cu合金的显微组织如图4。当Mn/Fe比例为0和0.3时，Al-Cu合金中可见针状 β -Fe相和块状 $\text{Al}_7\text{Cu}_2(\text{FeMn})$ 相，且Mn/Fe

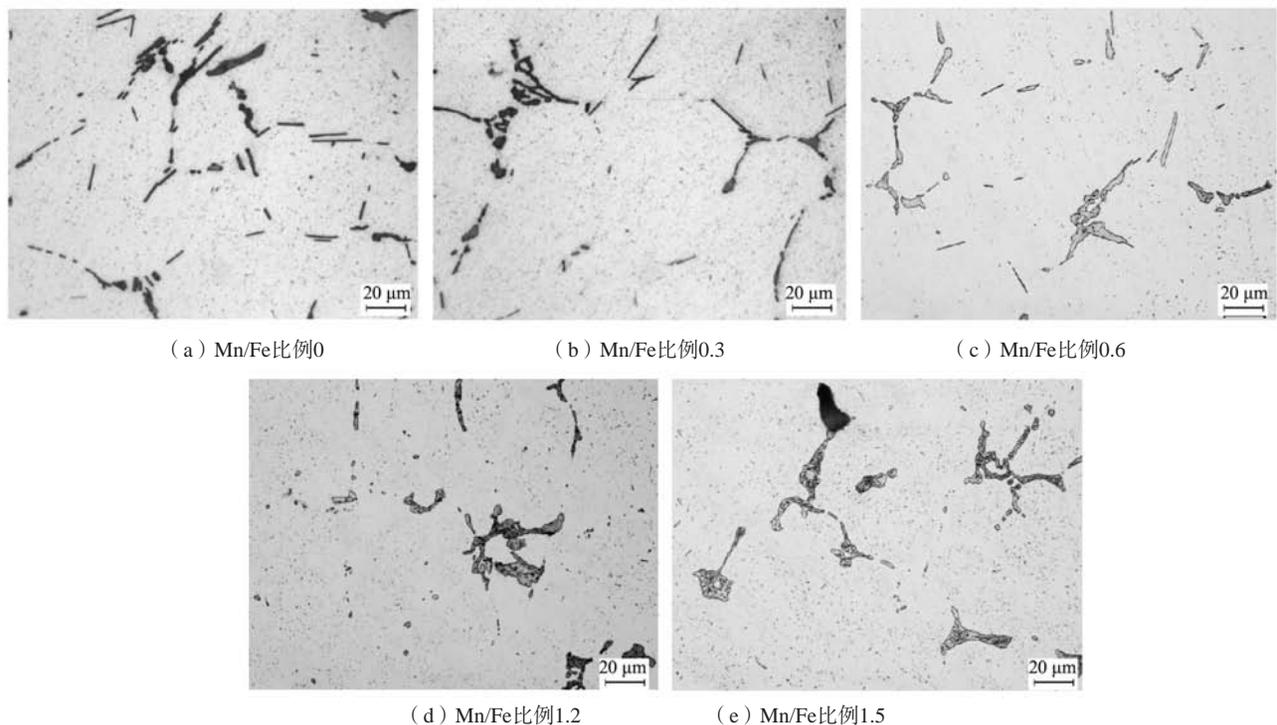


(a) 块状富铁相的TEM形貌

(b) [100]晶带轴选区电子衍射花样

图3 Mn/Fe比例为1.5的Al-Cu合金的TEM形貌和选区电子衍射花样

Fig. 3 TEM morphology and selected area electron diffraction patterns of Al-Cu alloy with Mn/Fe ratio of 1.5



(a) Mn/Fe比例0

(b) Mn/Fe比例0.3

(c) Mn/Fe比例0.6

(d) Mn/Fe比例1.2

(e) Mn/Fe比例1.5

图4 不同Mn/Fe比例对挤压压力为0的Al-Cu合金显微组织的影响

Fig. 4 Effect of different Mn/Fe ratio on microstructure of Al-Cu alloy with extrusion pressure of 0

比例为0.3时合金中针状 β -Fe相含量较少。当Mn/Fe比例增加为0.6时,合金中只有少量针状 β -Fe相存在,而块状 Al_7Cu_2 (FeMn)相更加明显。在Mn/Fe比例为1.2和1.5时,Al-Cu合金中只有块状 Al_7Cu_2 (FeMn)相存在。图5为不同Mn/Fe比例Al-Cu合金中针状 β -Fe相和块状 Al_7Cu_2 (FeMn)相的体积分数统计结果。可以看出,随着Mn/Fe比例的增加,Al-Cu合金中块状 Al_7Cu_2 (FeMn)相的体积分数逐渐增加,而针状 β -Fe相的体积分数逐渐降低,在Mn/Fe比例为0时针状 β -Fe相占全部富铁相的37%,而Mn/Fe比例为1.2和1.5时合金中均为块状富铁相。此外,当Mn/Fe比例从0.9增加至1.2时,合金中富铁相的体积分数没有发生明显变化,只是针状 β -Fe相全部转变为块状 Al_7Cu_2 (FeMn)相,而

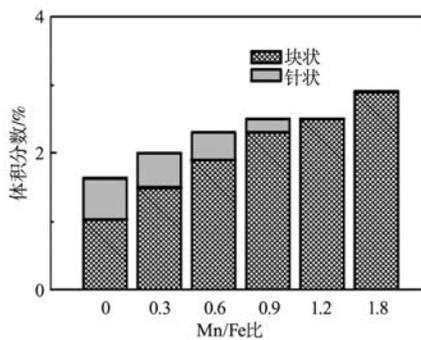


图5 挤压压力为0的Al-Cu合金中富铁相的体积分数统计结果
Fig. 5 The volume fraction of iron rich phase in Al-Cu alloy

Mn/Fe比例增加至1.5时,过量的Mn会造成富铁相的粗化以及合金中孔洞的产生^[6],在整体上表现为富铁相体积分数的进一步增加。

当挤压压力为75 MPa时、不同Mn/Fe比例Al-Cu合金的显微组织如图6。当Mn/Fe比例为0和0.3时,合金中仅存在少量针状 β -Fe相,针状富铁相的长度有所减小,而宽度略有增加,且富铁相较为分散地分布在合金基体中。当Mn/Fe比例增加至0.6、1.2和1.5时,合金中针状 β -Fe相已经消失,且富铁相基本都以骨骼状或者短棒状形态存在。与挤压压力为0的Al-Cu合金比较,在施加75 MPa挤压压力后,相同Mn/Fe比例的Al-Cu合金中的富铁相都更为细小和分散,且富铁相圆整度提高,可以一定程度上降低对合金造成的危害^[7]。

图7为不同Mn/Fe比例的Al-Cu合金的常温拉伸性能测试结果。重力铸造条件下随着Mn/Fe比例的增加,合金的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率会随着Mn/Fe比例增加而先增后减,在Mn/Fe比例为1.2时达到最大值。挤压铸造条件下(挤压压力为25 MPa和75 MPa),合金的抗拉强度和屈服强度随着Mn/Fe比例的变化趋势与重力铸造条件下相同,在Mn/Fe比例为0.9时取得最大值,而断后伸长率有随着Mn/Fe比例增加而略有降低。在相同Mn/Fe比例下,随着挤压压力的增加,Al-Cu合金的强度和塑性都得到明显提高。重力铸造和挤压铸

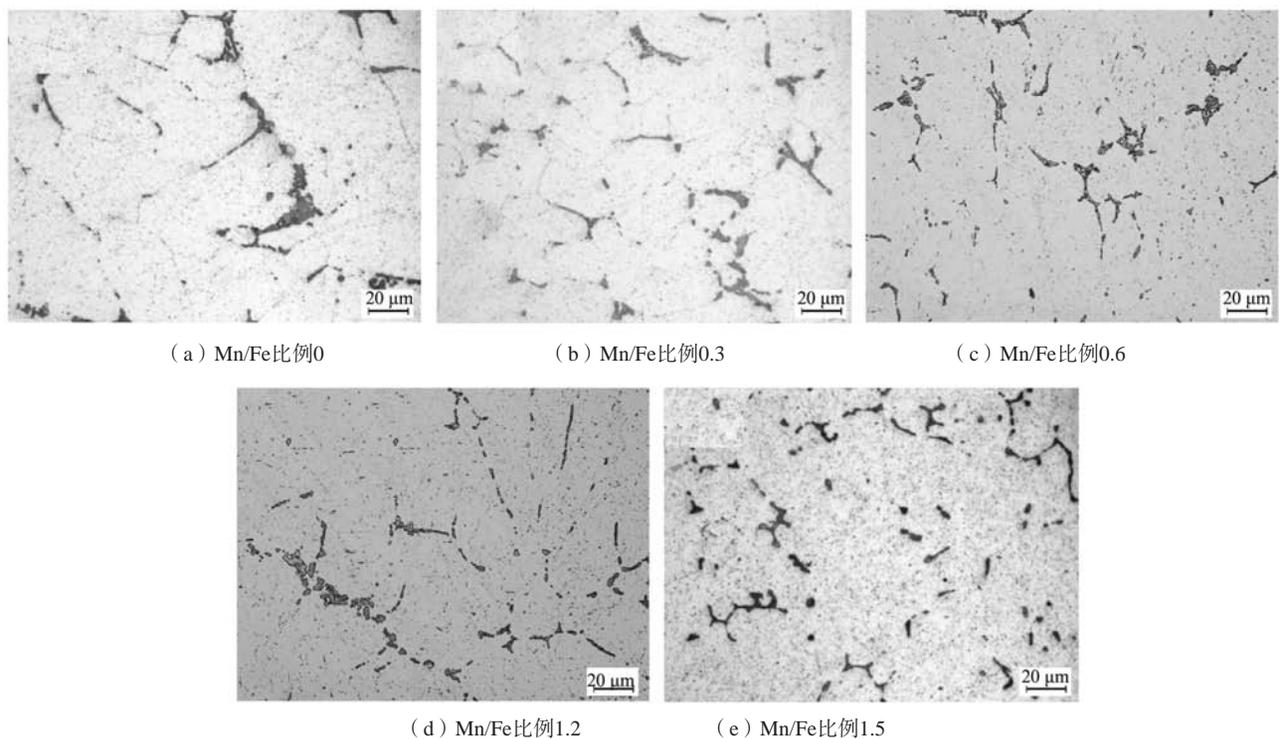
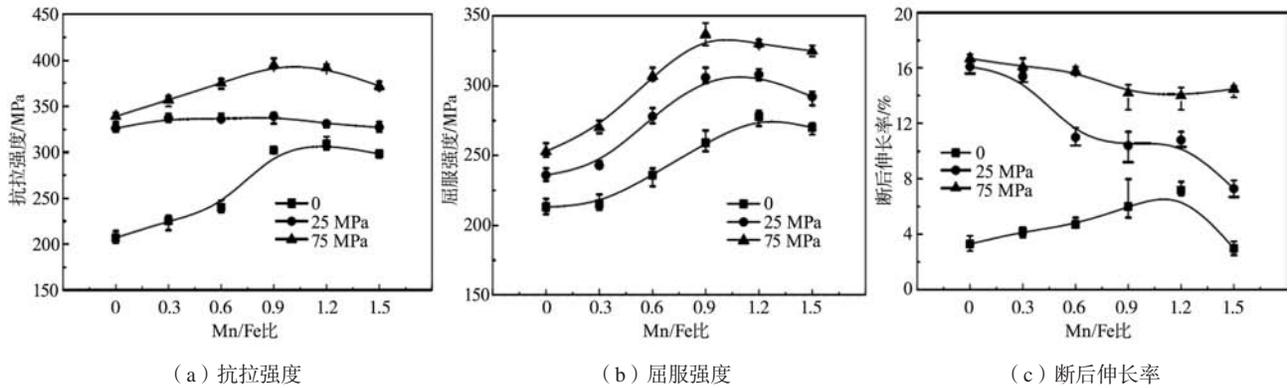


图6 不同Mn/Fe比例对挤压压力为75 MPa的Al-Cu合金显微组织的影响

Fig. 6 Effect of different Mn/Fe ratio on microstructure of Al-Cu alloy with extrusion pressure of 75 MPa



(a) 抗拉强度

(b) 屈服强度

(c) 断后伸长率

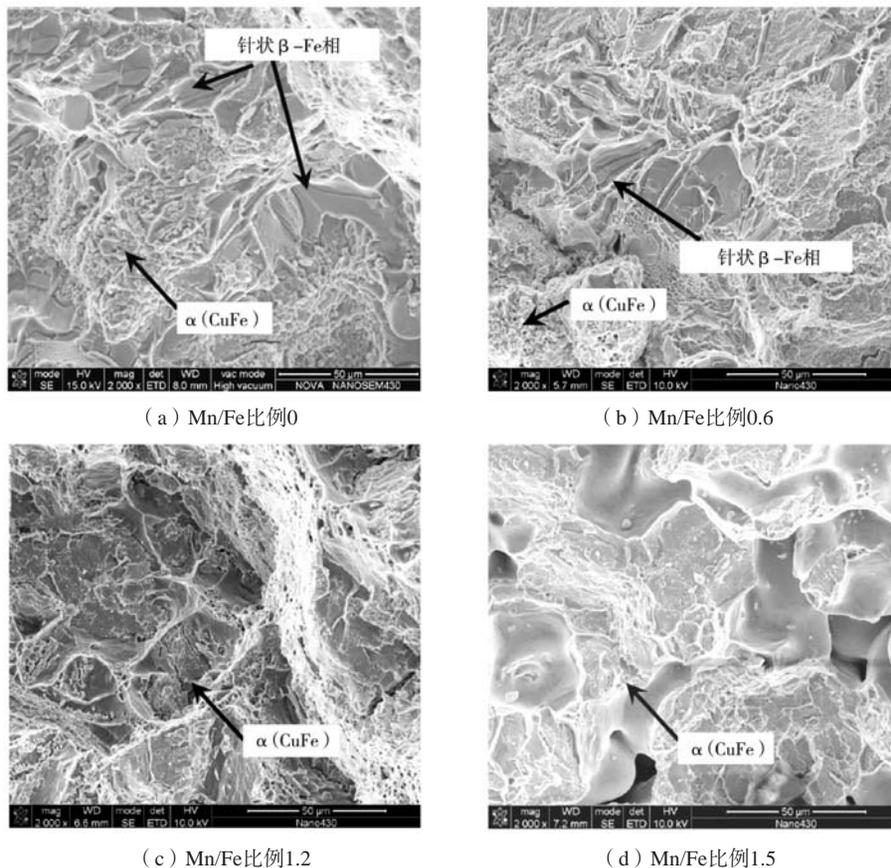
图7 不同Mn/Fe比例的Al-Cu合金的常温拉伸性能

Fig. 7 Tensile properties of Al-Cu alloy with different Mn/Fe ratio at normal temperature

造条件下, Al-Cu合金的力学性能随着Mn/Fe比例的变化特征主要与合金中富铁相的种类及其尺寸和分布有关^[8-13], 针状 β -Fe ($\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$)相相较于块状 Al_7Cu_2 (FeMn)相更容易成为裂纹源而割裂与基体的连接性, 导致Al-Cu合金力学性能的降低。改变Al-Cu合金中Mn/Fe比例可以对富铁相的种类和尺寸、分布产生影响, 从而改善合金的力学性能; 但是如果Mn含量过量, 会造成合金中富铁相含量增多, 且合金中孔洞等

缺陷数量也会增多, 反而对合金的组织 and 力学性能带来不利的影响^[14-15]; 因此, 在实际工业生产过程中应该对Mn/Fe比例加以控制。

图8为挤压压力为0、Mn/Fe比例分别为0、0.6、1.2和1.5时Al-Cu合金的常温拉伸断口形貌。当Mn/Fe比例为0和0.6时, Al-Cu合金断面上可见针状 β -Fe ($\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$)相。在拉伸试验过程中, 裂纹将在针状 β -Fe相所在位置起裂, 并在 α (CuFe)相之间产生偏



(a) Mn/Fe比例0

(b) Mn/Fe比例0.6

(c) Mn/Fe比例1.2

(d) Mn/Fe比例1.5

图8 不同Mn/Fe比例的Al-Cu合金的拉伸断口形貌

Fig. 8 Tensile fracture surface of Al-Cu alloy with different Mn/Fe ratio

转,形成脆性开裂特征。当Mn/Fe比例为1.2时,断口主要由细小韧窝和撕裂棱组成,表现为韧性断裂特征,断面上只观察到 α (CuFe)相的存在。当Mn/Fe比例为1.5时,断口上除 α (CuFe)相外,还可见明显的铸造孔洞缺陷存在,此时合金的强度和塑性较差^[16-17]。不同类型的富铁相在拉伸过程中都作为硬脆相而容易产生应力集中,但是相对而言,针状 β -Fe相更容易形成裂纹源,而结构紧凑的 α (CuFe)相对基体的割裂作用要小^[18-20],因此对强度和塑性的不利影响要小。

3 结论

(1) 挤压压力为0时, Al-Cu合金中Mn/Fe比例的增加使合金中针状 β -Fe富铁相向块状 α (CuFe)富铁相转变;透射电镜分析结果表明合金中块状相为 Al_7Cu_2 (FeMn)富铁相。

(2) 挤压压力为0时,随着Mn/Fe比例的增加, Al-Cu合金中块状 Al_7Cu_2 (FeMn)相的体积分数逐渐增

加,而针状 β -Fe相的体积分数逐渐降低。当Mn/Fe比例为1.2和1.5时合金中都为块状富铁相,相较于挤压压力为0的Al-Cu合金,在施加75 MPa挤压压力后,相同Mn/Fe比例的Al-Cu合金中的富铁相都更为细小和分散,且富铁相圆整度提高。

(3) 重力铸造条件下Al-Cu合金的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率会随着Mn/Fe比例增加而先增后降,在Mn/Fe比例为1.2时取得最大值;挤压铸造条件下(挤压压力为25 MPa和75 MPa),合金的抗拉强度和屈服强度随着Mn/Fe比例的变化趋势与重力铸造条件下相同,在Mn/Fe比例为0.9时取得最大值,而断后伸长率有随着Mn/Fe比例增加而略有降低。

(4) 改变Al-Cu合金中Mn/Fe比例可以对富铁相的种类和尺寸、分布产生影响,从而改善合金的力学性能;但是如果Mn含量过量,会造成合金中富铁相含量增多,且合金中孔洞等缺陷数量也会增多,反而对合金的组织 and 力学性能带来不利的影响。

参考文献:

- [1] 程翔翔, 陈家浩, 陶思节, 等. Al-Cu合金中微合金化的应用及其研究进展 [J]. 现代交通与冶金材料, 2022, 2(6): 81-89.
- [2] 梅自强, 刘志义, 柏松, 等. 稀土钇对铸造Al-Cu-Mg-Ag合金组织和力学性能的影响 [J]. 轻合金加工技术, 2021, 49(5): 15-19.
- [3] LIU K, CAO X, CHEN X G. Solidification of iron-rich intermetallic phases in Al-4.5Cu-0.3Fe cast alloy [J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2011, 42(7): 2004-2016.
- [4] WANG J, YANG Z, MA Z J, et al. Influence of cerium content on the microstructure and thermal expansion properties of suction cast Al-Cu-Fe alloys [J]. Royal Society Open Science, 2021, 8(11): 210584-210590.
- [5] FENG Z Q, YANG Y Q, CHEN Y X, et al. In-situ TEM investigation of fracture process in an Al-Cu-Mg alloy [J]. Materials Science & Engineering A Structural Materials Properties Microstructure & Processing, 2013, 586(6): 259-266.
- [6] KANG S J, KIM Y W, KIM M, et al. Determination of interfacial atomic structure, misfits and energetics of Ω phase in Al-Cu-Mg-Ag alloy [J]. Acta Materialia, 2014, 81: 501-511.
- [7] 吴楠, 祝喙, 杨路, 等. Al-Cu-Mn合金铸锭均匀化工艺及组织性能分析 [J]. 有色金属材料与工程, 2020, 41(5): 22-27.
- [8] 林波. 挤压铸造Al-5.0Cu合金中富铁相形成特点及力学性能研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [9] 柴兴强, 阎峰云. 半固态等温热处理对Al-Cu-Mn合金组织的影响 [J]. 铸造, 2022, 71(8): 985-989.
- [10] LOKESH N G, SHIVAKUMAR S, KARUNAKARA S. Study of hardness and tensile behaviour of Fe_2O_3 reinforced Al-Cu alloy metal matrix composites by stir squeeze casting [J]. Manufacturing Technology Today, 2019, 18(11): 3-8.
- [11] 杨玉萍, 苏睿明, 马思怡, 等. Ni元素对Al-Cu-Mn合金组织及力学性能的影响 [J]. 有色金属科学与工程, 2023, 14(1): 67-73.
- [12] LIN B, HE X X, ZHANG W X, et al. Evolution of iron-rich intermetallics and its effect on the mechanical properties of Al-Cu-Mn-Fe-Si alloys after thermal exposure and high-temperature tensile testing [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23: 2527-2541.
- [13] ZHANG W, LIN B, FAN J, et al. Microstructures and mechanical properties of heat-treated Al-5.0Cu-0.5Fe squeeze cast alloys with different Mn/Fe ratio [J]. Materials Science & Engineering A Structural Materials Properties Microstructure & Processing, 2013, 588(24): 366-375.
- [14] 李宽, 罗峰, 刘志新. 大规模集成电路用Al-Cu合金的制备与组织性能 [J]. 铸造, 2019, 68(11): 1255-1260.
- [15] WANG Z, CHEN M, JIANG H, et al. Effect of artificial ageing on strength and ductility of an Al-Cu-Mg-Mn alloy subjected to solutionizing and room-temperature rolling [J]. Materials Characterization, 2020, 165: 110383-110394.
- [16] 洪大军, 李爱文, 胡丽敏, 等. 热处理对Al-Cu-Li-Mg-Zr-Er合金组织和性能的影响 [J]. 航天制造技术, 2022, 234(4): 1-5.

- [17] 李彦霞, 吕偿. 时效处理对挤压铸造铝铜合金组织与硬度的影响 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (16) : 213–215.
- [18] 何仕发. 绿色建筑装饰铝合金模板的组织与性能研究 [J]. 成都工业学院学报, 2022, 25 (4) : 49–54.
- [19] 李宽, 罗峰, 刘志新. 大规模集成电路用Al-Cu合金的制备与组织性能 [J]. 铸造, 2019, 68 (11) : 1255–1260.
- [20] VAHID A, TOURADJ E, ZAHRA K, et al. Effect of mechanical alloying and preheating treatment on the phase transformation of the Al-Cu-Fe compacts annealed by microwave radiation [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 12: 749–759.

Study on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Copper Alloy by Squeezing Casting

QIU Xiao-yun¹, WANG Ji-heng²

(1. School of Intelligent Manufacture, Nanjing Polytechnic Institute, Nanjing 210048, Jiangsu, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, Jiangsu, China)

Abstract:

The effect of different Mn/Fe ratio and extrusion pressure on the microstructure and mechanical properties of Al-Cu alloy was studied by means of metallographic microscope, scanning electron microscope, and tensile testing machine, and the research revealed the existing form and effect mechanism of iron rich phase in Al-Cu alloy. The results showed that there existed needle like beta -Fe(Al₇Cu₂Fe) phase and bulk Al₇Cu₂(FeMn) phase in T5 heat treated Al-Cu alloy. With the increase of the proportion of Mn/Fe, the volume fraction of bulk Al₇Cu₂(FeMn) phase increased gradually, while the volume fraction of acicular beta-Fe phase decreased gradually, and when the ratio of Mn/Fe was 1.2 and 1.5, only bulk Al₇Cu₂(FeMn) phase in the alloy. Compared to the Al-Cu alloy with extrusion pressure of 0, the iron rich phase in Al-Cu alloy with the same Mn/Fe ratio was more fine and dispersed after applying 75 MPa extrusion pressure. When the extrusion pressure was 0, Al-Cu alloy got the maximum value of the tensile strength, yield strength and elongation with the Mn/Fe ratio was 1.2. When the extrusion pressure was 25 MPa and 75 MPa, Al-Cu alloy got the maximum value of the tensile strength and yield strength with the Mn/Fe ratio was 0.9, and the elongation slightly decreased with the increasing proportion of Mn/Fe, which were mainly related to the type, size and distribution of iron rich phase in the alloy.

Key words:

Al-Cu alloy; extrusion pressure; T6 heat treatment; iron rich phase; mechanical properties
