

Cu 含量对 7075 铝合金微观组织与力学性能的影响

唐 鹏^{1,2,4} 刘倩男¹ 谢振浩¹ 贾战迎³ 陈寒冰¹ 谢粤凌¹ 莫灼强⁴
(1.广西大学资源环境与材料学院;2.广西大学广西石化资源加工及过程强化技术重点实验室;
3.广西地凯科技有限公司;4.广西南南铝航空交通铝合金新材料与应用研究院)

摘 要 采用高温熔铸的方式制备 Al-Zn-Mg-yCu 合金(y=1.0%、1.2%、1.53%、1.7%、2.0%,质量分数)。利用金相显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、X 射线衍射仪(XRD)等研究了 Cu 含量对 Al-Zn-Mg-Cu 合金的微观组织和力学性能的影响。结果表明,随着 Cu 含量增加,合金中晶粒由原来的不规则粗大状变为细小状,合金的强度先提高后下降。合金中 Al₂Cu 相极易形成连续的网状甚至粗大的骨骼状组织,严重割裂了 7075 合金的基体组织,降低合金的力学性能。因此通过改变 Cu 含量对 Al₂Cu 颗粒进行细化,可以增强 7075 铝合金的力学性能。

关键词 Al-Zn-Mg-yCu 合金;Cu 含量;力学性能;微观组织

中图分类号 TG146.21 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.06.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Cu Content on Microstructure and Mechanical Properties of 7075 Aluminum Alloy

Tang Peng^{1,2,4}, Liu Qiannan¹, Xie Zhenhao¹, Jia Zhanying³, Chen Hanbing¹, Xie Yueling¹, Mo Zhuoqiang⁴
(1.School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University;
2.Guangxi Key Laboratory of Petrochemical Resource Processing and Process Intensification Technology, Guangxi University; 3.Guangxi Dikai Sci. & Tech. Co., Ltd.;
4.Guangxi Alnan Institute of Aerospace Transit Aluminum Alloy and Application)

Abstract: Al-Zn-Mg-yCu (y=1.0%, 1.2%, 1.53%, 1.7%, 2.0%, mass fraction) alloys were fabricated by high temperature melting-casting, and effects of Cu contents on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloys were investigated by means of metallographic microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffractometry (XRD). The results indicate that with the increase of Cu content, the grains in the alloy are transformed from irregular coarse shape to fine shape, and the strength of the alloy is increased firstly, and then decreased. The Al₂Cu phase in the alloy is prone to forming continuous network or even a thick skeletal structure, which seriously dissects the matrix of 7075 alloy, leading to reduction of mechanical properties. Therefore, the mechanical properties of 7075 aluminum alloy can be greatly enhanced by refining Al₂Cu particles, which is attributed to Cu content adjustment.

Key Words: Al-Zn-Mg-yCu Alloy, Cu Content, Mechanical Properties, Microstructure

收稿日期:2022-08-29;修改稿收到日期:2022-10-09
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52261024);中国博士后科学基金资助项目(2021M693800);广西石化资源加工与过程强化技术重点实验室开放基金资助项目(2022K005);广西大学大学生创新创业训练计划资助项目(202110593100);南宁市创新创业领军人才“邕江计划”资助项目(2020004)
第一作者简介:唐鹏,男,1980 年出生,讲师,南宁(530004),E-mail:tp@gxu.edu.cn
引用格式:唐鹏,刘倩男,谢振浩,等. Cu 含量对 7075 铝合金微观组织与力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(6): 830-835.
TANG P, LIU Q N, XIE Z H, et al. Effects of Cu content on microstructure and mechanical properties of 7075 aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(6): 830-835.

[17] 刘贤翠,潘冶,陆韬,等. 3003 铝合金蠕变行为与本构方程[J].材料导报, 2018, 32(6): 1 015-1 019.

[18] 张劲,邓运来,杨金龙,等. 2124 铝合金蠕变时效实验及本构模型研究[J].金属学报, 2013, 49(3): 379-384.

[19] TAKEUCHI S, ARGON A S. Steady-state creep of alloys due to viscous motion of dislocations[J]. Acta Metallurgica, 1976, 24 (10): 883-889.

[20] GUPTA R, DANIEL B S S. Impression creep behaviour of ultra-sonically processed in-situ Al₃Ti reinforced aluminium composite [J]. Materials Science and Engineering, 2018, A733, 257-266.

[21] 关海昆,李全安,陈晓亚,等. Mg-11Gd-2Y-1.5Ag-0.5Zr 合金的高温蠕变行为[J].材料导报, 2021, 35(6): 6 126-6 130.

[22] WANG J T, XIE L, LUO K Y, et al. Improving creep properties of 7075 aluminum alloy by laser shock peening[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 349: 725-735.

(编辑:栗万仲)

铝合金具有高比强度、耐腐蚀性能好、优良的塑性和韧性、加工性能好等特点,已被广泛应用在工业生产中^[1]。7075 铝合金作为一种典型的 Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金,具有密度小、强度高、加工性能好等特点,可加工成板材、管材、型材、棒材和锻件,在工程建设、航空航天和交通运输等领域得到广泛应用^[2-3]。

Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金的力学性能受到诸多因素影响,如合金成分、时效工艺(温度和时间)、变形制度等^[4-6]。贾志洪等^[2]发现添加微量 Sn 能有效提高 Al-Zn-Mg-Cu 合金的强度和耐腐蚀性。陈华等^[7]研究了微量元素 Ti、Sc、Zr 和 Mn 等对铝合金组织和性能的影响,发现添加适量的 Ti、Sc、Zr 或 Mn 之后,Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金不但具有较高的强度和硬度,而且还具有较好的断裂韧度和延展性。除添加微量元素外,要实现 Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金性能的进一步提升,主合金元素的影响至关重要,因此,研究者在主合金元素对材料组织和性能的影响上进行了大量的研究工作^[8-10]。XU Y 等^[11]发现 Zn 含量为 8% 时,Al-Zn-Mg-Cu 合金具有良好的力学性能和铸造性能,如果继续增加 Zn 含量,合金的强度和伸长率会显著降低;对于三元 Al-Zn-Cu 合金,杨东辉等^[12]发现 Cu 含量超过 3% 时,组织中硬脆相 θ -Al₂Cu 的弱化效果相对明显,硬而脆的 θ 相可以削弱合金枝晶间的强度,从而增加了枝晶间形成裂纹的倾向,使得合金的尺寸稳定性、强度和塑性随着 Cu 含量的增加而不断下降。GUPTA R K 等^[13]在研究富 Cu 和贫 Cu 的 7xxx 系铝合金时认为,添加 Cu 会促进析出相的形核,增加析出相的体积分数。另外,Cu 是 Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金的主要强化元素之一,通过 Al₂Cu、Al₂CuMg 等强化相形成固溶体从而对合金起到强化作用,提高合金的力学性能^[14]。在 Al-Zn-Mg 合金中加入 Cu 不仅增加了 G.P. 区的密度,而且部分改变了颗粒的形状和组成。在 Al-Zn-Mg 合金中可形成的 G.P. 区呈球形,Cu 原子的掺入会在 G.P. 区引入应变,使得形成的 G.P. 区呈球形和椭球状^[15-19]。LI B 等^[20]研究了 Cu 含量对 Al-2.5Mg-xCu-0.2Si 合金微观组织和性能的影响,发现当 Cu 含量低于 1.14% 时,合金具有较好的力学性能和抗腐蚀能力,但 Cu 含量超过 2.10% 的合金抗晶间腐蚀性能显著降低。杨涤心等^[21]发现适当地提高 Cu 含量,有利于细化合金的基体组织,提高其致密度,从而减少在生产过程中的缩孔、缩松倾向。Cu 对 7075 铝合金的抗腐蚀性、淬透性、断裂性和延展性等影响很大,作为主元素之一,还可以通过影响合金中 Al₂Cu 相和 Al₂CuMg 相的结晶来影响合金的力学性能。综上所述,在 Al-Zn-Mg-Cu 合金的微观组织变化受到诸多因素的影响,Cu 含量的变化也会导

致其组织变化进而影响力学性能。

通过研究发现,不同 Cu 含量对析出相 G.P. 区及 η' 相的研究很多^[22-23],但是关于 Cu 含量变化在 7xxx 系铝合金中对微观组织与力学性能的相关性的研究报道相对较少。随着铝矿资源不断减少以及环境问题逐渐突出,研究者加大了对合金成分(成分含量、微量元素)、热处理工艺参数(时效温度、时间)对材料微观组织演化的影响的探索。因此,本研究以 7075 铝合金为研究对象,通过改变合金中 Cu 含量,研究了工艺参数和组织结构特性对其力学性能的影响,并进一步研究了材料中物相组成及其弥散强化效果,探索其界面结构特性的影响,探讨复合作用时合金相形核析出的反应机制,为 7075 铝合金的深度应用提供技术参考。

1 试验方法

试验材料为 7075 铝合金、工业纯 Cu(99.7%,质量分数,下同)、工业纯 Zn(99.7%)、Al-10Mg 中间合金。

采用 SG2-7.5-10 型电阻炉熔炼。熔炼前,将石墨坩埚和铸铁模具均预热至 200 ℃,将 7075 铝合金返回料、工业纯 Cu、工业纯 Zn、Al-10Mg 中间合金装入石墨坩埚,放入炉中,升温至 800 ℃,待合金熔化后加入 2%~3% 的 C₂Cl₆ 精炼剂,搅拌静置 10 min 后扒渣;待炉温升至 800 ℃ 后,加入 2%~3% 的覆盖剂(NaCl、KCl 质量比为 1:1),再静置 10 min 扒渣,在 760 ℃ 浇注后随型冷却至室温。制得的 7075 铝合金用 ISPARK 8860 光谱仪进行成分测试,其化学成分见表 1。

表 1 不同 Cu 含量的 7075 铝合金的化学成分
Tab.1 Chemical composition of 7075 aluminum alloy with different Cu contents %

试样	w _B							%
	Zn	Mg	Cu	Cr	Si	Fe	Mn	
7075	5.1~6.1	2.1~2.9	1.2~2.0	0.18~0.28	≤0.40	≤0.50	≤0.30	余量
Cu100	4.67	2.69	1.09	0.12	0.10	0.15	0.06	余量
Cu120	5.73	2.25	1.27	0.21	0.08	0.24	0.05	余量
Cu153	5.23	2.65	1.54	0.23	0.15	0.19	0.12	余量
Cu170	5.58	2.19	1.74	0.25	0.06	0.10	0.15	余量
Cu200	5.13	2.00	2.03	0.19	0.23	0.30	0.05	余量

浇注试样尺寸为 $\phi 20\text{ mm} \times 130\text{ mm}$ 。金相试样统一在距离模具底部 20 mm 处切割,按照金相试样制备流程,采用水磨砂纸逐级磨至 3000 号后,进行粗抛光和细抛光。用改良科尔试剂(配比 1 mL 的 HF+15 mL 的 HCl+4 mL 的 HNO₃+190 mL 的 H₂O)腐蚀 6~10 s,用酒精擦拭试样表面后吹干。利用 Axio Observer A1 m 金相显微镜观察合金的组织形貌,每组试样拍摄不少于 10 张金相图片,利用 IXRF550i 能谱仪对典型形貌进行元素检测,测定合金材料微区的元素种类

和含量。按照 GB/T228-2002 制备标准样,每组试样取 3 根,用砂纸水磨去除试样表面氧化层,用电子万能试验机 (Instron8801) 测其拉伸性能,拉伸速率为 0.5 mm/min。利用 SU-8020 型扫描电镜观察试样断口形貌,分析合金断裂机制。用 AVH-5L 型自动转塔显微硬度仪测维氏硬度,载荷为 3 N,加载时间为 15 s,每个试样测 10 个点,取其平均值。利用耐驰 STA 449 F5 同步热分析仪 (DSC) 对试样进行差热分析,用砂纸磨去试样表面氧化层,并用酒精擦拭试样表面后吹干。试验过程采用高纯氩气保护,由室温 (25 ℃) 升至 800 ℃。采用 Nano Measurer 1.2 软件来统计 7075 铝合金在不同 Cu 含量下的平均晶粒尺寸,每组金相图按照试验要求选取 50 个晶粒并对其尺寸进行测量,取平均值。用 D/MAX 2500V 型 X 射线衍射仪 (XRD) 对试样进行物相分析。试验靶材为 CuK α 靶 ($\lambda=0.154\ 056\ \text{nm}$),工作电压为 40 kV,工作电流为 100 mA,扫描速度为 6 ($^{\circ}$)/min,扫描角度范围在 10 $^{\circ}$ ~90 $^{\circ}$ 之间。将得到的 XRD 图谱使用 Highscore Plus 软件与 PDF 卡片进行

对比,确定每个峰对应的物相。结合 X 射线衍射 (XRD) 和 EDS 结果,分析 Cu 含量对 7075 铝合金中组织强化机制的影响。

2 试验结果与分析

2.1 Cu 对 7075 铝合金显微组织的影响

图 1 为不同 Cu 含量的 7075 铝合金的金相组织。可以发现,当 Cu 含量为 1.0% 时,7075 铝合金中第二相呈粗大板条状,形状不规整,且相周围伴随着粗大颗粒析出。从高倍图可以发现,相周围析出的颗粒在基体上分布不均匀,可能为 Al₂Cu 相。随着 Cu 含量增加,7075 铝合金中的 Al₂Cu 相尺寸不断减小,粗大的颗粒变细,且分布更加均匀。图 2 为合金晶粒尺寸分布。可以看出,随着 Cu 含量增加,晶粒尺寸先减小后增大。当 Cu 含量为 1.53% 时,颗粒变得极为细小,且分布最均匀,其平均晶粒尺寸为 15.69 μm 。当 Cu 含量超过 1.53% 时,7075 铝合金中的 Al₂Cu 相尺寸增大至 20.76

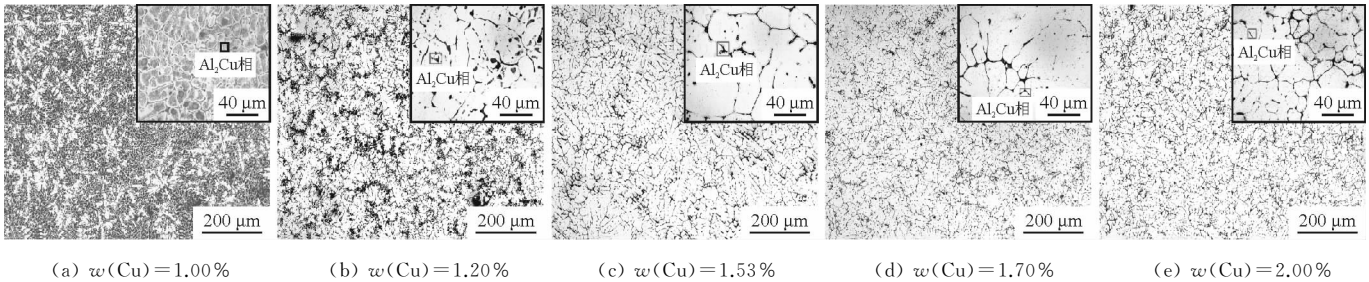


图 1 Al-Zn-Mg-yCu 合金微观金相组织
Fig.1 Microstructure of Al-Zn-Mg-yCu alloy

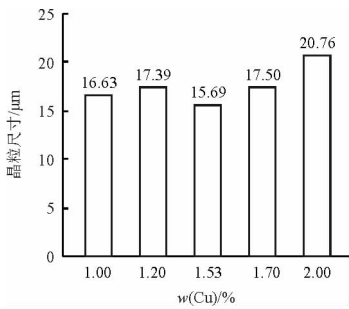


图 2 Al-Zn-Mg-yCu 合金的晶粒尺寸
Fig.2 Grain size of Al-Zn-Mg-yCu alloy

μm 。

2.2 Cu 对 7075 铝合金的力学性能影响

图 3 为不同的 Cu 含量对 7075 铝合金力学性能的影响。从图 3a 可以看出,随着 Cu 含量增加,7075 铝合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率均呈现先增大后减小的趋势。当 Cu 含量为 1.53% 时,屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为 150.6 MPa、163.0 MPa 和 32%,较 Cu 含量为 1.00% 的分别提高了 58.5%、50.9% 和 48.8%。

当 Cu 含量达到 2.00% 时,屈服强度降至 130.4 MPa,抗拉强度降至 144.2 MPa,伸长率降至 26%。从图 3b 可以发现,随着 Cu 含量增加到 1.53%,硬度 (HV) 增加到 123.8,较 Cu 含量为 1.00% 的提高了 21%。当 Cu 含量达到 2.00% 时,硬度 (HV) 降至 107.6。结合图 1 的 OM 图,当 Cu 含量为 1.53% 时,Al₂Cu 相尺寸最小、分布最均匀,对应的屈服强度、抗拉强度、伸长率和硬度均最高。

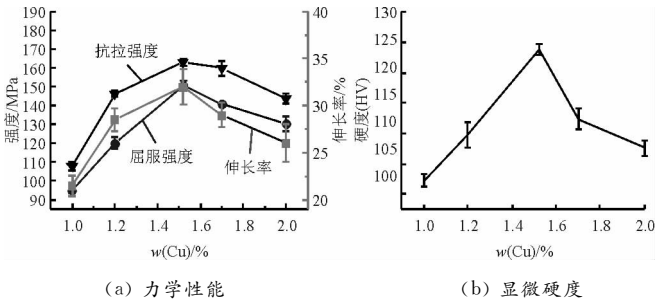


图 3 不同 Cu 含量对 7075 铝合金力学性能的影响
Fig.3 Effects of different Cu contents on mechanical properties of 7075 aluminum alloy

图 4 为不同 Cu 含量的铝合金断口 SEM 形貌。可以看出,Cu 含量为 1.00% 时,由于粗大颗粒的存在,合金断口呈现明显的解理面和解理台阶,这是由于 7075 铝合金中存在含有 Fe、Si 的杂质相,杂质颗粒端部存在尖角,容易引起应力集中,在外力的作用下导致裂纹产生。当 Cu 含量为 1.20% 时,解理面明显变小,力学性能得到提高,杂质相减少。当 Cu 含量提升到 1.53% 时,力学性能达到最好,解理面和解理台阶进一步减小,

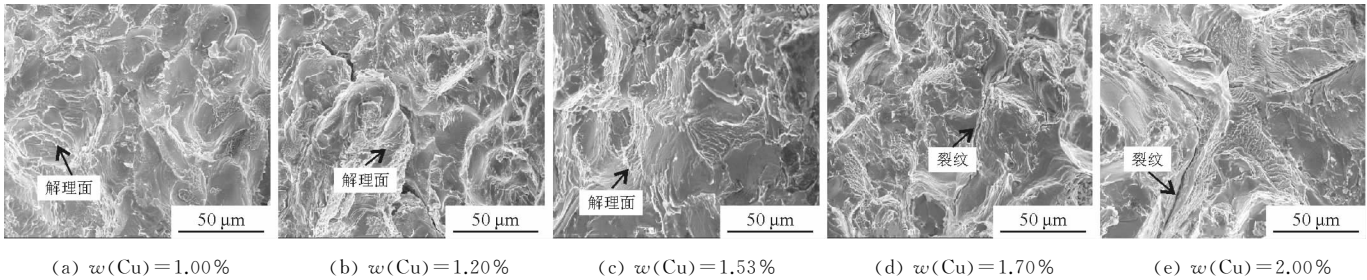


图 4 不同 Cu 含量的铝合金断口形貌
Fig.4 Fracture morphologies of aluminum alloy with various Cu contents

3 讨论和分析

图 5 是 Cu 含量为 1.53% 时的 EDS 图。从图 1 和图 5 可以发现,随着 Cu 含量增加, Al_2Cu 颗粒逐渐细化,在 Cu 含量达到 1.53% 时, Al_2Cu 颗粒尺寸最小。当 Cu 含量超过 1.53% 时, Al_2Cu 颗粒尺寸又反而增大,这是因为 Cu 含量增多,使得 Al_2Cu 颗粒聚集变大。随着 Cu 含量不断增加,基体中 Cu 元素的过饱和程度增大,BRYANT A J^[24]认为 Al-Zn-Mg 合金中添加 Cu 元素后降低 Mg 和 Zn 元素的溶解度,会使得析出过程的动力学机制发生改变^[25-26],从而使得合金元素的析出驱动力因动力学机制的改变而增大,Cu 元素更容易析出与 Al 元素生成 Al_2Cu 相。因此,当 Cu 含量在 1.53% 时性能最好,当 Cu 含量大于 1.53% 时,基体中 Cu 含量过高,会使得合金中 Al_2Cu 形成连续的网状甚至粗大的骨骼状组织,严重割裂了 7075 合金的基体组织,降低了 7075 铝合金的力学性能^[27]。对 Al_2Cu 颗粒

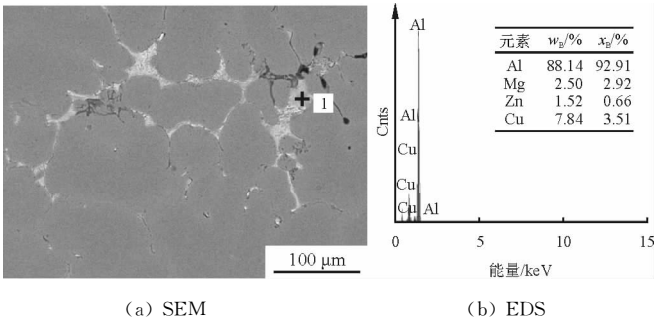


图 5 Cu 含量为 1.53% 时 7075 铝合金的 SEM 和 EDS 分析
Fig.5 SEM and EDS analysis of 7075 aluminum alloy with Cu content of 1.53%

这是由于 Al_2Cu 晶界面的阻碍作用,使得试样在拉伸时需克服更多界面能,从而提高了力学性能。当 Cu 含量增加到 1.70% 时,解理面的面积突然增大,力学性能变差,这是由于 Cu 含量增大,会导致 Cu 原子在晶相中富集,形成了成分偏析。而当 Cu 含量升高到 2.00% 时,断口形貌开始变得不规则,Cu 原子偏聚加重,解理面面积变得更大,河流花样异常明显(见图 4e),所以力学性能变差。

进行细化,可以显著提高 7075 铝合金的力学性能。
图 6 为 Cu 含量为 1.00% 和 1.53% 时 7075 铝合金 XRD 图谱。可以发现,Cu 含量为 1.00% 时,主要合金相为 Al_2Cu 和 CuMg_2 ,Cu 含量为 1.53% 时, CuMg_2 的衍射峰消失,而 Al_2Cu 相还存在。Cu 含量过低时,合金中的 Mg 脱溶出基体^[28],与 Cu 形成 CuMg_2 相, CuMg_2 对组织性能的增强效果比 Al_2Cu 相的增强效果弱,导致合金的力学性能下降。当合金中 Cu 含量低于 1.53% 时, Al_2Cu 颗粒粗大,随着 Cu 含量不断增大,基体中的 Cu 代替 Zn、Mg 原子,固溶到析出相中,生成大量的 Al_2Cu 相,使得晶粒变得细小,晶格常数也变小。而当合金中 Cu 含量高于 1.53% 时,Cu 含量的增加会促使 Zn、Mg 原子的析出^[24],Cu 原子发生偏聚,使得合金的晶粒尺寸开始变大。当 Cu 含量为 1.53% 时,晶界析出相中 Cu 的富集有利于合金的力学性能。从图 3a 可以发现,适当的 Cu 含量可以提高合金的强度。

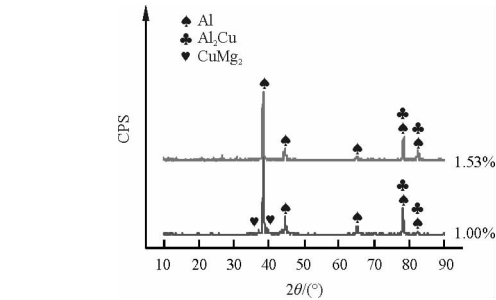


图 6 Cu 含量为 1.00% 和 1.53% 时 7075 铝合金 XRD 图谱
Fig.6 XRD pattern of aluminum alloy with Cu contents of 1.00% and 1.53%

图 7 为不同 Cu 含量的 7075 铝合金的 DSC 曲线。可以发现,从室温至 800 °C,在 Cu 含量为 1.00% 时有 2

个吸热峰,合金低熔点共晶相的熔化温度大约为 480 ℃,合金的熔化温度大约为 590 ℃。第 1 个吸热峰仅在 Cu 含量为 1.00% 时可见,结合图 7,表明此时开始有 CuMg₂ 相的存在。随着温度的不断升高,CuMg₂ 相开始溶解,释放能量。随着 Cu 含量的增加,对于同时存在的 Al₂Cu 峰,从图 7 可知,在 Cu 含量为 1.53% 时的吸热峰面积为 193.1 J/g,比 Cu 含量为 1.00% (175.9 J/g) 时要大,表明 Al₂Cu 峰增强,合金中的 Al₂Cu 相增加,提高了合金的力学性能。

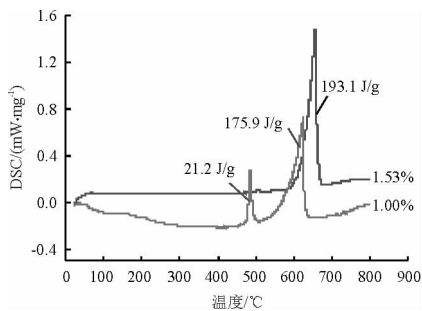


图 7 Cu 含量为 1.00% 和 1.53% 的 7075 铝合金的温度-DSC 曲线
Fig.7 Temperature-DSC curves of 7075 aluminum alloy with Cu contents of 1.00% and 1.53%

拉伸结果表明,随着 Cu 含量增加,材料的抗拉强度、屈服强度和伸长率的变化趋势与微观组织的变化趋势相同。Cu 含量为 1.00% 时,Al₂Cu 颗粒粗大,随着 Cu 含量增加,Al₂Cu 颗粒尺寸减小。金属的塑性变形机理中,晶内变形主要依靠位错的滑移和孪生,为了使位错穿过晶粒转移到另一个晶粒,在晶界附近的位错塞积群所产生的应力场强度对临近晶粒的位错源是否开动有关,而应力场强度与位错塞积群内位错数目 n 有关。试验研究表明,塞积群中位错数目 n 与位错源到障碍物的距离 L 具有如下关系^[29]:

$$n = \frac{k\pi\tau L}{Gb} \quad (1)$$

式中, k 为系数; τ 为外力在滑移方向的分切应力; L 为位错源到障碍物的距离; G 为剪切模量; b 为柏氏矢量。由于位错源到障碍物的距离 L 与晶粒的尺寸有关,因此晶粒越大,距离 L 也就越大,位错数目 n 也就越大,则位错塞积群的应力场强度越大,位错越容易发生移动,因此粗晶粒金属的变形相对于细晶粒金属变形更容易。细小的晶粒数目比粗晶粒多,在受到外力作用后发生塑性变形时位向有利的晶粒也较多,变形可以分散在更多的晶粒内进行,塑性变形均匀,应力集中小;晶粒越小,裂纹越难扩展;晶粒尺寸越小,金属越有利于变形,伸长率越高。Hall-Petch 公式^[30-31]表明了金属的屈服强度与其晶粒尺寸的关系:

$$\sigma_s = \sigma_0 + kd^{-1/2} \quad (2)$$

式中, σ_s 为屈服强度; σ_0 为常数,相当于单晶体的屈服强度; d 为多晶体中各晶粒的平均直径; k 为晶界对强度影响程度的常数,与晶界结构有关。在多晶体中晶界的变形抗力较大,并且每一个晶粒的变形都会受到周围晶粒的牵制和影响,故多晶体的室温强度随着晶粒的细化而提高。

凝固时析出的粗大第二相会降低合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率。这是因为粗大的第二相弹性模量大于基体,而载荷引起的应变在 Al₂Cu 颗粒与基体之间是不相容的,因此应力集中通常发生在晶界面处,从而使合金的力学性能降低。从图 1 的 OM 图可以发现,当 Cu 含量为 1.53% 时,Al₂Cu 颗粒直径最小,此时颗粒内部与晶界处的应变相差小,在拉伸过程中变形均匀,从而应力集中引起裂纹产生的机会小,拉伸断裂时所需要的外加应力小,因此材料的力学性能好。

4 结 论

(1)通过在 7075 铝合金中增加 Cu 含量可以有效细化 Al₂Cu 相。当 Cu 含量达到 1.53% 时,Al₂Cu 颗粒尺寸达到最小,细化效果最佳,当含量超过 1.53% 时,颗粒尺寸反而增大。

(2)当 Cu 过量时,会导致 7075 铝合金的强度有所下降。合金中形成的 Al₂Cu 相会在一定程度上割裂 Al-Zn-Mg-Cu 合金的基体组织,降低合金的力学性能。因此通过改变 Cu 含量对 Al₂Cu 颗粒进行细化,可以极大地增强 7075 铝合金的力学性能。

(3)当 Cu 含量过低时,7075 铝合金过饱和固溶体的浓度降低,使得合金中的 Mg 元素脱溶出基体与 Cu 元素形成 CuMg₂ 相,CuMg₂ 对组织性能的增强效果比 Al₂Cu 相的增强效果弱,所以导致合金的力学性能下降。

参 考 文 献

- [1] 唐鹏,于风洋,刘倩男,等. Sb 含量及热处理对 Al-11.5Si-9.5Mg 合金组织与性能的影响[J]. 稀有金属, 2022, 46(4): 428-437.
- [2] 贾志宏,翁瑶瑶,丁立鹏,等. 铝合金中的 Sn 微合金化: 强化作用及机制[J]. 材料导报, 2018, 31(9): 123-127.
- [3] YUAN L, GUO M, YONG Y, et al. Theoretical design and distribution control of precipitates and solute elements in Al-Zn-Mg-Cu alloys with heterostructure[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(11): 3 328-3 341.
- [4] 刘萍,陈江华,刘吉梓,等. 主要合金元素对 7000 系铝合金铸态和均匀化状态的组织影响[J]. 电子显微学报, 2013 (1): 6-13.
- [5] 贵星卉,钟鼓,李虎田,等. 合金元素对 7xxx 系铝合金力学性能和晶间腐蚀性能的影响[J]. 有色金属工程, 2021, 11(12): 22-28.
- [6] 刘懿芳,田伟,孙玥. Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金微合金化的研究进展[J]. 有色金属材料与工程, 2018, 39(1): 38-41.

- [7] 陈华,余爱武,叶青,等. Ti、Sc 微合金化后的铝合金组织及性能研究[J]. 铸造技术, 2021, 42(8): 667-671.
- [8] SUN T, GENG J, BIAN Z, et al. Enhanced thermal stability and mechanical properties of high-temperature resistant Al-Cu alloy with Zr and Mn micro-alloying[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(1): 64-78.
- [9] 孙立明,于化顺,闵光辉,等. Zr 对 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2007, 27(5): 380-381.
- [10] MARLAUD T, DESCHAMPS A, BLEY F, et al. Influence of alloy composition and heat treatment on precipitate composition in Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. Acta Materialia, 2010, 58(1): 248-260.
- [11] XU Y, ZHANG Z, GAO Z, et al. Effect of main elements (Zn, Mg and Cu) on the microstructure, castability and mechanical properties of 7xxx series aluminum alloys with Zr and Sc[J]. Materials Characterization, 2021, 182: 111 559.
- [12] 杨东辉,唐帅,吴子彬,等. 高锌铝合金的合金化和加工工艺的研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2023(2): 1-11.
- [13] GUPTA R K, DESCHAMPS A. Relating the early evolution of microstructure with the electrochemical response and mechanical performance of a Cu-rich and Cu-lean 7xxx aluminum alloy[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2012, 159(11): 492-502.
- [14] 胡欧林,李鹏飞,芦富敏,等. Mg 和 Cu 含量对 Al-Si-Mg 系合金组织和性能的影响[J]. 上海金属, 2019, 41(1): 20-24.
- [15] 晁代义,孙有政,刘晓滕,等. Cu 元素含量对 Al-Zn-Mg-Cu 系合金析出行为的影响[J]. 材料导报, 2019, Z33(2): 402-405.
- [16] 刘名鑫,邓运来,张臻,等. Cu 质量分数对 Al-1.0Mg-1.0Si-0.6 Mn 合金显微组织和性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(2): 309-318.
- [17] 樊喜刚,蒋大鸣,单长智,等. Cu 含量对 Al-Zn-Mg-Cu 合金的组织性能和断裂行为的影响[J]. 轻合金加工技术, 2006, 34(2): 31-35.
- [18] CHINH N Q, LENDVAI J, PING D H, et al. The effect of Cu on mechanical and precipitation properties of Al-Zn-Mg alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2004, 378(1-2): 52-60.
- [19] PENG Y, LIU C, WEI L, et al. Quench sensitivity and microstructures of high-Zn-content Al-Zn-Mg-Cu alloys with different Cu contents and Sc addition[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(1): 24-35.
- [20] LI B, WENG S P, SU M H, et al. Effect of Cu content on microstructure and properties of Al-2.5Mg-xCu-0.2Si alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(3): 740-745.
- [21] 杨涤心,高存贞,谢敬佩,等. Cu 含量对高铝锌合金组织和性能的影响[J]. 铸造技术, 2010, 31(11): 1 448-1 451.
- [22] 李祥,赵海东,王雪灵. Cu 含量和冷速对 A319 合金中 Al₂Cu 相三维特征的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(5): 583-588.
- [23] 夏雅阁,王杰芳,张国鹏,等. Cu 含量对 Al-Cu-Mg-Ag 合金蠕变行为和微观组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(8): 914-918.
- [24] BRYANT A J. The effect of composition upon the quench sensitivity of some Al-Zn-Mg alloy[J]. Inst. Metals, 1966, 94: 94-99.
- [25] LIN F S, STARKE E A. The effect of copper content and degree of recrystallization on the fatigue resistance of 7XXX type aluminum alloys I. Low cycle corrosion fatigue[J]. Mater. Sci. Eng., 1979, 39: 27-41.
- [26] PEEL C J, POOLE P. Mechanisms of environment sensitive cracking of materials[J]. Metals Soc., 1977, 4: 4-7.
- [27] 黄朋朋,芦刚,严青松,等. 交变磁场-真空差压协同场下 ZL205A 合金 θ -Al₂Cu 相的生长特性[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(11): 2 540-2 549.
- [28] DONG P, CHEN S, CHEN K. Effects of Cu content on microstructure and properties of super-high-strength Al-9.3Zn-2.4Mg-xCu-Zr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 788: 329-337.
- [29] 敬云兵,彭冬冬,甘春雷,等. 退火温度对 Al₂O₃/Cu 弥散强化铜合金组织性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(12): 1 524-1 528.
- [30] TANG P, LI W, WANG K, et al. Effect of Al-Ti-C master alloy addition on micro-structures and mechanical properties of cast eutectic Al-Si-Fe-Cu alloy[J]. Materials & Design, 2017, 115: 147-157.
- [31] TANG P, LAI J S, LIN Y Y. Effect on mechanical and thermodynamic properties of Al-10Si-0.8Fe alloys with Al-Ti-C and Ce compound additions[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2022, 35(1-3): 33-42.

(编辑:栗万仲)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管,中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然科学期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司



地址:武汉市江岸区九万方路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

