

外语能力：

4、 外语能力证书

444

大学英语四级考试 成绩报告单



姓 名：夏灿

学 校：云南农业大学

院（系）：工程技术学院

准考证号：

身份证号：

考试时间：2010 年 12 月



总分：444

听力 (35%)	阅读 (35%)	综合 (10%)	写作和翻译 (20%)
151	151	51	91

成绩单编号：102113003000310

教育部高等教育司

委托发布单位：全国大学英语四、六级考试委员会

考委会网址：www.cet.edu.cn



5、学术能力证明材料

期刊来源: 2024-09-17 17:02 网络首发地址: <https://doi.org/10.1007/s12040-024-00594-4>第53卷 第4期 材料工程 Vol.53 No.4
2025年4月 第43-51页 Journal of Materials Engineering Apr. 2025 pp.43-51引用格式: 夏旭, 许世春, 杨继奎, 等. Ni含量对Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu合金热裂倾向的影响[J]. 材料工程, 2025, 53(4): 43-51.
XIA Xu, XU Shichun, YANG Jiqui, et al. Influence of Ni content on hot tearing tendency of Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu alloys [J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(4): 43-51.

Ni含量对Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu合金热裂倾向的影响

Influence of Ni content on hot tearing tendency of Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu alloys

夏旭¹, 许世春¹, 杨继奎², 罗红梅³, 徐照明⁴,
吴昊⁴, 李再兴⁴

(1 云南机电职业技术学院 交通工程学院, 昆明 650203;

2 昆明理工大学 民航与航空学院, 昆明 650500;

3 西双版纳职业技术学院, 云南 西双版纳 666003;

4 兰州现代职业学院 财经商贸学院, 兰州 730000)

XIA Xu¹, XU Shichun¹, YANG Jiqui², LUO Hongmei³,
XU Zhao ming⁴, WU Hao⁴, LI Zai xing⁴

(1 Faculty of Transportation Engineering, Yunnan Vocational College

of Mechanical and Electrical Technology, Kunming 650203, China;

2 Faculty of Civil Aviation and Aeronautics, Kunming University of

Science and Technology, Kunming 650500, China; 3 Xishuangbanna

Vocational and Technology College, Xishuangbanna 666003,

Yunnan, China; 4 Faculty of Finance and Business, Lanzhou

Modern Vocational College, Lanzhou 730000, China)

摘要:采用数值模拟与实验相结合的方法,研究Ni含量对Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu-xNi(x=0%,0.1%,0.3%,0.5%)质量分数,下同)合金热裂倾向的影响。用ProCAST软件对合金的热裂倾向进行模拟,并结合OM、SEM、XRD、室温拉伸、析出相、应力场、热裂指数(hot tearing indicator, HTI)、有效应力等分析表征方法系统地研究Al-Zn-Mg-Cu系合金的热裂行为和力学性能。结果表明:当Ni含量小于0.5%时,HTI随Ni含量的增加先增加后降低;当Ni含量为0.5%时,HTI值最低,析出相尺寸和有效应力随Ni含量的增加也先增加后降低的变化趋势;当Ni含量为0.5%时,有效应力最低。与未添加Ni的合金相比,添加0.5%Ni的合金热裂敏感性降低,力学性能大幅度提升,抗拉强度提高了54.79%,屈服强度提高了48.49%,延伸率提高了691%。数值模拟结果与实验结果具有很好的一致性。

关键词: Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu合金;热裂倾向;数值模拟;有效应力

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2024.00594

中图分类号: TG146.2; TB31 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2025)04-0043-09

Abstract: A combination of numerical simulation and experimental methods was used to study the influence of Ni content on the hot tearing tendency of Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu-xNi (x=0%, 0.1%, 0.3%, 0.5%, the same below) alloys. The hot tearing tendency of the alloy is systematically simulated using the ProCAST software, combining with optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), room temperature tensile tests, precipitation phase, stress field, hot tearing index (HTI), and effective stress analysis methods. The hot tearing behavior and mechanical properties of the Al-Zn-Mg-Cu series alloys are systematically studied. The results show that when the Ni content is less than 0.5%, the HTI value first increases and then decreases with the increase of Ni content, and when the Ni content is 0.5%, the HTI value is the lowest. The effective stress at the bottom of the

44

材料工程

2025年4月

constraint rod also indicates a trend of first increasing and then decreasing with the increase of Ni content, and when the Ni content is 0.5%, the effective stress is the lowest. Compared to the alloy without Ni addition, the alloy with 0.5% Ni addition shows a significant reduction in hot tearing sensitivity, a substantial improvement in mechanical properties, an increase of 54.79% in tensile strength, an increase of 48.49% in yield strength, and an increase of 691% in tensile strain. The numerical simulation results are in good agreement with the experimental results.

Key words: Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu alloy; hot tearing tendency; numerical simulation; effective stress

Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu-xNi合金属于典型的Al-Zn-Mg-Cu系合金。该系合金具有力学性能优异、质轻、比强度高、耐腐蚀性和疲劳韧性好,可通过热处理强化等优点^[1],被广泛应用于汽车工业、轨道交通、航空航天、工程机械、电子产品及轻质太阳能支架等领域^[2]。然而,Al-Zn-Mg-Cu系合金属于亚形变合金,热裂倾向大成为该系合金在铸造领域的难点和痛点^[3]。降低合金凝固过程的热裂倾向可以实现“以铸代锻”,降低生产成本。热裂倾向又称“热脆性”,在铸造过程中,当熔体凝固收缩及热收缩,收缩部位得不到填充时,热裂就会发生。热裂的存在会导致产品严重的缺陷,引起事故和损失,所以降低铸件热裂和消除热裂是一个长期需要研究的课题^[4]。关于热裂形成的机理,国内外研究者进行了大量理论、比较主流的四种理论主要集中在液膜理论^[5]、强度理论^[6]、晶间控制理论^[7]和凝固收缩补偿理论^[8]方面。Sokoluk等^[9]对三种铝合金进行系统研究,发现在凝固过程中,纳米颗粒被推进的凝固前沿阻碍了溶质的析出和晶粒的长大,在凝固的最后阶段,增加的液态分散和更小的晶粒有效地防止了合金的热裂。Li等^[10]研究了Ni对铸态Al-Zn-Mg-Cu合金热裂的影响,发现Ni元素的添加使Al₂Ni析出,可以提高抗热裂性。Li等^[11]认为,改变模具温度和浇铸温度能够改善Al-Cu合金热裂的形成和收缩行为。本工作采用数值模拟与实验相结合的方法,用ProCAST软件对合金的热裂倾向进行系统的模拟研究,并结合OM、

SEM、XRD、室温拉伸、析出相、应力场、热裂指数(hot tearing indicator, HTI)、有效应力等分析表征方法研究Al-Zn-Mg-Cu系合金的热裂行为和力学性能,旨在降低Al-Zn-Mg-Cu系合金的热裂倾向,提高力学性能,改善综合性能,进一步拓展该系合金的应用范围。

1 数值模拟及实验过程

1.1 数值模拟

1.1.1 数值模拟模型

图1为实验用铸件和铸型示意图。热裂仿真的铸件模型用UG软件创建,采用典型的热裂约束铸件为铸件模型,如图1(a)所示。其主要尺寸参数为:左边浇道内径为50 mm,浇道内径均为20 mm,从上向下共5个水平热裂约束棒,每根热裂约束棒的总长度依次为100,150,200,250,300 mm。热裂仿真的铸型采用抽模模型,如图1(b)所示。抽模模型用于固定铸件,其尺寸分别为420,100,300 mm。在ProCAST仿真模拟过程中,其数值模拟的数学模型满足质量守恒定律、能量守恒定律和能量守恒定律。

1.1.2 数值模拟参数设置

划分网格。体网格后,材料属性对模具均采用固相63H钢,模具的预热温度设置为150℃,应力类型设置为Rigid;铸件的材质为Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu-xNi(x=0%,0.1%,0.3%,0.5%),质量分数,下同;应力类型设置为Linear-Elastic。铸件和铸型界面

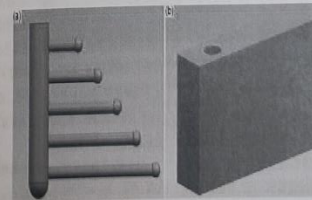


图1 实验用铸件(a)和铸型(b)示意图

Fig. 1 Diagrams of experimental casting(a) and mold(b)

面热流设置为 CONC , 换热系数 h 为 $2000 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。每次模拟时, 铸件主要工艺参数均设置3组, 分别是直浇道上端面浇注口的浇铸速度为 0.5 kg/s , 铸型四周、底面及外表面空气对流采用 20°C 下空冷, 铸型前后两面设置约束为 $Z=0$ 方向固定, 采用重力充型, 温度场、流场、应力场同时耦合进行计算。

1.2 实验过程

1.2.1 试样制备

结合仿真结果, 制备 $\text{Al}-5.6\text{Zn}-2.5\text{Mg}-1.0\text{Cu}-x\text{Ni}$ ($x=0\%, 0.1\%, 0.3\%$)合金试样, 其化学成分及参数如表1所示, 其中 T_f 为固相线温度, T_s 为液相线温度, ΔT 为固液相线温差。试样制备时, 过热度为 70°C , 模具温度为 150°C 。原材料采用99.9%纯铝块, 99.8%纯铜块, 99.8%纯镁块, 99.9%纯铜粉, 99.9%镍粒配制而成, 配料考虑Zn、Mg的挥发加烧损量均为5%, 其余原材料不计挥发和烧损量。

表1 Al-Zn-Mg-Cu系合金主要化学成分及参数

Table 1 Main chemical compositions and parameters of Al-Zn-Mg-Cu alloys system

$x/\%$	Alloy	$T_f/^\circ\text{C}$	$T_s/^\circ\text{C}$	$\Delta T/^\circ\text{C}$
0	Al-5.6Zn-2.5Mg-1.0Cu	459	622	163
0.1	Al-5.6Zn-2.5Mg-1.0Cu-0.1Ni	454	621	167
0.3	Al-5.6Zn-2.5Mg-1.0Cu-0.3Ni	454	621	167
0.5	Al-5.6Zn-2.5Mg-1.0Cu-0.5Ni	453	620	167

将配制好的金属进行熔炼, 制取 x 为 $0\%, 0.5\%$ 的铸锭, 分别在两铸锭的相同位置取样, 用于显微组织表征及力学性能测试, 取样位置如图2所示。



图2 取样位置
Fig. 2 Sampling position

1.2.2 显微组织表征

通过砂纸打磨、抛光, 使用Keller试剂($190 \text{ mL H}_2\text{O}+2 \text{ mL HF}+5 \text{ mL HNO}_3+3 \text{ mL HCl}$)腐蚀后制备金相, 用于表征分析材料的显微组织; 用X射线衍射仪对合金试样表面进行检测, 物相检测参数为: Cu靶材, 扫描范围 $10^\circ\sim 110^\circ$, 扫描速度

电压 40 kV , 扫描速度 50 mA , 扫描速度 $0.01^\circ/\text{s}$ 。将X射线衍射仪检测所得到的物相结果用Jade软件进行物相分析。采用扫描电镜观察样品的显微特征及组织形貌, 进行SEM面扫描和点扫描时, 结合电镜自带EDS能谱检测功能, 对物相分布情况以及化学成分进行定量评估, 打印物相的能谱图。

1.2.3 力学性能测试

用线切割从每个铸件的底端同一位置取出用于拉伸实验的试样, 拉伸试样尺寸参考GB/T 228.1-2021。采用万能试验机进行常温力学性能测试, 温度为 18°C , 拉伸速度为 1 mm/min , 拉伸后进行线切割制取SEM试样, 然后用扫描电镜观察断口形貌。

2 实验结果

2.1 合金热裂的模拟仿真

HTI的值越大, 热裂倾向越大。图3为Al-5.6Zn-2.5Mg-1.0Cu-xNi ($x=0\%, 0.1\%, 0.3\%, 0.5\%$)合金的热裂模拟结果。可以看出, 随着Ni含量的增加, HTI的最大值随Ni含量的增加呈先增加后降低的趋势, 当 $x=0.5\%$ 时, HTI最大值为 0.028 , 为4组材料中的最小值, 当 $x=0.3\%$ 时, HTI最大值为 0.0428 , 当 $x=0.5\%$ 时, 合金的热裂倾向最小。

2.2 合金的显微组织

为了进一步研究Ni含量为 0.5% 时热裂倾向降低的原因, 制备Al-5.6Zn-2.5Mg-1.0Cu-xNi ($x=0\%, 0.5\%$)两种铸态下的试样, 并对试样进行扫描电镜测试及物相检测, 合金金相组织如图4所示。可以看出, Ni的加入使得合金的晶粒尺寸减小, 晶粒明显得到细化。

图5为Al-5.6Zn-2.5Mg-1.0Cu-xNi合金的面扫描测试结果。可以看出, 随着Ni的加入, 组织发生明显的变化, 特别是在析出相的数量、形态和分布方面。当 $x=0\%$ 时, 如图5(a)所示, 大多数析出相呈连续的网状及块状分布在晶界上。当 $x=0.5\%$ 时, 如图5(b)所示, 析出相形态各异, 数量增加, 大多数析出相呈不连续状及点状, 点状分布在晶界上或晶界内; 对比图5(a), (b)可以发现, 合金在Al基体内的分布相对均匀, 在晶界处都有网状且相对连续的第二相, 晶界内有点状及棒状的第二相, 晶界内的元素分布无明显偏聚现象。

Al-5.6Zn-2.5Mg-1.0Cu-xNi合金物相检测结果如图6所示。与 $x=0\%$ 的合金相比, 在 $x=0.5\%$ 的合

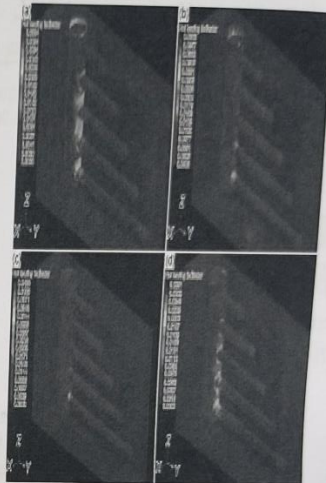


图3 Al-5.6Zn-2.5Mg-1.0Cu-xNi合金热裂模拟结果

(a) $x=0\%$; (b) $x=0.1\%$; (c) $x=0.3\%$; (d) $x=0.5\%$

Fig. 3 Heat cracking simulation results of Al-5.6Zn-2.5Mg-1.0Cu-xNi alloys

(a) $x=0\%$; (b) $x=0.1\%$; (c) $x=0.3\%$; (d) $x=0.5\%$

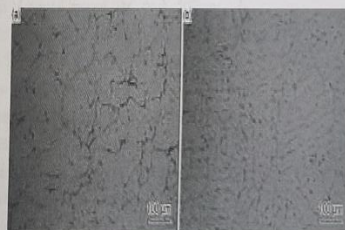


图4 Al-5.6Zn-2.5Mg-1.0Cu-xNi合金金相组织

(a) $x=0\%$; (b) $x=0.5\%$

Fig. 4 Metallographic structures of Al-5.6Zn-2.5Mg-1.0Cu-xNi alloys

(a) $x=0\%$; (b) $x=0.5\%$

金中检测到 Al_3Ni 相。 Al_3Ni 相可以细化合金晶粒形成共晶组织, 改善合金的流动性^[20]。添加Ni的合金生成 Al_3Ni , 改善合金的凝固过程, 提高合金的流动性, 增加凝固末期的补缩, 减少凝固末期的收缩应力, 从而降低合金凝固末期的热裂倾向。

2.3 合金的力学性能

铸态下Al-5.6Zn-2.5Mg-1.0Cu-xNi ($x=0\%, 0.5\%$)合金室温下的拉伸力学性能如图7所示。可知, 不添加Ni的合金抗拉强度为 162.10 MPa , 屈服强度为 126.49 MPa , 弹性模量为 75.04 GPa , 断裂前的拉伸应变为 0.36% ; 添加 0.5% 的合金抗拉强度为

250.91 MPa , 屈服强度为 187.82 MPa , 弹性模量为 73.31 GPa , 断裂前的拉伸应变为 2.02% 。与未添加Ni的合金相比, 添加 0.5% 的合金抗拉强度提高了 54.79% , 屈服强度提高了 48.49% , 拉伸应变提高了 451% 。

3 分析与讨论

3.1 Ni含量对热裂敏感性的影响

在图3的热裂模拟结果中, 随着Ni含量的增加, HTI的最大值随Ni含量的增加呈先增加后降低的

Ni含量对Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu合金流动性和力学性能的影响

夏灿^{1,2}, 周明¹, 杨尚³, 覃延鑫⁴, 周水芳¹, 许世鑫¹,
吴梵¹, 杨德奎¹

(1. 云南机电职业技术学院交通工程学院, 云南 昆明 650203; 2. 昆明理工大学航空与航空学院, 云南 昆明 650500; 3. 北海市恒利建设工程有限公司质量检测有限公司, 广西 北海 536000; 4. 南宁师范大学教育科学学院, 广西南宁 530299; 5. 云南机电职业技术学院机械工程学院, 云南 昆明 650203)

摘要: 通过数值模拟及试验相结合的方法, 研究了不同Ni含量(0.0、0.1、0.3和0.5 mass%)的添加对Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu合金流动性和力学性能的影响。结果表明: 合金的流动性随着Ni含量的增加而增加; 当Ni含量为0.5 mass%时, 合金的流动性最好, 力学性能也显著提高; 与未添加Ni的合金相比, 添加0.5 mass% Ni的合金的抗拉强度提高了54.79%, 屈服强度提高了48.49%, 延伸率提高了461%。Ni的添加可以降低合金的凝固温度, 提高固相线温度, 使凝固区间变窄, 降低凝固过程中因枝晶间距的增大而降低流动性; 此外, Ni加入合金中形成了Al₃Ni、Al₂Ni₃等化合物, 会与Al基体形成Al-Al₃Ni共晶组织, 此共晶组织具有良好的流动性, Al₃Ni还可以细化合金凝固末期枝晶区形成的晶粒, 降低了枝晶区的流动性, 从而改善合金的流动性。

关键词: Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu; Ni含量; 流动性; 数值模拟; 共晶组织

中图分类号: TG146.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6264(2025)04-0180-11

Influence of Ni content on fluidity and mechanical properties of Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu alloy

XIA Can^{1,2}, ZHOU Ming¹, YANG Shang³, QIN Yan-xin⁴, ZHOU Shui-fang¹,
WU Fan¹, YANG De-quai¹

(1. Faculty of Transportation Engineering, Yunnan Vocational College of Mechanical and Electrical Technology, Kunming 650203, China; 2. Faculty of Civil Aviation and Aeronautics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 3. Beihai Hengli Construction Engineering Quality Testing Co. Ltd., Beihai 536000, China; 4. School of Education Sciences, Nanning Normal University, Nanning 530299, China; 5. School of Mechanical Engineering, Yunnan Vocational College of Mechanical and Electrical Technology, Kunming 650203, China)

Abstract: Influence of adding different Ni contents (0, 0.1, 0.3 and 0.5 mass%) on fluidity and mechanical properties of Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu alloy was studied through a combination of numerical simulation and experimental methods. The results show that the fluidity of the alloy increases with the increase of Ni content. When the Ni content is 0.5 mass%, the fluidity of the alloy is the best and the mechanical properties are significantly improved. Compared with the alloy without Ni added, the alloy with 0.5 mass% Ni shows a 54.79% increase in tensile strength, a 48.49% increase in yield strength, and a 461% increase in tensile strain. The addition of Ni can lower the liquidus temperature of the alloy, increase the solidus temperature, narrow the solidification zone, reduce the solid phase fraction near the solid during the solidification, lower the flow resistance, and thus improve the fluidity of the alloy. In addition, the addition of

收稿日期: 2024-03-15 修回日期: 2024-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(51865025); 云南省重大专项项目(202202AG280011); 云南省教育厅科研基金(2024J1417)

作者简介: 夏灿(1989—),男,硕士,主要从事金属材料及热处理、新材料制备、机械加工工艺研究, E-mail: 745048500@qq.com。

通信作者: 周明(1969—),男,硕士,主要从事金属材料及热处理研究,发表学术论文30余篇, E-mail: 721270926@qq.com。

引用格式: 夏灿,周明,杨尚,等.Ni含量对Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu合金流动性和力学性能的影响[J].材料热处理学报,2025,46(4):180-190.

XIA Can, ZHOU Ming, YANG Shang, et al. Influence of Ni content on fluidity and mechanical properties of Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu alloy[J].

Transactions of Materials and Heat Treatment, 2025, 46(4): 180-190.

Ni results in the formation of Ni-based compounds such as Al₃Ni and Al₂Ni₃ in the alloy, which will form an Al-Al₃Ni eutectic structure with the Al matrix and has good fluidity. Al₃Ni can also reduce the grains formed in the solid phase at the end of the alloy solidification, reduce the flow resistance in the solid phase, and improve the fluidity of the alloy.

Keywords: Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu alloy; Ni content; fluidity; numerical simulation; eutectic structure

Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu合金具有强度高、耐腐蚀性强、疲劳性能好、可通过热处理强化^[1-4]等优点,被广泛应用于交通运输、汽车制造、民用航空、机械工程、建筑工程、电子产品等设备、轻质太阳能等领域^[5-8]。然而,该合金属于变形铝合金,其流动性低且凝固区间大,成为该合金在铸造领域的难点和痛点^[9]。改善合金凝固过程的流动性可以降低热应力,有望实现“以铸代锻”,从而降低生产成本,扩大其作为结构件的应用范围。

合金流动性是指在合金在液态状态下的流动能力,它是合金材料的一个重要物理性质^[10]。合金的流动性直接关系到铸造过程中合金的成型能力,对铸造有显著影响,具有良好流动性的合金可以降低铸件在凝固后期收缩的膨胀,减少热裂缺陷,让合金在凝固过程中能够充分填充薄壁复杂结构铸件的型腔,获得缺陷少的铸件^[11]。Yang等^[12]研究发现当Ni含量小于3%,Ni含量在2%至6%之间变化时,Al-Ni-Si合金的流动性随Si和Ni含量的增加而增加,而当Ni含量增加到8%时,形成初生相Al₃Ni,流动性降低。Ni可以通过产生大量的Al-Al₃Ni共晶相来改善流动性^[13]。

通过大量文献调研,前人对铝合金流动性从不同角度都有所研究,这也为本研究提供了丰富的理论依据和有力的参考。但前人所做的工作,大多是针对不同的铝合金开展的,并且对Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu合金的流动性的研究还鲜有报道。基于此,本文结合ProCAST材料库自带的Al基合金中Ni含量不大于0.5%的研究Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu合金的流动性,同时提高其力学性能,拓展该合金的应用范围。

1 数值模拟及试验过程

1.1 数值模拟模型及模拟参数设置

1.1.1 数值模拟模型

在ProCAST仿真模拟过程中,其数值模拟的数学模型满足质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律。其方程分别如式(1)、(2)和(3)所示^[14-16]。ProCAST基于方程(1)~(3)进行充型和凝固计算,可同时计算流场、温度场、应力场、微组织等。

质量守恒方程:

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{d(\rho u)}{dx} + \frac{d(\rho v)}{dy} + \frac{d(\rho w)}{dz} = 0 \quad (1)$$

三维坐标下的动量守恒方程(x方向,y,z方向与此方程类似):

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho u^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho uv \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho uw \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x +$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \left(\frac{\mu}{k} \right) \mu \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} + \rho \frac{\partial H u}{\partial x} + \rho \frac{\partial H v}{\partial y} + \rho \frac{\partial H w}{\partial z} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3)$$

其中: $H(T) = \int_{T_0}^T C_p(T) dT + L(1 - f_s)$ (4)

式中: u, v, w 分别为x,y和z方向的速度分量,m/s; ρ 为密度,kg/m³; μ 为时间,s; f_s 为液相率; p 为压力,Pa; g_x 为x方向重力分量,m/s²; μ 为绝对粘度,Pa·s; f_s 为固相率; k 为热传导率,W/(m·°C); C_p 为比热容,J/(kg·°C); L 为凝固潜热,J/kg; T 为节点温度,°C; H 为焓值,J/mol。

ProCAST仿真软件不能直接建立三维模型,常用的三维建模软件有CATIA、Unigraphics、SolidWorks、Pro/E、Cimat、ANSYS等^[17-21]。UG是一种被广泛应用于科研领域的建模软件,该软件的稳定性出色,能够确保在复杂的建模过程中基本不会出现崩溃或者错误,本文所涉及的所有三维模型均采用UG软件进行建模。

在流动性试验中,通常采用同心圆螺旋形模具测量合金的流动性,最终以凝固的长度来表示合金的流动性好坏^[22-24]。本文所涉及的流动性试验同样采用同心圆的螺旋形模具进行测量。虽然同心圆的螺旋形模具在实际试验中有体积小、直观性强、长度好测量、砂型模具好制作、模型可多次使用等一系列的优点。但是在ProCAST有限元仿真模拟软件中,其内置测量工具不好测量螺旋形长度,只能测量合金的型腔率,这不利于测量和分析。ProCAST有限元仿真模拟软件内置较好的测量工具可以测量直径,而且

测量准确,为了便于测量流动结束时的流道长度,故本文流动性仿真模拟的铸件模型采用环形流道,环形流道可方便软件直接测量流道的长度,模型由浇口部分和环形部分组成,模型截面尺寸为5 mm×5 mm,最大运行长度为305 mm,如图1所示。不考虑应力,故将型用换热系数代替,可以在凝固结束后,切换到软件后处理模块,采用适当的视图,很方便地用软件内置的工具测量流道的长度,并将测量结果记录下来。



图1 模拟模型
Fig.1 Simulation model

1.1.2 数值模拟参数设置

在Mold-CAST模块,首先是按ip格式将三维模型导入ProCAST仿真软件的Mold模块中,然后在系统中进行面定义、体定义、体检查、检查无误后,再进行有限元网格划分,而网格类型全部使用系统默认的三角形网格;网格划分要综合考虑模拟时间反模拟的准确性,流动性模拟的环形铸件的三角形面网格尺寸为2 mm,而网格尺寸划分完成后,进行检查,检查通过后,以面网格为基础,直接生成四面体网格。切换到CAST模块,设置参数,材料赋值时只涉及铸件,铸件的材料需要手动在ProCAST软件数据中输入合金元素及含量采用Solid模型进行计算其各项热物性后保存创建。本文只针对环形铸件进行模拟,不涉及界面换热系数,在工艺管理里添加 $k=1250 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 的对流系数代替模具和空气对流的传导,不进行应力计算,浇注速度均设置为过热度70℃条件下,3.5倍,采用系统内的公式计算创建完成,选用Nur求解器进行求解计算。模拟结束时,切换到Viewer CAST模块查看模拟结果。

1.2 试验过程

1.2.1 试验材料

所有铸锭原料采用99.9% (未做特别说明,本文合金成分均为质量百分比)纯铝块、99.8%纯铁块、

99.8%纯镍块、99.9%纯铜粉、99.9%镍粉配制而成,配料考虑Zn、Mg的挥发和烧损量均为5%,其余原材料不计挥发和烧损量。制备不同合金铸件时,按照质量百分数分别计算好各元素的含量,并用实验室高精度电子天平分别称量分装备用。

1.2.2 试验方法

将配制好的原料进行熔炼,熔炼时,先将高温不易挥发的金属放入石墨坩埚中用KQFS-100-2.5S中频电炉感应炉进行熔炼,用热电偶测温,熔炼温度控制在720℃左右,待固体金属全部融化后,再将铝粉预先包装好的Zn和Mg放入石墨坩埚中进行熔炼。当所有固态金属完全融化,每次熔炼均加入合金总质量为0.5%的 C_2Cl_6 用石墨棒轻轻搅拌排气、除渣。调节中频感应炉,再次测温并将温度控制在710℃进行电磁搅拌及保温30 min,关闭中频感应炉电源,取出盛有熔体的坩埚立即静置用热电偶测温,当温度为 $(700 \pm 5)^\circ\text{C}$ 时立即开始浇注入预先准备好的铸型中。流动性测试试验砂型模具采用两箱造型,将制作好的砂放入流动性模具中,用木锤紧实型砂,扎好透气孔,继续通入 CO_2 气体进行紧实固定砂型,当紧实度达到 1.7 g/cm^2 左右时,打开砂箱并取出铸型模型,仔细检查砂型的完整性,当型腔和浇注系统的表面轮廓清晰光滑,无任何损伤时,可以确定砂型已经制作完成,每次试验都应采用相同的方法和材料来制作砂型模具,不预热。

由于模具设备数量限制,试验分多组多次完成,熔炼条件均相同,流动性测试用的是砂型螺旋模具,均不预热,试验在室温20℃下进行浇注,其余试验用金属模具进行浇注,金属模具预热温度为150℃。浇注时环境温度温度为20℃,空气相对湿度为40%~70%,浇注过程连续均匀。浇注结束后在空气中随模具进行冷却,10~15 min后开箱取出铸件^[4]。为了保证试验的可重复性和准确性,流动性每组试验都应采用相同的方法和材料来制作砂型模具,金属等制样合金所用铸造模具为活动型金属模具且预热温度均为150℃。

1.2.3 显微组织表征

显微组织表征的铸态合金试样取样用数控机床上用细丝电火花线切割制备,取样位置如图2所示。取样后,通过对样品表面进行打磨处理,真空包装,用于X射线衍射(XRD)测试、扫描电镜(SEM)测试及力学性能测试。

采用D8 DISCOVER型X射线衍射仪对合金试



图2 取样位置示意图
Fig.2 Schematic diagram of sampling position

样进行物相检测与分析。物相检测参数为:靶材Cu靶材,扫描范围为 $10^\circ \sim 110^\circ$,扫描测试加速电压40 kV,扫描测试加速电流50 mA,扫描速度为 $0.01^\circ/\text{s}$,将X射线衍射仪检测所得到的物相数据用Mik-Jade9软件进行分析,与Mik-Jade9数据库中的PDF标准卡片进行对比从而进行确定物相。

采用S-3400N型扫描电镜观察铸件的显微组织,SEM样品为经喷金处理后立即进行真空包装的试样,在进行SEM面扫描和点扫描时,结合附带的能谱仪(EDS)对样品的物相分布情况以及化学成分进行半定量分析。拉伸力学性能测试后,本文还立即通过SEM进行断口形貌观察。

表1 Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu合金的主要化学成分参数

Ni content	Alloy (mass fraction, %)	Solidsus/°C	Liquidus/°C	$\Delta T/^\circ\text{C}$
0.0 mass%	Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu	469	622	163
0.1 mass%	Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu-0.1Ni	434	621	147
0.2 mass%	Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu-0.2Ni	434	621	147
0.5 mass%	Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu-0.5Ni	433	620	147

注: ΔT 为固相线与液相线的温差, $\Delta T = T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidsus}}$ is the temperature difference between the solidus and liquidus.

图4为合金凝固过程中的析出相随温度的变化,从合金在凝固过程中的析出行为来看,未添加Ni的Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Cu合金在凝固过程中析出相主要为Al₃Sr₂CaMg₂MgZn₂T-AlCaMgZn相,且在456℃时开始析出Al相以外的其他相,456℃低于合金固相线温度469℃,也就是在凝固结束时才析出S-Al₃CaMg₂MgZn₂T-AlCaMgZn等相;而添加Ni的合金除了析出Al₃Sr₂CaMg₂MgZn₂T-AlCaMgZn相外,还析出了Al₃Ni₂Al₃Ni₂相,且Al₃Ni₂Al₃Ni₂相在合金温度降低到固相线温度前就开始析出,随着Ni含量的增加,Al₃Ni₂相开始析出温度逐渐增加,析出质量分数也在增加,当 $x=0.1 \text{ mass\%}$ 时,Al₃Ni₂相开始析出温度为566℃,当 $x=0.3 \text{ mass\%}$ 时,Al₃Ni₂相开始析出温度为

力学性能测试尺寸参考了GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》,采用INSTRON 68 TM-303型万能试验机在室温下进行力学性能测试,室温为18℃,拉伸速率为1 mm/min。

2 试验结果

2.1 合金凝固过程

在ProCAST软件材料数据库自定义合金,采用Solid模型计算固液相线温度等热物性参数,如图1所示,随着Ni的加入,合金的固液温差是显著降低;从图3(a)析出相随温度变化曲线可以看出,在温度下降到固相线之前,4种合金的固相率均随着温度的降低而增加,当温度降低为490℃左右(固相线附近)时,通过图中的局部放大曲线可以看出,随着Ni含量的增加,析出相随温度的变化关系,在固相线附近,随着Ni含量的增加,4种合金的固相率均不断降低,液相率不断增加。综合固液温差、凝固特性曲线、固相率的变化情况,Ni含量的增加有利于降低合金的凝固区间,降低流动过程中合金的析出相率,这些热物性的降低都利于提高合金的流动性。

582℃,当 $x=0.5 \text{ mass\%}$ 时,Al₃Ni₂相开始析出温度为590℃,本文统计了固相线附近, $x=0.1, 0.3$ 和 $0.5 \text{ mass\%}$ 合金中Al₃Ni₂相析出质量分数,分别为0.22%、0.69%和1.17%。

2.2 流动性

本文通过对合金的流动性进行数值模拟,并选取 $x=0.1$ 和 $0.5 \text{ mass\%}$ 的合金进行流动性模拟试验验证,表2对流动性模拟及试验结果进行了统计。模拟结果为,未添加Ni的合金流长为137.6 mm,添加0.5 mass%Ni的合金流长为143.5 mm,是未添加Ni的合金的1.043倍;试验结果为,未添加Ni的合金流长为348.33 mm,添加0.5 mass%Ni的合金流长为738.33 mm,是未添加Ni的合金的两倍,忽略模拟及试验模具尺寸的因素,随着Ni含量的增加,合

表3 图9中各点的EDS元素含量分析结果(原子百分数, at%)

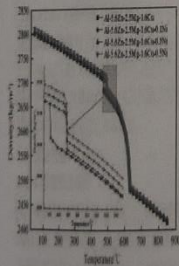
Table 3 EDS elemental content analysis results of each point marked in Fig. 9 (at%)

Point	Al	Zn	Mg	Ca	Ni	Principal phase
1	75.29	8.31	10.51	5.89	/	α -Al+ η Al ₂ Si
2	66.28	10.74	13.75	9.26	/	α -Al+ γ -Al ₃ Mg ₂ Si
3	94.39	2.17	3.07	0.37	/	α -Al
4	42.08	19.18	27.52	12.17	0.14	α -Mg+ γ -Al ₃ Mg ₂ Si
5	72.08	9.93	11.69	5.77	0.22	α -Mg+ γ -Al ₃ Mg ₂ Si
6	72.05	10.58	11.87	4.79	0.09	α -Mg+ η -Mg ₂ Si
7	57.96	11.42	20.25	7.70	0.68	α -Mg+ γ -Al ₃ Mg ₂ Si
8	86.28	2.82	4.49	1.43	5.30	Al ₃ Ni ₂ Si
9	88.9	1.62	3.23	2.52	3.72	Al ₃ Ni ₂ Si

此外,合金的流动性可以用半定量方程式(5)表示^[26]。在相同条件下,合金熔体的密度越大,越有利于合金的流动。图10是合金的密度随温度的变化关系。在凝固前Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Ca-0.5Ni合金的密度最大,故该合金的流动性最好。

$$L' = \frac{\rho_0 \sqrt{2\pi}}{\rho_0} \left(\frac{F_A}{P} \right) \left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T_B} \right) \quad (5)$$

式中, L' 为合金的流动长度, m 为表示流动消耗系数; ρ 为重力加速度, m/s^2 ; H 为静压力, m ; F 是铸件的面积, m^2 ; P_A 表示液态合金的密度, kg/m^3 ; P_B 是凝固面积 F 的周界, m ; k 是传热系数, $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$; T_A 表示液体停止流动时尖端的固相分数; ΔH 是液态合金的凝固潜热, J/kg ; c_L 是液态合金的比热容, $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$; T_B 是浇注温度, $^\circ C$; T_0 是流动停止的温度, $^\circ C$; T_L 是液相线温度, $^\circ C$; T_m 是凝固温度, $^\circ C$ 。

图10 Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Ca-0.5Ni合金的密度 ($x=0, 0.1, 0.3$ 和 0.5 mass%)Fig. 10 Density of the Al-5.6Zn-2.5Mg-1.6Ca-0.5Ni alloys ($x=0, 0.1, 0.3$ and 0.5 mass%)

3.2 Ni含量对力学性能的影响

本文在改善合金流动性的基础上,通过拉伸试验测量了 $x=0, 0.5$ mass%合金的拉伸性能,见图8。对比发现, $x=0.5$ mass%合金比 $x=0$ mass%合金的力学性能更好,说明微合金化后不但改善了合金的流动性,还提高了其力学性能。改善拉伸性能的原因是,Ni元素的加入提高了合金的流动性,细化了合金的晶粒,使得铸造缺陷降低;同时Ni元素的加入在铸造时析出了Al₃Ni₂Si、Al₃Ni₂Si等第二相细小粒子,这些第二相的析出和基体形成共晶组织,增加了结合力,有的第二相细小粒子分布在基体中,它们具有钉扎位错的能力^[6],可以有效地阻碍合金的位错运动,从而显著提高合金的强度,当然也不排除固溶强化所起的作用。

4 结论

- (1) Ni的添加可以降低合金的液相线温度,提高固相线温度,使凝固区间变窄,降低凝固过程中固相线附近的固相分数,降低流动阻力,从而改善合金的流动性;
- (2) Ni的添加可以生成Al₃Ni₂Si、Al₃Ni₂Si等化合物,Al₃Ni₂Si与基体Al形成少量的Al₃Ni₂Si共晶组织,此共晶组织具有良好的流动性,Al₃Ni₂Si还可以细化合金凝固末期析出区形成的晶粒,降低析出区的流动阻力,从而改善合金的流动性;0.5 mass% Ni的加入对合金流动性的改善最明显,流长是未添加Ni的合金的两倍;
- (3) 与未添加Ni的合金相比,添加0.5 mass% Ni的合金的抗拉强度提高了54.79%,屈服强度提高了48.49%,延伸率提高了46.1%。

参考文献

- [1] Liu J, Cheng Y S, Chen S W N, et al. Microstructure and mechanical properties of 7075 aluminum alloy during complex Rheotransition[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(12): 3373-3382.
- [2] Mohamed C, Muhammad H S. Effect of equal channel angular pressing on the mechanical and tribological behavior of AlZnMgCu alloy[J]. Materials Characterization, 2018, 140: 147-161.
- [3] 熊朝晖, 周俊, 张永安, 等. 铝镁合金合金化及性能研究[J]. 中国工程科学, 2022, 25(1): 38-45.
- [4] XING Hai-qing, YAN Han-qin, ZHANG Yan-qun, et al. Development strategy for the aviation-grade aluminum alloy industry in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 25(1): 80-85.
- [5] Zhang X P, Han Z K, Xu L L, et al. Evolution of precipitate and precipitate/matrix interface in Al-Zn-Mg-Cu (-Ag) alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 138: 157-170.
- [6] Chen J W, Ling X, Deng P, et al. Effect of Mg content on microstructure, mechanical properties and intergranular corrosion properties of Al-Cu-Mg-Al alloy[J]. Materials Today Communications, 2023, 34: 108363.
- [7] Li L Y, Tang J W, Liu Z Q, et al. Microalloying effects of Ni on the microstructure and mechanical properties of an AlZnMgCu-Sr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 947: 169667.
- [8] Wu S Y, Zhang J X, Xu X S, et al. Nucleation and evolution mechanism of precipitates during the initial aging stage in Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Materials Today Communications, 2023, 37: 107336.
- [9] 张兴文. 合金元素对 Al-Mg-Zn-Cu 系合金组织、力学及耐腐蚀性的影响研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
- [10] ZHANG Xingwen. Study on the effect of alloying elements on the microstructure, mechanics and corrosion performance of Al-Mg-Zn-Cu system alloy[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.
- [11] 刘志刚, 肖明, 马晓生, 等. 航空钛合金合金化及性能研究[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(11): 3-17.
- [12] LIU Zhi-gang, XIAO Ming, MA Xiao-sheng, et al. Development and research progress of aerospace Al-Al alloys[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(11): 3-17.
- [13] 夏旭, 夏臣平, 许世华, 等. 改善 Al-Zn-Mg-Cu 合金流动性的数值模拟及实验验证[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2022, 48(6): 20-24.
- [14] Xia Xu, Xia Chienping, Xu Shi-hua, et al. Numerical simulation and experimental verification of improving the fluidity of Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2022, 48(6): 18-24.
- [15] Han P, Wang Q, Xu W, et al. Bonding mechanism and fracture behavior of cold-chambered Ti-based amorphous alloy on 6061 Al alloy[J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 891: 131194.
- [16] Chen G, Li X. Effect of TiC nano-particles on the fluidity and solidification behavior of aluminum alloy 6063[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2024, 324: 118241.
- [17] Xu Z, Xiong C, Lai D, et al. Effect of Al on the fluidity of Zn-Mg alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 936: 167677.
- [18] Guo Y, Zhang L, Wu G, et al. Influence of Cu addition on hot tearing susceptibility and fluidity of Al-Si-Cu alloys: Experimental investigation, criterion prediction and simulation assessment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 949: 169720.
- [19] 李大志, 刘国光, 乔成光, 等. 铸造 Al-Si 合金流动性及热裂敏感性的研究[J]. 热加工工艺, 2022, 51(3): 7-12.
- [20] Li Da-zhi, Liu Guo-guang, Qiao Cheng-guang, et al. Research status of fluidity and hot cracking sensitivity of cast Al-Si alloys[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(3): 7-12.
- [21] Liu Y, Wen F L, Jiao D, et al. Effect of S and N contents on the fluidity of Al-Si-Mg alloys evaluated by using thermal analysis[J]. Thermochimica Acta, 2016, 643: 7-15.
- [22] Cho Y H, Kim H W, Lee J M, et al. A new approach to the design of a low Si content Al-Si casting alloy for optimizing thermal conductivity and fluidity[J]. Journal of Materials Science, 2015, 50(22): 7271-7281.
- [23] 孙海平. 铸态合金凝固过程数值模拟及工艺优化[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.