

热处理对镍合金化 7075 铝合金凝固组织结构及力学性能的影响

王琳锐¹ 王 开¹ 何乃军¹ 邱孝祥²
(1.重庆大学材料科学与工程学院; 2.重庆高金实业股份有限公司)

摘 要 镍合金化 7075 铝合金展现出较好的抗热裂性能,为了探究该合金热处理调控技术,比较研究了热处理对该合金微观结构及力学性能的影响。结果表明,7075 合金的凝固组织主要由初生相和晶间多相离异共晶组成。经固溶时效处理后,晶间的 Al-Cu-Mg 金属间化合物完全溶入基体合金,铸态试样中粗大的 Al-Ni 化合物也明显细化,分布更为分散。热处理后试样的综合力学性能均有明显提升,当 7075 铝合金中的 Ni 含量为 0.6% 时,平均抗拉强度较 7075 合金和 Ni 含量为 1.2% 的 7075 铝合金分别提高了 14% 和 17%,表明晶间化合物结构调控是改善合金抗拉强度的重要因素。

关键词 7075 铝合金; Al₃Ni 相; 凝固组织; 热处理; 力学性能

中图分类号 TG146.21 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.02.010 开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Effects of Heat Treatment on Solidification Microstructure and Mechanical Properties of Ni Alloying 7075 Aluminum Alloy

Wang Linrui¹, Wang Kai¹, He Naijun¹, Qiu Xiaoxiang²
(1.College of Materials Science and Engineering, Chongqing University;
2.Chongqing Gaokin Industrial Co., Ltd.)

Abstract: Nickel alloying 7075 aluminum alloy exhibits superior thermal cracking resistance. In order to explore the heat treatment regulation technology of the as-cast alloys, the influence of heat treatment conditions on the microstructure and mechanical properties of the 7075 alloys were investigated comparatively. The results reveal that the solidification microstructure of the alloys is mainly composed of primary α -Al phase and intergranular multi-phase divorced eutectic microstructure. The intergranular Al-Cu-Mg intermetallic compounds are completely dissolved into the matrix alloy after solid solution aging, where the coarse Al₃Ni intermetallic compound in the as-cast specimens is also refined with dispersed distribution. After heat treatment, the comprehensive mechanical properties of the specimens are significantly improved, where the average tensile strength of 7075 aluminum alloy with 0.6% Ni content is 14% and 17%, higher than that of 7075 alloy and 7075 aluminum alloy with 1.2% Ni content, respectively, indicating that the microstructural control of intergranular compounds is the key factor to improving the tensile strength of the alloy.

Key Words: 7075 Aluminum Alloy, Al₃Ni Phase, Solidification Structure, Heat Treatment, Mechanical Properties

7075 铝合金具有优良的综合力学性能,属于高强变形铝合金,是航空航天和交通运输领域中的一种重要结构材料^[1~3]。但是,该合金也存在凝固组织粗化严重、凝固温度区间宽、热裂倾向大等问题,加之合金力学性能在高温下显著降低^[4],阻碍着其更广泛的应用。研究表明,金属材料微观结构、强化相以及微观缺陷等对

合金性能具有重要影响^[5],铸态合金中存在大量金属间化合物构成晶间共晶组织,容易恶化合金的力学性能^[7~9]。采用适当的热处理技术,能显著改善合金的组织结构和综合力学性能^[6]。

在铝合金中增添稀土元素,可以细化晶粒、改善合金组织,进而提高合金的强度和韧性^[10]。此外,添加 Ni

收稿日期:2021-07-28;修改稿收到日期:2021-08-11
基金项目:重庆市技术创新与应用发展专项资助项目(cstc2019jscx-msxmX0028,cstc2020jscx-msxmX0203)
第一作者简介:王琳锐,女,1996 年出生,硕士研究生,重庆(400044),E-mail:1769050699@qq.com
通信作者:王开,男,1976 年出生,副教授,重庆(400044),E-mail:wangkai@cqu.edu.cn
引用格式:王琳锐,王开,何乃军,等. 热处理对镍合金化 7075 铝合金凝固组织结构及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(2):179-184.
WANG L R, WANG K, HE N J, et al. Effects of heat treatment on solidification microstructure and mechanical properties of Ni alloying 7075 aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(2):179-184.

能提高合金的耐热性、降低热膨胀系数,还能减小 Fe 对合金的有害作用^[11]。FAN Y 等^[12]研究了 Al-Al₃Ni 共晶反应的结晶学及形成机理,表明所形成的 Al-Al₃Ni 共晶在铸造合金中发挥了热稳定性作用。LIU F 等^[9]研究了铸态 Al-Zn-Mg-Cu-Ni 合金组织结构、抗热裂行为以及力学性能等,表明在 Al-Zn-Mg-Cu 合金中加入 Ni,会大大降低合金的热裂敏感性,提高合金的抗热裂性能。但是,过量 Ni 可能形成尺寸粗大的 Al₃Ni 相,反而降低力学性能。项东等^[13]研究了 RR350 铸造合金中镍化合物相的作用,发现 Al-Ni 化合物在铝基体中的固溶度非常小,沿着晶界分布,对阻碍晶粒的位错滑移起到积极作用,进而改善了铝合金的耐热性。虽然研究者对 7xxx 铝合金做了大量研究,但有关热处理对 Ni 合金化 7075 铝合金细化机理及凝固过程中共晶的形成的研究报道较少。基于此,本课题研究了热处理对 Ni 合金化 7075 铝合金凝固组织及和力学性能的影响,比较了含镍 7075 铝合金的铸态组织结构,探讨了热处理调控合金微观结构的作用行为和改善合金力学性能的机理。

1 试验材料与方法

试验材料为 7075 铝合金铸锭和 Al-20Ni 中间合金。采用熔铸法制备 3 组合金试样的化学成分见表 1。

表 1 7075 铝合金试样的化学成分

alloy specimens		w _B							%
合金	Zn	Mg	Cu	Cr	Si	Fe	Ni	Al	
1	5.6	2.5	1.6	0.23	0.4	0.5	0	余量	
2	5.32	2.37	1.54	0.22	0.38	0.47	0.6	余量	
3	5.06	2.26	1.45	0.21	0.37	0.46	1.2	余量	

在合金熔炼过程中,首先将 7075 铝合金和 Al-20Ni 中间合金放入熔炼炉中随炉加热到 780 ℃;待所有的中间合金完全熔化后保温 30 min,加入 C₂Cl₆ 精炼除气;之后,将熔体总质量分数为 0.3% 的 Al-5Ti-1B 晶粒细化剂加入铝液中,并继续在 (735±5) ℃ 保温 30 min;最后,浇注到提前预热至 200 ℃ 的金属型中冷却凝固,获得合金试样铸锭。

合金试样固溶、时效热处理工艺见图 1。首先,在 SK-2-12-4 箱式电阻炉中将合金试样铸锭随炉升温至 475 ℃,保温 8 h,取出试样后立即淬火冷却至室温;然后,将固溶处理之后的铸锭放入箱式电阻炉中,随炉升温至 120 ℃,保温 24 h 后取出试样,并在室温下自然冷却。

采用 CMT-5150 型电子万能试验机检测合金力学性能。首先,从 SK2-12-4 铸锭上截取出设计尺寸的板

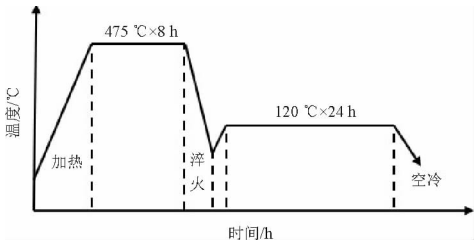


图 1 热处理工艺路线

Fig.1 Route of heat treatment process

状拉伸试样(见图 2),并用砂纸磨光试样表面;其次,在合金拉伸力学性能检测过程中,拉伸速率为 1 mm/min,获得应力-位移曲线,并依照截面尺寸和拉伸段的尺寸变化获得试样的抗拉强度和伸长率。在整个试验过程中,每组试样均测试 3 次并取平均值。

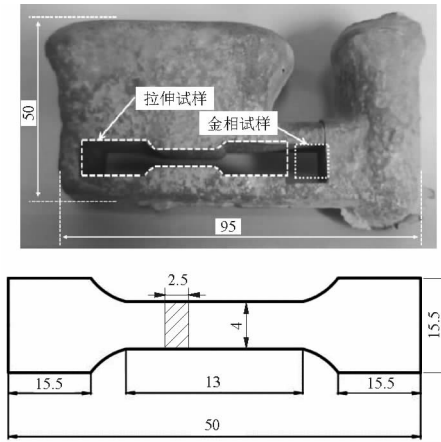


图 2 拉伸试样取样位置与尺寸

Fig.2 Sampling location and dimension of tensile specimen

对微观结构试样检测过程中,用线切割方法从铸锭上截取出尺寸为 2 mm×2 mm 的试块(见图 2);再用砂纸磨制、机械抛光制得金相试样,并用 Keller 溶液(体积分数为 2.5% 的 HNO₃+1.5% 的 HCl+1% 的 HF)腐蚀;采用 XJP-6A 型光学显微镜观察试样的微观组织,并利用线截距法检测凝固组织中初生相尺寸。此外,为了鉴别晶间结构,用配有 EDS 的 TM4000plus 型台式扫描电镜(SEM)检测了金属间物相结构特征。

采用 1000TM/LCD 型数字显微硬度计,检测试样的显微硬度。载荷为 2.94 N、保压时间为 10 s,每个数据点至少测试 5 次取平均值。

2 试验结果与分析

2.1 Ni 对 7075 铝合金铸态组织的影响

图 3 为铸态合金试样初生相的微观组织形貌,图 4 为试样的晶间组织结构及分布情况。可以看出,7075 铝合金的金相组织主要为较粗大的树枝胞状初生晶粒,平均晶粒尺寸为 91 μm。加入 0.6% 和 1.2% 的 Ni 后,

合金晶粒尺寸分别为 $67\ \mu\text{m}$ 和 $68\ \mu\text{m}$ 。相比于 7075 铝合金,添加 Ni 后合金的初生晶粒明显细化,且组织均匀性也显著改善。从图 4 中看出,晶界处分布缩松缺陷,而且晶间分布着较多化合物,且含 Ni 合金中晶间化合物数量增大,晶间间距也明显增大。类似研究发现,非

平衡第二相主要为 Zn、Mg、Cu 的富集,且枝晶偏析严重^[14]。综上所述,由于 Ni 含量改变,晶粒得到了细化,且晶粒细化程度与加入的 Ni 有关,添加适量的 Ni 可以有效细化合金晶粒,但 Ni 含量继续增加,晶粒尺寸没有进一步细化。

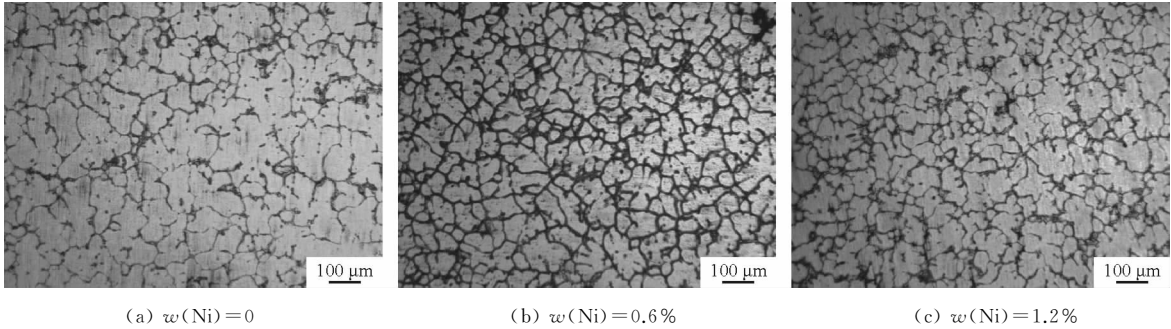


图 3 不同 Ni 含量下铸态 7075 铝合金宏观形貌
Fig.3 Macro morphology of as-cast 7075 aluminum alloy with different Ni content

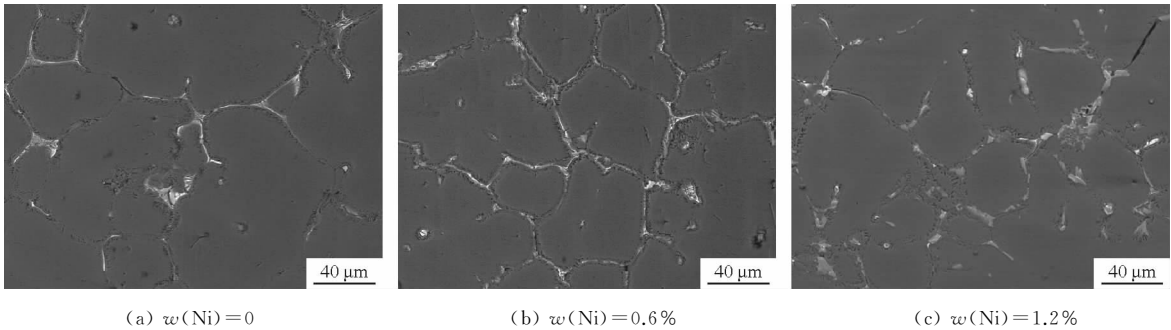


图 4 不同 Ni 含量下铸态 7075 合金的背散射 SEM 图像
Fig.4 Back scattering SEM images of as-cast 7075 aluminum alloy with different Ni content

2.2 热处理对铸态 7075 铝合金微观组织的影响

图 5 为 7075 铝合金热处理后的微观组织形貌,图 6 为合金试样的晶间物相结构与形貌。比较图 3a 和图 5a 可见,热处理后晶界更为清晰,铸态合金中晶间第二相通过热处理回溶到基体中。而且,由于溶质扩散及表面张力作用,晶粒形貌也有枝晶胞状转变为近球团状,整个过程中晶粒尺寸变化不明显。7075 合金晶间主要是残留的 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ 和少量 AlZnMgCu 相,其组织结构

特征与其他研究所报道的一致^[15~17],这与试验合金中 Fe 含量较高有关。而 Al_3Ni 形貌不规则,呈短棒状、团聚块状,Ni 含量增加导致晶间所形成的含 Ni 相更粗大,且分布也更分散。由于 Al_3Ni 是高熔点相,且在基体合金中的固溶度低,难以回溶到基体中,即使在 $475\ ^\circ\text{C}$ 保温 8 h,沿晶界仍然呈不连续离散分布。随着 Ni 含量增加, Al_3Ni 含量增加并在晶界处的富集长大越显著。

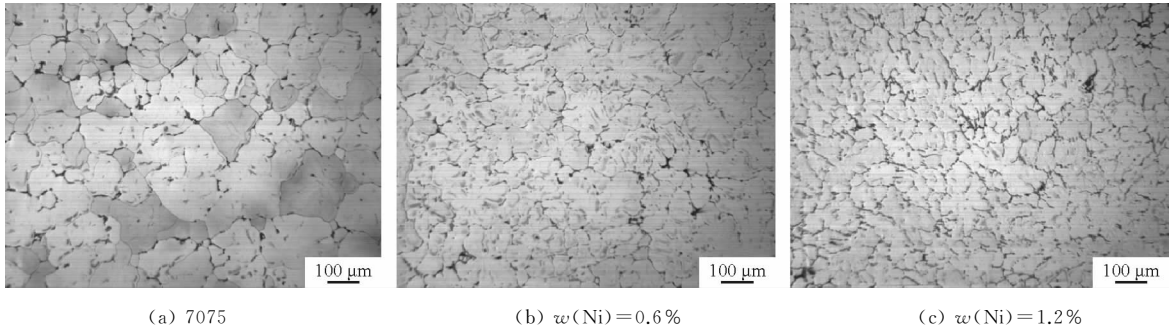


图 5 不同 Ni 含量的 7075 铝合金热处理后的微观组织
Fig.5 Microstructure of 7075 aluminum alloy with different Ni content after heat treatment

结合图 5 的光学显微镜和图 6 的 SEM 图像进行分析,在 7075 铝合金中添加 Ni 会细化凝固组织的初生

相。参考 Al-Ni 合金相图可知,在 Al 多 Ni 少的情况下,熔融态下的铝合金会与 Ni 在 $640\ ^\circ\text{C}$ 发生共晶反应,

反应产物为 Al_3Ni ^[18]。 Al_3Ni 相相对于 Al 的其他相来说,具有高硬度和较高的熔点,所以在凝固时的冶金反应中会优先析出。当 Al_3Ni 析出后,对于此时还处于熔融状态的 Al 来说, Al_3Ni 起到抑制晶界移动的作用,且由于合金元素含量增加,导致 Al、Cu、Mg 等合金元素扩散速度变慢,故 Ni 的加入起到阻碍晶粒长大粗化的作用,初生晶粒将得到细化,这一点在图 3b 和图 3c 中可以看到。但是随着 Ni 含量增多, Al_3Ni 也会增多增大,且在晶间分布更加连续。据分析,其形貌与晶间化合物的形核机制有很大关系,由于凝固过程中合金溶质元素在晶间高度富集,在较低的过冷作用下形核率低,

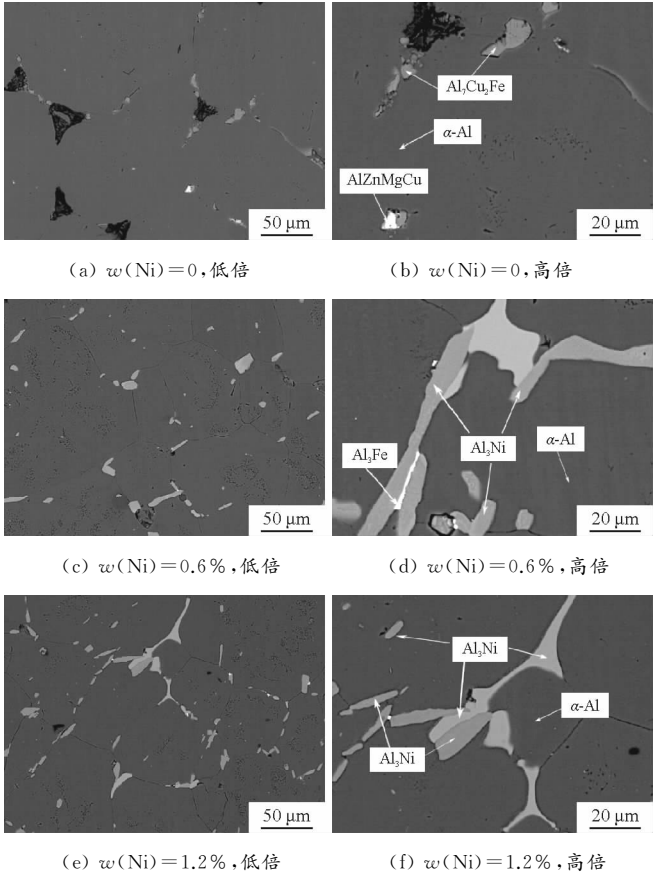


图 6 固溶时效后的 7075 铝合金背散射低 SEM 图像和能谱分析
Fig.6 Back scattering SEM images and EDS analysis of 7075 aluminum alloy with different Ni contents after solid solution aging

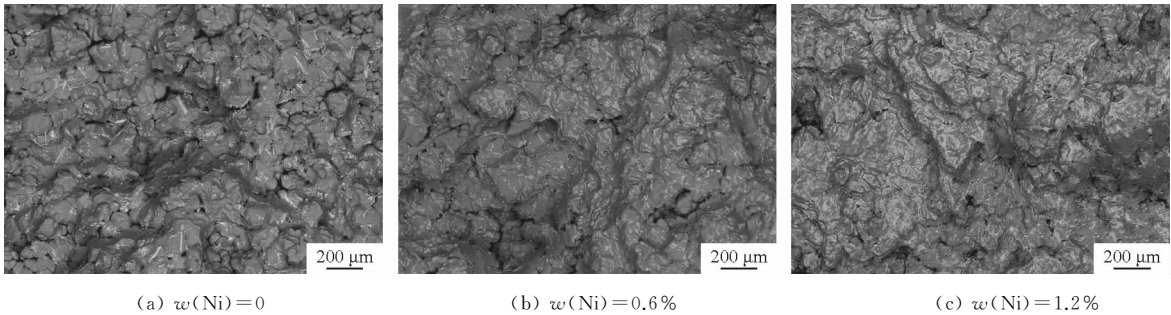


图 9 不同 Ni 含量的 7075 铝合金拉伸试验后断口表面形貌 SEM
Fig.9 SEM images of fracture surface morphology of 7075 aluminum alloy with different Ni contents

以至于长大倾向明显,形成粗大的 Al_3Ni 化合物相,图 6c 和图 6e 晶界分析结果可以验证上述观点。

2.3 Ni 对 7075 铝合金力学性能影响

图 7 是 Ni 含量为 0.6% 时铝合金热处理前后室温拉伸应力-应变曲线和力学性能。图 8 为不同 Ni 含量的 7075 合金室温力学性能。可以看出,合金的强度在热处理后有明显的提高,但是伸长率没有大的改变。由图 8 可以看出,含 0.6% Ni 的铸态铝合金的抗拉强度为 212 MPa,热处理后抗拉强度最高为 286 MPa,比 7075 铝合金、1.2% 的 Ni 的铝合金分别提高 14% 和 17%。铸态 7075 铝合金抗拉强度低的原因是其晶粒尺寸较大,且存在液相凝固收缩缺陷。1.2% 的 Ni 的合金抗拉强度明显降低的原因在于 Ni 含量较多,晶间共晶分数较高,共晶聚集粗化。0.6% 的 Ni 的合金由于晶粒较小,共晶分布更均匀,在一定程度上起到了凝固增加合金结合性的作用,因此抗拉强度最高。而热处理后合金伸长率随着 Ni 含量的增加有所下降,和 Al_3Ni 偏聚加重、晶界粗化有关。

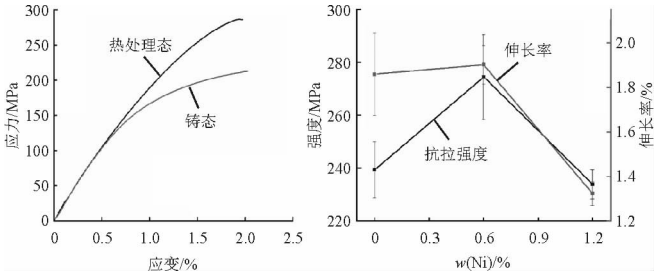


图 7 加 0.6% 的 Ni 后铸态和热处理态合金的应力-应变曲线
Fig.7 Stress-strain curves of as-cast and heat-treated 7075 aluminum alloy after adding 0.6% Ni
图 8 Ni 含量对热处理后 7075 合金室温力学性能的影响
Fig.8 Effects of Ni content on mechanical properties of 7075 alloy at room temperature after heat treatment

图 9 为不同 Ni 含量的 7075 铝合金拉伸断口形貌。可以看出,3 种合金均为脆性断裂。在 7075 铝合金中添加 Ni 以后,合金试样中的晶间缩松、不连续缺陷减少。添加 Ni 后, Al_3Ni 相沿晶界不连续分布,这在一定程度上起到抑制裂纹的萌生,提高合金强度的作用,但

是粗大的 Al_3Ni 相塑性变形能力差,其在晶间偏聚会聚集位错,加速裂纹扩展,导致合金的伸长率降低。尽管 Al_3Ni 对伸长率有不利影响,但对缺陷改善和细化晶粒作用更明显。因此,当 Ni 含量为 0.6% 时,适量的 Ni 会起到改善合金性能的作用。当 Ni 含量为 1.2% 时,由于硬度较高的 Al_3Ni 相含量不断增加,且大量的共晶在晶界上偏聚,尺寸逐渐增大,晶界逐渐增厚,使得合金的强度和伸长率均降低。

硬度是金属材料表面局部位置抵抗接触应力作用产生塑性变形或破裂的能力。硬度值越高表明金属对塑性变形抵抗力越大,材料越难发生塑性变形。图 10 为试验合金热处理前后硬度变化曲线。可以看出,整体上热处理均提高了合金的硬度,硬度分布也更加集中,表明热处理改善了合金试样的组织均匀性。热处理后 7075 铝合金硬度(HV)为 117.7,随着 Ni 含量增加,合金的硬度增加,Ni 含量为 0.6% 时合金的硬度(HV)为 123.8,当 Ni 含量为 1.2% 时试样硬度(HV)达到 127.4。由于 7xxx 系合金时效过程中的沉淀析出顺序为^[19]: α (过饱和固溶体) $\rightarrow$ G.P. 区 $\rightarrow\eta'$ (MgZn_2) $\rightarrow\eta$ (MgZn_2),合金硬度增加与 Zn、Mg 等固溶到基体中,随后在时效过程中析出 MgZn_2 起到强化作用有关,因此在热处理后通过固溶强化和析出强化作用增大了合金试样的硬度与强度。 Al_3Ni 在铝合金中是硬脆的稳定相,硬质 Al_3Ni 相随 Ni 含量增加而增多,且大量 Al_3Ni 在晶界处聚集,可以起到阻碍位错运动的作用,使合金的硬度增加,塑、韧性降低。另一方面,硬质 Al_3Ni 相若在晶界分布较多,可能导致材料受力时沿着晶界破坏,导致材料性能下降。此外,晶间缺陷是该种合金难以避免的铸造缺陷,尽管增大共晶量可以改善晶间组织结构,但是其形核生长行为也会引起晶间缺陷形成规律的变化。因此,随着 Ni 含量增加,7075 铝合金硬度会逐渐增大,Ni 含量为 1.2% 时合金的硬度值最大,而其力学性能会出现先增加后降低的现象。

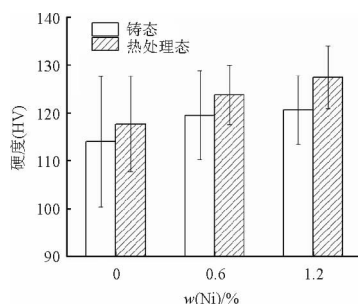


图 10 不同 Ni 含量的 7075 铝合金热处理后的硬度
Fig.10 Hardness value of 7075 aluminum alloy with different Ni contents after heat treatment

3 结 论

(1)在 7075 铝合金中添加 Ni,可以细化晶粒、减少

晶间缺陷、提升抗拉强度和硬度。随着 Ni 含量增多,共晶组织量增多,在晶界附近聚集长大,导致晶界粗化和脆性增加,反而降低合金的性能。

(2)经固溶处理后,7075 合金中的晶间相除了 Fe 相外均可完全固溶,晶界结构更加清晰,而在含 Ni 的 7075 铝合金中, Al_3Ni 相除了形貌变得圆钝、尺寸有所细化,仍主要分布在晶间。且 Ni 含量越高,晶间 Al_3Ni 相也越粗大,且倾向于连续分布。

(3)铸造 7075 铝合金经 $475\text{ }^{\circ}\text{C}\times 8\text{ h}$ 固溶+水淬和 $120\text{ }^{\circ}\text{C}\times 24\text{ h}$ 时效处理后,其力学性能在热处理后得到明显的提高。Ni 含量为 0.6% 时,合金的平均抗拉强度比 7075 铝合金、Ni 含量为 1.2% 的 7075 铝合金分别提高 14% 和 17%,综合力学性能较好。

参 考 文 献

- [1] ZHOU B, LU S, XU K L, et al. Hot cracking tendency test and simulation of 7075 semi-solid aluminium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(2): 318-332.
- [2] GARCÍA-INFANTA J, ZHILYAEV A P, SHARAFUTDINOV A, et al. An evidence of high strain rate superplasticity at intermediate homologous temperatures in an Al-Zn-Mg-Cu alloy processed by high-pressure torsion[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2009, 473(1-2): 163-166.
- [3] REN J, WANG R, FENG Y, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of an ultrahigh strength Al-Zn-Mg-Cu-Zr-Sc (7055) alloy processed by modified powder hot extrusion with post aging[J]. Vacuum, 2019, 161: 434-442.
- [4] EZATPOUR H R, CHAICHI A, SAJJADI S A. The effect of Al_2O_3 -nanoparticles as the reinforcement additive on the hot deformation behavior of 7075 aluminum alloy[J]. Materials & Design, 2015, 88(25): 1 049-1 056.
- [5] JAVDANI A, DA EI-SORKHABI A H. Microstructural and mechanical behavior of blended powder semisolid formed 7075Al/B₄C composites under different experimental conditions[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(7): 1 298-1 310.
- [6] MOHAMMADI H, KETABCHI M, KALAKI A. Microstructure evolution of semi-solid 7075 aluminum alloy during reheating process[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2011, 20(7): 1 256-1 263.
- [7] DONG J, CUI J Z, YU F X, et al. A new way to cast high-alloyed Al-Zn-Mg-Cu-Zr for super-high strength and toughness[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 171(3): 399-404.
- [8] EBRAHIMI S, EMAMY M. Effects of Al-5Ti-1B and Al-5Zr master alloys on the structure, hardness and tensile properties of a highly alloyed aluminum alloy[J]. Materials & Design, 2010, 31(1): 200-209.
- [9] LIU F, ZHU X, JI S. Effects of Ni on the microstructure, hot tear and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloys under as-cast condition[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 821: 153-158.
- [10] 赵俊,刘志勇,刘秋平,等.稀土 Er 及回归热处理对 7075 铝合金组织和性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2014,34(6): 666-669.
- [11] 师昌绪,李恒德,周廉.材料科学与工程手册(上卷)[M].北京:化学工业出版社,2004.

Al 含量对 MA-SPS 制备 Ti-Al 合金组织与电阻率的影响

徐 灿 陈 哲 程婧璠 蔡启舟
(华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室)

摘 要 采用机械合金化-放电等离子烧结(MA-SPS)技术制备了不同 Al 含量的 Ti-Al 合金,研究了 Al 含量对 Ti-Al 复合粉末形貌、Ti-Al 合金组织与电阻率的影响。结果表明,高能球磨过程中 Ti/Al 复合粉末扁平化,Al 固溶于 Ti 中,当 Al 含量高于 9% 后,部分 Al 固溶于 Ti,而未固溶的 Al 破碎为细小颗粒附着于 Ti 颗粒表面,颗粒表面粗糙度增加,颗粒截面呈层状结构。当 Al 含量为 6% 时,球磨粉末烧结试样组织为单相 α -Ti(Al)固溶体,Al 含量为 9%~12%,组织为 α -Ti(Al)相及其晶界析出的细小 α_2 颗粒。当 Al 含量超过 12% 后,组织为 α -Ti(Al)固溶体和 α_2 -Ti₃Al 双相组织。合金电阻率随着 Al 含量的增加先增大后减小,Al 含量为 18% 时,又略有增加。Al 含量为 9% 时,电阻率达最大值 2.074 $\mu\Omega \cdot m$ 。

关键词 Ti-Al 合金;机械合金化;放电等离子烧结;微观组织;电阻率

中图分类号 TG146.2 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.02.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Al Content on Microstructure and Resistivity of Ti-Al Alloys
Prepared by MA-SPS

Xu Can, Chen Zhe, Chen Jingfan, Cai Qizhou
(State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology,
Huazhong University of Science and Technology)

Abstract: Ti-Al alloys with different Al contents were fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering (MA-SPS). The effects of Al content on the composite powder morphologies, microstructure and electrical resistivity of SPS Ti-Al alloys were investigated. The results indicate that Ti-Al composite powders are flattened during high energy ball milling with Al dissolved into Ti. When the content of Al is higher than 9%, part of Al is dissolved into Ti, while the insoluble Al is broken into fine particles and attached to the surface of Ti particles, resulting in the increase of surface roughness, where the cross section of particles presents a layered structure. When the amount of Al is 6%, the microstructure of SPS specimen prepared by ball milled powders is single-phase α -Ti(Al) solid solution, which becomes α -Ti(Al) phase and fine α_2 particles precipitated in grain boundary when the amount of Al is 9%~12%. When the amount of Al exceeds 12%, the microstructure is dual-phase composed of α -Ti(Al) and α_2 -Ti₃Al. The electrical resistivity of the alloys is firstly increased and then decreased with the increase of Al content, and slightly increased when the amount of Al reaches 18%. The electrical resistivity reaches the maximum value of 2.074 $\mu\Omega \cdot m$ when the Al content is 9%.

Key Words: Ti-Al Alloy, Mechanical Alloying, Spark Plasma Sintering, Microstructure, Electrical Resistivity

收稿日期: 2021-07-12; **修改稿收到日期:** 2021-08-18
基金项目: 武汉市 2019 年度第一批创建国家科技创新平台项目
第一作者简介: 徐灿,男,1995 年出生,硕士研究生,武汉(430074),E-mail: 18569969504@163.com
通信作者: 蔡启舟,男,1964 年出生,教授,武汉(430074),E-mail: caiqizhou@hust.edu.cn
引用格式: 徐灿,陈哲,程婧璠,等. Al 含量对 MA-SPS 制备 Ti-Al 合金组织与电阻率的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(2): 184-189.
XU C, CHEN Z, CHEN J F, et al. Effects of Al content on microstructure and resistivity of Ti-Al alloys prepared by MA-SPS[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(2): 184-189.

[12] FAN Y, MAKHLOUF M M. The Al-Al₃Ni eutectic reaction; Crystallography and mechanism of formation[J]. Metallurgical & Materials Transactions, 2015, A46(9): 3 808-3 812.

[13] 项东, 王少全. 铸造铝合金 RR350 中镍相作用的研究[J]. 现代制造技术与装备, 2001(5): 20-21.

[14] 李承波, 韩素琦, 何克准, 等. 7075 铝合金铸锭组织及均匀化研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(12): 1 248-1 252.

[15] 李慧, 陈涛, 赵路远, 等. T651 态 7075 铝合金的显微组织与拉伸断裂机制[J]. 机械工程材料, 2016(11): 38-43.

[16] 王江涛, 谭文胜, 周东帅, 等. 固溶时效对 7075 铝合金微观组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2017(12): 148-154.

[17] 韩成府, 岑少起, 路王珂, 等. 固溶处理对 7075 铝合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(2): 201-204.

[18] MASSALSKI T B. Binary Alloy Phase Diagrams[M]. Ohio: ASM. Intl., 1990.

[19] 李志辉, 熊柏青, 张永安, 等. 7B04 铝合金的时效沉淀析出及强化行为[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(2): 248-253.

(编辑: 栗万仲)