

轻质金属的发展和应用：高强铝合金和镁合金

王俊升^{1,2} 薛程鹏¹ 王 硕¹ 田光元¹ 苏 辉¹
(1.北京理工大学材料学院; 2.北京理工大学前沿交叉科学研究院)

摘 要 高强轻质合金在许多重要工程领域如汽车、海洋和航空航天应用占据重要的地位, Al/Mg-Li 合金是最具代表性的高强轻质合金。Li 的加入不仅减轻了铝/镁合金的质量, 同时提高了强度和弹性模量。综述了最新的 Al-Li 和 Mg-Li 合金的微合金化、微观组织/缺陷以及先进的制造工艺和加工技术, 旨在为未来轻质合金建立“成分-加工-微观结构-性能”的最佳组合提供参考。

关键词 Al-Li 合金; Mg-Li 合金; 微合金化; 轻质合金

中图分类号 TG146.2; TG113.2 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.02.001 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Development and Applications of Lightweight Metal: High-strength Al and Mg Alloys

Wang Junsheng^{1,2}, Xue Chengpeng¹, Wang Shuo¹, Tian Guangyuan¹, Su Hui¹
(1.School of Materials Science and Engineering, Beijing Institute of Technology;
2.Advanced Research Institute of Multidisciplinary Science, Beijing Institute of Technology)

Abstract: High-strength lightweight alloys occupy an outstanding position in many critical engineering fields such as automotive, marine and aerospace applications, among which Al/Mg-Li alloy is the most representative. Li addition not only reduces the weight of Al/Mg alloys, but also increases the strength and elastic modulus. The recent microalloying, microstructure/defects and advanced manufacturing process as well as processing technology of Al-Li and Mg-Li alloys were reviewed, aiming to provide guidance for building optimal combination of “composition-processing-microstructure-property” for lightweight alloys in the future.

Key Words: Al-Li Alloy, Mg-Li Alloy, Microalloying, Lightweight Alloy

航空航天、武器装备结构件对轻质高强合金的需求日益迫切。Al/Mg-Li 合金具有密度低、弹性模量高、比强度高和比刚度高等特点, 是航空航天等领域轻量化材料研究的热点。Al-Li 合金可代替传统铝合金, 使军机整机质量减轻 15%, 意味着可缩短滑跑距离 15%, 增加航程 20%, 同时提高有效载荷 30%; 对于民用客机, 其结构质量可减轻 14.6%, 飞机每年的飞行费用将节省 2.2%。我国 C919 大飞机由于采用第 3 代 Al-Li 合金 AA2060 替换了第一代传统的 Al-Cu 合金 AA2024, 使用量高达 10%, 实现减重 15%^[1]。Mg-Li 合金是工程应用中最轻的结构材料之一, 密度为铝合金的 1/2, 在航空航天领域中应用 Mg-Li 合金能够降低飞行器自身质量的 20%~30%, 可以有效节省能源和提升飞行器的飞行能力^[2]。

本研究对高强 Al-Li/Mg-Li 合金的设计思路、先进的制备工艺以及加工技术发展现状进行了回顾, 指出了制约 Al-Li/Mg-Li 合金高强度的问题, 提出了实现高强

Al-Li/Mg-Li 合金的技术手段以及发展趋势, 旨在为 Al-Li/Mg-Li 合金建立“成分-加工-微观结构-性能”的最佳组合提供指导。

1 高强 Al-Li 合金的研究进展

1.1 高强铸造 Al-Li 合金

铸造 Al-Li 合金特别适用于对整体性能要求高且均匀的大型复杂结构件, 其铸造过程较为复杂, 铸件的力学性能在很大程度上取决于微观结构特征^[3]。图 1 为不同铸造铝合金在不同温度下的氢含量比较以及 Al-Li 合金的非平衡凝固过程。可以看出, 由于 Al-Li 合金的凝固温度范围很广(最高可达 137 ℃), 因此在铸造过程中容易形成树枝状结构, 并容易在高温下吸氢和氧化(见图 1a), 形成微观结构缺陷, 如气孔、热裂纹、氧化物和金属夹杂物^[4-5], 这对合金的力学性能非常不利。目前, 对提高铸造 Al-Li 合金力学性能的研究主要集中

收稿日期: 2022-06-18
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52073030); 区域联合基金(重点)资助项目(U20A20276)
第一作者简介: 王俊升, 男, 1979 年出生, 教授, 北京(100081), E-mail: Junsheng.wang@bit.edu.cn
引用格式: 王俊升, 薛程鹏, 王硕, 等. 轻质金属的发展和应用: 高强铝合金和镁合金[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(2): 145-152.
WANG J S, XUE C P, WANG S, et al. Development and applications of lightweight metal: High-strength Al and Mg alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(2): 145-152.

在两个方面:①以合金化的手段开发新型合金,即通过研究合金元素及其添加量对 Al-Li 合金的影响,以研制高性能 Al-Li 合金。②通过先进的制备工艺避免或减弱缺陷,提高铸造 Al-Li 合金的性能。

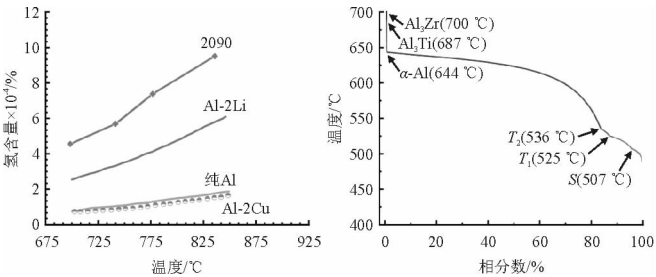


图 1 不同铸造铝合金在不同温度下氢含量比较以及典型 AA2060 合金的非平衡凝固过程

Fig.1 Comparison of the hydrogen content of different aluminum alloys at various temperatures and non-equilibrium solidification of a typical AA2060 Al-Li alloy

1.1.1 合金化元素对 Al-Li 合金组织和性能的影响

合金化元素对 Al-Li 合金微观结构和力学性能的影响见表 1。DECREUS B 等^[6]研究了不同 Cu/Li 比对 Al-Li 合金析出相沉淀顺序和动力学的影响,发现二者虽然经历相同的 T_1 相沉淀顺序,但是高 Li 含量 T_1 相孕育形核时间更长且直径更大。WU L 等^[7]研究了 Mg 含量对 Al-Li 合金微观组织的影响,发现添加少量的 Mg($\leq 2\%$)促进了 Cu 原子的扩散,从而促进 T_1 相的形核。而当 Mg 含量高于 5% 时, $S'-Al_2CuMg$ 相的形成促进了 $\delta'-Al_3Li$ 相的形成,这对 Al-Li 合金的力学性能不利。ZHANG J S 等^[8]研究了 Zn 对铸造 Al-Li 合金组织演变和力学性能的影响。结果表明,Zn 有效地改变了析出行为,随着 Zn 含量增加到 1%, T_1 相的析出能力大大增强,提高了合金的抗拉强度。

表 1 合金元素对铸造 Al-Li 合金的微观结构和力学性能的影响

Tab.1 Effects of alloying elements on microstructure and mechanical properties of as-cast Al-Li alloy	
合金元素	产生的影响
Li、Cu ^[6]	Cu/Li 比决定沉淀相的析出顺序
Mg ^[7]	Mg 含量 $\leq 2\%$ 促进铜原子的扩散,促进 T_1 相的形核
Zn ^[8]	改变 T_1 相的析出行为,提升沉淀能力
Ag ^[9]	Ag 改变析出相的析出顺序,促进 T_1 相的析出
Zr、Ti ^[10]	细化晶粒
Sc、Er ^[11-13]	降低晶粒尺寸,抑制晶间相的形成;Sc 降低 δ' 相的生长速度
Cd ^[14-15]	促进 T_1 相的均匀分布,促进 δ' 相的溶解
Ce ^[16]	抑制晶间相的形成,促进 T_1 相的析出
La ^[17]	促进树枝状晶向等轴晶转化,细化晶粒,良好的抗热裂性

近年来,许多研究都集中在贵重或稀土(RE)元素添加到 Al-Li 合金中以获得更好的力学性能。JIANG B 等^[9]研究了 Ag 对 Al-Li 合金析出行为的影响,发现 Ag 改变了 Al-Li 合金的析出顺序,促进了 T_1 相的析

出。ZHANG J S 等^[10]研究了 Zr 和 Ti 对铸造 Al-Li 合金的影响,发现在 Al-Li 合金熔体有限的保温时间内几乎没有毒化现象,晶粒明显细化。ZHANG X L 等^[11]揭示了 Sc 含量对铸造 Al-Li 合金晶粒的影响,发现加入 0.2% 的 Sc 可使铸造 Al-Li 合金的晶粒细化程度达到最高。此外,Sc 的添加降低了基体中 $\delta'-Al_3Li$ 和 δ' 无析出区($\delta'-PFZs$)的生长速率,屈服强度和抗拉强度不断提高^[12]。此外,ZHANG X J 等^[13]研究了 Sc 和 Er 对 Al-Li 合金的微观结构演变和力学性能的影响,发现与 Sc 相比,Er 对晶粒的细化作用不太明显,但二者都能抑制晶间相的形成。在铸造 Al-Li 合金中,几乎没有大量的位错,所以很难获得高密度的 T_1 相。WU L 等^[14]揭示了 Cd 对铸造 Al-Li 合金的时效动力学和沉淀硬化的影响,发现 Cd 促进了 T_1 相的均匀分布,同时作为异质形核点促进 T_1 相的数量增加。而在另一项研究中发现 Cd 会促进 δ' 相的溶解,导致 T_2 相的形成^[15]。YU X X 等^[16]研究了 Ce 对 Al-Li 合金的微观结构和力学性能的影响,发现 Ce 不仅细化了金属间相和晶粒,而且还促进了 T_1 相的析出,导致强度增加了 16% 以上。TAO C C 等^[17]研究了 La 对 Al-Cu-Mg 合金热裂敏感性的影响,发现添加适量的 La 可以促进树枝晶向等轴晶转变,同时细化晶粒,使合金表现出良好的抗热裂性,由此可见,La 在铸造 Al-Li 合金的应用潜力巨大。

1.1.2 高强度铸造 Al-Li 合金的制备

除了微合金化,Al-Li 合金的制备工艺对力学性能也有很大影响,工艺方法对铸造 Al-Li 合金的力学性能的影响见表 2。RONG M 等^[18]研究了精炼工艺对铸造 Al-Li 合金夹杂物和力学性能的影响,发现 C_2Cl_6 精炼和旋转气体喷吹相结合的精炼工艺可以显著提高铸造 Al-Li 合金的熔体纯度,与未精炼合金相比,气孔缺陷和夹渣体积分数从 1.47% 下降到 0.12%,抗拉强度从 179 MPa 增加到 293 MPa。MERİÇ C^[19]首次研究了真空铸造下添加 Li 的 2024 合金的力学性能,发现在真空下铸造的合金的力学性能比在无真空下铸造的更加优良,根据近来研究得知,这主要得益于真空熔炼下熔体中的氢浓度降低到最低水平,避免了铸件中的孔洞缺陷。NAYAN N 等^[20]采用真空感应熔炼(VIM)技术对 Al-Li 合金进行铸造,经过机械加工和热处理之后获得了优良的力学性能,虽未报道铸态 Al-Li 合金的力学性能,但是经过后续处理后其抗拉强度达到 578 MPa。随着铸造技术的进一步发展,电磁铸造技术已经成功应用于 Al-Li 合金的生产。WANG F Y 等^[21]利用低频电磁铸造(LFEC)技术制备 2195Al-Li 合金,发现 LFEC 可以显著改善铸造合金的微观结构和冶金品质。为了解决传统铸造方法中存在的冶金缺陷等问题,LI S J 等^[22]采用双辊铸造(TRC)工艺铸造 Al-Li 合金,该工艺将铸

造和轧制变形合二为一,解决了 Al-Li 合金中因凝固收缩和吸氢而产生的气孔等缺陷,但合金在铸造状态下的强度不高。此外,离心铸造还可以将传统铸件中的冶金缺陷降到最低^[26]。

表 2 工艺方法对铸造 Al-Li 合金的力学性能的影响
Tab.2 Effects of process methods on mechanical properties of as-cast Al-Li alloys

合金	工艺技术	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
Al-2Li-2Cu-0.2Zr ^[18]	六氯乙烷精炼和旋转气体发泡结合	293	142	18.1
AA2024+2%~4%Li ^[19]	真空铸造+自然时效	420	260	12.0
Al-Cu-1.3Li-Mg-Ag-Zr ^[20]	真空感应熔化技术+T6	578	553	6.7
AA2195 ^[21]	直接冷铸+挤压+T6	537	465	10.4
AA2195 ^[21]	低频电磁铸造(10 Hz)+挤压+T6	608	592	8.8
AA2099 ^[22]	双辊铸造	183	120	6.7
Al-2.2Li-1.23Hf ^[23]	粉末冶金	460	416	4.9
Al-6Mg-1.6Li-0.4Zr ^[24]	喷射成形	553	495	8.5
AA2196 ^[25]	增材制造	439	372	6.9

最近,一些新型制备工艺也被应用在 Al-Li 合金上。粉末冶金技术被用来解决传统铸造工艺中存在的缺陷问题,如热裂纹和宏观/微观偏析^[27]。NORMAN A F 等^[23]将粉末冶金技术用于 Al-Li 合金,在实现细化晶粒的同时,将缺陷降到最低。热处理后抗拉强度达到 460 MPa,但合金的伸长率很低。尽管粉末冶金工艺取得了相当大的成功,但容易出现氧化物污染,这对合金的疲劳寿命不利。喷射成形技术结合了快速凝固、半固态加工、近净形加工等优点^[28],制备的 Al-Li 合金几乎没有宏/微观偏析,从而避免了许多传统铸造中必要的用于消除/最小化偏析的中间步骤,如长时间均匀化处理和大量的热机械加工。HOGG S C 等^[24]利用喷射成形技术研究了低密度 Al-Li 合金的微观组织和力学性能,合金显示出细小均匀的等轴晶粒,平均尺寸为 10~15 μm ,经过峰时效后强度可达到 553 MPa,伸长率达到 8.5%,高于粉末冶金的性能。然而,喷射成形技术的广泛商业化仍然存在一定问题,如喷射成形合金材料中不可避免地存在一些孔洞,孔隙率一般为 0.5%~2%,必须经过挤压/轧制才能使其足够致密。另一项技术是增材制造,已被 XUE C P 等^[25]证明对制造 Al-Li 合金是有效的,并发明了一种热变形工艺来控制微孔率,从而控制 3D 打印后 Al-Li 合金的力学性能。

对于未来高强铸造 Al-Li 合金的发展,一方面要综合考虑合金元素对其本身微观组织的影响,特别是微量元素和稀土元素对 Al-Li 合金的微观组织和力学性能的影响;另一方面,由于 Al-Li 合金铸造的特殊性,在 Al-Li 合金的制备上要关注传统铸造方法中熔体的深

度净化或者采用新兴技术实现铸件内部的良好品质。

1.2 高强变形 Al-Li 合金

与钢、镍合金等相比,Al-Cu-Li 合金,如 AA2195、AA2050 和 AA2060,由于 Cu 含量高(一般为 4%左右),在室温下的成形性较低,无法通过冷成形工艺来满足复杂部件的需要。对于这些 Al-Li 合金,通常采用热变形工艺。目前,围绕 Al-Cu-Li 合金系的热变形研究主要集中在以下方面:建立应力与应变量、应变速率以及温度之间的内在关系模型^[29~32];构建加工图以确定加工参数的最佳范围^[29];探究 Al-Cu-Li 合金在热变形过程中的流变行为^[32,33];高温软化机制^[34];建立挤压参数(包括挤压率和温度)对织构、各向异性和力学性能的影响^[35,36];以及热轧过程中亚晶尺寸、形态及邻近溶质的再分布问题^[37]。

对于 Al-Mg-Li 系合金,由于其本身具有良好的室温塑性(高达 20%的变形量),往往直接采取冷轧工艺。最近研究发现,将冷轧 Al-Mg-Li 合金与电脉冲辅助再结晶退火(EARA)和时效(EAA)相结合,可以同时提高其强度和延展性,并降低各向异性^[38,39]。这要归因于 EARA 中额外的焦耳热,可以加速空位的扩散,而扩散控制的位错攀升在高温条件下对亚晶粒的形成和生长发挥着关键作用,进而决定了冷轧 Al-Mg-Li 合金的再结晶率。

为了进一步提高 Al-Li 合金的力学性能,在热/冷变形后通常会进行适当的固溶、时效处理。热处理过程不仅改变了晶粒大小、再结晶程度和织构,而且还影响到第二相的析出。在这一点上,变形 Al-Li 合金的主要强化机制是沉淀强化。如何控制沉淀相的类型、数量密度、晶粒尺寸和空间分布,成为设计高强度、高韧性的 Al-Li 合金的关键。目前,对于 Al-Li 合金中的析出相包括晶体结构、形成条件及其作用等方面都有广泛的报道。其中,板状的 T_1 相,以及三明治结构的 $\delta'/\theta'/\delta'$ 复合沉淀相起到了最重要的强化作用^[40,41]。根据理论计算,确定了在 $\delta'/\theta'/\delta'$ 复合沉淀内的两端 δ' 相的两种位相关系,即同相和反相^[42]。借鉴反相畴界的切变模式,提出了两端 δ' 相的相变模式^[43]。对于复杂相界面,提出了一种精确求解界面能的方法,发现界面能的最小化与相稳定性直接相干。同时,基于相界面变形模型,发现纳米级的 $\delta'/\theta'/\delta'$ 复合相表现出良好的抗拉强度。而在半共格界面上存在能量更低的稳定层错结构,低能的本征层错提供了位错源,为高强、高韧 Al-Li 合金的设计提供了新思路^[44]。

2 高强 Mg-Li 合金的研究进展

2.1 高强铸造 Mg-Li 合金

高性能的铸造 Mg-Li 合金是变形 Mg-Li 合金良好

力学性能的基础。然而,铸造 Mg-Li 合金的强度低、耐腐蚀性差、抗蠕变性弱等缺点严重限制了其应用。因此,从合金强化和晶粒细化的角度对高强度 Mg-Li 合金的加工技术进行了回顾,并对高强度 Mg-Li 合金的应用前景进行了展望,以指导新型高强度铸造镁合金的合作开发和加工。

2.1.1 合金化元素对铸造 Mg-Li 合金性能的影响

合金化是改善铸造 Mg-Li 合金性能的基本方法。通过合金元素,如 Al、Zn、Zr、Ag 和稀土(RE),可以改变共晶化合物或结构进而提高合金的性能,从而获得不同性质的 Mg-Li 合金。广泛使用的铸态 Mg-Li 合金是镁锂铝(LA)、镁锂锌(LZ)和镁锂铝锌(LAZ)体系,其中 Al 和 Zn 是主要的合金元素。尽管 Al 和 Zn 在 Mg-Li 合金中具有较大的固溶度,并能产生良好的固溶强化效果,但由于在时效过程中会产生 $MgLi_2(Al, Zn)$ 软质相,并在低温下发生相变,导致强度下降,因此受到限制。最近,研究人员在 LA、LZ 和 LAZ 合金的基础上加入了不同的合金元素。CHANG L L 等^[45]研究了添加不同含量的 Y 对 Mg-4Li-3Al 合金的微观结构演变和力学性能的影响。发现当 Y 含量为 0.5% 时,合金具有较高的抗拉强度(211 MPa)和伸长率(17.8%),这主要归因于晶粒细化和固溶强化的综合作用。JI H 等^[46]研究表明,当添加 0.5% 的 Er 时,Mg-10Li-5Zn-0.5Er 合金表现出最好的力学性能,抗拉强度、屈服强度和伸长率分别达到 223 MPa、198 MPa 和 14.7%,这主要是由于加入 Er 后,合金的晶粒尺寸明显减小,促进了 Mg-Zn-Er(W 相)的形成,减少 Mg-Li-Zn 相。WU L B 等^[47]研究了富 Ce 稀土(RE)和热处理对铸造的 Mg-5Li-3Al-2Zn(LAZ532)合金力学性能的影响。发现随着 RE 的加入, Al_2RE/Al_3RE 析出相和共晶细化形成,而 AlLi 相减少,从而改善了合金的力学性能。其他含有 RE 的典型 Mg-Li 合金及其力学性能见表 3。

表 3 含有 REs 的其他典型铸造 Mg-Li 合金和力学性能
Tab.3 Other typical as-cast Mg-Li alloys containing RE and its mechanical properties

合金	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
Mg-8Li-3Al-2Zn-0.5Nd ^[48]	218.47	168.49	18.88
Mg-8Li-3Al-3Sn ^[49]	190.00	156.00	9.90
Mg-5Li-3Al-2Zn-1.2Ag ^[50]	200.00	-	5.80
Mg-9Li-3Al-2Gd ^[51]	188.00	174.00	14.90
Mg-14-Li-6Zn-2Gd ^[52]	158.00	116.50	26.10
Mg-5.21Li-3.44Zn-0.32Y-0.01Zr ^[53]	165.70	92.30	14.50
Mg-8Li-3Al-3Zn-1Y ^[55]	189.99	128.20	7.80
Mg-8Li-3Al-3Zn ^[54]	134.40	96.46	7.50

2.1.2 高强度铸造 Mg-Li 合金的制备

(1)重力铸造 重力铸造是目前常用的铸造 Mg-Li 合金的方法。考虑到高活性的 Mg 和 Li 金属容易被氧

化和剧烈燃烧,熔炼过程必须得到保护。采用覆盖剂保护和真空熔炼技术。覆盖剂保护是通过阻断空气和金属液体的接触来熔化 Mg-Li 合金。但是,覆盖剂中的氯盐在高温熔炼过程中会产生有毒气体,如 Cl_2 。目前,真空冶炼技术主要用于熔化 Mg-Li 合金,方法是先抽空空气,然后注入惰性气体。ZHAO J 等^[55]使用真空熔炼方法制备了不同 Y 含量的高强度铸造 Mg-8Li-3Al-2Zn 合金($\sigma_b = 218.5$ MPa, $\sigma_{0.2} = 153.0$ MPa, $\delta = 16.9\%$)。SUN X G 等^[56]使用同样的方法制备了具有细小晶粒和均匀结构的 Mg-3Li-Sc 合金。

(2)压铸 压铸是通过将熔化的镁合金液体在高速和压力下注入精密的金属模具来实现快速成形。Mg-Li 合金的熔体温度为 600~700 ℃,因此通常采用冷室压铸。通过调整压力,可以细化微观结构以提高强度。然而,在铸造 Mg-Li 合金时,金属液在模具中会产生卷气等现象,造成铸锭的内孔缺陷。

(3)热处理强化 铸造 Mg-Li 合金的微观结构和力学性能可以通过热处理进行优化。通常使用固溶强化和沉淀强化来产生完整的固溶体和纳米级的沉淀物。LI J Q 等^[57]发现,在对铸态 Mg-9Li-7Al-1Sn 合金进行固溶处理后,Al-Li 相完全溶解在基体中,导致布氏硬度逐渐增加。MAURYA R 等^[58]发现,Mg-9Li-7Al-Sn 合金在 400 ℃固溶和 50 ℃时效后,硬度和模量都高于铸态的。

2.2 高强变形 Mg-Li 合金

与传统铸造 Mg-Li 合金相比,变形 Mg-Li 合金在塑性变形过程中,能够细化晶粒,并有效消除气孔等铸造缺陷,从而提高 Mg-Li 合金的力学性能,不同变形工艺 Mg-Li 合金的力学性能见表 4。

表 4 不同变形工艺下 Mg-Li 合金的力学性能
Tab.4 Mechanical properties of Mg-Li alloys under different deformation processes

合金	工艺	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
Mg-7Li-2Al-1.5Sn ^[59]	挤压	250	324	11.9
Mg-8Li-1Al-0.5Sn ^[60]	挤压	240	322	11.0
Mg-9Li-3Al-1.5Nd ^[61]	挤压	255	216	21.2
Mg-8Li-5Zn-0.5Er ^[62]	挤压	212	222	19.6
Mg-8Li-4Y-2Er-2Zn-0.6Zr ^[63]	轧制	—	221	22.0
Mg-9.5Li-1Zn ^[64]	轧制	227	258	21.0
Mg-7.28Li-2.19Al-0.091Y ^[65]	热轧+冷轧	182	299	15.7
Mg-8Li-1Al ^[66]	挤压+轧制	—	299	15.7
Mg-8Li-1Al-1Zn ^[66]	挤压+轧制	—	233	9.2
Mg-16Li-2.5Zn-2.5Er ^[67]	挤压+冷轧	225	234	26.0
Mg-9Li ^[68]	等通道转角挤压+轧制	167	206	21.0
Mg-14Li-3Al-2Gd ^[69]	四层累积叠轧焊	232	255	4.0

热挤压和轧制是 Mg-Li 合金塑性变形最典型的方法。ZHOU G 等^[59]对铸态 Mg-7Li-2Al-1.5Sn 在 260

℃下以 25 : 1 的挤压比挤压, 制备了高强度 Mg-Li 合金, 其屈服强度为 250 MPa, 抗拉强度为 324 MPa, 伸长率为 11.9%。TANG Y 等^[70]研究了挤压温度和热处理工艺对 Mg-Li 合金力学性能的影响, 发现当挤压温度为 300 ℃时, 合金的抗拉强度能够达到 329.2 MPa。PENG X 等^[71]对铸态 Mg-8Li-3Al-2Zn-0.5Y 合金进行挤压, 其屈服强度和抗拉强度分别由 198.1 MPa 和 222.5 MPa 提升到 282.4 MPa 和 319.3 MPa。

Li 元素固溶进镁基体中, 降低了镁合金的 c/a 晶格轴比, 使得镁合金能够在室温下轧制。WANG D 等^[63]通过热处理和冷轧工艺将 Mg-8Li-4Y-2Er-2Zn-0.6Zr 合金的抗拉强度从 142 MPa 提高到 221 MPa。ZHANG S 等^[72]通过在室温下轧制 Mg-14Li-0.5Ni 合金获得纳米晶, 使其强度提高了 150%。GUO F 等^[64]设计了一种多向轧制工艺, 通过细化晶粒, 同时提高了 Mg-Li 合金的抗拉强度和延展性。CAO F R 等^[65]通过在 300 ℃下进行 77.3% 的大变形热压缩并随后进行 60% 的冷轧, 获得了高强度 (299 MPa) 和良好伸长率 (15.7%) 的 Mg-7.28Li-2.19Al-0.091Y 合金。MENG X R 等^[66]对 Mg-8Li-1Al 合金进行了 280 ℃热挤压, 随后进行 200 ℃的热轧, 通过细化晶粒和加工硬化的方法, 获得了抗拉强度为 313.9 MPa 的 Mg-Li 合金。JI Q 等^[67]通过 100 ℃热挤压和随后的冷轧, 获得了高比强度的 Mg-16Li-2.5Zn-2.5Er 合金, 其抗拉强度为 234 MPa, 屈服强度为 225 MPa, 伸长率为 26%。KLU E E 等^[68]通过室温等通道角挤压 (ECAP) 工艺获得了抗拉强度为 206 MPa, 伸长率为 21% 的超细晶粒 (UFG's) 高强 Mg-9Li 合金。

此外, 通过等通道转角挤压 (ECAP)、剧烈塑性变形 (SPD)、高压扭转 (HPT)、累积叠轧焊 (ARB) 和多向锻造 (MDF) 等超塑性变形可以进一步改善 Mg-Li 合金的力学性能。CHEN D X 等^[73]通过 ECAP 对 Mg-10.73Li-4.49Al-0.52Y 合金进行了大变形量的剪切塑性变形, 获得了最大伸长率为 306.6% 的 Mg-Li 合金。MATSUNOSHITA H 等^[74]发现, 挤压态 Mg-8Li 合金的平均晶粒尺寸可在 HPT 后细化至 500 nm, 表现出良好的超塑性, 在 200 ℃拉伸时, 其伸长率可达到 1 330%。ZHENG H P 等^[69]研究了 Mg-Li 合金在传统两层累积叠轧焊 (TARB) 的 4 层累积叠轧焊 (FARB) 过程中的几何变化和数学关系, 发现与铸态 Mg-14Li-3Al-2Gd 合金相比, 经 ARB 处理的板材的屈服强度和抗拉强度显著提高。TARB6 和 FARB4 板材的屈服强度分别为 (201.6 ± 4.7) MPa 和 (231.6 ± 3.8) MPa, 分别提高了 209.6% 和 240.7%。MINETA T 等^[75]通过热处理和 MDF 的组合工艺获得了兼具高强度和高塑性的 Mg-14.4Li-2.8Al 合金 (LA143)。

3 结 语

虽然微合金化、先进的制备工艺以及加工技术可以最大化地改善 Al-Li/Mg-Li 合金的微观组织, 减少缺陷, 提升力学性能, 但是微合金元素的比例以及加入方式需要仔细考虑。此外, Al-Li/Mg-Li 合金由于自身熔体的特殊性, 在铸造过程中不可避免地发生氧化、吸氢等问题, 以及在后续加工过程中造成的应力问题, 微观组织控制技术亟需进一步解决。当前实现高性能 Al-Li/Mg-Li 合金仍面临一系列挑战, 未来高强度 Al-Li/Mg-Li 合金的设计需要从以下几个方向全面考虑。

(1) 结合相图 (CALPHAD) 计算优化合金元素的比例, 精确控制 Al-Li/Mg-Li 合金析出相的类型和含量, 建立合金元素对析出相种类、分布和尺寸的影响规律。

(2) 在传统 Al-Li/Mg-Li 合金铸造基础上开发熔体深度净化技术, 消除或减弱铸造过程中的冶金缺陷, 建立铸造技术参数与缺陷之间的联系, 从而提高铸造 Al-Li/Mg-Li 合金的内部品质。

(3) 采用有限元模拟计算方法为 Al-Li/Mg-Li 合金加工技术提供参数指导, 选择最佳参数的组合调控微观组织、消除加工过程中的应力, 构建加工参数-微观组织-力学性能之间的关系。

参 考 文 献

- [1] 于以标, 陈乐平, 徐勇. 高性能 Al-Li 合金的研究进展及其应用[J]. 铸造技术, 2020, 41(7): 687-692.
- [2] 郭晶. 新型 Mg-Li-Al 合金的微观组织及性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [3] SINGH V, GOKHALE A A. Melting and casting of aluminum-lithium alloys[J]. Aluminum-lithium Alloy, 2014, 167-185.
- [4] WANG H Z, LEUNG D Y C, LEUNG M K H, et al. A review on hydrogen production using aluminum and aluminum alloys[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(4): 845-853.
- [5] WATSON J W, MESHII M. Hydrogen in aluminum and aluminum alloys[J]. Treatise on Materials Science & Technology, 1989, 31: 501-521.
- [6] DECREUS B, DESCHAMPS A, GEUSER F DE, et al. The influence of Cu/Li ratio on precipitation in Al-Cu-Li- x alloys[J]. Acta Materialia, 2021, 61(6): 2 207-2 218.
- [7] WU L, LI X F, WANG H W. Significant roles of minor Mg addition in microstructural evolution and mechanical properties of cast Al-3Li-2Cu-0.15Zr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 857: 157 600-157 615.
- [8] ZHANG J S, WU G H, ZHANG L, et al. Effect of Zn on precipitation evolution and mechanical properties of a high strength cast Al-Li-Cu alloy[J]. Materials Characterization, 2020, 160: 110 089.
- [9] JIANG B, WANG H S, YI D Q, et al. Effect of Ag addition on the age hardening and precipitation behavior in an Al-Cu-Li-Mg-Zn-Mn-Zr alloy [J]. Materials Characterization, 2020, 162: 110 184-110 206.
- [10] ZHANG J S, WU G H, ZHANG L, et al. Role of Ti in the microstructure evolutions and mechanical properties of cast Al-2.5Li-

- 1.5Cu-1Zn-0.5Mg(-0.2Zr) alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 899: 163-320.
- [11] ZHANG X L, ZHANG L, WU G H, et.al. Influence of Sc content on the microstructure and mechanical properties of cast Al-2Li-2Cu-0.5Mg-0.2Zr alloy[J]. *Materials Characterization*, 2018, 142: 223-236.
- [12] XUE C P, WANG Y, WANG J S. Designing elastic modulus of Al_3X precipitates in Al alloys by identifying effective atomic bonds and stabilizing coherent structures[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 896: 162-619.
- [13] ZHANG X J, WANG H W, YAN B, et.al. The effect of grain refinement and precipitation strengthening induced by Sc or Er alloying on the mechanical properties of cast Al-Li-Cu-Mg alloys at elevated temperatures[J]. *Materials Science and Engineering*, 2021, A822: 141-641.
- [14] WU L, LI Y G, LI X F. Interactions between cadmium and multiple precipitates in an Al-Li-Cu alloy: Improving aging kinetics and precipitation hardening[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 42(11): 44-49.
- [15] WU L, WANG Q, SHU S P. Interactions between cadmium and Al_3Li precipitates: A new mechanism of accelerating dissolution and transformation of phases in Al-Li-Cu alloy[J]. *Materials Science and Engineering*, 2021, A806: 140-607.
- [16] YU X X, YIN D F, YU Z M. Effects of cerium and zirconium microalloying addition on the microstructures and tensile properties of novel Al-Cu-Li alloys[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(8): 1-917-1-923.
- [17] TAO C C, YUAN X G, LIU J, et.al. Effect of La on hot cracking susceptibility of Al-Cu-Mg alloy[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(10): 105-802.
- [18] RONG M, ZHANG L, WU G H, et.al. Effect of refining processes on inclusions and mechanical properties of cast Al-2Li-2Cu-0.2Zr alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(7): 1-375-1-382.
- [19] MERİÇ C. Physical and mechanical properties of cast under vacuum aluminum alloy 2024 containing lithium additions[J]. *Materials Research Bulletin*, 2000, 35(9): 1-479-1-494.
- [20] NAYAN N, GOVIND, NAIR K S, et.al. Studies on Al-Cu-Li-Mg-Ag-Zr alloy processed through vacuum induction melting (VIM) technique[J]. *Materials Science and Engineering*, 2007, A(454-455): 500-507.
- [21] WANG F Y, WANG X J, SUN W, et.al. Low frequency electromagnetic casting of 2195 aluminum-lithium alloy and its effects on microstructure and mechanical properties[J]. *Acta Metallurgica Sinica(English Letters)*, 2020, 33: 338-350.
- [22] LI S J, HE C, FU J Y, et.al. Evolution of microstructure and properties of novel aluminum-lithium alloy with different roll casting process parameters during twin-roll casting[J]. *Materials Characterization*, 2020, 161: 110-145.
- [23] NORMAN A F, TSAKIROPOULOS P. Strengthening mechanisms in powder metallurgy Al-Li-Hf alloys[J]. *Materials Science and Technology*, 2013, 9(3): 228-234.
- [24] HOGG S C, MI J, NILSEN K E, et.al. Microstructure and property development in spray formed and extruded Al-Mg-Li-Zr alloys for aerospace and autosport applications[J]. *Materials Science & Engineering Technology*, 2010, 41(7): 562-567.
- [25] XUE C P, ZHANG Y X, WANG J S, et.al. Improving mechanical properties of wire arc additively manufactured AA2196 Al-Li alloy by controlling solidification defects[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 43: 102-019.
- [26] PATHAK J P, MOHAN S, SINGH J K, et.al. Centrifugal casting of leaded aluminium alloys[J]. *International Journal of Cast Metals Research*, 2006, 19(5): 283-288.
- [27] KUMAR S, SINGH R, SINGH D. The influence of cold forging process on the microstructure, porosity and wear behavior of spray formed Al-Si alloys[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(2): 3-486-3-496.
- [28] HENRIQUE A, GODINHO, ANDRÉ L R, et.al. Microstructure and mechanical properties of a spray formed and extruded AA7050 recycled alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 586: 139-142.
- [29] WANG Y X, ZHAO G Q, XU X X, et al. Constitutive modeling, processing map establishment and microstructure analysis of spray deposited Al-Cu-Li alloy 2195[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 779: 735-751.
- [30] YANG X H, WANG J S, ZHANG M S, et al. Achieving high strength and ductility of Al-Cu-Li alloy via creep aging treatment with different pre-strain levels[J]. *Materials Today Communications*, 2021, 29: 102-898.
- [31] LI H, ZHAN L H, HUANG M H, et al. Effects of pre-strain and stress level on stress relaxation ageing behaviour of 2195 Al-Li alloy: Experimental and constitutive modelling[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 851: 156-829.
- [32] WANG L J, LI X Q, LIN W J, et al. Hot compression deformation behavior and constitutive model of 2050 Al-Li alloy[A]. *The 2nd International Conference on Advanced Materials and Intelligent Manufacturing (ICAMIM 2021)* [C]. Nanning, 2021.
- [33] SMIRNOV A S, KONOVALOV A V, BELOZEROV G A, et al. Peculiarities of the rheological behavior and structure formation of aluminum under deformation at near-solidus temperatures[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2016, 23: 563-571.
- [34] YU W, LI H, DU R, et al. Characteristic constitution model and microstructure of an Al-3.5Cu-1.5Li alloy subjected to thermal deformation[J]. *Materials Characterization*, 2018, 145: 53-64.
- [35] TAO J S, ZHANG L, WU G H, et al. Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of extruded Al-4Cu-1Li-0.4Mg-0.4Ag-0.18Zr Alloy[J]. *Materials Science and Engineering*, 2018, A717: 11-19.
- [36] CHEN X X, MA X W, XI H K, et al. Effects of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of extruded 2196 Al-Cu-Li alloy[J]. *Materials & Design*, 2020, 192: 108-746.
- [37] TSIVOULAS D, PRANGNELL P B. The effect of Mn and Zr dispersoid-forming additions on recrystallization resistance in Al-Cu-Li AA2198 sheet[J]. *Acta Materialia*, 2014, 77: 1-16.
- [38] XIAO H, JIANG S S, ZHANG K F, et al. Optimizing the microstructure and mechanical properties of a cold-rolled Al-Mg-Li alloy via electropulsing assisted recrystallization annealing and ageing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 814: 152-257.
- [39] XIAO H, LU Z, ZHANG K F, et al. Achieving outstanding combination of strength and ductility of the Al-Mg-Li alloy by cold rolling combined with electropulsing assisted treatment[J]. *Materials*

- & Design, 2020, 186: 108-279.
- [40] WANG S, WANG J S, ZHANG C, et al. Continuous precipitate modes of the δ' -Al₃Li phase in Al-Li alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 904: 163-800.
- [41] 王硕, 张弛, 王俊升. Al-Li 合金纳米析出相结构与性能综述[J]. 航空制造技术, 2021, 64(9): 68-76, 92.
- [42] WANG S, ZHANG C, LI X, et al. First-principle investigation on the interfacial structure evolution of the $\delta'/\theta'/\delta'$ composite precipitates in Al-Cu-Li alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 58(23): 205-214.
- [43] WANG S, ZHANG C, LI X, et al. Uncovering the influence of Cu on the thickening and strength of the $\delta'/\theta'/\delta'$ nano-composite precipitate in Al-Cu-Li alloys[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56: 10 092-10 107.
- [44] WANG S, ZHANG C, LI X, et al. Heterophase interface dominated deformation and mechanical properties in Al-Cu-Li alloys[J]. Advanced Theory and Simulations, 2021, 4(6): 2 170-011.
- [45] CHANG L L, GUO J, SU X J. Effect of Y on microstructure evolution and mechanical properties of Mg-4Li-3Al alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(12): 3 691-3 702.
- [46] JI H, LIU W C, WU G H, et al. Influence of Er addition on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-10Li-5Zn alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2019, A739: 395-403.
- [47] WU L B, CUI C L, WU R Z, et al. Effects of Ce-rich RE additions and heat treatment on the microstructure and tensile properties of Mg-Li-Al-Zn-based alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2011, A528(4-5): 2 174-2 179.
- [48] ZHANG J, ZHANG Y, WU G H, et al. Microstructure and mechanical properties of as-cast and extruded Mg-8Li-3Al-2Zn-0.5Nd alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2015, A621: 198-203.
- [49] CHEN X Y, ZHANG Y, CONG M Q, et al. Effect of Sn content on microstructure and tensile properties of as-cast and as-extruded Mg-8Li-3Al-(1,2,3)Sn alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(8): 2 079-2 089.
- [50] WU R Z, ZHANG M L. Microstructure, mechanical properties and aging behavior of Mg-5Li-3Al-2Zn-xAg[J]. Materials Science and Engineering, 2009, A520(1-2): 36-39.
- [51] ZHANG B, PENG X D, MA Y, et al. Microstructure and mechanical properties of Mg-9Li-3Al-xGd alloys[J]. Materials Science and Technology, 2014, 31(9): 1 035-1 041.
- [52] LIU W C, GAO Z K, PENG X, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of as-cast and as-extruded Mg-14Li alloy with different Zn/Y and Zn/Gd addition[J]. Advanced Engineering Materials, 2020, 22(11): 2 000-480.
- [53] CHEN Z Y, DONG Z C, YU C, et al. Microstructure and properties of Mg-5.21Li-3.44Zn-0.32Y-0.01Zr alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2013, A559: 651-654.
- [54] SONG W, DONG H, LIU J, et al. Effect of Y on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-8Li-3Al-3Zn alloy [J]. Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31: 1-7.
- [55] ZHAO J, ZHANG J, LIU W C, et al. Effect of Y content on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-8Li-3Al-2Zn alloy with duplex structure[J]. Materials Science and Engineering, 2016, A650: 240-247.
- [56] SUN X G, SHA G Y, LIU T, et al. Effects of Se addition on microstructure and mechanical properties of Mg-3Li alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2010, 35: 29-32.
- [57] LI J Q, AN J M, QU Z K, et al. Effects of solution heat treatment on the microstructure and hardness of Mg-5Li-3Al-2Zn-2Cu alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2010, A527(26): 7 138-7 142.
- [58] MAURYA R, MITTAL D, BALANI K. Effect of heat-treatment on microstructure, mechanical and tribological properties of Mg-Li-Al based alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020(9): 4 749-4 762.
- [59] ZHOU G, YANG Y, ZHANG H Z, et al. Microstructure and strengthening mechanism of hot-extruded ultralight Mg-Li-Al-Sn alloys with high strength[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 103: 186-196.
- [60] FU X S, YANG Y, HU J W, et al. Microstructure and mechanical properties of as-cast and extruded Mg-8Li-1Al-0.5Sn alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2018, A709: 247-253.
- [61] XU T, SHEN X, LI B, et al. Effect of Nd on microstructure and mechanical properties of dual-phase Mg-9Li-3Al alloys[J]. Materials Research Express, 2019(6): 076 548.
- [62] JI H, WU G H, LIU W C, et al. Microstructure characterization and mechanical properties of the as-cast and as-extruded Mg-xLi-5Zn-0.5Er(x=8, 10 and 12%) alloys[J]. Materials Characterization, 2020, 159: 110 008.
- [63] WANG D, LIU S J, WU R Z, et al. Synergistically improved damping, elastic modulus and mechanical properties of rolled Mg-8Li-4Y-2Er-2Zn-0.6Zr alloy with twins and long-period stacking ordered phase[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 881: 160 663.
- [64] GUO F, JIANG L Y, MA Y L, et al. Strengthening a dual-phase Mg-Li alloy by strain-induced phase transformation at room temperature[J]. Scripta Materialia, 2020, 179: 16-19.
- [65] CAO F R, ZHOU B J, DING X, et al. Mechanical properties and microstructural evolution in a superlight Mg-7.28Li-2.19Al-0.091Y alloy fabricated by rolling[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 745: 436-445.
- [66] MENG X R, WU R Z, ZHANG M L, et al. Microstructures and properties of superlight Mg-Li-Al-Zn wrought alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 486(1-2): 722-725.
- [67] JI Q, WANG Y, WU R Z, et al. High specific strength Mg-Li-Zn-Er alloy processed by multi deformation processes[J]. Materials Characterization, 2020, 160: 110 135.
- [68] KLU E E, SONG D, LI C, et al. Achieving ultra-fine grains and high strength of Mg-9Li alloy via room-temperature ECAP and post rolling [J]. Materials Science and Engineering, 2022, A833: 142 371.
- [69] ZHENG H P, WU R Z, HOU L G, et al. Mathematical analysis and its experimental comparisons for the accumulative roll bonding (ARB) process with different superimposed layers[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 9(5): 1 741-1 752.
- [70] TANG Y, LE Q C, MISRA R D K, et al. Influence of extruding temperature and heat treatment process on microstructure and mechanical properties of three structures containing Mg-Li alloy bars [J]. Materials Science and Engineering, 2018, A712: 266-280.

分级时效热处理对 7A85 铝合金结构壁板组织性能的影响

樊振中^{1,2} 李绍威³ 许晨玲³ 何建伟³ 董哲^{1,2} 陆政^{1,2}
(1.中国航发北京航空材料研究院; 2.北京市先进铝合金材料及应用工程技术研究中心; 3.大连汇程铝业有限公司)

摘要 以 7A85 铝合金结构壁板为研究对象,结合力学性能测试与微观组织分析,研究了分级时效热处理温度与时间对 7A85 铝合金结构壁板组织性能的影响。结果表明,7A85 铝合金单级时效热处理析出相主要为 Al_2Cu 相、 $\text{Mg}_2\text{Zn}_{11}$ 相与 G.P. II 区,与 $\alpha\text{-Al}$ 基体呈半共格关系,在保持较高强度的基础上兼具了良好的塑性。双级时效处理后合金析出相为 $\text{Mg}_2\text{Zn}_{11}$ 相、 $\text{Mg}_{3.5}\text{Zn}_{1.5}$ 相与 MgZn_2 相,强化机制为 G.P. II 区和 $\text{Mg}_2\text{Zn}_{11}$ 析出相与 $\alpha\text{-Al}$ 基体的半共格晶格畸变强化,屈服强度与硬度有所上升,塑性随之下降。随着时效保温过程的持续进行,析出相转变为 $\text{Mg}_2\text{Zn}_{11}$ 相、 MgZn_2 相与 Al_2CuMg 相,且 MgZn_2 为主析出相,与 $\alpha\text{-Al}$ 基体的晶格关系转变为完全非共格,强度随之下降,塑性受 $\alpha\text{-Al}$ 基体影响连续上升。

关键词 7A85 铝合金;时效热处理;力学性能;微观组织;结构壁板

中图分类号 TG166.3;TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.02.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Hierarchical Aging Treatment on Microstructure and Properties of 7A85 Aluminum Alloy Panel

Fan Zhenzhong^{1,2}, Li Shaowei³, Xu Chenling³, He Jianwei³, Dong Zhe^{1,2}, Lu Zheng^{1,2}

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials; 2. Beijing Advanced Engineering Technology and Application Research Center of Aluminum Materials; 3. Dalian Huicheng Aluminum Co., Ltd.)

Abstract: The influence of hierarchical aging temperature and time on the microstructure and properties of 7A85 aluminum alloy panel was investigated by the mechanical property test and microstructure analysis. The results indicate that the precipitate phase in 7A85 aluminum alloy after single stage aging are mainly composed of Al_2Cu phase, $\text{Mg}_2\text{Zn}_{11}$ phase, and G.P. II region, which are semi-coherent with the $\alpha\text{-Al}$ matrix, showing excellent plasticity while maintaining high strength. The precipitates of two-stage aging are $\text{Mg}_2\text{Zn}_{11}$, $\text{Mg}_{3.5}\text{Zn}_{1.5}$, and MgZn_2 , and the strengthening mechanism is characterized by the semi-coherent lattice distortion strengthening between the G.P. II region or $\text{Mg}_2\text{Zn}_{11}$ phase and the $\alpha\text{-Al}$ matrix, showing a rise of yield strength and hardness as well as descent of the plasticity. The precipitate phase is transformed into $\text{Mg}_2\text{Zn}_{11}$, MgZn_2 , and Al_2CuMg phases as the aging process continues, where MgZn_2 is the major, and the lattice relationship between the MgZn_2 phase and the $\alpha\text{-Al}$ matrix is converted to incoherent completely, leading to a decline of strength, and continuous increase of plasticity under the influence of $\alpha\text{-Al}$ matrix.

Key Words: 7A85 Aluminum Alloy, Aging Heat Treatment, Mechanical Properties, Microstructure, Structure Panel

收稿日期:2022-08-20

基金项目:结构舱段用高强高韧 7A85 铝合金宽幅薄壁高筋整体成形壁板研制

第一作者简介:樊振中,男,1985 年出生,高级工程师,北京(100095),E-mail: fanzhenzhong2010@163.com

引用格式:樊振中,李绍威,许晨玲,等. 分级时效热处理对 7A85 铝合金结构壁板组织性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(2):152-157.

FAN Z Z, LI S W, XU C L, et al. Effects of hierarchical aging treatment on microstructure and properties of 7A85 aluminum alloy panel[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(2):152-157.

[71] PENG X, LIANG X L, LIU W C, et al. High-cycle fatigue behavior of Mg-8Li-3Al-2Zn-0.5Y alloy under different states[J]. Journal of Magnesium Alloys, 2021, 9(5): 1 625-1 635.

[72] ZHANG S, SUN B, WU R, et al. Nanocrystalline strengthened Mg-Li alloy with a bcc structure prepared via heat treatment and rolling[J]. Materials Letters, 2022, 312: 131 680.

[73] CHEN D X, KONG J, GUI Z Z, et al. High-temperature superplastic behavior and ECAP deformation mechanism of two-phase Mg-Li alloy[J]. Materials Letters, 2021, 301: 130 358.

[74] MATSUNOSHITA H, EDALATI K, FURUI M, et al. Ultrafine-grained magnesium-lithium alloy processed by high-pressure torsion: Low-temperature superplasticity and potential for hydroforming[J]. Materials Science and Engineering, 2015, A640: 443-448.

[75] MINETA T, HASEGAWA K, SATO H. High strength and plastic deformability of Mg-Li-Al alloy with dual BCC phase produced by a combination of heat treatment and multi-directional forging in a channel die[J]. Materials Science and Engineering, 2020, A773: 138 867.

(编辑:彭瑾)