



镁锂合金的合金化及其应用

彭翔, 刘文才, 吴国华

(上海交通大学 材料科学与工程学院 轻合金精密成型国家工程研究中心, 上海 200240)

摘要: 镁锂合金具有优异的综合性能, 即高比强度、高比刚度、良好热导率、优良电磁屏蔽和阻尼性能等, 在航空航天、武器装备、电子信息和汽车工业等领域有着广阔的应用前景。本文对镁锂合金的合金化研究进展及其应用情况进行了综述, 重点梳理了合金元素在镁锂合金中的作用, 总结了该合金的应用领域, 探讨了镁锂合金存在的问题及今后的研究方向。

关键词: Mg-Li 合金; 合金化; 应用; 研究进展

文章编号: 1004-0609(2021)-11-3024-20

中图分类号: TG146.22

文献标志码: A

引文格式: 彭翔, 刘文才, 吴国华. 镁锂合金的合金化及其应用[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(11): 3024-3043. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37975

PENG Xiang, LIU Wen-cai, WU Guo-hua. Alloying and application of Mg-Li alloys: A review[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(11): 3024-3043. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37975

镁锂合金具有高比强度、高比刚度、良好热导率、优良电磁屏蔽和阻尼性能等优异的综合性能, 在航空航天、武器装备、电子信息和汽车工业等领域有着广阔的应用前景^[1-6], 被称为“21 世纪绿色工程材料”^[7-8]。镁锂合金的研究, 始于德国科学家 MASING 等^[9]在 1910 年发现 Li 改变 Mg 的晶体结构之时。随后, 在航空航天和武器装备等领域的需求牵引下, 镁锂合金在基础理论、制备技术、表面处理技术和应用领域均得到了全面研究。图 1 所示为镁锂合金的研究发展历程^[10-25]。由图 1 可见, 在巨大军事价值等的推动下, 镁锂合金先后经历了以下几个发展阶段: 1) 基础研究阶段(发现成分改变 Mg 晶体结构和测定 Mg-Li 二元相图); 2) 正式提出与全面研究阶段(集中研究时期); 3) 低潮研究阶段(时效失效导致性能不稳定, 但十多年间仍未研究清楚时效机理); 4) 新型技术研究阶段(为了改善性能, 多种新型制备技术被用于镁锂合金, 包括镁锂合金基复合材料、快速凝固(RSP)、稀土合金化、

半固态加工成形、等径角挤压(ECAE)等大变形技术等)。近年来, 镁锂合金的研究主要集中在运用合金化、热处理和塑性变形等手段提升镁锂合金的性能及其稳定性等方面^[5]。纵观镁锂合金的发展历程可见, 自镁锂合金研究之始, 合金化一直是镁锂合金的研究重点^[4-6]。本文作者系统梳理合金化元素在镁锂合金中的作用, 综述镁锂合金的应用情况, 并探讨存在的问题及今后的发展方向。

1 镁锂合金的合金化

合金化是一种提高镁锂合金性能简单易行且行之有效的重要途径。合金化效果主要取决于合金元素在基体合金中的固溶度, 这也是固溶强化和沉淀强化的基础。根据经典的 Hume-Rothery 固溶体理论^[26], 固溶度主要受合金元素原子尺寸、电负性、晶体结构等因素的影响。当原子半径差异大于 15% 时, 溶质在溶剂中的固溶度将很低。因此, 比较

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51771115, 51775334, 51821001, U2037601); 上海航天技术研究院-上海交大航天先进技术联合研究中心资助项目(USCAST2020-14); 航天一院高校联合创新基金资助项目(CALT2020-TS07)

收稿日期: 2021-04-16; **修订日期:** 2021-09-17

通信作者: 吴国华, 教授, 博士; 电话: 021-54742630; E-mail: ghwu@sytu.edu.cn

Mg(原子半径, 0.160 nm)与其他元素的原子半径, 尺寸差别在±15%以内的合金元素共有 30 个, 即如图 2 所示的两平行虚线内的元素^[27]。由图 2 可见, 可能在 Mg 形成较大固溶度的元素有 Al、Zn、Ag、Zr、Cd 等。考虑到晶体结构的因素, Cd 可与 Mg 形成连续固溶体。

除原子尺寸因素外, 还需要考虑电负性, 即溶质与溶剂元素的化学亲和力。溶质与溶剂元素的电

负性差别对固溶也有很重要的影响。基于 Hume-Rothery 的固溶体理论, 可以认为可形成固溶体的溶质与溶剂元素的电负性相差的绝对值应低于 0.4。图 3 所示为原子序数与电负性的关系^[27-28]。由图 3 可见, 可能与 Mg 形成固溶体的元素位于图中两个虚线之间。

除理论研究外, 学者们还通过实验测试了合金元素在 Mg-Li 合金中的固溶度。JACKSON 等^[12]对

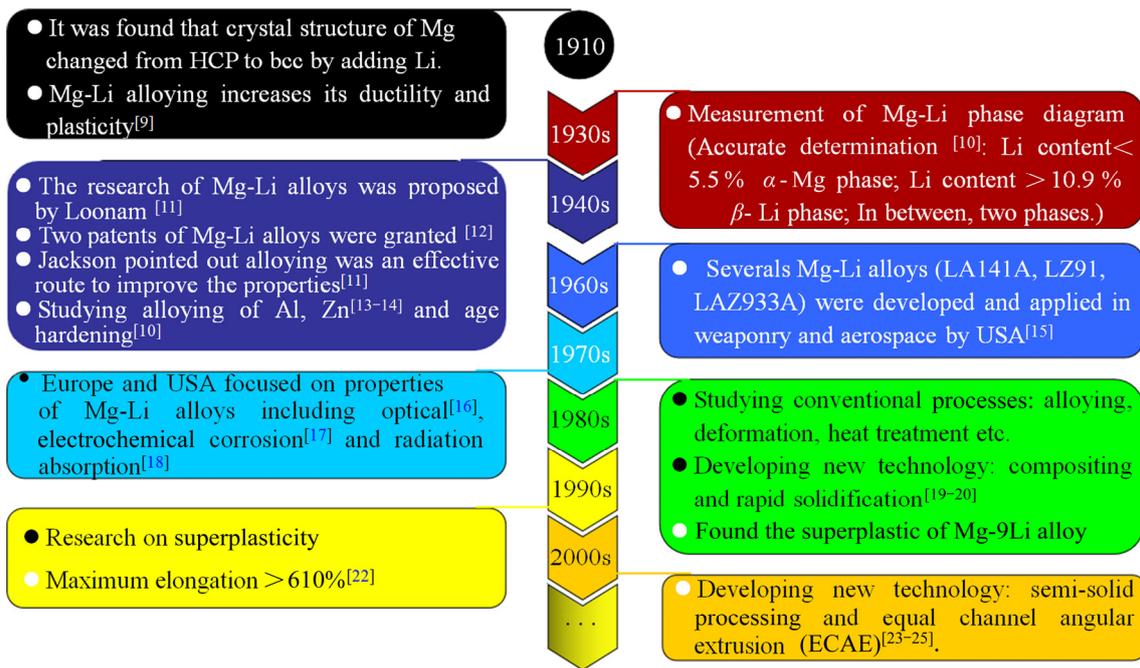


图 1 镁锂合金的研究发展历程^[10-25]

Fig. 1 Research history of Mg-Li alloys^[10-25]

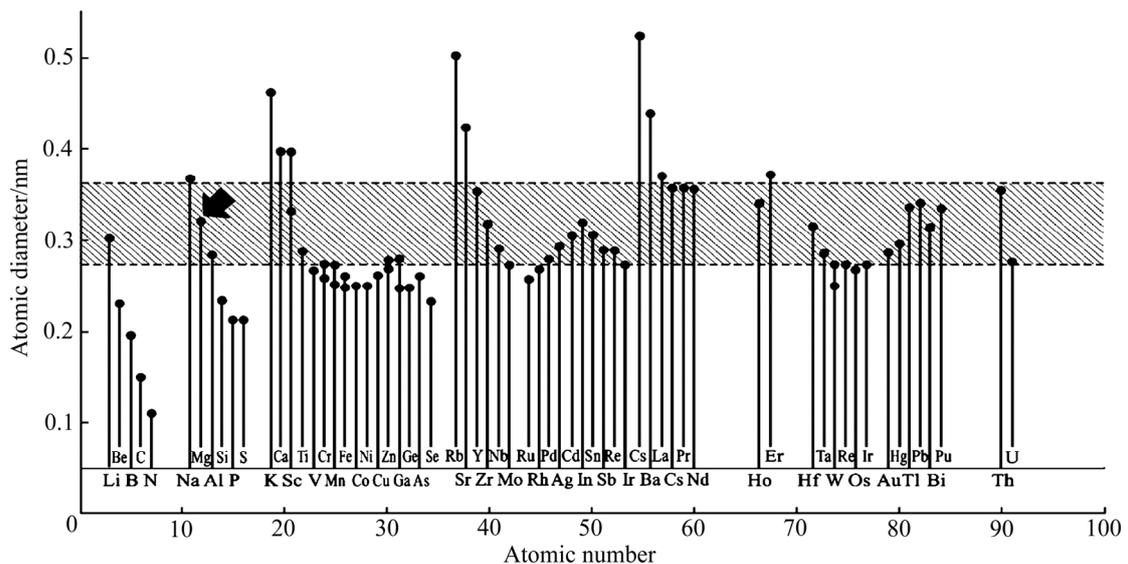
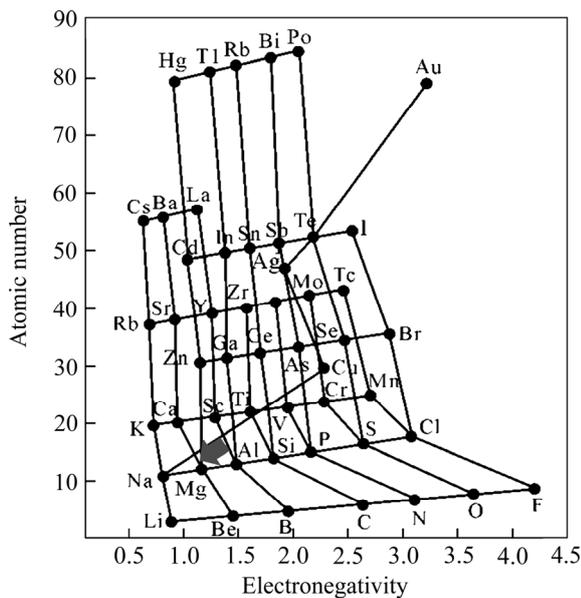


图 2 Mg 与其他元素的原子尺寸^[27]

Fig. 2 Atomic diameters of Mg and other elements^[27]

图3 Mg与其他元素的电负性^[27-28]Fig. 3 Electronegativity of Mg and other elements^[27-28]表1 部分合金元素在镁中的固溶度^[27-29]Table 1 Solubility of some alloying elements in magnesium^[27-29]

Element	$x/\%$	$w/\%$	Type	Additive route	Yield/%
Ag	3.8	15.0	Eutectic	Metallic bulk	100
Al	11.8	12.7	Eutectic	Metallic bulk	90-100
Ca	0.44	—	Eutectic	Mg-Ca intermediate alloy	50-100
Fe	0.00043	—	Eutectic	Metallic powder	10
Li	17.0	5.5	Eutectic	Metallic bulk	95
Mn	1.0	2.2	Peritectic	Al-Mn intermediate alloy	75
Si	—	—	—	FeSi/Si powder	35-85
Zr	1.0	3.8	Peritectic	Metallic bulk	20-50
Zn	2.4	6.2	Eutectic	Metallic bulk	95-100
Y	3.35	12.4	Eutectic	—	—
Th	0.52	4.75	Eutectic	—	—
Cs	0.1	-0.5	Eutectic	—	—
Nb	-0.1	-0.6	Eutectic	—	—

表2 部分合金元素在镁锂合金的 β -Li相中的固溶度^[6]Table 2 Solubility of some alloying elements in β -Li phase of Mg-Li alloys^[6]

Element	Solubility
Al, Ag, Cd, Hg, In, Tl, Zn	High (>1%)
Ba, Bi, Ca, Ce, Co, Cu, Ge, La, Nd, Ni, Pb, Sb, Si, Sn, Sr, Y	Small (<1%)
B, Be, Cb, Cr, Fe, K, Mn, Mo, Th, Ti, U, V, W, Zr	Very less (<0.1%)

此进行了系统研究,并根据实测合金元素在Mg-Li合金中的固溶度将合金元素分为如下三类。

1) 固溶度较大的元素: Al、Zn和Cd等,这类元素具有较强的合金强化作用,但所得合金的组织及性能稳定性较差,且在室温或稍高于室温时易产生过时效现象。

2) 固溶度较小的元素: Ni、Co、Cu、Ca、Sr、Ba、Ce、Si、Ge、Sn、Pb、Sb和Bi等,这类元素的合金强化作用较小,但所得合金的组织及性能稳定性好。

3) 固溶度很小的元素: K、Be、B、Cr、Mo、W、V、Ti、Zr、Th、Fe和Mn等,添加这类元素的镁锂合金的研究较少。表1总结了实际实验过程中合金元素在基体镁中的固溶度^[27-29]。此外,CAIN等^[6]总结了合金元素在镁锂合金的 β -Li相中的固溶度,其结果如表2所列。

1.1 锂元素在镁锂合金中的作用

如上所述, 当锂含量高于 5.7% 时, 镁金属晶体结构由密排六方结构(HCP)转变为体心立方结构(BCC)。为了更加全面地掌握锂在镁锂合金中的作用, 学者们进行了系统研究。有关 Mg-Li 二元体系相关关系的研究表明: 当锂含量高于 5.7% 时, Li 元素固溶在 Mg 金属中, 形成单相固溶体 α -Mg; 当锂含量高于 10.3% 时, Mg 元素固溶在 Li 金属中, 形成单相固溶体 β -Li; 当锂含量为 5.7%~10.3% 时, 形成双相组织 α -Mg 相+ β -Li 相^[10]。图 4 所示为 Mg-Li 合金二元相图^[30-31]。

晶体结构变化后的镁锂合金具有优异的塑性加工性能^[32-33]。当 Li 含量为某些值时, 镁锂合金甚至表现出超塑性。例如, HIGASHI 等^[22]和 METENIER 等^[21]的研究表明, Mg-8.5Li 和 Mg-9Li 的细晶组织具有超塑性现象, 伸长率可达 460%~610%(350 °C)。这主要有两方面的原因: 与纯镁金属比较, 添加 Li 降低了原 Mg 晶体结构 HCP 的 c/a 值, 降低了六方晶格沿 {1010} {1210} 棱面滑移所需的能量, 导致室温下该滑移与滑移系 {0001} {1210} 可同时开动, 从而提高镁锂合金的塑性, 使之即使在室温条件下也可进行加工。另一方面, 当镁锂合金为双相组织 α -Mg 和 β -Li 时, 塑性相 β -Li 的存在更加有利于合金的塑性变形。Li 的增加利于降低变形镁锂合金中的动态再结晶程度, 产生强织构, 进而增加合金强度但一定程度降低塑性^[34]。此外, 近期关于 Li 对 Mg-Li 合金塑性贡献的研究还表明, 聚集在晶界处的 Li 原子具有促进晶界滑动的作用, 但是同时也增加了晶粒脆性, 导致穿晶断裂的发生^[35]。

镁锂合金虽然具有良好的塑性, 但是该二元合金的强度较低^[5-6]。双相组织 α -Mg+ β -Li 镁锂合金的抗拉强度为 110~120 MPa, 屈服强度为 60~90 MPa; 单相组织 β -Li 镁锂合金的抗拉强度仅为 100 MPa 左右, 屈服强度则低于 60 MPa。此外, 二元镁锂合金的高温力学性能差, 在较小的应力作用下就发生蠕变失效。因此, 该合金无法单独使用。为了提高二元镁锂合金的力学性能, 通常需要添加其他合金元素进一步合金化, 形成三元或多元合金, 以获得高强度的合金^[36-37]。根据合金元素在镁锂合金中的强化作用机制, 这些元素可归纳为如下几类^[38]。

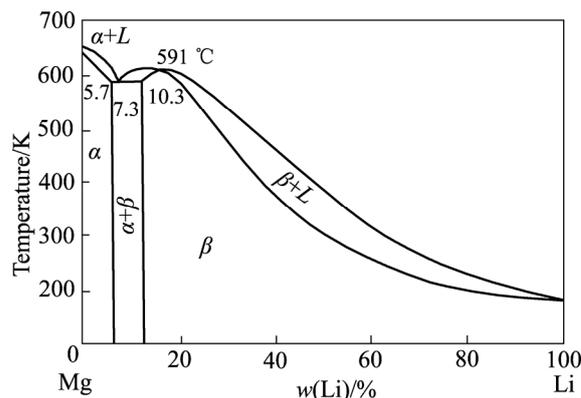


图 4 Mg-Li 合金二元相图^[30-31]

Fig. 4 Binary phase diagram of Mg-Li alloy^[30-31]

1) 固溶度较大的合金元素: 这类合金元素固溶进入 Mg-Li 基体合金, 使基体发生严重晶格畸变, 增加位错移动阻力, 阻碍位错移动, 起到固溶强化作用。例如, Al、Zn 和 Cd 等在镁锂合金中固溶度大的元素。

2) 改善铸造性能的合金元素^[39]: 在熔炉铸造过程中, 这类合金元素在结晶界面富集产生成分过冷区, 形成形核带, 从而获得大量细小等轴晶, 起到细晶强化的作用。例如, Sn 等降低异质形核表面能的元素。

3) 与 Mg、Li 或自身之间反应形成第二相的合金元素^[40]: 弥散分布第二相的出现一方面使其周围的基体合金发生晶格畸变, 导致应力集中, 形成大量位错; 另一方面阻碍位错滑移, 起到第二相强化的作用。若第二相在熔融液体中以弥散分布状态成为凝固形核点, 则起到细晶强化的作用。此外, 第二相若在晶界处聚集析出, 则抑制晶粒长大和阻碍晶界滑移, 起到弥散强化的作用。例如, Ca、Mn 等^[41]非稀土元素和 Nd 等^[42]稀土元素在镁锂合金中的作用。

上述关于镁锂合金的合金化元素机理仅为初步归纳, 具体的合金化原理和作用机制仍不完善且正在发展。根据合金化元素的种类, 本文将进一步归纳合金元素在镁锂合金中的作用。

1.2 非稀土元素在镁锂合金中的作用

铝: Al 是镁锂合金最为重要的合金化元素之一。Al 的密度和熔点(2.7 g/cm³, 660.2 °C)与 Mg 的(1.74 g/cm³, 650 °C)最为接近。添加 Al 既能够保持

镁锂合金轻质的特点,又能够降低合金熔点,改善铸造性能,但铸造组织易出现疏松缺陷^[25]。由 Mg-Li-Al 三元相图可知,Al 在镁锂合金中的固溶度较大。Al 在单相 β -Li 和双相 α -Mg+ β -Li 中均可固溶。在室温下,Al 的固溶度约为 2%;固溶度随温度变化明显,即随着温度升高而增加;当温度为 437 °C 共晶温度时,Al 的固溶度达到最大(约为 12.5%)。在适当条件下, Mg-Li-Al 合金体系中存在 MgLi_2Al 、 MgLiAl_2 、 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 和 AlLi 等金属间化合物。这些第二相的形态、大小、数量及其分布均对镁锂合金的性能存在较大影响。Al 的添加容易导致 AlLi 和 MgLi_2Al 相的形成,对 Mg-Li-Al 系合金的性能存在很大影响^[43]。当 Li 含量较高时, Mg-Li-Al 合金中易出现过时效析出现象: β -Li \rightarrow $\text{MgLi}_2\text{Al}\rightarrow$ AlLi ^[44]。可见,添加 Al 的镁锂合金可通过热处理强化^[45-47]。合金化元素 Al 含量对镁锂合金的性能影响很大。JACKSON 等^[12]研究了 Al 分别对 α -Mg 相、 α -Mg+ β -Li 双相以及 β -Li 相 3 种组态镁锂合金(挤压态)力学性能的影响。结果表明: Al 对 3 种组态合金的作用类似。随着 Al 含量的增加,镁锂合金的强度均增加而塑性均降低。当 Al 含量高于 6% 时,合金强度不再显著增加,而塑性则显著降低。因此,镁锂合金中 Al 的含量应低于 5%。当 Al 含量为 2% 时, Mg-11Li 合金的抗拉强度从 110 MPa 提升到 160 MPa,屈服强度从 80 MPa 提升到 150 MPa,且伸长率未明显降低。关于三元 Mg-8.8Li-6.4Al 合金的研究表明^[48]: 当 Al 含量较高时,基体合金中容易析出沉淀相 MgLiAl_2 和 AlLi ; 由于 Al 在 α -Mg 相的固溶强化作用,挤压态 Mg-8.8Li-6.4Al 的抗拉强度为二元 Mg-8.8Li 合金的 1.8 倍,达到 239 MPa,且伸长率保持为 33%。Al 含量对 LZ91 合金性能存在明显影响: 当 Al 添加量为 0.6% 时,在保持原有伸长率和电磁屏蔽性能的条件下,该合金的抗拉强度和耐腐蚀性均获得提高^[49]。RAHULAN 等^[50]的研究也证实, Al 的添加显著提升 Mg-Li-Al 系合金的拉伸强度和硬度。

Li 含量对 Mg-Li-Al 系合金的力学性能存在影响。增加 Li 含量, Mg-Li-Al 系合金的强度稍有降低,而伸长率则显著增加^[51]。该合金的阻尼性能取决于 Li 含量、温度和频率等因素的共同作用,温度越高,该合金的阻尼性能越高,但是高 Li 含量合金 Mg-8Li-1Al 的室温和高温阻尼性能显著高于低 Li

含量合金 Mg-4Li-1Al 的。针对 Mg-xLi-3(Al-Si) 系合金性能的研究表明,随锂含量的增加,该系合金的强度降低,而伸长率却随之增加^[52]。KAZAKOV 等^[53]以 LA141 和 MA 18 两种合金为研究对象,研究了高 Li 含量对纯 β -Li 相镁锂合金的影响,表明该高 Li 含量镁锂合金中的 MgLi_2Al 相不稳定,在室温时效一段时间后,极易分解为 AlLi 相和基体合金,导致该合金强度急剧降低。因此,通常需要进行某些稳定合金组织的热处理,如淬火、退火和时效,并且某些条件下还需要配合强塑性变形工艺如累积叠轧技术(Accumulative roll-bonding, ARB)和多向锻造(Multi-directional forging, MDF)等来提升材料的性能^[54]。

Al 的添加对 Mg-Li-Al 系合金性能也存在不足之处。该合金系的组织性能不稳定,易出现过时效现象,且随 Al 含量的增加,过时效出现的时间变短,导致合金性能下降^[12]。其主要原因是,在时效过程中,时效强化相 MgLi_2Al 发生粗化,使合金的强度随着时间的延长而降低。在该合金系中同时添加某些合金元素,如 Ag 和 Cu 等,可一定程度起到改善作用。

锌: Zn 是镁锂合金最为常用的合金化元素之一。Zn 的熔点为 419.58 °C,晶体结构(HCP)与 Mg 相同,原子半径与 Mg 接近。由 Mg-Li-Zn 相图可知, Zn 在镁锂合金中的固溶度较大(最高约 6.2%),随着温度降低而减少。因此, Zn 在 Mg-Li-Zn 系合金中可产生显著的固溶强化作用。与 Al 的作用效果类似,随着 Zn 含量的增加, Mg-Li-Zn 系合金的强度增加而塑性略有降低。与 Al 的不同之处在于,因为 Zn 的密度较大,所以 Zn 的单位质量强化效果低于 Al。由相图还可知,该合金系中存在金属间化合物 θ' 相 MgLi_2Zn 。该第二相不稳定,在时效过程中会粗化转变为稳定的短蠕虫状 θ 相 MgLiZn 。与 Mg-Li-Al 系合金中的第二相类似, θ 相的形态、大小及其分布对镁锂合金性能具有重要影响,也可产生第二相强化、弥散强化等作用。刘鹏等^[55]的研究表明,均匀化热处理 Mg-Li-Zn-Zr 合金,条状的 θ' 相转变为短杆状 θ 相,提高合金的强度。此外, SONG 等^[56]研究了 Mg-Li-Zn 合金的阻尼性能,结果表明: Zn 的添加可提高镁锂合金的延展性和阻尼容量。

与 Al 含量的作用类似, Li 含量对第二相存在影响,进而对 Mg-Li-Zn 系镁锂合金性能产生影响。

当 Li 含量低于 5.7% 时, 基体合金为单相 α -Mg, 时效过程中基体合金内析出稳定的 θ 相而产生析出强化作用; 当 Li 含量介于 5.7% 至 10.3% 之间时, 基体合金为双相组织 α -Mg+ β -Li, 第二相对 α -Mg 相的强化效果不明显, 而对 β -Li 相产生时效析出强化和过时效软化的作用; 当 Li 含量高于 10.3% 时, 基体合金为单相 β -Li, 产生时效析出强化和过时效软化的作用^[57-58]。TAKUDA 等^[59]关于 Mg-(6, 9.5, 12)Li-1Zn 合金薄板的研究也表明, Li 含量对合金的相组成存在影响。其中, Mg-6Li-1Zn 的基体合金为塑性较差的单相 α -Mg 相; Mg-9.5Li-1Zn 的基体合金为塑性较好的双相 α -Mg+ β -Li; Mg-12Li-1Zn 的则为塑性优良的单相 β -Li。Mg-9.5Li-1Zn 和 Mg-12Li-1Zn 对应变速率比较敏感。在较低的应变速率下, 两合金的伸长率超过 100%。低应变速率有利于强化织构, 提高伸长率, 但降低强度; 高应变速率下则合金强度较高, 但塑性和伸长率降低。3 种合金中, Mg-9.5Li-1Zn 合金的综合力学性能最优。

Zn 的添加对 Mg-Li-Zn 系合金性能也存在不足之处。如前所述, 与高 Al 含量的镁锂合金类似, 高 Zn 含量镁锂合金的组织性能较不稳定, 尤其是 θ' 相易转变成 θ 相, 产生过时效现象。添加稀土元素和 Ag 元素可在时效过程中抑制该转化, 提高 Mg-Li-Zn 系合金的性能稳定性^[60]。

锡: Sn 是镁合金的晶粒细化剂之一。Sn 在镁锂合金中具有一定的固溶度且受温度变化的影响, 并且 Sn 与 Mg、Li 反应可形成第二相: Mg_2Sn 或 $MgLi_2Sn$ 。因此, 含 Sn 的镁锂合金可通过时效析出方式产生第二相强化。变形态合金中均匀析出的第二相是动态再结晶的形核点, 能够起到细化晶粒的作用。此外, 合金中高熔点的 $MgLi_2Sn$ (熔点 770 °C) 有助于提高镁锂合金的热稳定性^[61-63]。

钙: Ca 是镁锂合金的常用合金元素之一。Ca 在镁锂合金熔体的凝固过程中易偏聚在 α -Mg 相的结晶前沿, 抑制晶粒长大, 起到显著细化组织的作用。由 Mg-Li-Ca 三元相图可知, Ca 在 Mg-Li-Ca 合金中具有一定的固溶度(150 °C 达到最大值), 存在第二相 Mg_2Ca 和 CaLi。因此, 该镁锂合金系中也可产生第二相强化^[64], 且高熔点第二相颗粒 Mg_2Ca 的形成可提高合金的高温性能^[41]。在该合金系中, 除了 Mg_2Ca 之外, 也容易生成高熔点的 CaMgSn。

在 Mg-Sn 合金中逐渐增加 Ca 含量, 合金中易生成稳定性更高的 CaMgSn 相, 既能增加合金的强度, 又可提高抗蠕变性能^[44, 64]。SONG 等^[41]系统研究了 Ca 含量对 Mg-12Li-xCa 系合金的影响。结果表明, 该合金系主要由枝晶状的 β -Li 和 β -Li 与化合物 Mg_2Ca 的共晶组织。该共晶组织的含量随着 Ca 含量的增加而增加。冷轧破坏 Mg-12Li-5Ca 合金中的共晶组织形貌和分布, 使层状共晶组织破碎、细化。他们的研究还表明, 添加 Ca 元素可增加镁锂合金的抗氧化性能。图 5 所示为不同 Ca 含量下铸造态和冷轧态 Mg-12Li-xCa 合金的微观组织。

李红斌等^[65]研究了 Ca 对 Mg-Li-Al 系合金的微观组织和力学性能, 证实 Ca 的添加可起到细化晶粒的作用, 并分析了 Ca 对 Mg-Li-Al-xCa 合金产生细化作用的机理。在该合金系的熔炼过程中, 在基体合金中固溶度较低的 Ca 既容易大量富集在凝固界面前沿, 又容易与 Al 反应生成化合物 Al_2Ca 。偏聚的 Ca 富集在结晶晶粒表面, 阻碍其他元素进入结晶晶粒, 阻碍晶粒长大, 起到细化晶粒的作用。在 Mg-Li-Al 系合金中添加一定量的 Ca(约 1%) 可一定程度提高合金强度, 但降低合金塑性。这主要有两方面的原因: 一方面, 在晶界处析出的第二相 Al_2Ca 使晶界脆化, 导致应力容易在晶界处集中, 萌生微裂纹并扩展, 使合金发生脆性断裂, 导致合金塑性降低; 另一方面, 第二相 Al_2Ca 的析出和 Ca 的富集使塑性变形过程中晶粒转变的难度增大, 导致 Ca 虽然产生了晶粒细化但是合金塑性仍然降低。关于 Ca 对 Mg-5Li-3Al-2Zn 系合金影响的研究表明^[66], 添加 2% 的 Ca 可以显著改善铸态 Mg-5Li-3Al-2Zn 的力学性能, 使其抗拉强度增加 10.65%, 伸长率提升到 125%。此外, Ca 的添加利于镁锂合金密度的进一步降低(Ca 密度为 1.53 g/cm³); Ca 还是一种镁合金熔体的阻燃剂, 可减少熔炼过程中固体氧化物的形成。需要注意的是, 当 Ca 含量高于 3% 时, 合金的热裂倾向将增加。

锆: Zr 在镁锂合金中的固溶度非常有限, 与 Mg 和 Li 均无化合物。因此, Zr 在镁锂合金中仅以高熔点 α -Zr 的形式存在。该高熔点相可作为凝固时的异质形核点, 因而起到细化晶粒的作用。随着 Zr 含量的增加, Zr 的晶粒细化效果也增加。另外, 变形孪晶和滑移带成为再结晶的晶核, 提高再结晶温度, 抑制再结晶, 产生细晶强化的作用, 提高镁锂

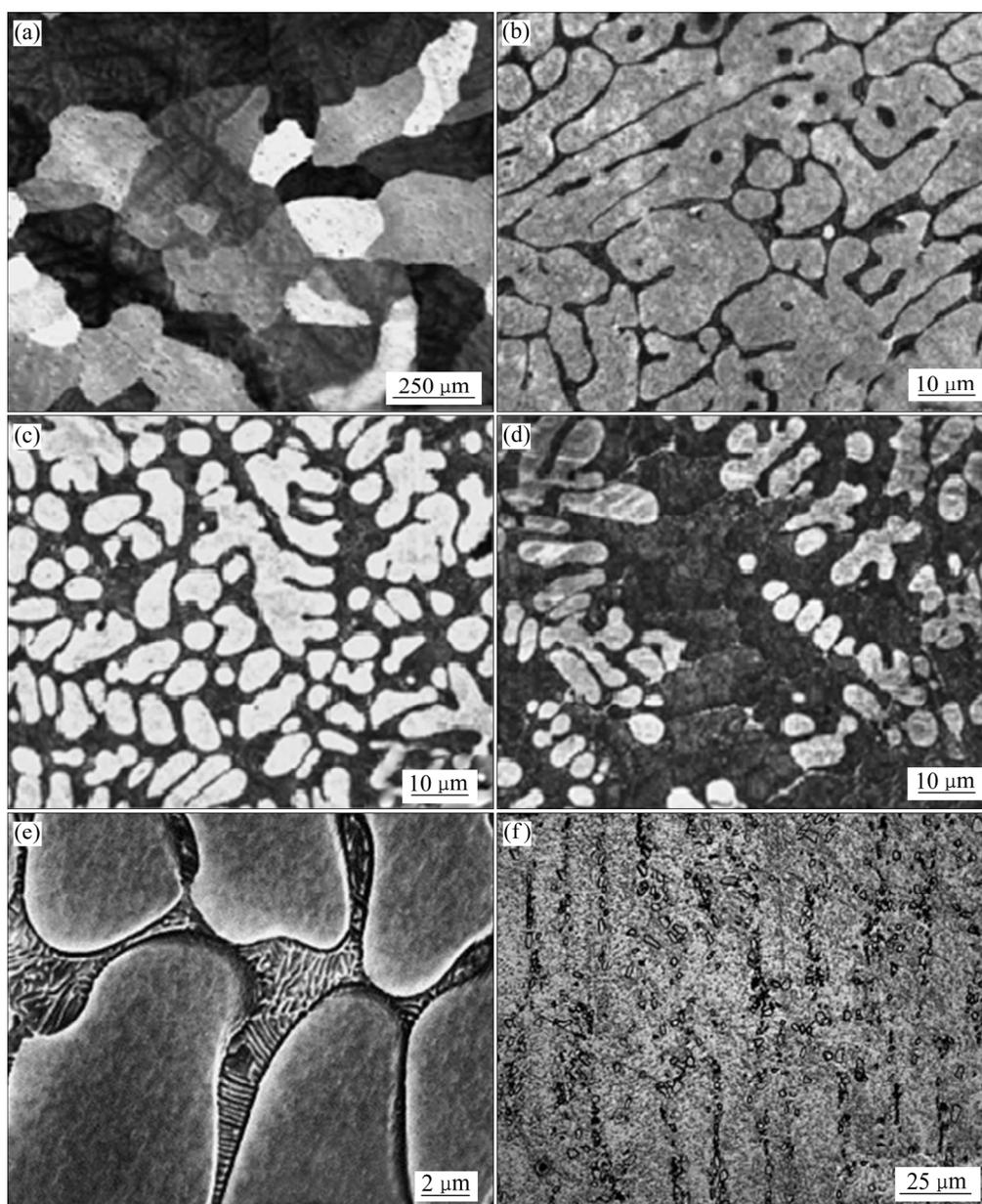


图5 Mg-12Li-xCa合金的微观组织^[41]

Fig. 5 Microstructures of Mg-12Li-xCa alloys^[41]: (a) 0, as-cast; (b) 5%, as-cast; (c) 10%, as-cast; (d) 15%, as-cast; (e) 5%, as-cast; (f) 5%, cold-rolled

合金的综合性能^[67]。HORI等^[68]的研究表明：添加少量Zr可显著细化镁锂合金的晶粒。Zr虽然不与Mg形成化合物，但是在凝固过程中预先形成富Zr微粒，为Mg晶粒提供异质形核点。因此，在Mg基体中固溶的Zr具有细化晶粒的作用。此外，当镁锂合金中存在其他可与Zr反应形成化合物的元素如Al、Si、Mn和Fe等时，Zr细化晶粒的作用会降低。此外，在Mg-Li-Al系合金中，Zr与Al反应形成的高熔点Al-Zr金属化合物可提高合金的抗蠕

变性能，促进再结晶形核率，细化晶粒。关于Mg-8Li-xZr的研究表明^[69]，添加Zr可一定程度提升 β -Li相的室温和高温强度，改善加工性能。

锰：Mn在镁锂合金中的固溶度非常低，与Mg和Li均不能形成金属间化合物。在镁锂合金的凝固过程中，Mn容易在 α -Mg相凝固界面前沿偏聚，抑制一次枝晶的长大，起到细化和球化 α -Mg相晶粒的作用，提高合金强度。 α -Mg相内固溶的Mn也具有固溶强化的作用。此外，Mn还可提高镁锂合金

的加工性能。

硅: Si 在镁锂合金中固溶度很小,但是 Si 与 Mg 形成高熔点(1085 °C)、高硬度(460HV)的金属间化合物 Mg_2Si 。因此,添加 Si 可以很好地改善镁锂合金的高温强度和蠕变性能^[70-71]。Li 固溶于 Mg_2Si 相并改变其晶格常数,降低 Mg-Si 二元相图的共晶温度,一定程度改变共晶成分点^[72]。当 Mg-Li-Si 系合金中含有 8%(Si+Li)时,该合金系中出现三元共晶。他们的研究还表明,添加 Si 显著提高镁锂合金的抗拉强度,但仍低于纯镁。FROST 等^[73]研制了航空航天用 Mg-Li-Si 耐热镁锂合金。SHI 等^[74]以 Al-12.5%Si 中间合金在镁锂合金中添加 Al 和 Si,获得的 Mg-8Li-6(Al-Si)合金的强度远优于 Mg-8Li 合金,最大抗拉强度甚至达到了 390 MPa,且保持伸长率为 20%。

银: Ag 的原子半径比 Mg 的大 11%, Ag 固溶到 Mg 中形成间隙式固溶体,固溶度最大可达 15%。Ag 与 Mg、Li 反应形成金属间化合物 $MgAg$ 和 $AgLi$,显著提高 Ag 在镁锂合金中的固溶度,改善合金的高温强度和蠕变性能^[75]。在 Mg-Li-Ag 系合金中,当 Ag 含量低于 10%时,随着 Ag 含量增加,该合金强度缓慢线性增加;而当 Ag 含量高于 10%时,该合金的强度急剧大幅度增加^[76]。但是 Ag 元素的高成本和高密度(与 Zn 元素的情况类似)限制其大规模应用。

铜: Cu 在 α -Mg 相中的溶解度很小,在 β -Li 相中几乎不溶解,因此, Cu 在镁锂合金中的固溶强化作用不明显。Cu 影响双相(α -Mg+ β -Li)镁锂合金中的相形态, α -Mg 相呈现为细长带状。当 Cu 含量较低(<3%)时, Cu 表现出一定的强化效果;当 Cu 含量较高时, Cu 的强化效果不但不佳反而显著降低塑性。因此,镁锂合金中的 Cu 量一般介于 1%~1.5%之间。LI 等^[77]关于 Cu 对 Mg-5Li-3Al-2Zn 合金影响的研究表明,添加 Cu 在合金中生成 AlCuMg 相,明显抑制 AlLi 相的生成和长大,并且前者的硬度高于后者,因此添加 Cu 可提高合金硬度且随 Cu 添加量的增加而升高。此外,与 Ag 类似, Cu 也具有稳定合金高温性能的作用。还有研究表明, Cu 元素降低镁锂合金的耐蚀性能,导致添加 Cu 元素的镁锂合金较少。当 Cu 含量小于 3%时,强化效果出现峰值,故 Cu 含量应维持在 1%~5%之间。双相镁锂合金中加入 Cu 元素后, α -Mg 相发生变化,呈细长带

状。Cu 元素在镁锂合金中的应用前景因其对腐蚀性能产生不利影响而受到限制,大多数镁合金中很少添加 Cu 元素。

1.3 稀土元素在镁锂合金中的作用

稀土元素(RE, Rare Earth)是元素周期表中镧(La)系并包括钇(Y)和钪(Sc)在内的 17 种元素。独特的核外电子排布使得稀土元素呈现出特殊的性能,在金属合金化中起到独特的作用。稀土元素也是镁锂合金中常用的合金化元素,例如 Y、Nd、Sc、Ce 等。RE 在 α -Mg 相和 β -Li 相中的固溶度较低,与基体合金元素 Mg、Li 或合金化元素如 Al、Zn 等反应形成多种金属间化合物,如 Mg_3RE 、 $Mg_{17}RE_2$ 、AlRE、 $(Mg, Al)_{11}RE_3$ 、 $(Mg, Al)_3RE$ 等,成为异质形核核心而起到细化晶粒的作用,导致塑性大幅度提高甚至出现超塑性。因此,稀土元素在镁锂合金中产生作用的主要强化机制为细晶强化和第二相强化等。添加稀土元素的镁锂合金具有较好的热稳定性和高温性能^[78],不会像添加 Al 等非稀土元素的合金一样产生过时效现象。此外,添加稀土元素可提高镁锂合金的再结晶温度^[79],表现出时效强化的效果^[78]。添加稀土元素还可以净化镁锂合金熔体,改善其铸造性能,提高其综合力学性能。添加镁锂合金中常见的稀土元素有 Y、Nd、Sc、Ce 等。

钇: Y 对高锂含量镁锂合金中的双相(α -Mg+ β -Li)均存在影响^[80]。Y 能够固溶在 β -Li 相中,但固溶度很小。Y 能够细化 α -Mg 相,并形成两种组织:富 Y 的粒状 α -Mg、 $Mg_{24}Y_5$ 与 α -Mg 组成的层状共晶。Y 在 α -Mg 相中的固溶产生固溶强化, $Mg_{24}Y_5$ 相的析出产生第二相强化,二者共同作用提升镁锂合金的抗拉强度。Mg-7Li-3Y 合金表现出最优的综合力学性能,其抗拉强度、屈服强度和伸长率分别达到 160 MPa、144 MPa 和 22%。在 Mg-Li-Zn 系合金中, Y 与 Mg 和 Zn 发生反应,形成二十面体结构的 Mg_3Zn_6Y 相,显著提高 Mg-Li-Zn 系合金的抗拉强度^[81]。CHANG 等^[61]研究了 Sn 和 Y 对 Mg-9Li-3Al 系镁锂合金的影响。结果表明, Y 使合金中的 α -Mg 相为块状和板条状; Sn 使初生块状 α -Mg 相为板条状,两者均有利于合金强度和伸长率的提高。而王涛等^[46]关于 Y 对 Mg-8.5Li-3Al 合金的研究表明,添加 Y 会细化合金中的 α -Mg 相,使之由板条状逐

渐变成近球状。添加 0.5%~1%Y 显著提高该合金的强度和伸长率。此外, 还有研究表明, Y 含量高于 3% 的镁锂合金其抗拉强度和伸长率分别高于 230 MPa 和 40%, 并表现出优异的阻尼性能^[82]。Y 对于铸造态 Mg-8Li-3Al-2Zn 系双相镁锂合金的微观组

织有显著影响^[83]如图 6 所示。Y 在该系合金中起到钝化和细化基体相、改善其形貌的作用。Al₂Y 相随着 Y 含量的增加逐步形成、长大。Y 含量为 0.5% 的合金具有最佳的综合力学性能: 屈服强度为 153.0 MPa, 抗拉强度为 185 MPa, 伸长率为 16.9%。PENG

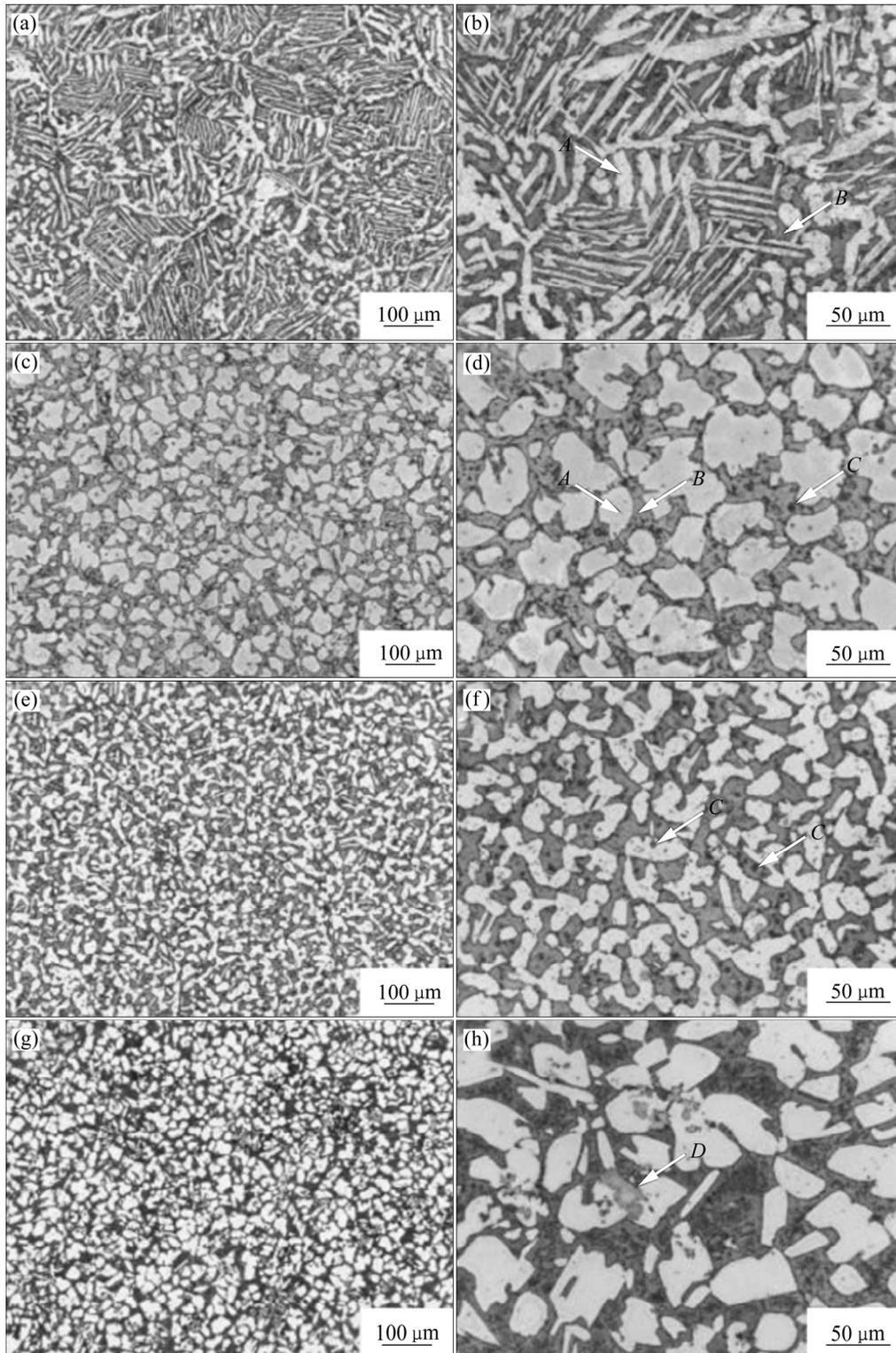


图 6 铸造态 Mg-8Li-3Al-2Zn-xY 合金的微观组织^[83]

Fig. 6 Microstructures of as-cast Mg-8Li-3Al-2Zn-xY alloys^[83]: (a), (b) 0; (c), (d) 0.5%; (e), (f) 1%; (g), (h) 1.5%

等^[2]研究了 Y 和 Sn 对于铸造态 Mg-5Li-3Al-2Zn 系镁锂合金的微观组织、力学性能和腐蚀行为的影响。结果表明, 添加 Y 和 Sn 使该系合金形成 Mg₂Sn 和 Al₂Y 相并细化晶粒, 产生第二相强化和细晶强化的作用。Al₂Y 相随着 Y 含量的增加逐步形成、长大。铸态 Mg-5Li-3Al-2Zn-0.8Sn-1.2Y 合金表现出优异的力学性能和最优的耐蚀性能: 屈服强度为 166.2 MPa, 抗拉强度为 228.6 MPa, 伸长率为 14.8%。

铈: Ce 在镁锂合金中主要以原子的形式固溶在 α -Mg 相中, 或者以金属间化合物 Mg₂Ce 的形式存在于合金中(特别是高 Li 含量的镁锂合金)^[46]。王涛^[46]研究了 Mg-8Li-(0~3)Ce 系镁锂合金的显微组织和性能。结果表明, 添加 Ce 能够细化晶粒, 同时提高该系合金的强度和塑性; 形成 Mg₂Ce 相, 有利于提高其强度但降低其塑性。当 Ce 含量为 2% 时, 晶粒细化的效果最为显著, 铸态合金(Mg-8Li-2Ce) 的强度为 120 MPa, 挤压态的最高值达到 175 MPa。在 Mg-Li-Al 系合金中, 因 Ce 与 Al 的电负性差异最大, 故 Ce 主要以 Al₂Ce 相的形式存在^[84]。在 Mg-8Li-1Al-1Ce 合金中, Al₂Ce 相为均匀分布的棒状。挤压形变改变棒状 Al₂Ce 相的方向, 使之沿着挤压方向分布, 提高该合金的抗拉强度和伸长率, 分别由 160 MPa 提高到 190 MPa、15% 提高到 30%^[84]。Al₂Ce 相的含量随着 Ce 含量的增加而增加。该相能够阻止晶界滑移, 提高合金的耐热性。

但是, 当 Ce 含量较大时, Al₂Ce 相会分割晶体, 导致合金的性能下降^[39]。WU 等^[85]的研究表明, Ce 含量对 Mg-Li-Al-Zn 系合金晶粒尺寸的影响不大。他们认为, 与 Mg 晶体结构差异大的 Al₂Ce 相既不能作为非均匀形核的核心而起到细化晶粒的作用, 又大量消耗 Al 原子而促进相对晶粒尺寸向较大方向发展; 同时, Ce 在固液界面处的聚集造成成分过冷, 促进形核, 起到细化晶粒的作用。这两方面的作用相互抵消, 造成合金的晶粒尺寸变化不大。

钕: Nd 在镁锂合金中主要以 Mg₃Nd 的形式存在。Mg₃Nd 相利于合金强度和耐热性的提高。但是添加 Nd 又会降低 α -Mg 相的含量, 导致合金强度和耐热性降低。因此, 添加 Nd 并不会显著提高镁锂合金的强度和热稳定性^[86]。Nd 在 Mg-Li-Al 系合金中以 Al₂Nd 的形式存在, 并使得该合金系晶粒显著细化, 同时起到第二相强化和细晶强化的作用, 因此, 显著提高 Mg-Li-Al 系合金的强度。Li 等研究了 Nd 对于铸造态 Mg-8Li-3Al 合金的微观组织存在显著影响^[42]: 1) Nd 的含量影响 α -Mg 相枝晶的比例。该相枝晶比例随 Nd 含量增加而逐渐降低。当 Nd 含量为 6% 时, 该相比例最低。图 7 所示为不同 Nd 含量的铸造态 Mg-8Li-3Al 合金的微观组织。2) 弥散分布于相界面的 Al₂Nd 相强烈抑制铸造态 Mg-8Li-3Al 合金的长大, 产生细晶强化作用。3) 一定量的 Nd 可提高 Mg-8Li-3Al 系合金的抗拉强度和伸长率, 但过量的 Nd 导致生成过多的 Al₂Nd 相,

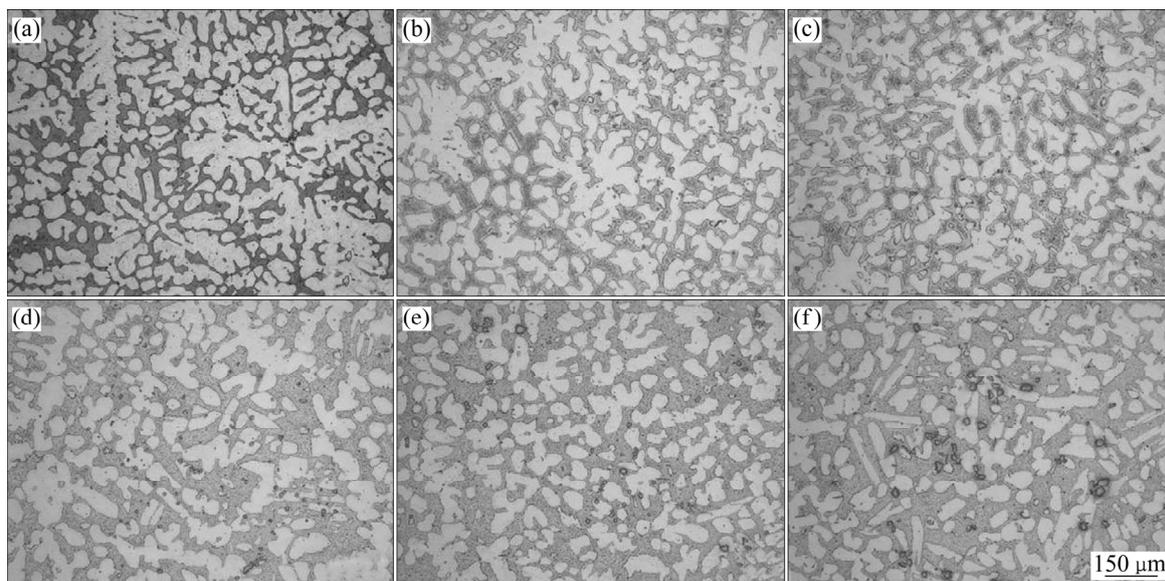


图7 铸造态 Mg-8Li-3Al-xNd 合金的微观组织^[42]

Fig. 7 Microstructures of as-cast Mg-8Li-3Al-xNd alloys^[42]: (a) 0; (b) 0.4%; (c) 0.8%; (d) 1.2%; (e) 1.6%; (f) 2.0%

而该相因其成为裂纹源,有可能降低该系合金力学性能。此外,Nd与其他合金元素对镁锂系合金的组织性能还存在协调作用。例如,在Mg-5Li-3Al-2Zn合金中,Nd与Y协同作用的晶粒细化效果显著。当同时添加1.2%Y和0.8%Nd时,效果最明显(最小平均晶粒尺寸为30 μm),该合金的最高强度和最大伸长率分别为231 MPa和16%^[87]。

2 镁锂合金的应用

2.1 在航空航天领域的应用

镁锂合金密度(1.3~1.6 g/cm³)为普通铝合金的1/2左右,普通镁合金的2/3~3/4,应用在航空航天领域中能够降低飞行器自身质量的20%~30%,既能够节约能源、降低成本,又能够提高飞行能力^[88]。表3所列镁锂合金在航空航天领域的应用^[3-4, 89-90]。

现有报道显示,为了替代传统的航空航天材料

镁合金、铝合金及铍等,Lockheed导弹与航空公司最早开始研发航空航天用镁锂合金,用于制造低载荷、低温服役条件的零部件。图8所示为Lockheed公司开发并成功应用于阿金纳助推器及其发射卫星的镁锂合金零部件^[3-4, 90]。

CIIA公司采用其研发的镁锂合金制备了火箭和宇宙飞船的部件,使“Apollo”号飞船的质量减重22 kg。此外,该公司还采用其研制的镁锂合金制造计算设备外壳和计算机底盘,并成功用于“Catyph-V”号火箭,如图9(a)所示。基于Lockheed导弹与航空公司的工作,IBM采用Brooks & Perkins公司提供的镁锂合金材料开展了表面处理和焊接等方面的研究并取得突破,研制出用于“Saturn V”号运载火箭的计算机室(降低质量20 kg),用于美国航空航天局双子座宇宙飞船的线路板盒(见图9(b))及键盘基板与支座(见图9(c))。美国富兰克福兵工厂研制了Mg-14Li-3Ag-5Zn-2Si镁锂合金,随后麻省理工学院采用该合金制备了惯性导航系统中的球形陀螺仪(直径为0.23 m)(见图9(d))。北美航

表3 航空航天领域的应用镁锂合金零部件^[3-4, 89-90]

Table 3 Mg-Li alloys parts of for applications in aerospace field^[3-4, 89-90]

Developer	Alloy type	Product	Time
Lockheed Martin	LA141	Gyroscope mounting plate, vibration diaphragm at load adapter, corner tray for installing electronic devices, assembly bracket in power control box	1962
IBM	LA141	The base plate and bracket of circuit board box and manual data keyboard of Gemini spacecraft	1970s
CIIA	CIIA	Catyph-V Shell of rocket computer equipment	1990s
North American Aviation	LA141A	Accelerometer housing	—
MIT	Mg-14Li-3Ag-5Sn-2Si	Spherical gyroscope	—
US military	—	TOW(tube launched missile launch tube) Tube launcher	—
US company	—	Spacecraft frame, bracket, electronic instrument shell, rocket cabin cover, heat shield	—
China	—	Main structure of Shenzhou-7 manned spacecraft flying with small satellites	2008
China	—	Part of the scientific experiment satellite for carbon dioxide monitoring part of the Pujiang-1 satellite	2015
China	—	Some parts of scientific experiment satellite for carbon dioxide monitoring	2016

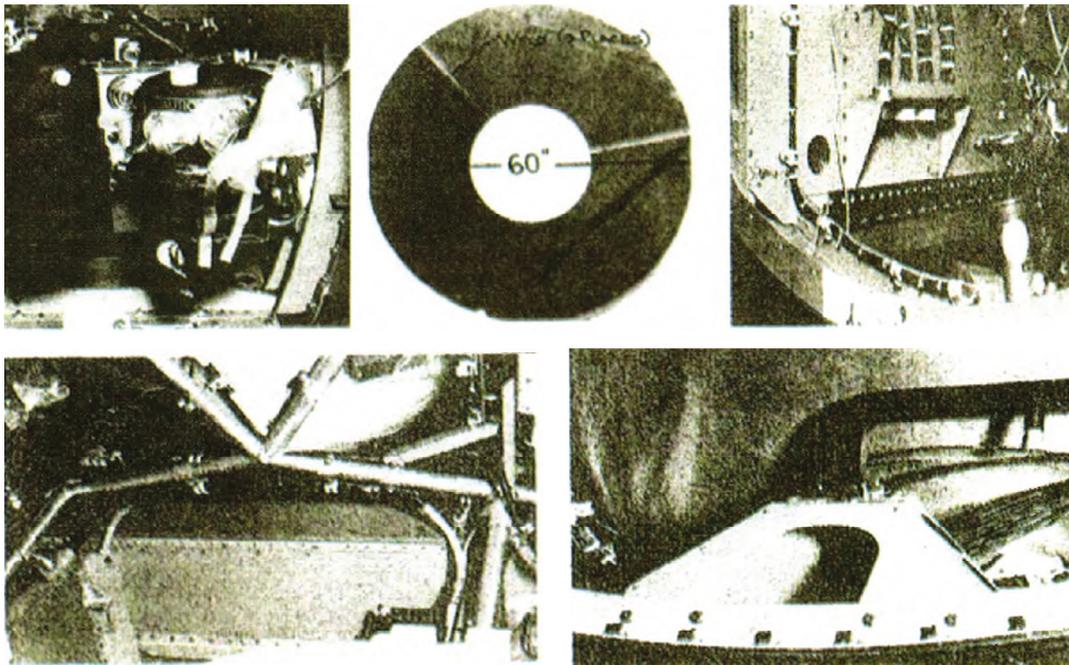


图 8 Lockheed 公司开发的卫星镁锂合金零部件^[3-4, 90]

Fig. 8 Mg-Li alloys parts for satellite developed by Lockheed^[3-4, 90]: (a) Gyro mounting plate; (b) Vibration diaphragm at load adapter; (c) Corner tray for mounting electronic components; (d) Drawer partition; (e) Microwave device mount

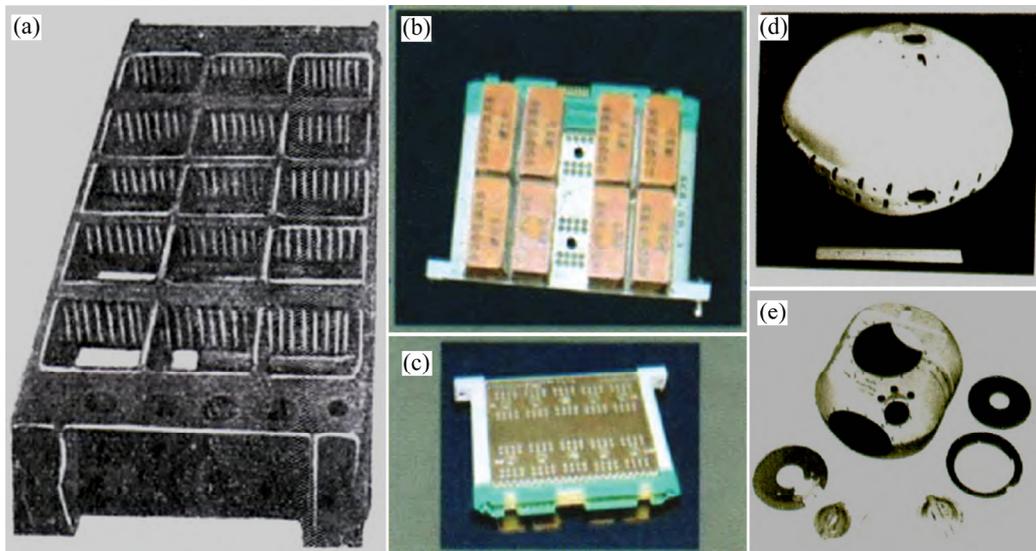


图 9 采用镁锂合金制备的航空航天零部件^[4, 90]

Fig. 9 Mg-Li alloys parts for aerospace^[4, 90]: (a) Rocket computing equipment shell and computer chassis; (b) Spacecraft circuit board box; (c) Spacecraft keyboard base plate and support; (d) Spherical gyroscope (d 0.23 m); (e) Accelerometer shell (d 380 m \times 610 mm)

空公司自动控制部门采用镁锂合金制备了加速仪壳体(d 380 m \times 610 mm)(见图 9(e))。

此外, 有报道^[4]称, 多家美国公司采用镁锂合金制备多种航空航天零件, 例如框架、支架、电子

仪器的外壳波导管、火箭的舱盖、隔热板、太空飞船防止宇宙微尘的保护板等。Boeing 公司还将镁锂合金用于制造多种航天装置, 例如绕月轨道卫星和可移动的登月太阳能装置等。中国也采用镁锂合金

制造了多种航空航天零部件并成功应用。例如, 神舟7号载人飞船释放的伴飞小卫星、“浦江一号”卫星和首颗全球二氧化碳监测科学实验卫星等均采用了多个镁锂合金部件, 其中某些卫星的整体减重达40%~50%^[3]。中国铝业郑州轻金属研究研制的超轻镁锂合金成功应用于四旋翼防爆无人机和光电吊舱, 实现了镁锂合金在世界航空史上的首次应用^[91]。

2.2 在生物应用领域的应用

镁锂合金具有优异的力学性能(与常用不锈钢支架材料的接近: 不锈钢的抗拉强度和伸长率分别为480~620 MPa和30%~40%)、良好的生物相容性(体内和体外均相容)、较合适的腐蚀性能(低于其他镁合金的降解速率)和安全的降解产物(无毒性且能被人体吸收或排出)等特点, 是最有前途的可降解生物医用材料之一。目前, 镁锂合金主要应用于制备可降解的心血管支架以及外科植入物^[92-93]。

德国汉诺威大学最早成功将镁锂合金用作心血管植入材料。随后, 各国学者们从生物医用材料的角度针对镁锂合金的力学性能、腐蚀性能和降解性能等方面开展了大量研究, 逐渐认为镁锂合金是一种新型的生物医用可降解植入金属材料^[94]。为了避免心血管支架在球囊膨胀过程中出现断裂失效的情况, 制备该支架的金属材料必须满足高塑性的性能要求: 伸长率达到20%~30%^[95]。ZHOU等^[96]系统研究了镁锂合金的力学性能、生物腐蚀性能和相容性能等。结果表明, 该合金的塑性优于其他镁合金且与316L不锈钢的相近, 其伸长率可调范围为15.6%~46.1%; 抗拉强度在可接受范围内略有降低, 且可通过其他工艺技术如等径角挤压(ECAE)^[25]提升性能。

为了确定镁锂合金的生物腐蚀性能, LEEFLANG等^[97]采用长周期实验研究了Mg-Li-Al-(RE)系的生物腐蚀速率。结果表明, 该系镁锂具备理想生物可降解支架材料的潜在可能: 腐蚀速率低于0.1 mm/a^[98]; 植入后至少6个月内不完全溶解^[99]。同时, 该系镁锂合金在析氢测试即腐蚀过程中析氢速率无峰值, 表明该合金腐蚀平稳。

此外, 刘玉玲等^[92]还系统对比了文献中报道的

镁锂系合金的腐蚀速率, 发现最大速率为Mg-9Li-1Zn合金的0.38 mg/(cm²·h), 远低于人体内允许的Mg量, 表明镁锂合金在降解过程中Mg的释放是安全的。

2.3 在其他领域的应用

1) 武器装备。美国军方与Hughes公司共同研发了TOW(管射式导弹发射器管筒)中瞄准装置的圆盘, 主要是利用镁锂合金大热膨胀、低密度的性能特点^[89]。DOW化学公司开发Mg-Li-Al系镁锂合金LA136合金(Mg-13.5Li-5.5Al-0.15Mn)并优化合金成分(Mg-14Li-1.5Al-0.08Mn), 制造M113军用运输车壳体, 显著减轻了装甲车质量且提升了机动性能。但是该镁锂合金的质量以及成本等问题限制了其在M113军用运输车上的大规模应用。镁锂合金还在坦克装甲车上有重要应用。有报道显示, 美国于2012年投入近1亿美元对此进行研究。与其他镁合金比较, 镁锂合金在保持其强度的条件下具有更优的塑性以及更好的内耗系数, 是更为理想的复合装甲材料的夹层材料, 进而大幅度降低坦克装甲车的质量, 增加其机动性; 同时, 阻尼性能良好的镁锂合金可更大程度地减少因子弹或炮弹的冲击而产生的震动, 更为有效地保护车内人员。此外, 镁锂合金还用于制造其他军事装备, 如担架、电控装备的外壳、控制舱壳体、导弹尾翼、单兵外骨骼等; 也用于制造武器, 如弹夹、武器瞄准装置、单兵轻武器等^[90]。据2019年9月的报道, 中国研制的镁锂合金应用于制备战斗机飞机行员的头瞄零部件^[91]。

2) 电子信息。在电子信息特别是3C产业(Computer、Communication、Consume Electronic)领域, 应用镁锂合金既能够减轻重量, 又能够降低电磁干扰。镁锂合金被用于制造计算机壳体、高端音响振膜、高端手机/相机外壳、导线管、笔记本液晶屏幕框架、背面壳体、键盘框壳等电子产品零件^[91]。此外, 在电子制造业中, 利用镁锂合金良好的电磁屏蔽和阻尼性能特点, 使得仪表和电器的制造精确性更高^[100]。

3) 汽车工业。在汽车行业轻量化和清洁能源环保化的趋势下, 镁锂合金将成为车体和零部件(车

身、底盘、车体框架、车窗框架、座位、车门、后行李箱等)的优先备选材料之一,拥有巨大的发展潜力。

此外,镁锂合金还被应用作为电池阳极材料,表现出较优异的放电特性和放电容量。张密林等^[4]对镁锂合金用作化学电源阳极材料进行了研究。PAN等^[10]将镁锂合金用于空气电池,并研究了晶粒和晶界对镁锂合金电极材料的腐蚀和放电行为的影响。

3 结语

作为超轻金属材料,镁锂合金在航空航天、武器装备、电子信息和汽车工业等领域具有绝对的优势,在科学研究和产业化应用等方面已经有了长足的发展,取得的成果十分显著。但是镁锂合金的问题仍然比较突出。

1) 当前镁锂合金的熔炼铸造均在真空条件下进行,导致生成效率低下、成本高昂等,进而限制镁锂合金的大规模应用。

2) 镁锂合金体系的合金化机理不明确,特别是多元合金体系中的合金元素与主元素 Mg、Li 以及合金元素之间的相互作用机理,仍有待深入研究并开发新的多元合金体系。

3) 已经取得应用的镁锂合金体系大多为变形镁锂合金,而制造成本更为低廉的铸造技术甚至是在常规镁合金中已成熟应用的压力铸造技术,在镁锂合金研究和应用中仍有待突破;

4) 镁锂合金的腐蚀机制尚未研究透彻,提高其耐蚀性的表面处理技术和利用其可蚀性(可降解)的生物医用与电化学技术等研究尚待加强。

5) 高强度镁锂合金(>350 MPa)仍处于空白领域,因而限制了其更大规模的应用。

为了解决这些问题,镁锂合金的研究应重点集中在以下几方面。

1) 深入系统地研究镁锂合金的熔炼制备技术,尤其是开发出切实有效、成本低廉的非真空熔炼技术。

2) 加强镁锂合金基础科学规律的研究,重点是镁锂合金的合金化机理、热处理机制和塑性变形规

律等方面。

3) 借助数字模拟和智能计算新型技术开展镁锂合金的研究。例如,利用有限元技术分析镁锂合金的塑性变形规律;运用人工智能机器学习算法深入研究合金化中多元素的交互作用机理等。

4) 开发适应于镁锂合金的新型制备及变形技术。例如开发兼具快速凝固技术和大塑性变形技术等工艺特点的技术。已有报道的 3D 打印“微铸锻”技术就具有这种复合型特点。但是,该技术在镁锂合金领域应用的相关报道目前尚未见到。

5) 深入拓展已有合金系镁锂合金的应用,特别是在生物医用和清洁能源等领域的应用。

REFERENCES

- [1] WANG Bao-jie, LUAN Ji-yu, XU Dao-kui, et al. Research progress on the corrosion behavior of magnesium-lithium-based alloys: A review[J]. *Acta Metallurgica Sinica(English Letters)*, 2019, 32(1): 1-9.
- [2] XIANG Peng, XU Shi-hao, DING De-hua, et al. Microstructural evolution, mechanical properties and corrosion behavior of as-cast Mg-5Li-3Al-2Zn alloy with different Sn and Y addition[J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2021, 72: 16-22.
- [3] 冯凯, 李丹明, 何成旦, 等. 航天用超轻镁锂合金研究进展[J]. *特种铸造及有色合金*, 2017, 37(2): 140-144.
FENG Kai, LI Dang-ming, HE Cheng-dan, et al. Progress in superlight Mg-Li alloys for aerospace industry[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2017, 37(2): 140-144.
- [4] 张密林, ELKIN F M. 超轻镁锂合金[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
ZHANG Mi-lin, ELKIN F M. *Ultralight Mg-Li alloys*[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [5] 吴国华, 赵炯, 刘文才, 等. 超轻镁锂合金研究应用现状与展望[C]//第十三届全国铸造年会暨 2016 中国铸造活动周论文集. 成都: 中国机械工程学会铸造分会, 2016: 1-9.
WU Guo-hua, ZHAO Jiong, LIU Wen-cai, DING Wen-jiang. Situation and prospect of research and application on super light Mg-Li alloys[C]//Proceedings of The 13th National Foundry Annual Meeting and 2016 China Foundry Week. Chengdu: The Foundry Institution of China Mechanical

- Engineering Society, 2016: 1–9.
- [6] CAIN T W, LABUKAS J P. The development of β phase Mg-Li alloys for ultralight corrosion resistant applications[J]. *npj Materials Degradation*, 2020, 4: 17-1–10. <https://doi.org/10.1038/s41529-020-0121-2>.
- [7] TANG Hao, YAN Yong-de, ZHANG Mi-lin, et al. Fabrication of Mg-Pr and Mg-Li-Pr alloys by electrochemical co-reduction from their molten chlorides[J]. *Electrochimica Acta*, 2013, 107: 209–215.
- [8] XIE Jin-shu, ZHANG Jing-huai, YOU Zi-ha, et al. Towards developing mg alloys with simultaneously improved strength and corrosion resistance via re alloying[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2021, 9(1): 41–56.
- [9] MASING G, TAMMANN G. Metallographische Mitteilungen aus dem Institut für physikalische Chemie der Universität Göttingen. LXXV. über das Verhalten von Lithium zu Natrium, Kalium, Zinn, Cadmium und Magnesium[J]. *Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie*, 1910, 67(1): 183–199.
- MASING G, TAMMANN G. Metallographic communications from the institute of physical chemistry of the University of Gothenburg. LXXV on the behaviour of lithium to sodium, potassium, tin, cadmium and magnesium[J]. *Journal of Inorganic and General Chemistry*, 1910, 67(1): 183–199.
- [10] FREETH W E, RAYNOR G V. The systems magnesium-lithium and magnesium-lithium-silver[M]. *The Journal of the Institute of Metals*, 1953–1954, 82: 575–580.
- [11] 乐启焱, 崔建忠. Mg-Li 合金的过去, 现在与将来[J]. *宇航材料工艺*, 1997, 27(2): 1–6.
- LE Qi-zhi, CUI Jian-zhong. Past, present and future of Mg-Li alloy[J]. *Aerospace Materials and Technology*, 1997, 27(2): 1–6.
- [12] JACKSON J H, FROST P D, LOONAM A C, et al. Magnesium-lithium base alloys—Preparation, fabrication, and general characteristics[J]. *Journal of Metals*, 1949, 1(2): 149–168.
- [13] FROST P D, KURA J G, EASTWOOD L W. Aging characteristics of magnesium-lithium base alloys[J]. *Journal of Metals*, 1950, 2(10): 1277–1282.
- [14] JONES W R D. The mechanical properties of binary and ternary Mg alloy containing Li[M]. *The Journal of the Institute of Metals*, 1955/1956, 84(84): 364–378.
- [15] *Worldwide Guide to Equivalent Nonferrous Metals and Alloys*. Second Edition. 7–21
- [16] MATHEWSON A G, MYERS H P. The optical properties of lithium-manganese alloys[J]. *Journal of Physics F: Metal Physics*, 1973, 3: 623–639.
- [17] SAHOO M, ATKINSON J T N. Magnesium-lithium alloys—Constitution and fabrication for use in batteries[J]. *Journal of Materials Science*, 1982, 17(12): 3564–3574.
- [18] CRISP S R. Soft X-ray emission and self-absorption studies on HCP solid solutions of Li in Mg—An experimental study[J]. *Journal of Physics F: Metal Physics*, 1983, 13(6): 1317–1324.
- [19] MASON J F, WARWICK C M, SMITH P J, CHARLES J A, CLYNE T W. Magnesium-lithium alloys in metal matrix composites — A preliminary report[J]. *Journal of Materials Science*, 1989, 24(11): 3934–2946.
- [20] GONZALEZ-DONCEL G, WOLFENSTINE J, METENIER P, et al. The use of foil metallurgy processing to achieve ultrafine grained Mg-9 Li laminates and Mg-9Li-5B4C particulate composites[J]. *Journal of Materials Science*, 1990, 25(10): 4535–4540.
- [21] METENIER P, GONZALEZ-DONCEL G, RUANO O A, et al. Superplastic behavior of a fine-grained two-phase Mg-9wt.%Li alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1990, 125(2): 195–202.
- [22] HIGASHI K, WOLFENSTINE J. Microstructural evolution during superplastic flow of a binary Mg-8.5 wt.% Li alloy[J]. *Materials Letters*, 1991, 10(7/8): 329–332.
- [23] YOSHIDA Y, CISAR L, KAMADO S, et al. Low temperature superplasticity of ECAE processed Mg-10%Li-1%Zn alloy[J]. *Materials Transactions*, 2005, 43(10): 2419–2423.
- [24] WANG Jian-yih, CHANG Tien-chan, CHANG Li-zen, et al. Effect of Al and Mn content on the mechanical properties of various ECAE processed Mg-Li-Zn alloys[J]. *Materials Transactions*, 2006, 47(4): 971–976.
- [25] CHANG Tien-chan, WANG Jian-yih, CHU Chun-len, et al. Mechanical properties and microstructures of various Mg-Li alloys[J]. *Materials Letters*, 2006, 60(27): 3272–3276.
- [26] ROTHERY W H, RAYNOR G V. *The structure of metals and alloys*[M]. London: Institute of Metals, 1962.
- [27] 黄晓锋, 朱凯, 曹喜娟. 主要合金元素在镁合金中的作用[J]. *铸造技术*, 2008, 29(11): 1574–1578.
- HUANG Xiao-feng, ZHU Kai, CAO Xi-juan. The roles of

- alloying elements in magnesium alloys[J]. Foundry Technology, 2008, 29(11): 1574–1578.
- [28] 黎文献. 镁及镁合金[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005.
LI Wen-xian. Magnesium and magnesium alloys[M]. Changsha: Press of Central South University, 2005.
- [29] 吴承建, 陈国良, 强文江. 金属材料学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
WU Chen-jian, CHEN Guo-liang, QIANG Wen-jiang. Metallic materials science[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.
- [30] WANG Jia-hao, WU Rui-zhi, FENG Jing, et al. Influence of rolling strain on electromagnetic shielding property and mechanical properties of dual-phase Mg-9Li alloy[J]. Materials Characterization, 2019, 157: 109924.
- [31] GASIOR W, MOSER Z, ZAKULSKI W, et al. Thermodynamic studies and the phase diagram of the Li-Mg system[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1996, 27(9): 2419–2428.
- [32] JAYASATHYAKAWINA S, RAVICHANDRAN M, BASKAR N, et al. Mechanical properties and applications of magnesium alloy—Review[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 27(5): 909–913.
- [33] 罗丽娟. 镁锂合金的开发加工和应用[J]. 稀有金属快报, 2002, 000(5): 11–13.
LUO Li-juan. Research and application of Mg-Li alloys[J]. Letters of Rear Metals, 2002, 000(5): 11–13.
- [34] LI Chuan-qiang, HE Yi-bin, HUANG Huai-pei. Effect of lithium content on the mechanical and corrosion behaviors of HCP binary Mg-Li alloys[J]. Journal of Magnesium and Alloys, In Press. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.02.022>
- [35] SOMEKAWA H, EGUSA D, ABE E. Grain boundary plasticity in solid solution Mg-Li binary alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 790: 139705.
- [36] 马春江, 张 荻, 张国定. 超轻型 Mg-Li 合金[J]. 宇航材料工艺, 1998, 28(2): 27–32.
MA Chun-jiang, ZHANG Di, ZHANG Guo-ding. Superlight Mg-Li alloys[J]. Aerospace Materials and Technology, 1998, 28(2): 27–32.
- [37] SAITO N, MABUCHI M, NAKANISHI M, et al. The aging behavior and the mechanical properties of the Mg-Li-Al-Cu alloy[J]. Scripta Materialia, 1997, 36 (5): 551–555.
- [38] 曾 迎, 蒋 斌, 李瑞红, 等. 合金元素对 Mg-Li 合金组织及性能的影响[J]. 铸造, 2012, 61(3): 275–279.
ZENG Ying, JIANG Bin, LI Rui-hong, et al. Influences of alloying elements and the microstructures and properties of Mg-Li alloys[J]. Foundry, 2012, 61(3): 275–279.
- [39] 刘 滨, 张密林. Ce 对 Mg-Li-Al 合金组织及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2007, 27(5): 325–331.
LIU Bin, ZHANG Mi-lin. Effect of Ce on the microstructure and mechanical properties of Mg-Li-Al alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2007, 27(5): 325–331.
- [40] 余 琨. 稀土变形镁合金组织性能及加工工艺研究[D]. 长沙: 中南大学, 2002.
YU Kun. Study on microstructure, properties and processing technology of Rare earth wrought magnesium alloy[D]. Changsha: Central South University, 2002.
- [41] SONG G S, KRAL M V. Characterization of cast Mg-Li-Ca alloys[J]. Materials Characterization, 2005, 54(4): 279–286.
- [42] LI Ming, HAO Hai, ZHANG Ai-min, et al. Effects of Nd on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-8Li-3Al alloy[J]. Journal of Rare Earths, 2012, 30(5): 492–496.
- [43] HE Yu-qing, PENG Chao-qun, FENG Yan, et al. Effects of alloying elements on the microstructure and corrosion behavior of Mg-Li-Al-Y alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 834: 154344.
- [44] QU Zhi-kun, JIANG Bin, WANG Tao, et al. Creep behaviors of Mg-5Li-3Al-(0,1)Ca alloys[J]. Materials and Design, 2012, 34: 863–866.
- [45] 吴利斌, 孟祥瑞, 崔崇亮, 等. 超轻变形 Mg-Li-Al-Zn 合金的显微组织和性能[J]. 铸造技术, 2009, 30(10): 1256–1259.
WU Li-bin, MENG Xiang-rui, CUI Chong-liang, et al. Microstructures and properties of superlight Mg-Li-Al-Zn wrought alloys[J]. Foundry Technology, 2009, 30(10): 1256–1259.
- [46] 王 涛. 镁锂稀土合金的制备及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
WANG Tao. Preparation and properties of rare earth Mg-Li alloys[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008.
- [47] 邹 云. 镁锂合金成分和处理工艺对变形机制及性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
ZOU Yun. Influence of alloying elements and treatment process on wrought mechanism and properties of Mg-Li alloys[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [48] SANSCHAGRIN A, TREMBLAY R, ANGERS R, et al.

- Mechanical properties and microstructure of new magnesium-lithium base alloys[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1996, 220(1): 69–77.
- [49] LIN H C, LIN K M, LIN H M, et al. Effects of Aluminum addition on magnesium-lithium-zinc alloy[J]. *Magnesium Technology*, 2005: 275–280.
- [50] RAHULSN N, GOPALAN S, KUMARAN S. Mechanical behavior of Mg-Li-Al alloys[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(9): 17935–17943.
- [51] 马春江, 张 荻, 覃继宁, 等. Mg-Li-Al 合金的力学性能和阻尼性能[J]. *中国有色金属学报*, 2000, 10(S1): s10–s14. MA Chun-jiang, ZHANG Di, QIN Ji-ning, et al. Mechanical properties and damping capacity of Mg-Li-Al alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2000, 10(S1): s10–s14.
- [52] ZHANG Cheng, WU Liang, ZHAO Zi-long, et al. Effect of Li content on microstructure and mechanical property of Mg-xLi-3(Al-Si) alloys[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, 29(12): 2506–2513.
- [53] KAZAKOV A A, TIMONOVA M A, BORISOVA L G. Properties of magnesium-lithium alloys[J]. *Metal Science & Heat Treatment*, 1983, 25(9): 682–684.
- [54] 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 channel die[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2020, 773, 138867.
- [55] 刘 鹏, 赵 平. 热处理对 Mg-Li-Zn-Zr 系镁合金组织及性能影响[J]. *热加工工艺*, 2006, 35(2): 40–42. LIU Peng, ZHAO Pin. Effect of heat treatment on structure and properties of Mg-Li-Zn-Zr alloy[J]. *Hot Working Process*, 2006, 35(2): 40–42.
- [56] SONG J M, WEN T X, WANG J Y. Vibration fracture properties of a lightweight Mg-Li-Zn alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2007, 56(6): 529–532.
- [57] YAMAMOTO A, ASHIDA T, HARUSHIGE T, et al. Precipitation in Mg(4-13)%Li(4-5)%Zn ternary alloys[J]. *Materials transactions*, 2003, 44(4): 619–624.
- [58] YAMAMOTO A, ASHIDA T, TSUBAKINO H, et al. Precipitation in Mg-11mass%Li-10mass%Zn alloy[J]. *Journal of Japan Institute of Light Metals*, 1992, 42(12): 797–803.
- [59] TAKUDA H, MATSUSAKA H, KIKUCHI S, et al. Tensile properties of a few Mg-Li-Zn alloy thin sheets[J]. *Journal of Materials Science*, 2002, 37(1): 51–57.
- [60] 乐启焯, 李洪晓, 崔建忠. 稀土和银对 Mg-Li 合金显微组织及力学性能的影响[J]. *兵器材料科学与工程*, 1997, 20(4): 9–13. LE Qi-chi, LI Hong-xiao, CUI Jian-zhong. Effects of Re and Ag on microstructures and mechanical properties of Mg-Li alloy[J]. *Ordnance Materials Science and Engineering*, 1997, 20(4): 9–13.
- [61] CHANG Li-li, SHI Chun-chang, CUI Hong-wei. Enhancement of mechanical properties of duplex Mg-9Li-3Al alloy by Sn and Y addition[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2018, 28(1): 30–35.
- [62] XIAO Wen-long, JIA Shu-sheng, WANG Li-dong, et al. Effects of Sn content on the microstructure and mechanical properties of Mg-7Zn-5Al based alloys[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527(26): 7002–7007.
- [63] JIN Cheng-ji, WU Rui-zhi, ZHANG Jing-huai, et al. The Effect of Sn on microstructure and mechanical properties of Mg-Li-Zn-Sn alloys[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 650: 185–189.
- [64] GROBNER J, SCHMID-FETZER R, PISCH A, et al. Phase equilibria, calorimetric study and thermodynamic modeling of Mg-Li-Ca alloys[J]. *Thermochim Acta*, 2002, 389(1): 85–94.
- [65] 李红斌, 姚广春, 吉海宾, 等. Ca 对超轻 Mg-Li-Al 合金显微组织和力学性能的影响[J]. *铸造*, 2005, 54(12): 1276–1279. LI Hong-bin, YAO Guang-chun, JI Hai-bin, et al. Effects of Ca on the microstructures and mechanical properties of Mg-Li alloys[J]. *Foundry*, 2005, 54(12): 1276–1279.
- [66] 王 涛, 巫瑞智, 李吉庆, 等. Ca 对 Mg-5Li-3Al-2Zn 合金组织和力学性能的影响[J]. *铸造技术*, 2009, 30(12): 1559–1562. WANG Tao, WU Rui-zhi, LI Ji-qing, et al. Effect of Ca on the microstructures and mechanical properties of Mg-5Li-3Al-2Zn alloys[J]. *Foundry Technology*, 2009, 30(12): 1559–1562.
- [67] 徐春杰, 马 涛, 屠 涛, 等. 超轻 Mg-Li 合金强化方法研究现状及其应用[J]. *兵器材料科学与工程*, 2012, 35(2): 97–100. XU Chun-jie, MA Tao, TU Tao, et al. Research status and application of strengthening method of ultralight Mg-Li

- alloys[J]. *Ordnance Materials Science and Engineering*, 2012, 35(2): 97–100.
- [68] HORI S, FUJITANI W. Cold workability of Mg-Li and Mg-Zr-Li alloys[J]. *Japan Institute of Light Metals*, 1990, 40: 285–289.
- [69] 曾郁文, 王盈璇, 江承祖, 等. 添加合金元素对镁锂合金机械性能与抗蚀性能之影响[EB/OL]. [2021-04-13]. <http://ishare.iask.sina.com.cn/f/34s2CgmgMrF.html>.
ZENG Yu-wen, WANG Ying-xuan, JIANG Chen-zu, et al. Effect of alloying elements on mechanic and corrosion properties of Mg-Li alloys[EB/OL]. [2021-04-13]. <http://ishare.iask.sina.com.cn/f/34s2CgmgMrF.html>.
- [70] 张春香, 关绍康, 陈海军, 等. 硅对Mg-8Zn-4Al-0.3Mn合金显微组织和性能的影响[J]. *机械工程材料*, 2004, 28(9): 19–22.
ZHANG Chun-xiang, GUAN Shao-kang, CHEN Hai-jun, et al. Effect of Si on microstructure and properties of Mg-8Zn-4Al-0.3Mn alloy[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2004, 28(9): 19–22.
- [71] 卫爱丽, 刘兴海, 张焜禹, 等. 复合添加 Si, Nd 元素对 Mg-11Li-3Al 合金组织与力学性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2016, 45(4): 990–996.
WEI Ai-li, LIU Xing-hai, ZHANG Kun-yu, et al. Effects of Si and Nd co-addition on microstructures and mechanical properties of Mg-11Li-3Al alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(4): 990–996.
- [72] SIDDHARTHA D. A study of alloys based on the magnesium-lithium system[D]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 1989.
- [73] FROST P D. Technical and economic status of magnesium-lithium alloys: A report to industrial and defense management[M]. Ohio: National Aeronautics and Space Administration, 1965.
- [74] SHI Quan-xin, BIAN Li-ping, LIANG Wei, et al. Effects of adding Al-Si eutectic alloy and hot rolling on microstructures and mechanical behavior of Mg-8Li alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 631: 129–132.
- [75] LIU Bin, ZHANG M L, NIU Zhong-yi. Influence of RE on microstructure and mechanical properties of Mg-Li-Al alloys[J]. *Materials Science Forum*, 2007, 62: 211–216.
- [76] 杨光昱, 郝启堂, 介万奇. 镁锂系合金的研究现状[J]. *铸造技术*, 2004, 25(1): 19–21.
YANG Guang-yu, HAO Qi-tang, JIE Wan-qi. Study status of Mg-Li system alloys[J]. *Foundry Technology*, 2004, 25(1): 19–21.
- [77] LI Ji-qing, QU Zhi-kun, WU Rui-zhi, et al. Effects of Cu addition on the microstructure and hardness of Mg-5Li-3Al-2Zn alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527(10/11): 2780–2783.
- [78] TANNO, OHUCHI K, MATUZAWA K, et al. Effect of rare-earth on structures and mechanical properties of Mg-8%Li alloys[J]. *Journal of Japan Institute of Light Metals*, 1992, 42(1): 3–9.
- [79] 于化顺, 闵光辉, 陈熙深. 合金元素在 Mg-Li 基合金中的作用[J]. *稀有金属材料与工程*, 1996, 25(2): 1–5.
YU Hua-shun, MIN Guang-hui, CHEN Xi-shen. Effect of alloying elements on Mg-Li base alloys[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 1996, 25(2): 1–5.
- [80] DONG Han-wu, WANG Li-dong, WU Yao-ming, et al. Effect of Y on microstructure and mechanical properties of duplex Mg-7Li alloys[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2010, 506(1): 468–474.
- [81] XU D K, LIU L, XU Y B, et al. The strengthening effect of icosahedral phase on as-extruded Mg-Li alloys[J]. *Scripta Materialia*, 2007, 57(3): 285–288.
- [82] 乐启焯, 崔建忠, 李红斌, 等. Mg-Li 合金研究最新进展及其应用[J]. *材料导报*, 2003, 17(12): 1–8.
LE Qi-chi, CUI Jian-zhong, LI Hong-bin, et al. Current research development in Mg-Li alloy and its applications[J]. *Materials Review*, 2003, 17(12): 1–8.
- [83] ZHAO Jiong, ZHANG Jie, LIU Wen-cai, 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 & Engineering A*, 2016, 650: 240–247.
- [84] WANG Tao, ZHANG Mi-lin, WU Rui-zhi. Microstructure and properties of Mg-8Li-1Al-1Ce alloy[J]. *Materials Letters*, 2008, 62(12/13): 1846–1848.
- [85] WU Li-bin, CUI Chong-liang, WU Rui-zhi, 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 A*, 2010, 528(4): 2174–2179.
- [86] OHUCHI K, IWASAWA S, KAMADO S, et al. Effects of Nd and Ag additions on the microstructures and mechanical properties of Mg-8mass%Li alloys[J]. *Journal of Japan Institute of Light Metals*, 1992, 42(8): 446–452.

- [87] ZHU Tian-long, CUI Chong-liang, ZHANG Tian-long, et al. Influence of the combined addition of Y and Nd on the microstructure and mechanical properties of Mg-Li alloy[J]. *Materials and Design*, 2014, 57: 245–249.
- [88] 曾荣昌, 柯伟, 徐永波, 等. Mg合金的最新发展及应用前景[J]. *金属学报*, 2001, 37(7): 673–685.
ZENG Rong-chang, KE Wei, XU Yong-bo, et al. Recent development and application of magnesium alloys[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2001, 37(7): 673–685.
- [89] 刘旭贺. 超轻超塑性镁锂合金的制备及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
LIU Xu-he. Study on fabrication and properties of ultra light/plastic Mg-Li alloys[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [90] 王军武, 刘旭贺, 王飞超, 等. 航空航天用高性能超轻镁锂合金[J]. *军民两用技术与产品*, 2013(6): 21–24.
WANG Jun-wu, LIU Xu-he, WANG Fei-chao, et al. Ultra-light Mg-Li alloys with high properties for aeronautics and astronautics[J]. *Dual Use Technologies & Products*, 2013(6): 21–24.
- [91] 郑州轻研合金科技有限公司. 航空航天用减重部件[EB/OL]. [2021-05-20]. http://www.almgcu.cn/products_list/&pageNo_FrontProducts_list01-1486200725015=2&pageSize_FrontProducts_list01-1486200725015=6.html.
Zhengzhou Light Research Alloy Technology Co., Ltd. Weight reducing components for aerospace[EB/OL]. [2021-05-20]. http://www.almgcu.cn/products_list/&pageNo_FrontProducts_list01-1486200725015=2&pageSize_FrontProducts_list01-1486200725015=6.html.
- [92] 刘玉玲, 张修庆. 镁锂合金在生物医学方面的应用及前景[J]. *材料科学*, 2019, 9(7): 691–698.
LIU Yu-ling, ZHANG Xiu-qing. Biomedical applications and prospect of Mg-Li alloys[J]. *Materials Science*, 2019, 9(7): 691–698.
- [93] WU J, MADY L J, ROY A, et al. In-vivo efficacy of biodegradable ultrahigh ductility Mg-Li-Zn alloy tracheal stents for pediatric airway obstruction[J]. *Communications Biology*, 2020, 3(1): 787. <https://doi.org/10.1038/s42003-020-01400-7>.
- [94] WEN Zhao-hui, WU Chang-jun, DAI Chang-song, et al. Corrosion behaviors of Mg and its alloys with different Al contents in a modified simulated body fluid[J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2009, 488(1): 392–399.
- [95] MANI G, FELDMAN M D, PATEL D, et al. Coronary stents: A materials perspective[J]. *Biomaterials*, 2007, 28(9): 1689–1710.
- [96] ZHOU W R, ZHENG Y F, LEEFLANG M A, et al. Mechanical property, biocorrosion and in vitro biocompatibility evaluations of Mg-Li-(Al)-(RE) alloys for future cardiovascular stent application[J]. *Acta Biomaterialia*, 2013, 9(10): 8488–8498.
- [97] LEEFLANG M A, DZWONCZYK J S, ZHOU J, et al. Long-term biodegradation and associated hydrogen evolution of duplex-structured Mg-Li-Al-(RE) alloys and their mechanical properties[J]. *Materials Science and Engineering B*, 2011, 176(20): 1741–1745.
- [98] HERMAWAN H, DUBE D, MANTOVANI D. Developments in metallic biodegradable stents[J]. *Acta Biomaterialia*, 2009, 6(5): 1693–1697.
- [99] PEUSTER M. A novel approach to temporary stenting: Degradable cardiovascular stents produced from corrodible metal—results 6–18 months after implantation into New Zealand white rabbits[J]. *Heart*, 2001, 86(5): 563–569.
- [100] KRAL M V, MUDDLE B C, NIE J F. Crystallography of the bcc/hcp in a Mg-8Li alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 460(1): 227–232.
- [101] YANG H, WU L, JIANG B, LIU W, et al. Clarifying the roles of grain boundary and grain orientation on the corrosion and discharge processes of α -Mg based Mg-Li alloys for primary mg-air batteries[J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2021, 62: 128–138.

Alloying and application of Mg-Li alloys: A review

PENG Xiang, LIU Wen-cai, WU Guo-hua

(National Engineering Research Center of Light Alloy Net Forming, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Mg-Li alloys, possessing excellent comprehensive properties, i.e., high specific strength, high specific stiffness, good thermal conductivity, good electromagnetic shielding and damping properties, have an application potentiality in wide fields of aerospace, weapon equipment, electronic and automotive industry etc. In this paper, the research progress of alloying and application of Mg-Li alloy, including untangling the influence of alloying elements on the alloys, were reviewed, its application, problems and research direction were discussed.

Key words: Mg-Li alloy; alloying; application; research progress

Foundation item: Projects(51771115, 51775334, 51821001, U2037601) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(USCAST2020-14) supported by the Research Program of SAST-SJTU Joint Research Center of Advanced Spaceflight Technologies, China; Project (CALT2020-TS07) supported by the Joint Innovation Fund of CALT and College, China

Received date: 2021-04-16; **Accepted date:** 2021-09-17

Corresponding author: WU Guo-hua; Tel: +86-21-54742630; E-mail: ghwu@sjtu.edu.cn

(编辑 李艳红)