

高 Zn 含量 Al-Zn-Mg-Cu 系合金的热处理技术研究综述

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2024.05.010

吴 琴 吕华钦 范才河
倪雨朦 胡泽艺 武 帅

湖南工业大学
材料与先进制造学院
湖南 株洲 412007

摘 要: 综述了高 Zn 含量 (质量分数不小于 7%) Al-Zn-Mg-Cu 系合金的研究现状,重点介绍了高 Zn 含量 Al-Zn-Mg-Cu 系合金热处理技术(均匀化处理、固溶处理、时效处理及形变热处理)的研究近况,阐述了不同热处理技术对高 Zn 含量 Al-Zn-Mg-Cu 系合金组织性能的影响机制,展望了高 Zn 含量 Al-Zn-Mg-Cu 系合金发展趋势及前景,旨在为 Al-Zn-Mg-Cu 合金综合性能的提升及铝合金材料产业的持续发展提供参考。

关键词: 高 Zn 含量; Al-Zn-Mg-Cu 系合金; 热处理技术

中图分类号: TG156

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2024)05-0072-11

引文格式: 吴 琴, 吕华钦, 范才河, 等. 高 Zn 含量 Al-Zn-Mg-Cu 系合金的热处理技术研究综述 [J]. 包装学报, 2024, 16(5): 72-82.

Al-Zn-Mg-Cu 系 ($7 \times \times \times$ 系) 合金具有强度高、韧性好的特点,而且价格低廉,一直是航空、高铁等工业领域最具竞争力的结构材料。传统 Al-Zn-Mg-Cu 系合金的制备一般经历铸锭冶金制坯、冷热变形成形、热处理性能优化等诸道工序,最后获得终态产品,如飞机机身、飞机框架、机翼蒙皮、火箭舱体、高速机车底盘等各种轻质高强部件^[1-4]。随着社会的发展,各种设施、设备更新加快,对 Al-Zn-Mg-Cu 系合金的性能也提出了更高的要求。

最初,研究者们普遍使用传统铸造方法制备 Al-Zn-Mg-Cu 系合金,其中 Zn 的含量 (质量分数) 一般不超过 7%。后来,他们发现加入不同含量的稀土元素可以有效提高合金的机械强度、塑性和抗疲劳强

度,但稀土材料价格昂贵,提高了合金的生产成本。随后的研究表明,在 Zn 的质量分数大于 7% 条件下,控制好 Zn、Mg 的比例,可以在提高 Al-Zn-Mg-Cu 系合金的综合性能的同时降低生产成本^[5-8]。此外,学者们还致力于研究合金成分设计、热处理工艺(均匀化处理、固溶处理、时效处理)优化,以及大塑性变形(轧制、挤压)等对 Al-Zn-Mg-Cu 系合金性能的影响。基于此,本文梳理高 Zn 含量 (质量分数不小于 7%) Al-Zn-Mg-Cu 系合金的研究现状,并对热处理技术优化改善高 Zn 含量 Al-Zn-Mg-Cu 系合金综合性能的研究进行综述,以期为高强高韧铝合金的研发提供技术参考。

收稿日期: 2024-03-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (5227010927); 湖南省科技创新领军人才基金资助项目 (2021RC4036)

作者简介: 吴 琴 (1993-), 女, 湖南永州人, 湖南工业大学讲师, 博士, 主要从事轻量化材料制备及应用研究, E-mail: 420362747@qq.com

通信作者: 范才河 (1978-), 男, 湖南邵阳人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事喷射成形快速凝固技术研究, E-mail: 369581813@qq.com

1 高 Zn 含量 Al-Zn-Mg-Cu 系合金研究现状

Zn 和 Mg 元素被认为是 Al-Zn-Mg-Cu 系合金中最主要的强化元素, 并且是形成 η 相 (MgZn_2)、亚稳相和 T 相 ($\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$) 的主要元素。高强高韧铝合金的强度、硬度、韧性以及抗应力腐蚀性能与 Zn、Mg 元素的含量有关。Chen Z. Y. 等^[9]发现与低 Zn 含量相比, 高 Zn 含量 Al-Zn-Mg-Cu 系合金的强度得到了提高, 但断裂韧性较低。越来越多的学者在开发高 Zn 合金的基础上继续优化成分设计, 从而开发了性能更为优异的 Al-Zn-Mg-Cu 系合金。

Yuan D. L. 等^[10]研究了高 Zn 含量 (质量分数分别为 7.9%, 9.0%, 11.0%) 对 Al-Zn-Mg-Cu 系合金抗应力腐蚀能力、力学性能和微观组织的影响, 发现 Zn 含量的提高导致 η' 相密度增大, 因此合金的极限抗拉强度 (ultimate tensile strength, UTS) 和屈服强度 (yield strength, YS) 随着 Zn 含量的增加而增大。此外, 过饱和固溶度随着 Zn 含量的增加而增加, 较高的析出动力学为后续时效过程中晶界析出相 (grain boundary precipitates, GBPs) 的增长提供了必要条件。所以 Zn 含量越高的 Al-Zn-Mg-Cu 系合金的 GBPs 尺寸越大, 同时拥有较宽的无沉淀析出带 (precipitation free zones, PFZs)。

Liu J. T. 等^[11]研究了 3 种不同 Zn 含量的 Al-Zn-Mg-Cu 合金 (7056、7095、7136) 的物相和显微组织, 发现这 3 种合金均含有 $\alpha(\text{Al})$ 、 $\text{Al/Mg}(\text{Cu, Zn, Al})_2$ 和 $\eta(\text{MgZn}_2)$ 相, 不同的是铸态 7095 和 7136 合金中还发现了 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 相。在 450 °C /24 h 均匀化过程中, 3 种合金细小的 η 相完全溶解到基体中, 7136 合金中的 $\text{Mg}(\text{Cu, Zn, Al})_2$ 相转变为 $\text{S}(\text{Al}_2\text{CuMg})$ 相。

Tan P. 等^[12]发现 $\text{Al-}x\text{Zn-}2.3\text{Mg-}1.7\text{Cu}$ ($x=4.4, 5.1, 5.8, 6.5, 7.2$) 合金中, Zn 含量的增加会引起 $\alpha\text{-Al}$ 基体枝晶形貌、尺寸以及晶间共晶组织的变化, 还会引起断裂韧窝的尺寸和数量增加, 但不影响合金的组成相。此外, 随着 Zn 含量的增加, 极限抗拉强度逐渐提高, 当 Zn 的质量分数为 7.2% 时, 达到最大值 248.05 MPa; 屈服强度保持相对稳定, 为 (179.39 ± 6.81) MPa。

Jiang H. T. 等^[13]发现, 提高 Zn 含量会导致固溶强化作用减弱, 但能促进 η' 相析出。此外, 在高 Zn 含量合金中添加 Sc 和 Zr 可以形成大量 $\text{Al}_3(\text{Sc, Zr})$ 相,

并通过 Orowan 强化机制提高合金的强度和塑性。

Tang J. 等^[14]对高 Zn 含量的 Al-Zn-Mg-Cu 系合金进行热挤压实验, 发现不同的 Zn 含量可以影响合金热塑性变形过程中的动态软化。在变形温度为 300 °C、应变速率为 0.1 s^{-1} 时, 动态软化的持续时间和程度随着 Zn 含量的增加而减小, 且 Zn 含量的增加可以加速析出过程。

Meng X. N. 等^[15-16]对熔体纺丝技术制造的挤压态 Al-27Zn-1.5Mg-1.2Cu-0.08Zr 合金进行了固溶处理 + 自然时效处理。分析发现: 高 Zn 含量会提供驱动力, 让脱溶原子偏聚区 (guinier-preston zones, GP 区) 向 η' 转变; 400 °C 固溶处理 + 自然峰时效合金中, η' 相占析出相总数的 50%, 远高于 350 °C 固溶处理 + 自然峰时效合金, 因此前者的力学性能更优。

2 热处理技术

热处理是制备高强高韧铝合金必不可少的加工工艺, 通过改变显微结构 (晶粒、析出相等) 来提升铝合金综合力学性能以及耐腐蚀性能。

2.1 均匀化处理

传统铸造的 Al-Zn-Mg-Cu 系合金, 在凝固过程中会产生严重的枝晶偏析、枝晶间非平衡相等缺陷。均匀化就是在高温下通过原子的扩散来消除或减少实际结晶的枝晶偏析, 溶解非平衡相和沉淀过饱和元素, 使溶质的浓度更加均匀。目前, 一级、双级和多级均匀化处理在高强韧 Al-Zn-Mg-Cu 系合金上的应用较为广泛。

Fan Y. Q. 等^[17]研究了喷射成形 Al-9.97Zn-2.65Mg-1.94Cu-0.12Zr 合金, 在 470 °C 下均匀化 24 h 期间的微观结构演变, 发现随着均匀化时间延长, 初生相明显减少, 晶界变薄且光滑。赵鸿金等^[18]研究了三级均匀化工艺对铸造 7055 铝合金组织性能的影响, 发现未均匀化处理的合金明显存在晶内偏析现象, 而经过三级均匀化处理后成分偏析现象明显改善, 基本看不到非平衡共晶组织。这表明三级均匀化可以最大程度消除晶内偏析现象。Xie Z. Q. 等^[19]发现, 350 °C /5 h + 470 °C /24 h 下的均匀化, 促进了 Al_3Zr 相的均匀沉淀, 并降低了喷射成形 Al-8.25Zn-2.2Mg-2.4Cu-0.2Zr 合金中晶粒尺寸的不均匀性。

2.2 固溶处理

固溶处理可以分为单级固溶处理和分级固溶处理两种类型。传统铸造工艺制造的高 Zn 含量 Al-Zn-

Mg-Cu 系合金, 由于冷却速率慢, 易形成粗大网状第二相。单级固溶处理可以有效促进第二相粒子的溶解, 提高成分的均匀性^[20-21]。而分级固溶处理可以最大程度溶解这些粗大网状第二相和多相共晶组织, 从而提高合金的力学性能^[22]。同时, 高 Zn 含量的合金中 η 相具有更高的 (Zn+Cu)/Mg 比^[23], 在分级固溶处理过程中可能表现出不同的溶解行为。

2.2.1 单级固溶处理

单级固溶处理可以溶解均匀化处理后合金内部残留的难以溶解的非平衡共晶相和粗大的第二相, 最大限度提高合金元素的固溶度^[24-25]。A. Ditta 等^[26]发现, 喷射成形 Al-11.3Zn-2.65Mg-1.0Cu 合金经过热挤压后会产生致密且细小的晶粒, 但挤压温度高和冷却缓慢会导致第二相的不规则粗化, 采用单级固溶 (470 °C / 3 h) 处理可以实现第二相的最大化溶解, 其抗拉强度、屈服强度以及延伸率分别达到 564 MPa、411 MPa、14%。

为了使 Al-Zn-Mg-Cu 系合金在固溶过程中有更好的接触温度和保温效果, Jin W. M.、Zhang Z. Q.、Wang Z. X. 等^[27-29]将 7075 合金板材放入如图 1 的装置中进行接触单级固溶处理 (contact solution treatment, CST)。结果表明, 与传统保温炉单级固溶处理相比, CST 可以缩短 Al-Zn-Mg-Cu 系合金的峰值时效时间至 18 h, 其较高的固溶度可以增加沉淀驱动力并降低相的形成温度。

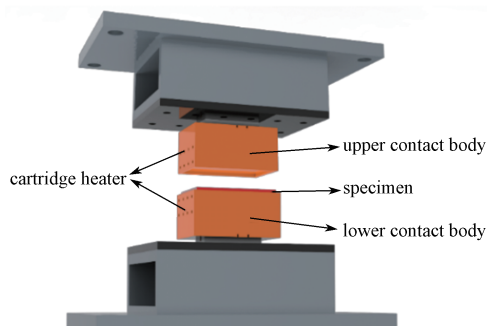


图 1 接触固溶处理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of contact solution treatment

2.2.2 分级固溶处理

在极限的单级固溶温度下, 合金可能会出现过烧现象, 并且第二相和多相共晶组织难以彻底溶解入基体^[21]。因此, 学者们探索出了更加优异的固溶处理工艺——分级固溶。

Xu D. K. 等^[30]研究了多级固溶 (475 °C / 8 h + 485 °C / 4 h + 495 °C / 2 h) 对 7150 合金的影响。结果表明,

η 相在 475 °C 下保温 5 min 即可完全溶解, 通过后两级固溶处理, 成功将 S 相溶解进基体, 而再结晶分数控制在 50% 以下。

Yang X. B. 等^[31]采用了三级高温固溶处理 (470 °C / 7 h + 480 °C / 3 h + 490 °C / 2 h) 对 Al-7.83Zn-1.55Mg-2.5Cu-0.2Zr 合金的析出相进行球化。结果表明, 三级固溶处理可以使更多的合金元素以溶质的形式存在于 Al 基体中, 而且可以使杂质和其他合金原子以球状颗粒形式存在。对比单级固溶, 这种球化处理不仅提高了合金强度, 还提高了耐腐蚀性能。

Zhou Q. S. 等^[32]研究了 Al-9.74Zn-2.59Mg-0.94Cu-0.2Zr-0.83Ti 合金经过 3 种不同的多级固溶工艺处理 (参数如表 1 所示) 后的微观组织和力学性能, 发现随着多级固溶处理温度和保温时间的增加, 合金晶粒尺寸逐渐增大, 未溶相数量逐渐减少, 无沉淀析出带扩大, 合金的硬度、抗拉强度和延伸率先升高后降低, 其中 S2 样品的性能最佳, 其硬度、抗拉强度和延伸率分别为 230.45 HV、740.84 MPa 和 4.6%。

表 1 文献 [32] 的多级固溶参数

Table 1 Multistage solid solution parameters in reference [32]

样品组	固 溶 处 理 参 数
S1	450 °C / 2 h + 460 °C / 2 h + 470 °C / 2 h
S2	450 °C / 2 h + 460 °C / 2 h + 470 °C / 2 h + 480 °C / 2 h
S3	450 °C / 2 h + 460 °C / 2 h + 470 °C / 2 h + 480 °C / 2 h + 490 °C / 2 h

2.3 时效处理

Al-Zn-Mg-Cu 系合金在固溶处理后获得的过饱和固溶体处于不平衡状态, 过剩溶质原子会自发析出。时效处理可分为单级时效处理和分级时效处理。单级时效处理是一种最简单也是经济效益最好的时效工艺, 即在固溶处理后只进行一次时效处理。单级时效处理可以是以 GP 区强化为主的自然时效, 也可以是以过渡相为主的人工时效。单级时效处理虽然工艺简单, 经济效益好, 但是其显微组织的均匀性较差, 抗应力腐蚀与力学性能方面难以得到良好的配合; 分级时效处理则可以弥补这方面的缺点且能进一步缩短生产周期。

2.3.1 单级时效处理

Al-Zn-Mg-Cu 系合金最常用的人工时效处理是单级峰时效, 此时合金中主要析出相为 η' (MgZn₂) 相, 该状态下合金达到最佳的室温强度, 但合金极易发生应力腐蚀, 其断裂韧性和疲劳强度也无法令人满意。

Lee S. H. 等^[33]研究了自然时效对 Al-Zn-Mg-Cu 系合金的析出强化,发现 GP I 区在自然时效 0.5 h 后开始形成,并在进一步时效过程中 GP I 区的体积分数增加;在 25 °C 下自然时效超过 1500 h 的合金中观察到 GP II 区。自然时效提高了合金的屈服强度和拉伸强度,但是牺牲了延展性。

应力时效处理(stress aging treatment, SAT)一般是指在单级时效过程中施加小于屈服强度的应力。

Guo W. 等^[34-35]认为,高密度晶格缺陷产生的应力引起了沉淀动力学的变化,晶格缺陷改变了溶质原子在基体中的扩散速率。此外,他们还发现 AA7075 的硬度呈现出双峰现象,施加的应力促进了 η' 相的形成,同时抑制了稳定 η 相的形成。

Lin Y. C. 等^[36]指出,与无应力时效处理(stress-free aging treatment, SFAT)相比, SAT 可以细化沉淀相,减少 PFZs 的宽度,进而而不连续的 GBPs 和狭窄的 PFZs 提高了合金的耐腐蚀性。

Zhang Z. G. 等^[37]对 7055 合金进行了如图 2 所示的 SAT 处理后,组织中大量细小的 η' 相大大提高了合金的力学性能。时效时间为 4 h,合金强度随着施加应力的增加而逐渐增加,当应力为 150 MPa 时,合金强度最高(UTS 为 699.1 MPa,YS 为 676.3 MPa);应力为 150 MPa 时,随着时效时间的增加,UTS 和 YS 先增大后减小,合金强度在时效 2 h 时达到峰值(UTS 为 710.8 MPa,YS 为 664.4 MPa)。

M. A. Khan 等^[38]发现,Al-8.0Zn-2.0Mg-2.1Cu-0.13Zr 合金在峰值时效(120 °C /24 h)后(样品 A1),小角度晶界上的析出相以 θ'' (Al₂Cu) 为主,并伴随少量的 η' 相;在 120 °C /48 h 时效后(样品 A2),晶界析出相主要为沿小角度晶界分布的相和

沿大角度晶界分布的 θ'' 、 η' 和 η 相。与挤压态(YS-193 MPa)对比,A1 样品(YS-690 MPa)的屈服强度提高了 72%。A2 样品可能因为在小角度晶界上存在半共格 θ'' 相,导致强度没有 A1 样品高;但由于 A2 样品晶界析出相长大和无沉淀析出带的消失,导致其伸长率(16%)比 A1 样品(13%)的高。

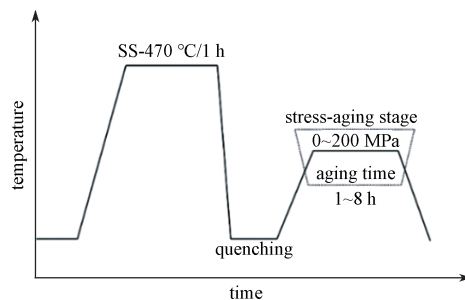


图 2 应力时效处理工艺流程图

Fig. 2 Process flow chart of stress stage aging treatment

2.3.2 分级时效处理

Al-Zn-Mg-Cu 系合金常用的分级时效工艺是 T7X 处理。T7X 状态对应 η' 相的粗化和 η 相生成,此时合金的抗腐蚀能力有所提高,但强度会有所下降,因而其更具有实际应用价值^[39]。从早期单纯追求强度到之后追求强度、韧性及耐蚀性能的良好匹配,目前已开发出多种 T7X 处理工艺。Wen K. 等^[40]对 Al-9.78Zn-2.04Mg-1.76Cu-0.11Zr 合金进行了不同的时效处理,研究结果如表 2 所示。T6 样品的抗拉强度、屈服强度和硬度高于 T76、T74、T73 样品,但 T6 样品的电导率最低;T6 样品的伸长率比 T79 样品高,但皆低于其余时效样品;T7X 时效样品随着时效程度加深,抗拉强度和屈服强度逐渐降低,但延伸率和电导率逐渐升高。

表 2 文献[40]中 Al-Zn-Mg-Cu 系合金的时效处理结果

Table 2 Aging treatment results of Al-Zn-Mg-Cu alloy in reference [40]

状态	时效工艺参数	硬度 /HV	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 /%	电导率 /(MS·m ⁻¹)
T6	120 °C /24 h	210.4	702	654	12.0	17.4
T79	110 °C /8 h+160 °C /5 h	209.0	678	666	10.8	20.5
T76	110 °C /8 h+160 °C /9 h	198.3	643	626	13.3	21.1
T74	110 °C /8 h+160 °C /14 h	186.2	614	586	13.6	22.1
T73	110 °C /8 h+160 °C /24 h	173.7	576	533	14.3	24.1

M. A. Khan 等^[41]探讨了喷射成形 7055 合金经过热成型工艺(锻压和挤压)以及 T6 处理(393 K/24 h)、T74 处理(393 K/6 h+433 K/12 h)、T73 处理(393 K/8 h+433 K/24 h)下的微观结构和不同温度的拉伸

性能。发现 T6 态合金中产生了大量的细小析出相,其室温抗拉强度和屈服强度分别可以达到 784 MPa 和 700 MPa,同时表现出良好的塑性。T73 和 T74 态合金中的析出相比 T6 态的尺寸更大;当拉伸温度从

室温升至 300 K 时, T73 和 T74 态合金依旧表现出较高的抗拉强度和延展性。

Zhou P. 等^[42]提出了如图 3 所示的两级时效耦合变形工艺。结果表明:在较短的预时效时间下,当变形量达到一定值时,位错诱导的析出可以促进合金强度提高;第二级时效过程中,高密度细小的 η 相快速析出,进一步提高了合金强度。预时效 120 °C /2 h-变形 10%-二级时效 160 °C /0.5 h (YS-555.9 MPa) 条件下,拉伸强度比 T6 (YS-545 MPa) 条件下的提高了 1.99%,时效时间缩短了 89.58%。

A. Ditta 等^[43]研究了喷射成形挤压态高 Zn 含量 Al-Zn-Mg-Cu 系合金的单级时效和双级时效特性。结果表明:单级时效合金的显微组织呈现出以 η' 相为主的细小弥散的高体积分分数晶内析出相,并且显示出连续的 GBPs,没有明显的 PFZs,强度最高,但延伸率最低。双级时效的预时效阶段 (peak-aged, PA),合金中出现高密度的细小晶内析出相;而在第二级时效 (dual-peak aged, DA) 下,这些细小析出相逐渐转变成稳定的 η 相,GBPs 变得不连续,PFZs 不断扩大,合金强度随着第二级时效时长增加而逐渐降低,但延伸率逐渐增大。两种时效处理下

Al-Zn-Mg-Cu 系合金的特性如表 3 所示。

GP 区通常被认为是在室温时效和人工时效早期阶段形成的析出相^[44]。基于此,Zhao J. G. 等^[45]对比了如图 4 所示的不同时效处理对 Al-Zn-Mg-Cu 系合金的影响。结果表明:T6 时效后 Al-Zn-Mg-Cu 系合金的力学性能最优,而 RRA (retrogression and re-aged) 和三级时效样品的耐腐蚀性能最强。此外,四级时效样品表现出与 T6 态相近的力学性能的同时,兼具接近 RRA 和三级时效样品的耐腐蚀性能。

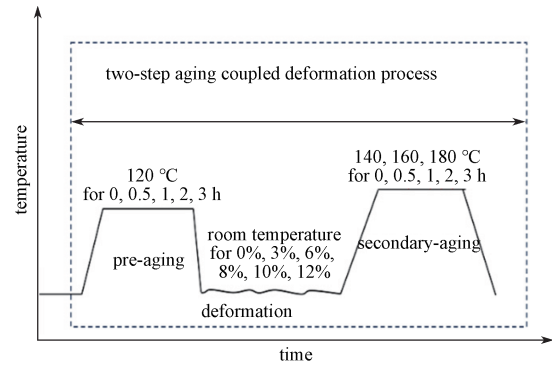


图 3 两级时效耦合变形工艺流程图

Fig. 3 Process flow chart of two-stage aging coupling deformation

表 3 文献 [43] 中 Al-Zn-Mg-Cu 系合金的时效处理结果

Table 3 Aging treatment results of Al-Zn-Mg-Cu alloy in reference [43]

时效处理名称	时效状态	硬度 /HV	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 /%
PA	120 °C /16h	224	823	807	5.5
DA	110 °C /4 h	208	764	730	7.4
DA-2 h	PA+150 °C /2 h	216	782	773	5.8
DA-6 h	PA+150 °C /6 h	207	749	714	7.8
DA-12 h	PA+150 °C /12 h	192	674	668	8.6
DA-16 h	PA+150 °C /16 h	182	628	607	11.0

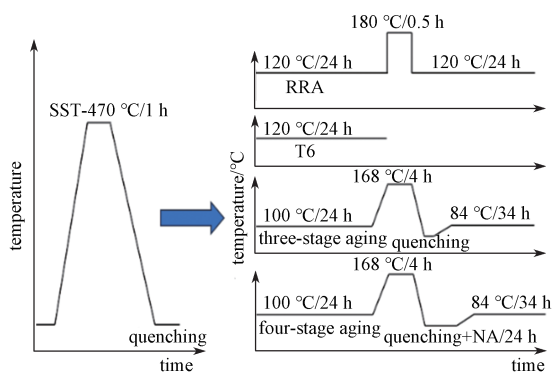
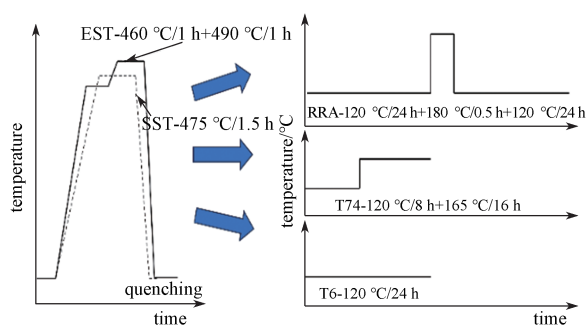


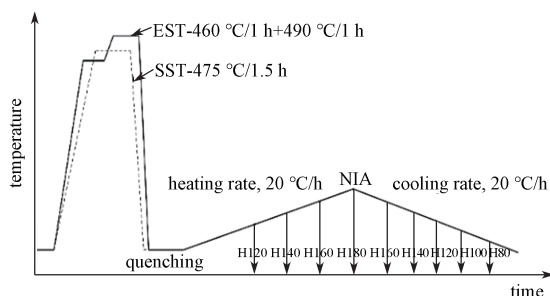
图 4 多种时效处理工艺流程图

Fig. 4 Flow chart of various aging treatment processes

Wang W. Y. 等^[46]建立了一种强化固溶处理 (enhanced solution treatment, EST) + 非等温时效处理 (non-isothermal aging treatment, NIA) 相结合的热处理方法,并与单级固溶 (single-stage solution treatment, SST) + 时效处理 (T6, T74, RRA) 对比,实验参数及步骤如图 5 所示。结果表明 NIA 可以有效促进细小的 GP I 区、 η' 相和少量 η^2 相的生成。此外,不连续的晶界析出相形成 PFZs,大大提升了合金的耐腐蚀性能。由于在强化固溶处理 +20 °C / h 时效工艺的样品中,晶内和晶界上均析出有大量细小的析出相,表现出与 SST-T6 态相近的良好力学性能和类似于 T74 态的耐腐蚀性能,而且时效用时更短。



a) EST+传统时效处理



b) EST+NIA 工艺流程图

图 5 文献 [46] 中热处理工艺流程

Fig. 5 Heat treatment process in reference [46]

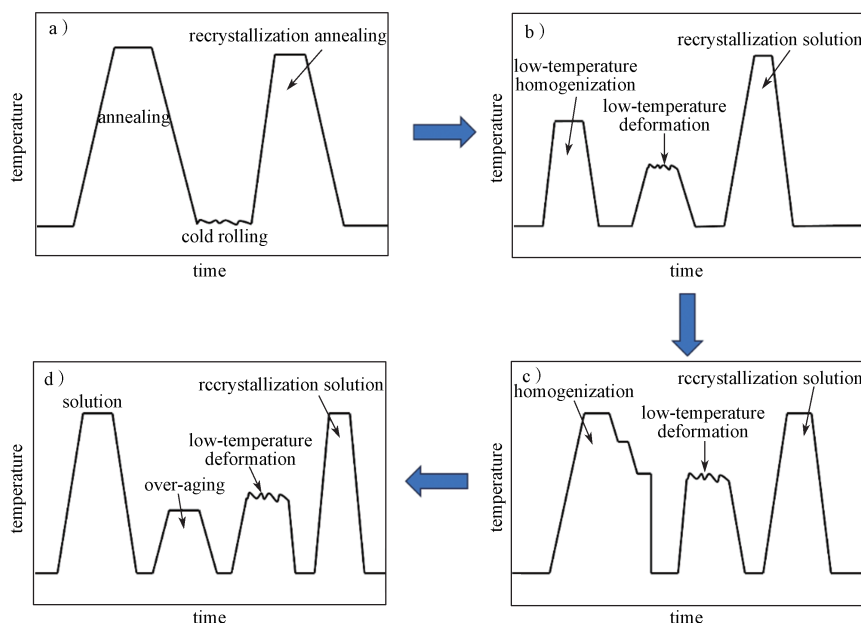
为了获得单级时效的高强度和双级时效的高抗应力腐蚀性能的最佳配合, 将时效后的铝合金在较高的温度下保温使其硬度和强度下降到固溶处理的水平, 然后再进行时效处理, 这种分级时效工艺叫回归再时效处理。

Xiong H. Q. 等^[47] 针对 7050 合金提出了一种新的回归再时效制度, 在回归过程中, 以不同的回归升温速率将预时效合金从室温加热至 190 °C, 然后快速冷却之后进行再时效处理。随着回归升温速率的增加, 析出相的尺寸和无析出带的宽度减小, 合金的力学性能提高, 但耐蚀性降低。当回归升温速率控制在 3 °C/min 时, η' 相均匀分布, 而 η 相发生粗化, 此时 7050 合金表现出良好的强度和耐蚀性。

Qu L. F. 等^[48] 对比研究了单级时效处理、双级时效处理以及回归再时效处理对 Al-Zn-Mg-Cu-Sc-Zr 合金的影响, 发现随着温度的升高和回归时间的延长, 晶内析出相逐渐长大并从 GP 区 + η' 相转变为 η' 相 + η 相, 粗大晶界析出相的不连续性显著增加, PFZs 的宽度变宽。与传统的 T6 和 T74 处理相比, 在 160 °C/30 min 的回归处理下, 可以获得硬度为 168.5 HV、极限拉伸强度为 547 MPa 和良好耐腐蚀性能的优异组合。

2.4 形变热处理

形变热处理工艺通过形变强化和相变强化的综合作用来改变晶粒尺寸、位错密度和力学性能, 有望制备出高强度、高韧性与高抗腐蚀能力兼具的 Al-Zn-Mg-Cu 系合金^[49]。形变热处理可分为中间形变热处理 (intermediate thermo-mechanical treatment, ITMT) 和最终形变热处理 (final thermo-mechanical treatment, FTMT)^[50]。中间形变热处理发展路径如图 6 所示。



注: a) 为 ITMT; b) 为 ISML-ITMT; c) 为 FA-ITMT; d) 为 RI-ITMT。

图 6 中间形变热处理发展路线

Fig. 6 Development route of intermediate deformation heat treatment

ITMT (见图 6a) 是在合金均匀化后引入轧制变形, 通过轧制变形在大尺寸析出相周围形成强烈形变区, 通过固溶再结晶处理粒子激发再结晶形核效应细化晶粒尺寸。E. di Russo、张志森等^[51-52]所开发的如图 6b 所示的 ISML-ITMT 工艺, 可以使 7075 合金获得细小等轴晶粒, 提高断裂韧性和耐腐蚀性。J. Waldman 等^[53]采用如图 6c 所示的 FA-ITMT 工艺, 利用低温均匀化和低温形变析出大尺寸析出相来影响铝合金的再结晶行为。J. A. Wert 等^[54]结合 ISML-ITMT 和 FA-ITMT 的优势设计出如图 6d 所示的 RI-ITMT 工艺, 其主要利用过时效工艺析出大尺寸析出相, 减少形变热处理的时间。

在 FA-ITMT 的基础上, Mei L. 等^[55]研究了固溶-低温轧制-温轧-时效处理下 Al-Zn-Mg-Cu 系合金的组织、力学性能及耐腐蚀性能。结果表明: 合金在温轧过程中形成了大量富 Zn 的球形 GP 区, 这些 GP 区在后续时效过程中直接转变为 η 相且均匀分布在基体中。时效过程中, 合金中形成了超细亚晶, 高密度的析出相和位错与细晶相结合, 使得形变热处理后的合金具有更高的强度。此外, 温轧与时效的结合抑制了晶界析出相的形成, 有利于提高合金的耐腐蚀性能。

Chen Z. G. 等^[56]研究了新型形变热处理 (具体工艺流程如图 7a 所示) 对 Al-Zn-Mg-Cu 系合金的显微组织以及力学性能的影响, 发现预时效不对称轧制 (asymmetrical rolling, ASR) 后时效样品的极限抗拉强度、屈服强度以及伸长率分别为 (639 ± 0.4) MPa、 (605 ± 1.6) MPa、 $(13.4 \pm 0.2)\%$, 合金获得了超过 T6 态的拉伸强度, 同时保持了高伸长率和优良的抗应力腐蚀能力。

Wang Y. 等^[57]研究了如图 7b 所示的双变形阶段的特殊形变热处理 (special thermo-mechanical treatment, STMT) 工艺对 7185 合金组织演变和性能的影响机制。结果表明: 预变形阶段 (pre-deformation, PD) 增大预变形量可使球形析出相增多, 位错密度显著增大。中温沉淀 (medium-temperature precipitation, MTP) 过程可以将高密度位错胞转变为有序的位错墙, 并形成许多亚晶。最终热轧阶段 (final hot rolling, FHR) 之后, 析出相的数量再次增加, 球形颗粒明显多于棒状或圆盘状析出相, 微观剪切带由大量细小的亚晶规则排列。经过再结晶固溶和时效处理 (T6) 后, 合金由均匀细小等轴晶组成,

晶界析出相尺寸大且分布间距大, 所以该工艺处理的合金耐腐蚀性能和塑性均得到了提升。

Zuo J. R. 等^[58]用多级形变热处理工艺 (multi-step thermo-mechanical rolling, MSTR) 制备出了细晶 Al-Zn-Mg-Cu 板材, 具体工艺如图 7c 所示。结果表明 MSTR 工艺可以获得比传统形变热处理工艺更细的纵向晶粒尺寸和更好的力学性能。此外, 还观察到预变形可以促进高密度位错包裹析出相的球化; 高温短时中间退火过程中会形成大量有序亚结构; 热轧过程中, 预变形过程中形成的球形析出相会钉扎位错和晶界。随着累积应变的增加, 小角度晶界逐渐转变为大角度晶界, 从而导致晶粒细化。

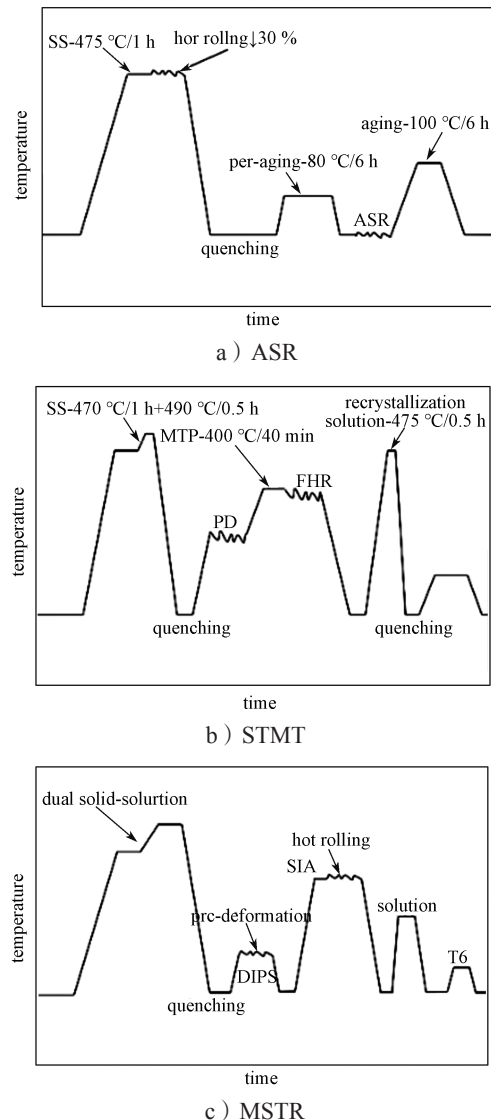


图 7 基于 FA-ITMT 变化的形变热处理工艺

Fig. 7 Deformation heat treatment process based on FA-ITMT change

Zuo J. R. 等^[59]为了获得细晶粒 Al-Zn-Mg-Cu 板材, 提出了一种热处理后双级轧制 (double-stage rolling thermo-mechanical treatment, DR-TMT) 的工艺, 具体工艺流程如图 8 所示。结果表明: 第一步温轧 (warm rolling, WR) 预变形过程产生的细小球形 $MgZn_2$ 相可钉扎位错, 从而抑制位错胞或晶粒的生长。在短时中间退火过程中可以形成新的细 (亚) 晶粒。最后, 这些亚晶界在最终高温轧制过程中稳定并转变为大角度晶界。第二步热轧 (hot rolling, HR) 后合金由细小的等轴晶粒组成, 还观察到了不连续的 GBPs 和狭窄的 PFZs。

Huo W. T. 等^[60]提出了一种能同时细化晶粒、提高延伸率和保证强度的简单热机械处理 (W-TMT) 工艺, 包括固溶、温轧、连续轧制和再结晶退火。该工艺主要通过变形诱导粗的 $MgZn_2$ 颗粒析出, 为再结晶创造了优先形核点, 调整这些颗粒的尺寸可以有效地调节或控制最终晶粒尺寸, 从而制备出超细晶 AA7075 合金。在 85% 的总压下量下, 与传统轧制相比, W-TMT 加工板材的晶粒尺寸可降至不超过 $10\ \mu\text{m}$, W-TMT 加工的细晶粒板材的断裂伸长率显著提高至 18.5%, 而粗晶粒热轧板材的断裂伸长率为 13.1%。

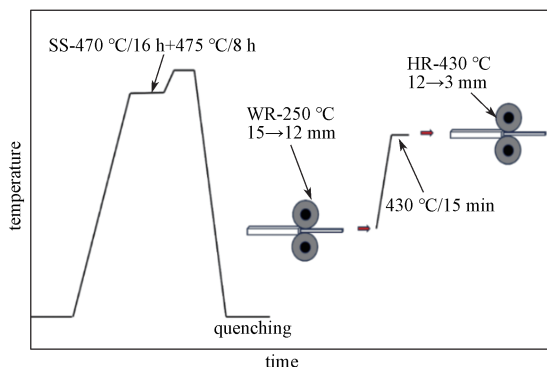


图 8 热处理后双步轧制工艺流程图

Fig. 8 Process flow chart of double-stage rolling thermo-mechanical treatment

3 结论

综上所述, 可得如下结论:

1) Zn 含量的提高会引起 Al-Zn-Mg-Cu 系合金中 α -Al 基体枝晶形貌、尺寸以及晶间共晶组织的变化, 但不影响合金的组成相, 但目前暂未建立起 Zn 含量 - 组织演变 - 力学性能之间的关系模型。

2) 不同热处理工艺对 Al-Zn-Mg-Cu 系合金的组

织和性能有不同的影响。多级均匀化、多级固溶处理和形变热处理工艺的优势日渐明显。因此, 开发新的热处理技术有望获得强度、韧性和耐腐蚀性最佳组合的合金。

3) 迄今为止, 高 Zn 含量的 Al-Zn-Mg-Cu 系合金在热处理过程中, 关于 Zn 原子对组织和性能的影响机理探索还不够深入; 缺少对 Zn 含量、热处理工艺条件与组织性能之间的相关性的探索; 尚未建立起 Zn 含量 - 工艺条件 - 组织演变 - 力学性能之间的关系模型。

对上述机理的深入研究以及相关模型的建立将更有利于挖掘高 Zn 含量 Al-Zn-Mg-Cu 系合金的潜能, 为科学预测、指导和控制合金强韧化过程, 开发超高强韧 Al-Zn-Mg-Cu 系合金提供支持。

参考文献:

- [1] LUKASAK D A, HART R M. Strong Aluminum Alloy Shaves Airframe Weight[J]. Advanced Materials & Processes, 1991, 140(4): 46-49.
- [2] WEI Q, XIONG B Q, ZHANG Y A, et al. Production of High Strength Al-Zn-Mg-Cu Alloys by Spray Forming Process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2001, 11(2): 258-261.
- [3] SRIVASTAVA V C, MANDAL R K, OJHA S N. Microstructure and Mechanical Properties of Al-Si Alloys Produced by Spray Forming Process[J]. Materials Science and Engineering: A, 2001, 304/305/306: 555-558.
- [4] 郭 舒. 喷射沉积 Al-Zn-Mg-Cu 合金凝固行为及热加工过程组织演变 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011. GUO Shu. Solidification Behavior of Spray Deposited Al-Zn-Mg-Cu Alloys and Their Microstructural Evolution During Thermal Processing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [5] WEN K, XIONG B Q, ZHANG Y A, et al. Aging Precipitation Characteristics and Tensile Properties of Al-Zn-Mg-Cu Alloys with Different Additional Zn Contents[J]. Rare Metals, 2021, 40(8): 2160-2166.
- [6] KHAN M A, WANG Y W, YASIN G, et al. Adiabatic Shear Band Localization in an Al-Zn-Mg-Cu Alloy Under High Strain Rate Compression[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(3): 3977-3983.
- [7] YUAN J, ZUO M, SOKOLUK M, et al. Nanotreating High-Zinc Al-Zn-Mg-Cu Alloy by TiC Nanoparticles[EB/OL]. [2023-10-21]. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-36408-3_46.

- [8] LIU Y, ZHANG C C, ZHANG X Y, et al. Understanding Grain Refinement of Sc Addition in a Zr Containing Al-Zn-Mg-Cu Aluminum Alloy from Experiments and First-Principles[J]. *Intermetallics*, 2020, 123: 106823.
- [9] CHEN Z Y, MO Y K, NIE Z R. Effect of Zn Content on the Microstructure and Properties of Super-High Strength Al-Zn-Mg-Cu Alloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2013, 44(8): 3910–3920.
- [10] YUAN D L, CHEN S Y, CHEN K H, et al. Correlations Among Stress Corrosion Cracking, Grain-Boundary Microchemistry, and Zn Content in High Zn-Containing Al-Zn-Mg-Cu Alloys[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2021, 31(8): 2220–2231.
- [11] LIU J T, ZHANG Y A, LI X W, et al. Phases and Microstructures of High Zn-Containing Al-Zn-Mg-Cu Alloys[J]. *Rare Metals*, 2016, 35(5): 380–384.
- [12] TAN P, SUI Y D, JIN H N, et al. Effect of Zn Content on the Microstructure and Mechanical Properties of As-Cast Al-Zn-Mg-Cu Alloy with Medium Zn Content[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 18: 2620–2630.
- [13] JIANG H T, XING H, XU Z H, et al. Effect of Zn Content and Sc, Zr Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Al-Zn-Mg-Cu Alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 947: 169246.
- [14] TANG J, WANG J H, TENG J, et al. Effect of Zn Content on the Dynamic Softening of Al-Zn-Mg-Cu Alloys During Hot Compression Deformation[J]. *Vacuum*, 2021, 184: 109941.
- [15] MENG X N, ZHANG D T, ZHANG W W, et al. Microstructure and Mechanical Properties of a High-Zn Aluminum Alloy Prepared by Melt Spinning and Extrusion[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 819: 152990.
- [16] MENG X N, ZHANG D T, ZHANG W W, et al. Influence of Solution Treatment on Microstructures and Mechanical Properties of a Naturally-Aged Al-27Zn-1.5Mg-1.2Cu-0.08Zr Aluminum Alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 802: 140623.
- [17] FAN Y Q, LI Z H, LI X W, et al. Investigation on As-Cast Microstructure in a High Zn-Containing Al-Zn-Mg-Cu-Zr Alloy and Its Evolution During Two-Stage Homogenization[EB/OL]. [2023-10-19]. <https://www.xueshufan.com/publication/2670767429>.
- [18] 赵鸿金, 曾文锋, 孔 军, 等. 7055 铝合金多级均匀化工艺研究 [J]. *有色金属科学与工程*, 2013, 4(3): 49–53.
- [19] ZHAO Hongjin, ZENG Wenfeng, KONG Jun, et al. Multi-Level Homogenization Technology of 7055 Aluminum Alloy[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2013, 4(3): 49–53.
- [20] XIE Z Q, JIA Z H, XIANG K Y, et al. Microstructure Evolution and Recrystallization Resistance of a 7055 Alloy Fabricated by Spray Forming Technology and by Conventional Ingot Metallurgy[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2020, 51(10): 5378–5388.
- [21] WANG X D, PAN Q L, LIU L L, et al. Characterization of Hot Extrusion and Heat Treatment on Mechanical Properties in a Spray Formed Ultra-High Strength Al-Zn-Mg-Cu Alloy[J]. *Materials Characterization*, 2018, 144: 131–140.
- [22] LIU J Z, CHEN J H, YUAN D W, et al. Fine Precipitation Scenarios of AlZnMg(Cu) Alloys Revealed by Advanced Atomic-Resolution Electron Microscopy Study Part I: Structure Determination of the Precipitates in AlZnMg(Cu) Alloys[J]. *Materials Characterization*, 2015, 99: 277–286.
- [23] 向开云, 丁立鹏, 贾志宏, 等. 喷射成形超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金研究进展 [J]. *中国有色金属学报*, 2022, 32(5): 1199–1223.
- [24] XIANG Kaiyun, DING Lipeng, JIA Zhihong, et al. Research Progress of Ultra-High Strength Spray-Forming Al-Zn-Mg-Cu Alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2022, 32(5): 1199–1223.
- [25] 刘文义, 胡小会, 李 军. 7085 超高强铝合金的研究进展 [J]. *热加工工艺*, 2021, 50(8): 10–14.
- [26] LIU Wenyi, HU Xiaohui, LI Jun. Research Progress of 7085 Ultra-High Strength Aluminum Alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2021, 50(8): 10–14.
- [27] BAO G N, XU X J, HUA Y Q, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Al-11.3Zn-3.2Mg-1.3Cu-0.2Zr-0.1Sr-xTi Extruded Aluminum Alloy with Different Aging Process[J]. *Journal of Wuhan University of Technology(Mater Science Edition)*, 2023, 38(5): 1161–1168.
- [28] XIANG K Y, LEI X C, DING L P, et al. Optimizing Mechanical Property of Spray Formed Al-Zn-Mg-Cu Alloy by Combination of Homogenization and Warm-Rolling[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 846: 143248.
- [29] DITTA A, WEI L J, XU Y J, et al. Effect of Hot Extrusion and Optimal Solution Treatment on Microstructure and Properties of Spray-Formed Al-11.3Zn-2.65Mg-1Cu Alloy[J]. *Journal of Alloys and*

- Compounds, 2019, 797: 558–565.
- [27] JIN W M, YU J H, ZHANG Z Q, et al. Study on Ultra-High Temperature Contact Solution Treatment of Al-Zn-Mg-Cu Alloys[J]. Metals, 2021, 11(5): 842.
- [28] ZHANG Z Q, YU J H, HE D Y. Influence of Contact Solid-Solution Treatment on Microstructures and Mechanical Properties of 7075 Aluminum Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 743: 500–503.
- [29] WANG Z X, JIANG H H, LI H, et al. Effect of Solution-Treating Temperature on the Intergranular Corrosion of a Peak-Aged Al-Zn-Mg-Cu Alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(3): 6497–6511.
- [30] XU D K, ROMETSCH P A, BIRBILIS N. Improved Solution Treatment for an As-Rolled Al-Zn-Mg-Cu Alloy. Part II. Microstructure and Mechanical Properties[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 534: 244–252.
- [31] YANG X B, CHEN J H, LIU J Z, et al. Spherical Constituent Particles Formed by a Multistage Solution Treatment in Al-Zn-Mg-Cu Alloys[J]. Materials Characterization, 2013, 83: 79–88.
- [32] ZHOU Q S, LI C, WANG T L, et al. Effect of Various Multi-Stage Solution Treatments on the Microstructure and Properties of Cold-Extruded Al-9.74Zn-2.59Mg-0.94Cu-0.2Zr-0.83Ti Alloy[J]. Journal of Materials Research, 2022, 37(21): 3731–3742.
- [33] LEE S H, JUNG J G, BAIK S I, et al. Precipitation Strengthening in Naturally Aged Al-Zn-Mg-Cu Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 803: 140719.
- [34] GUO W, YANG M, ZHENG Y, et al. Influence of Elastic Tensile Stress on Aging Process in an Al-Zn-Mg-Cu Alloy[J]. Materials Letters, 2013, 106: 14–17.
- [35] GUO W, GUO J Y, WANG J D, et al. Evolution of Precipitate Microstructure During Stress Aging of an Al-Zn-Mg-Cu Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 634: 167–175.
- [36] LIN Y C, ZHANG J L, CHEN M S. Evolution of Precipitates During Two-Stage Stress-Aging of an Al-Zn-Mg-Cu Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 684: 177–187.
- [37] ZHANG Z G, MA X W, ZHANG C S, et al. Effect of Stress-Aging Treatment on the Mechanical and Corrosion Properties of Al-Zn-Mg-Cu Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 838: 142791.
- [38] KHAN M A, XU C H, HAMZA M, et al. Enhanced Tensile Strength in an Al-Zn-Mg-Cu Alloy via Engineering the Precipitates along the Grain Boundaries[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 22: 696–705.
- [39] LIU X H, LIU Y Z, ZHOU Z G, et al. Enhanced Strength and Ductility in Al-Zn-Mg-Cu Alloys Fabricated by Laser Powder Bed Fusion Using a Synergistic Grain-Refining Strategy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 124: 41–52.
- [40] WEN K, FAN Y Q, WANG G J, et al. Aging Behavior and Precipitate Characterization of a High Zn-Containing Al-Zn-Mg-Cu Alloy with Various Tempers[J]. Materials & Design, 2016, 101: 16–23.
- [41] KHAN M A, WANG Y W, AFIFI M A, et al. Microstructure and Mechanical Properties of an Al-Zn-Cu-Mg Alloy Processed by Hot Forming Processes Followed by Heat Treatments[J]. Materials Characterization, 2019, 157: 109901.
- [42] ZHOU P, SONG Y L, LU J, et al. Novel Fast-Aging Process for Al-Zn-Mg-Cu Alloy Sheets and Its Micro-Mechanisms[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 856: 143996.
- [43] DITTA A, WEI L J, XU Y J, et al. Microstructural Characteristics and Properties of Spray Formed Zn-Rich Al-Zn-Mg-Cu Alloy Under Various Aging Conditions[J]. Materials Characterization, 2020, 161: 110133.
- [44] XIA P, LIU Z Y, BAI S, et al. Enhanced Fatigue Crack Propagation Resistance in a Superhigh Strength Al-Zn-Mg-Cu Alloy by Modifying RRA Treatment[J]. Materials Characterization, 2016, 118: 438–445.
- [45] ZHAO J G, LIU Z Y, BAI S, et al. Effects of Natural Aging on the Formation and Strengthening Effect of G.P. Zones in a Retrogression and Re-Aged Al-Zn-Mg-Cu Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 829: 154469.
- [46] WANG W Y, PAN Q L, WANG X D, et al. Non-Isothermal Aging: A Heat Treatment Method That Simultaneously Improves the Mechanical Properties and Corrosion Resistance of Ultra-High Strength Al-Zn-Mg-Cu Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 845: 156286.
- [47] XIONG H Q, ZHOU Y X, KONG C, et al. Effect of Retrogression Treatment with Different Heating Rates on Microstructure, Strength and Corrosion Behaviors of 7050 Alloy[J]. Materials Characterization, 2022, 186: 111819.
- [48] QU L F, PAN Q L, LIU B, et al. Influence of Aging Treatment on the Microstructure, Mechanical Properties

- and Corrosion Behavior of Al-Zn-Mg-Sc-Zr Alloy[J]. Vacuum, 2022, 200: 110995.
- [49] 范才河, 李彝会, 胡泽艺, 等. 超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金研究综述 [J]. 包装学报, 2021, 13(6): 62–72.
FAN Caihe, LI Yihui, HU Zeyi, et al. A Review on Ultra-High-Strength Al-Zn-Mg-Cu Alloy[J]. Packaging Journal, 2021, 13(6): 62–72.
- [50] LI J H, ZHANG Y B, LI M J, et al. Effect of Combined Addition of Zr, Ti and Y on Microstructure and Tensile Properties of an Al-Zn-Mg-Cu Alloy[J]. Materials & Design, 2022, 223: 111129.
- [51] di RUSSO E, CONSERVA M, BURATTI M, et al. A New Thermo-Mechanical Procedure for Improving the Ductility and Toughness of Al-Zn-Mg-Cu Alloys in the Transverse Directions[J]. Materials Science and Engineering, 1974, 14(1): 23–36.
- [52] 张志森, 刘家承, 刘 浩, 等. 铝合金形变热处理研究进展及发展趋势 [J]. 轻合金加工技术, 2023, 51(2): 1–14.
ZHANG Zhisen, LIU Jiacheng, LIU Hao, et al. Research Progress and Development Trend of Thermomechanical Treatment of Aluminum Alloys[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2023, 51(2): 1–14.
- [53] WALDMAN J, SULINSKI H V, MARKUS H. Processes for the Fabrication of 7000 Series Aluminum Alloys: US3847681[P]. 1974–11–12.
- [54] WERT J A, PATON N E, HAMILTON C H, et al. Grain Refinement in 7075 Aluminum by Thermomechanical Processing[J]. Metallurgical Transactions A, 1981, 12(7): 1267–1276.
- [55] MEI L, YANG M J, CHEN X P, et al. Precipitate Evolution and Properties of an Al-Zn-Mg-Cu Alloy Processed by Thermomechanical Treatment[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 867: 144716.
- [56] CHEN Z G, YUAN Z G, REN J K. The Mechanism of Comprehensive Properties Enhancement in Al-Zn-Mg-Cu Alloy via Novel Thermomechanical Treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 828: 154446.
- [57] WANG Y, LI Y, YU W, et al. Effect of a Special Thermo-Mechanical Treatment Process on Microstructure and Properties of 7185 Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 935: 168072.
- [58] ZUO J R, HOU L G, SHU X D, et al. Effect of Deformation on Precipitation and the Microstructure Evolution during Multistep Thermomechanical Processing of Al-Zn-Mg-Cu Alloy[J]. Metals, 2020, 10(11): 1409.
- [59] ZUO J R, HOU L G, SHI J T, et al. Enhanced Plasticity and Corrosion Resistance of High Strength Al-Zn-Mg-Cu Alloy Processed by an Improved Thermomechanical Processing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 716: 220–230.
- [60] HUO W T, SHI J T, HOU L G, et al. An Improved Thermo-Mechanical Treatment of High-Strength Al-Zn-Mg-Cu Alloy for Effective Grain Refinement and Ductility Modification[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 239: 303–314.

(责任编辑: 邓光辉)

Review of Recent Researches on Heat Treatment Technology of Al-Zn-Mg-Cu Alloy System with High Zn Content

WU Qin, LÜ Huaqin, FAN Caihe, NI Yumeng, HU Zeyi, WU Shuai

(College of Materials and Advanced Manufacturing, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: Recent researches of high Zn content (the mass fraction is not less than 7%) Al-Zn-Mg-Cu alloys were summarized, and recent status of the heat treatment technology (homogenization treatment, solid solution treatment, aging treatment, and thermo-mechanical treatment) of high Zn content Al-Zn-Mg-Cu alloys were introduced. The mechanism and influences of different heat treatment techniques on the microstructure and properties of high Zn content Al-Zn-Mg-Cu alloy were elucidated, and the development trend and the outlook of high Zn content Al-Zn-Mg-Cu alloy were prospected. It was expected to provide reference for the comprehensive performance improvements in Al-Zn-Mg-Cu alloys and the sustainable development of the aluminum alloy industry.

Keywords: high-Zn content; the Al-Zn-Mg-Cu alloy system; heat treatment technology