

超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金研究综述

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2021.06.009

范才河^{1,2} 李彝会³
胡泽艺¹ 沈彤¹
何文静¹

1. 湖南工业大学
材料与先进制造学院
湖南 株洲 412007
2. 安徽建业科技有限公司
研发中心
安徽 淮北 235000
3. 湖南工业大学
包装与材料工程学院
湖南 株洲 412007

摘要: 综述了超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金的元素构成及合金化机理, 介绍了超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金的先进制备技术和热处理技术, 阐述了超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金的制备原理和热处理强韧化机制, 展望了高 Zn 含量超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金的发展趋势和前景。旨在为超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金材料产业的持续发展提供理论参考。

关键词: Al-Zn-Mg-Cu 合金; 合金化; 制备技术; 热处理

中图分类号: TG146

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2021)06-0062-11

引文格式: 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.

0 引言

超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金(7×××系)具有密度低、强度高和热加工性能好等优点, 已被广泛应用于航空航天和轨道交通等领域^[1-5]。尤其在航空工业中占有非常重要的地位, 是航空工业的主要结构材料之一。目前, 世界各国飞机上的铝合金已经占到结构材料质量的 70%~80%, 其中大部分是超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金^[6]。随着国民经济和国防建设的发展, 对 Al-Zn-Mg-Cu 合金的性能提出了更高的要求。由于超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金具有极其优良的综合力学性能, 世界各国都非常重视对它的研究。

当前, 通过提高 Zn 含量同时降低杂质元素的含量来提升 Al-Zn-Mg-Cu 合金的性能, 已经成为研究者的共识。但是 Zn 含量的提升容易导致严重的宏观偏析、显微组织粗化和裂纹问题^[7-8]。为解决上述问题, 可采用快速凝固/粉末冶金、喷射成形和微/

纳米晶细化等技术来生产高溶质(主要是 Zn 元素)的超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金。同时, 研究者们也致力于研究超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金的均匀化、固溶、时效和形变热处理工艺, 以求达到强度和耐腐蚀性能的高度匹配。基于此, 本文综述了超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金的成分设计思路, 概述了制备技术和热处理方面的研究成果, 展望了高 Zn 含量超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金的发展前景, 以期对相关工程材料的设计研发提供有益的参考。

1 超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金的元素构成及合金化机理

1.1 主合金元素

1.1.1 Zn 和 Mg

在超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金中, Zn 和 Mg 元素被认为是最主要的强化元素。Zn 和 Mg 在合金中形成

收稿日期: 2021-05-05

基金项目: 公开竞争类重大科技成果工程化研发专项基金资助项目(202003c08020005); 2020 年高新技术产业科技创新引领计划(科技攻关类)基金资助项目(2020GK2045)

作者简介: 范才河(1976-), 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

沉淀强化相 η (MgZn_2) 和 T ($\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$) 相^[9-10], 这两种相在 Al 基体中具有较大的固溶度, 并且固溶程度会随着温度的升降而发生急剧变化。例如 MgZn_2 相在共晶温度下的固溶度可以达到 28%, 而在室温下仅为 4%~5%, 因而 η 相和 T 相具有很强的时效强化效果^[11]。

Zn/Mg 的质量比对超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金的强度和抗应力腐蚀能力有显著影响^[12]。刘胜胆等^[13]发现, 增大 $m(\text{Zn})/m(\text{Mg})$ 的比值可以弥补合金慢冷试样中空位浓度降低的不利影响, 促使 MgZn_2 沉淀强化相的均匀形核析出, 提高强化效果。W. Gruhl^[14]提出, 当 Zn/Mg 的质量比在 2.7~2.9 范围内, 即 Zn/Mg 质量比接近 T 相中 Zn/Mg 的质量比 (2.71) 时, 铝合金的综合性能最佳。另有学者认为, 当 Zn/Mg 的质量比约为 3.5 时, 铝合金的综合性能会更优^[15]。然而, 在不降低 Mg 和 Cu 含量的情况下增加 Zn 的含量, 当 Zn 的质量分数高于 7% 时, 合金中难溶解的结晶相数量会极速增多, 导致与韧性相关的性能显著降低, 并且抗腐蚀性能也会恶化^[16]。因此, 合理调控 Zn、Mg 元素的含量以及 Zn/Mg 的质量比才能得到性能优良的合金。

1.1.2 Cu

Cu 元素也是超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金中非常重要的合金元素。有文献^[17-19]表明, 在低 Zn-Mg 含量的 Al-Zn-Mg-Cu 合金中, Cu 含量的提高能有效增加析出物的数量, 同时也会增强材料的屈服强度和耐腐蚀性。然而, 在高 Zn-Mg 含量的 Al-Zn-Mg-Cu 合金中, Cu 含量的改变对合金性能和晶界析出相成分的影响仍有待研究。

T. Marlaud 等^[20]研究了 7150 (Al-6.2Zn-2.3Mg-2.2Cu)、7449 (Al-8.5Zn-2.2Mg-1.9Cu) 和 PA (Al-10.3Zn-2Mg-1.6Cu) 3 种合金的析出相成分, 发现在 Cu 含量最高的合金以及在最高温度下进行热处理

理的合金中, 析出相中的 Cu 含量较高。然而, T. Marlaud 等只关注于析出相成分, 并未对其性质进行研究。Dong P. X. 等^[21]成功制得了高 Zn-Mg 含量的 Al-9.3Zn-2.4Mg-xCu-Zr 合金, 并研究了 Cu 含量 (质量分数为 0.8%~2.2%) 对合金组织和性能的影响。结果表明, 在一定范围内 (1.8%~2.2%), 随着 Cu 含量的降低, 合金的力学性能提高。这是因为 Cu 含量在此范围内的降低, 导致残余共晶相的体积分数减少, 而晶界析出相中的 Cu 含量保持不变。当 Cu 的质量分数为 1.5% 时, 合金的力学性能较佳: 抗拉强度, 屈服强度, 延伸率分别为 753 MPa, 725 MPa 和 8.4%。

1.2 微量合金元素

随着对超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金研究的深入, 学者们发现, 在制备合金时添加微量元素能改善合金的微观组织, 从而有效提高合金的综合性能^[22]。目前, 常用的微量元素包括 Sc、Cr、Mn、Ti、Zr、Ag、Li、Ni、Sn、Sr 等^[23], 其中 Sc 元素是目前公认的细化晶粒和抑制再结晶效果最好的微量元素^[24-26], 但由于价格昂贵限制了其大规模的工业化应用^[27]。因此, 研究人员开始致力于使用相对便宜的稀土元素替代 Sc 元素, 这为探索新型超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金提供了新思路。

Wang M. 等^[28]研究了 Cr 和 Pr 的复合添加对 Al-Zn-Mg-Cu-Zr 合金组织和力学性能的影响。发现 Cr 和 Pr 的加入可以形成纳米级的 Al_3Zr (含 Cr 和 Pr) 和 $\text{PrCr}_2\text{Al}_{20}$ (含 Zr) 弥散相, 这些弥散相可以有效抑制再结晶和亚晶粒长大, 保留了以小角度晶界为主的回复组织。合金的化学成分和 T6 态的力学性能如表 1^[28] 所示。由表 1 可知, 添加微量的 Cr 和 Pr 元素后, AlZnMgCu-0.16Zr 合金的抗拉强度、屈服强度、延伸率和断裂韧性都得到了不同程度的加强。

表 1 合金的化学成分和力学性能

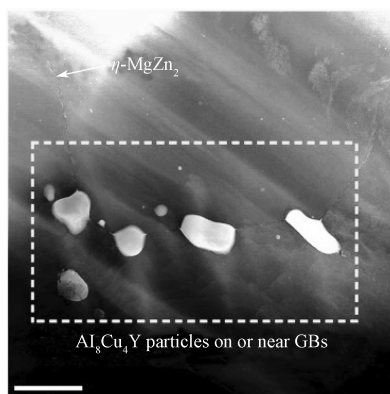
Table 1 Composition and mechanical properties of alloy

合金名称	合金成分质量分数 /%						合金力学性能			
	Zn	Mg	Cu	Zr	Cr	Pr	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	延伸率 /%	断裂韧性 $/(\text{MN} \cdot \text{m}^{-3/2})$
AlZnMgCu-Zr	8.6	2.5	2.2	0.16			719	701	8.5	23.7
Cr&Pr-containing	8.6	2.5	2.2	0.16	0.1	0.14	743	708	10.1	29.7

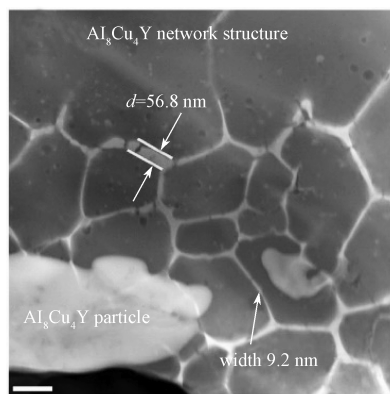
Li J. H. 等^[29]提出了一种基于 Kriging 模型改进的有效全局优化算法, 并将其应用于超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金的成分优化, 开发出了一种极限抗拉强

度为 950 MPa 的超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金, 合金成分为 Al-6.49Zn-2.52Mg-1.92Cu-0.25Zr-0.07Ti-0.29Y。研究发现, 在 T6 态合金中 $\text{Al}_6\text{Cu}_4\text{Y}$ 相具有两种不同

的形态^[29] (见图 1), 分别为晶界上或晶界附近的不规则颗粒和沿 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Y}$ 颗粒附近亚晶界的纳米网状结构, 细小 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Y}$ 颗粒可以稳定亚结构并抑制再结晶晶粒的生长, 这表明 Y 元素具有潜在的强化效应, 但 Li J. H. 等并未对 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Y}$ 纳米网状结构进行更深入的研究。由于 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Y}$ 网状结构的形成与 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Y}$ 颗粒密切相关, 因此控制两种结构 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Y}$ 相的比例以调配合金不同的性能应该是可行的, 这还有待进一步研究。



a) 不规则颗粒结构



b) 纳米网状结构

图 1 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Y}$ 相的两种不同形态

Fig. 1 Two different morphologies of $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Y}$

1.3 杂质元素

Fe 和 Si 是超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金中常见的杂质元素, 其在超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金中主要以 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ 、 $\text{Al}_{13}\text{Fe}_4$ (或 Al_3Fe) 和 $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ (或 $\alpha\text{-AlFeSi}$) 等杂质相的形式存在^[30]。这些相多数是尺寸大、熔点高的金属间化合物, 很难利用热处理的方法进行消除, 经热变形加工后破碎拉伸形成的带状脆性组织极易成为裂纹源^[31]。有文献^[32-33]表明, 当富 Fe 相和富 Si 相的尺寸减小到 $0.1 \mu\text{m}$ 以下时, 有利于合金的

断裂韧性和抗应力腐蚀性能; 而传统变形工艺的变形量有限, 很难使这些合金相的尺寸减到 $0.1 \mu\text{m}$ 以下。因此, 要严格控制 Fe、Si 元素在超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金中的含量, 把控好原材料的品质和熔炼铸造工艺。

2 先进制备技术

2.1 快速凝固 / 粉末冶金技术

快速凝固 / 粉末冶金工艺是应用较早的超高强铝合金制备技术^[34], 在 20 世纪 90 年代, 已有报道称日本学者成功利用该技术制得了抗拉强度在 700 MPa 以上的超高强铝合金, 但由于合金粉末烧结困难, 成本较高, 因而未能获得大规模的实际应用^[35]。

Ren J. 等^[36]采用气体雾化、预压和热挤压相结合的改进型粉末热挤压工艺, 制备了超高强 Al-Zn-Mg-Cu-Zr-Sc (7055) 合金, 在 T6 态的抗拉强度和延伸率分别达到了 734 MPa 和 9.8%。这种技术具有制造大尺寸铝合金板的能力, 是制备超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金较为理想的方式。Gao Y. Y. 等^[37]通过燃烧合成和热挤压的方式制备了 TiC_x 含量 (体积分数为 20%~30%) 不同的纳米 $\text{TiC}_x/\text{Al-Zn-Mg-Cu}$ 合金材料, 发现 TiC_x 体积分数为 30% 的 $\text{TiC}_x/\text{Al-Zn-Mg-Cu}$ 合金在 T6 态具有良好的综合性能。在此基础上, Yao X. H. 等^[38]进一步探讨了纳米 TiC 颗粒对 7085 合金力学性能的影响, 结果显示随着纳米 TiC 颗粒的质量分数从 0.1% 增加到 1.0%, T6 态试样的抗拉强度和屈服强度先升高后降低。当纳米 TiC 的质量分数为 0.5% 时, 试样的抗拉强度达到最大值 608 MPa。与未添加 TiC 的 7085 合金相比, 合金的抗拉强度提高了 16%。Cheng J. F. 等^[39]采用机械合金化和放电等离子烧结法制备了 Al-7Zn-2.5Mg-2.5Cu 合金, 并研究了球磨时间对烧结样品显微组织和力学性能的影响。结果表明, 随着球磨时间的增加, Zn、Mg、Cu 元素逐渐溶于 Al 基体中, 并形成了微米级的 Al_2Cu 相和纳米级的 MgZn_2 相。同时, 放电等离子体烧结样品的抗压强度逐渐增加, 30 h 球磨制备的烧结试样的抗压强度达到了 908 MPa。

2.2 喷射成形技术

喷射成形是一种先进的快速凝固技术, 已成功用于生产各种金属合金和复合材料^[40]。喷射成形可以提高合金元素的溶解度, 有较高的冷却速率 ($10^3 \sim 10^5 \text{ K/s}$), 可以促进晶粒细化和组织均匀, 消

除或限制宏观偏析^[41]。与快速凝固/粉末冶金技术相比, 喷射成形的复杂性较低, 工艺中涉及的制造步骤较少, 可以节省相当多的经济成本^[42]。因此, 喷射成形技术非常适合于工业化生产高溶质的 Al-Zn-Mg-Cu 合金。

A. Ditta 等^[43]利用喷射成形快速凝固技术制备了 Al-11.3Zn-2.65Mg-1Cu 合金, 并研究了合金的微观组织和力学性能。结果表明, 经人工时效至 T6 回火状态, 材料的屈服强度达到了 807 MPa。这主要是由于喷射成形和最佳固溶处理的累积效应, 固溶合金的高过饱和度使基体大量析出亚稳态相。Li H. C. 等^[44]通过喷射成形技术制备了具有不同 Mg+Cu 含量的 Al-Zn-Mg-Cu 合金, 并对其力学性能进行了研究。合金的化学成分如表 2^[44]所示, T6 态合金的力学性能如图 2^[44]所示。

表 2 合金的化学成分

Table 2 Chemical compositions of the alloys

合金试样	Zn	Mg	Cu	Al	$m(\text{Zn})/m(\text{Mg})$	Mg+Cu
1#	10.63	2.65	1.95	Bal.	4.00	4.60
2#	10.57	2.67	1.36	Bal.	4.00	4.03
3#	10.78	2.45	1.70	Bal.	4.50	4.15
4#	10.39	2.02	1.93	Bal.	5.00	3.95

注: 表中数据除第 6 列外均为质量分数, 单位为 %。

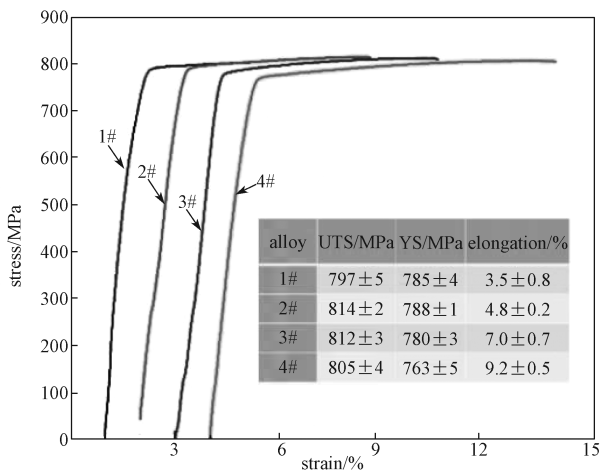


图 2 T6 态合金的力学性能

Fig. 2 Mechanical properties of the alloys after T6 heat treatment

由图 2 可知, 具有中等 Mg+Cu 含量的 3# 合金在 T6 处理后表现出了优异的力学性能: 极限抗拉强度、屈服强度和延伸率分别达到了 812 MPa、780 MPa 和 7.0%。他们认为是 Mg 含量的增加提高了析

出物的体积分数, 导致屈服强度提高和延伸率降低; 相比之下, Cu 对屈服强度的影响较小, 但对保持合金在过时效状态下的峰值强度有积极作用。

2.3 微/纳米晶细化技术

制备微/纳米晶超高强铝合金最早采用的是低温轧制和低温球磨技术^[45]。日本和美国分别报道过利用低温轧制和低温球磨技术制备微米级和纳米级的铝合金板材^[46-47], 后来逐渐发展出大塑性变形方法制备超细晶铝合金材料。有学者^[48]采用大塑性变形的的方式制备得到了超细晶 7075 合金, 获得的最小(亚)晶粒尺寸为 100 nm。通过此方法制备的铝合金通常拥有较高的强度, 但延伸率不高。为此, Chen X. 等^[49]通过交叉累积挤压结合后续的时效处理制备超细晶 Al-Zn-Mg-Cu 合金, 发现合金极限抗拉强度达到 562 MPa 的同时, 还能保持 21.5% 的延伸率。类似地, Huo W. T. 等^[50]提出了一种基于形变强化析出和再结晶粒子激发形核思想的形变热处理技术, 制备高延伸率的 AA7075 合金, 在热轧总压下率为 85% 的情况下, 制备的加工板材晶粒尺寸可以达到 10 μm 以下, T6 态的材料延伸率可高达 18.5%。

2.4 其他制备技术

除上述的先进制备技术外, 学者们还在实验室进行着新的尝试和开发。近年来涌现出了许多新的技术手段, 这些制备技术为超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金性能的提升成为可能, 为高强铝合金的应用开创更广阔的前景。

Zuo J. R. 等^[51]提出一种基于预变形、短时中间退火和终轧的改进机械双步热轧工艺, 用于制备细晶超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金, 制得的合金由于晶粒细化和晶界析出不连续, 晶粒结构比常规热轧样品更细小、更均匀, 具有更好的拉伸塑性和耐腐蚀性。Wang P. 等^[52]通过选择性激光熔化技术成功制备了一种高 Zn 含量的超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金, 发现合成的铝合金材料的硬度与均匀化处理后的铸造样品相似, T6 态合金的硬度高于相应的 T6 铸造样品, 这主要是由于经 T6 热处理后, 几乎所有的 η 相均回溶于 Al 基体中。Chen C. G. 等^[53]采用了一种改进的粉末冶金技术成功制备了超高强 Al-10Zn-3.5Mg-1.5Cu 合金, 并对其力学性能进行了分析。结果显示, 由于晶粒细化、时效和弥散强化的综合作用, 合金经热挤压和热处理后的极限抗拉强度、屈服强度和延伸率分别达到了 810 MPa、770 MPa 和 8%。

3 超高强 Al-Zn-Mg-Cu 系高强铝合金的热处理技术

3.1 均匀化处理

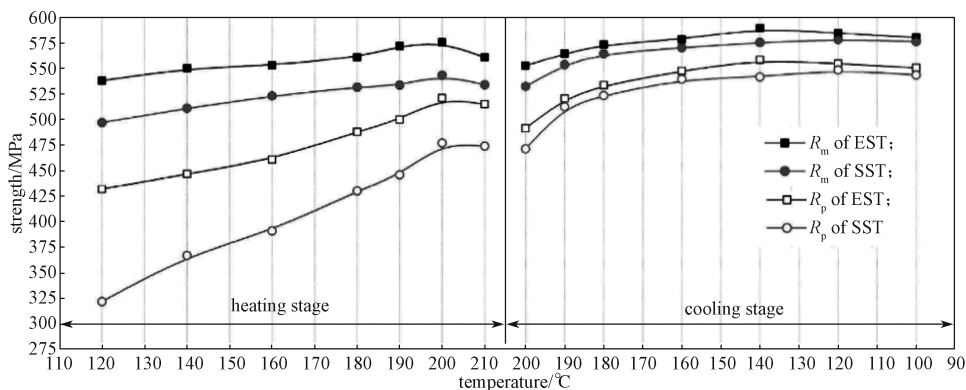
铸态超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金, 在凝固过程中会产生严重的枝晶偏析、枝晶间非平衡相等缺陷^[54]。均匀化就是在高温下通过原子的扩散来消除或减少实际结晶条件下的枝晶偏析、溶解非平衡相和沉淀过饱和元素, 使溶质的浓度更加均匀化^[55]。目前, 一级、二级和多级均匀化处理在超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金上的应用较为广泛^[56]。Deng Y. 等^[57]研究发现, 400 °C /10 h+473 °C /24 h+485 °C /4 h 均匀化处理可使 7050 合金中的 Al₂MgCu 相充分溶入基体。贾品峰等^[58]研究对比了一级、二级和三级均匀化处理对 7050 合金组织及性能的影响, 结果发现三级均匀化处理可以使第二相溶入基体中而不发生过烧。赵金国等^[59]对合金元素添加和均匀化的综合作用进行了研究, 结果表明, 含 Zr 7050 合金的冷凝过程中, 在约 470 °C 时优先析出的 Al₃Zr 能促进 α -Al 成核, 有利于成长出细化的初晶 α 晶粒, 起到晶粒细化的作用。

3.2 固溶处理

超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金固溶处理是为获得高浓度的过饱和固溶体, 同时改变合金过剩相的数量、晶

粒尺寸与形态, 为后续热处理做准备^[55]。固溶处理制度的发展经历了单级固溶到复合固溶的过程^[60]。常见的固溶强化有双级固溶、强化固溶和高温预析出^[61]。

Han N. M. 等^[62]在 7050 合金上进行的实验表明, 与单级固溶样品相比, 对样品进行双级固溶处理可以使残余相的溶解得到改善, 强度和断裂韧性更高。此外, Peng X. Y. 等^[63]研究了强化固溶对 7050 合金力学性能的影响, 其力学性能曲线如图 3 所示。由图 3 可见, 非等温时效后的多级强化固溶 7050 合金获得了比单级固溶+非等温时效更高的抗拉强度和屈服强度。高温预析出处理是在极限固溶温度保温一定时间后, 直接降低到稍低于极限固溶温度的某一温度并保温一定时间, 再进行淬火和时效处理^[54]。有文献表明^[61], 高温预析出能在晶界处提前析出过饱和固溶体, 使合金获得更好的抗腐蚀性能。但也有研究指出^[64], 高温预析出要求高温且所需时间较长, 而热处理时间过长容易导致原析出相团聚, 形成大尺寸析出相, 从而降低合金的性能。为此, Wang K. N. 等^[65]提出采用激光高温预析出法来代替传统的高温预析出法, 并研究了激光高温预析出对 AA7075 合金组织和力学性能的影响。研究发现, 用 1000 W 激光处理后可获得最佳的力学性能, 在基质中形成了更多的亚稳态相, 析出相分散在其中。



注: R_m 、 R_p 分别表示抗拉强度和屈服强度, EST、SST 分别代表单级固溶和强化固溶。

图 3 7050 铝合金在强化固溶、单级固溶+非等温时效处理后的力学性能

Fig. 3 Mechanical property curves of 7050 aluminum alloy after enhanced solution treatment(EST), single-stage solution treatment(SST) + non-isothermal aging

3.3 时效处理

获得峰值强度最常规的时效处理方式是单级时效 (T6), 在 T6 峰值时效状态下很容易获得高强度, 但是极易发生应力腐蚀而开裂^[66]。为了降低这种敏感性, 可以进行先低温后高温的双级时效处理

(T7x), 但是会牺牲 10%~15% 的强度^[67]。为避免强度损失, 同时提高耐腐蚀性能, 出现了回归再时效 (retrogression and re-aging, RRA) 的处理方式。RRA 处理可以在材料强度损失较小的情况下改善 Al-Zn-Mg-Cu 合金的抗应力腐蚀性能^[68]。RRA 处理工

艺如图 4^[69] 所示。由图 4 可以看出, RRA 处理工艺包含 3 个时效阶段: 1) 将合金处理至 T6 峰值时效状态的预时效热处理; 2) 在高温下对合金进行短时间的处理, 使预时效过程中形成的部分沉淀物重新溶解的回归热处理; 3) 合金在较低温度下处理较长时间的再时效热处理。M. Shakouri 等^[70] 研究比较了 RRA 和 T6 峰值时效对 Al-Zn-Mg-Cu 合金力学性能和抗腐蚀性能的影响, 发现 RRA 处理后试样的强度和抗腐蚀性能均高于 T6 峰值时效态试样。类似地, Lu J. T. 等^[71] 在实验中发现, 相较于 T73 热处理工艺, 经 RRA 处理后, 合金在保持较高延伸率的条件下, 抗拉强度和屈服强度均得到了回升。

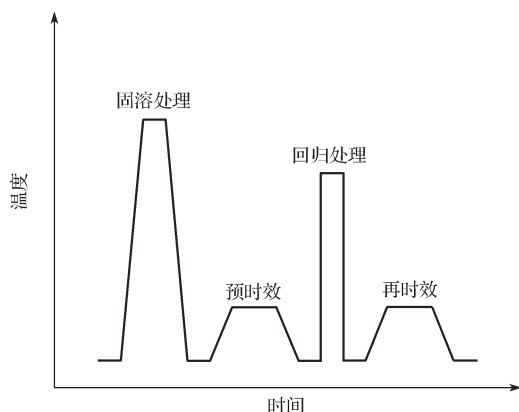


图 4 RRA 处理工艺示意图

Fig. 4 Schematic diagram of RRA treatment process

3.4 形变热处理

在制备超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金的过程中, 强度、韧性、抗腐蚀性能通常不能兼顾。有研究指出, 由固溶-冷轧-时效组成的形变热处理 (thermo-mechanical treatment, TMT) 能有效提高铝合金的位错密度和细化晶粒尺寸^[72-73], 有望实现高强、高韧和高抗腐蚀性 Al-Zn-Mg-Cu 合金的制备。但由于 Al-Zn-Mg-Cu 合金存在高层错能, 使用传统的 TMT 无法获得超细晶组织 (晶粒尺寸 $d < 30 \mu\text{m}$)^[74]。近年来, 出现了一些改进的形变热处理方法。

Chen Z. G. 等^[75] 提出了一种新型形变热处理 (novel thermo-mechanical treatment, NTMT: 固溶、热轧、淬火、预时效、冷轧、最终时效) 来制备 Al-Zn-Mg-Cu 合金, 并研究了合金的力学性能和涉及的机制。结果表明, NTMT 在 Al-Zn-Mg-Cu 合金中实现了强度、韧性和抗腐蚀性能的良好结合。NTMT 试样强度的提高是位错强化、纳米析出、纹理构型

和共簇强化协同作用的结果。Zuo J. R. 等^[74] 设计了一种新的短循环形变热处理 (double-stage rolling thermo-mechanical treatment, DRTMT), 用于生产 7055 合金。由于合金在 DRTMT 过程中大多在相对较高的温度下变形, 屈服强度较低, 成形能力较好。与传统的 TMT 相比, DRTMT 具有更高的效率、更节能也更省时。

4 高 Zn 含量超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金研究现状

超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金的发展与航空航天事业密切相关。目前, 应用于航空航天领域的 Al-Zn-Mg-Cu 合金材料中 Zn 的质量分数为 5%~9%^[76]。有研究指出, 合金的强度随着析出相体积分数的变化而变动, 而析出相体积分数主要受 Zn 含量的影响^[43]。Sharma M. M. 等^[77] 对不同 Zn 含量的喷射成型 Al-Zn-Mg-Cu 合金进行了比较, 结果显示, 随着 Zn 含量的上升, 析出相体积分数会相应增大。类似地, Chen Z. Y. 等^[78] 对通过半连续铸造技术生产的 3 种不同 Zn 含量 (质量分数为 9%~11%) 合金进行了对比实验, 发现 Zn 含量越高相应的析出相体积分数也越高。这表明, 提高 Al-Zn-Mg-Cu 合金强度可以通过增加 Zn 含量的方式实现。

另有研究^[79] 显示: 超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金中的 Zn 的质量分数为 9.5%~11.5% 时, 近似 T6 态下的合金强度可以突破 800 MPa。Chen Z. Y. 等^[78] 进一步指出, 随着 Zn 的质量分数从 9% 增加到 10%, 超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金的强度会相应地增加, 当 Zn 质量分数为 10%~11% 时, 合金的强度基本保持不变。然而, 随着 Zn 含量的增加, 超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金的成形性和可加工性会显著降低^[80-81], 从而限制了它的应用。为了解决这一限制问题, 通常选择热塑性变形来加工超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金, 因为成形温度的提高有助于提高其延伸率。Tang J. 等^[82] 研究了 Zn 含量对超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金热塑性变形过程中动态软化的影响, 在变形温度为 300 °C 和 400 °C 以及应变速率为 0.01 s^{-1} 和 0.1 s^{-1} 的条件下, 对 Zn 含量不同的超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金进行了单轴热挤压实验。结果发现, 随着 Zn 含量的增加, 变形初期的加工硬化行为加快, 合金的峰值应力和热变形活化能先增大后减小。变形温度为 300 °C 时的动态软化

过程增强,而在 400 °C 时动态软化行为因 Zn 含量的增加而减缓。这为进一步提升高 Zn 含量超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金的性能提供了新思路。

5 结语

超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金的发展趋势是追求高强、高韧和抗腐蚀。其新型合金可以通过优化合金配比和熔炼工艺、添加或替换新的合金元素、采用新的制备技术和热处理工艺等途径来开发。近年的研究方向概括为以下几个方面。

1) 合金的综合力学性能主要受 Zn/Mg 质量比的影响,但目前与最优综合力学性能相对应的 Zn/Mg 质量比的取值仍存在争议。

2) 微合金元素能有效提高合金的力学性能,将机器学习与超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金成分设计跨学科结合,以探索最佳的微合金化设计。

3) 新的制备技术能够细化晶粒、抑制偏析和促进组织均匀,故而开发新的制备技术能有效改善超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金的力学性能。

4) 通过热处理调控析出相的形态和分布可以优化超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金的力学性能。

然而,迄今关于高 Zn 含量超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金固溶机制、强化机理等尚不够深入,热塑性变形条件下高固溶 Zn 原子对组织和性能的影响机理还有待进一步探索。对上述理论和机理的深入研究和探索,将有利于充分挖掘高 Zn 含量超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金的应用潜能,探索出适合高 Zn 含量超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金的热塑性变形工艺,从而开发出超高强高韧的先进铝合金材料。

参考文献:

- [1] CHEN H S, WANG W X, LI Y L, et al. The Design, Microstructure and Mechanical Properties of B4C/6061Al Neutron Absorber Composites Fabricated by SPS[J]. Materials & Design, 2016, 94: 360-367.
- [2] MOBASHERPOUR I, TOFIGH A A, EBRAHIMI M. Effect of Nano-Size Al₂O₃ Reinforcement on the Mechanical Behavior of Synthesis 7075 Aluminum Alloy Composites by Mechanical Alloying[J]. Materials Chemistry and Physics, 2013, 138(2/3): 535-541.
- [3] HE Y D, ZHANG X M, YOU J H. Effect of Minor Sc and Zr on Microstructure and Mechanical Properties of Al-Zn-Mg-Cu Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(5): 1228-1235.
- [4] BARADESWARAN A, PERUMAL A E. Influence of B₄C on the Tribological and Mechanical Properties of Al 7075-B₄C Composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 54: 146-152.
- [5] HEINZ A, HASZLER A, KEIDEL C, et al. Recent Development in Aluminium Alloys for Aerospace Applications[J]. Materials Science and Engineering: A, 2000, 280(1): 102-107.
- [6] SUN H, YANG X. Development of Super High Strength Aluminum Alloy[J]. Mechanical Engineer, 2007, 9: 41-42.
- [7] JIA Y D, CAO F Y, NING Z L, et al. Influence of Second Phases on Mechanical Properties of Spray-Deposited Al-Zn-Mg-Cu Alloy[J]. Materials & Design, 2012, 40: 536-540.
- [8] BAI P C, HOU X H, ZHANG X Y, et al. Microstructure and Mechanical Properties of a Large Billet of Spray Formed Al-Zn-Mg-Cu Alloy with High Zn Content[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 508(1/2): 23-27.
- [9] XU X S, ZHENG J X, LI Z, et al. Precipitation in an Al-Zn-Mg-Cu Alloy During Isothermal Aging: Atomic-Scale HAADF-STEM Investigation[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 691: 60-70.
- [10] STYLES M J, BASTOW T J, GIBSON M A, et al. Substitution of Cu and/or Al in η Phase (MgZn₂) and the Implications for Precipitation in Al-Zn-Mg-(Cu) Alloys[J]. Intermetallics, 2014, 49: 40-51.
- [11] 张 颢. 合金元素对 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织和性能的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
ZHANG Xie. Effect of Alloying Elements on the Structure and Properties of Al-Zn-Mg-Cu Alloy[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [12] 温 凯, 熊柏青, 张永安, 等. 高 Zn 含量 Al-Zn-Mg-Cu 合金均匀化过程中显微结构演变研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(4): 928-934.
WEN Kai, XIONG Baiqing, ZHANG Yongan, et al. Microstructure Evolution of a High Zinc Containing Al-Zn-Mg-Cu Alloy During Homogenization[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(4): 928-934.
- [13] 刘胜胆, 尹邦文, 李东锋, 等. Zn 与 Mg 质量比对 Al-Zn-Mg-Cu 合金淬火敏感性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(7): 2242-2248.
LIU Shengdan, YIN Bangwen, LI Dongfeng, et al. Effect of Mass Ratio of Zn to Mg on Quench Sensitivity of Al-Zn-Mg-Cu Aluminum Alloys[J]. Journal of Central

- South University (Science and Technology), 2016, 47(7): 2242-2248.
- [14] GRUHL W. Stress-Corrosion Cracking of High-Strength Aluminum-Alloys[J]. Zeitschrift für Metallkunde, 1984, 75(11): 819-826.
- [15] ELAGIN V I, ZAKHAROV V V, ROSTOVA T D. Scandium-Alloyed Aluminum Alloys[J]. Metal Science and Heat Treatment, 1992, 34(1): 37-45.
- [16] 丛福官, 赵刚, 田妮, 等. $7 \times \times \times$ 系超高强铝合金的强韧化研究进展及发展趋势[J]. 轻合金加工技术, 2012, 40(10): 23-33.
- CONG Fuguan, ZHAO Gang, TIAN Ni, et al. Research Progress and Development Trend of Strengthening-Toughening of Ultra-High Strength $7 \times \times \times$ Aluminum Alloy[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2012, 40(10): 23-33.
- [17] LIN F S, STARKE JR E A. The Effect of Copper Content and Degree of Recrystallization on the Fatigue Resistance of $7 \times \times \times$ -Type Aluminum Alloys II. Fatigue Crack Propagation[J]. Materials Science and Engineering, 1980, 43(1): 65-76.
- [18] SARKAR B, MAREK M, STARKE E A. The Effect of Copper Content and Heat Treatment on the Stress Corrosion Characteristics of Al-6Zn-2Mg-X Cu Alloys[J]. Metallurgical Transactions A, 1981, 12(11): 1939-1943.
- [19] SANDERS R E, STARKE E A. The Effect of Intermediate Thermomechanical Treatments on the Fatigue Properties of a 7050 Aluminum Alloy[J]. Metallurgical Transactions A, 1978, 9(8): 1087-1100.
- [20] MARLAUD T, DESCHAMPS A, BLEY F, et al. Influence of Alloy Composition and Heat Treatment on Precipitate Composition in Al-Zn-mg-Cu Alloys[J]. Acta Materialia, 2010, 58(1): 248-260.
- [21] DONG P X, CHEN S Y, CHEN K H. Effects of Cu Content on Microstructure and Properties of Super-High-Strength Al-9.3Zn-2.4Mg-xCu-Zr Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 788: 329-337.
- [22] 董朋轩. Al-8.54Zn-2.41Mg-xCu 超强铝合金多相组织调控及性能研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- DONG Pengxuan. Research on Multiphase Microstructure Modulation and Properties of Al-8.54Zn-2.41Mg-xCu Aluminum Alloy[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [23] 杨云龙, 周兴华, 李金鑫. Al-Zn-Mg-Cu 系合金的微合金化研究进展[J]. 技术与教育, 2018, 32(03): 11-16.
- YANG Yunlong, ZHOU Xinghua, LI Jinxin. Research Progress on Microalloying of Al-Zn-Mg-Cu Series Alloys[J]. Technique & Education, 2018, 32(03): 11-16.
- [24] TIAN S K, LI J Y, ZHANG J L, et al. Effect of Zr and Sc on Microstructure and Properties of 7136 Aluminum Alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(5): 4130-4140.
- [25] 杨凯. Sc 对 7075 铝合金组织和性能的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- YANG Kai. The Effect of Sc on the Microstructure and Properties of 7075 Aluminum Alloy[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.
- [26] 赵宾, 李向博, 王久林, 等. 微量 Sc 对高强铝合金铸态组织性能的影响[J]. 精密成形工程, 2015, 7(6): 70-75.
- ZHAO Bin, LI Xiangbo, WANG Jiulin, et al. Influence of Micro-Sc on Casting Microstructures and Mechanical Properties of High Strength Aluminum Alloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(6): 70-75.
- [27] 季承维, 马爱斌, 江静华. 轻质高熵合金的研究现状与发展趋势[J]. 材料导报, 2020, 34(19): 19094-19100.
- JI Chengwei, MA Aibin, JIANG Jinghua. Research Status and Development Trend of Lightweight High-Entropy Alloys[J]. Materials Reports, 2020, 34(19): 19094-19100.
- [28] WANG M, HUANG L P, CHEN K H, et al. Influence of Minor Combined Addition of Cr and Pr on Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behaviors of an Ultrahigh Strength Al-Zn-Mg-Cu-Zr Alloy[J]. Micron, 2018, 104: 80-88.
- [29] LI J H, ZHANG Y B, CAO X Y, et al. Accelerated Discovery of High-Strength Aluminum Alloys by Machine Learning[J]. Communications Materials, 2020, 1: 73.
- [30] 余欢, 疏达, 储威, 等. Fe 和 Si 杂质元素对 $7 \times \times \times$ 系高强航空铝合金组织及性能的影响[J]. 材料工程, 2013, 41(6): 92-98.
- SHE Huan, SHU Da, CHU Wei, et al. Effects of Fe and Si Impurities on the Microstructure and Properties of $7 \times \times \times$ High Strength Aircraft Aluminum Alloys[J]. Journal of Materials Engineering, 2013, 41(6): 92-98.
- [31] 王祝堂, 田荣璋. 铝合金及其加工手册[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 2000: 166-167.
- WANG Zhutang, TIAN Rongzhang. Aluminum Alloy and Its Processing Manual[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 2000: 166-167.
- [32] HAHN G T, ROSENFELD A R. Metallurgical Factors

- Affecting Fracture Toughness of Aluminum Alloys[J]. Metallurgical Transactions A, 1975, 6(4): 653–668.
- [33] THOMPSON D S. Metallurgical Factors Affecting High Strength Aluminum Alloy Production[J]. Metallurgical Transactions A, 1975, 6(4): 671–683.
- [34] LADELPH A D P, NEUBING H, BISHOP D P. Metallurgical Assessment of an Emerging Al-Zn-Mg-Cu P/M Alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2009, 520(1/2): 105–113.
- [35] 张永安, 熊柏青, 石力开. 快速凝固 7000 系超高强铝合金的研究现状 [J]. 材料导报, 2005, 19(10): 91–93. ZHANG Yong'an, XIONG Baiqing, SHI Likai. Research Status of Rapidly Solidified Ultra-High Strength Aluminum Alloys[J]. Materials Review, 2005, 19(10): 91–93.
- [36] REN J, WANG R C, FENG Y, et al. Microstructure Evolution and Mechanical Properties of an Ultrahigh Strength Al-Zn-Mg-Cu-Zr-Sc (7055) Alloy Processed by Modified Powder Hot Extrusion with Post Aging[J]. Vacuum, 2019, 161: 434–442.
- [37] GAO Y Y, QIU F, SHU S L, et al. Mechanical Properties and Abrasive Wear Behaviors of in Situ Nano-TiC_x/Al-Zn-Mg-Cu Composites Fabricated by Combustion Synthesis and Hot Press Consolidation[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2018, 18(1): 179–187.
- [38] YAO X H, ZHOU D S, LU Y L et al. Effects of Nano TiC Particles on Recrystallization and Mechanical Properties of Al-Zn-Mg-Cu Alloy[J]. Metals, 2019, 9(7): 753.
- [39] CHENG J F, CAI Q Z ZHAO B Y, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Nanocrystalline Al-Zn-Mg-Cu Alloy Prepared by Mechanical Alloying and Spark Plasma Sintering[J]. Materials, 2019, 12(8): 1255.
- [40] WANG Z X, ZHANG Y A, ZHU B H, et al. Tensile and High-Cycle Fatigue Properties of Spray Formed Al10.8Zn2.9Mg1.9Cu Alloys after Two-Stage Aging Treatment[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(4): 808–812.
- [41] 范才河. 快速凝固与喷射成形技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2019: 9. FAN Caihe. Rapid solidification and Spray Forming Technology[M]. Beijing: China Machinery Press, 2019: 9.
- [42] SI C R, TANG X L, ZHANG X J, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Low-Pressure Spray-Formed Zn-Rich Aluminum Alloy[J]. Materials Express, 2017, 7(4): 273–282.
- [43] 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.
- [44] LI H C, CAO F Y, GUO S, et al. Effects of Mg and Cu on Microstructures and Properties of Spray-Deposited Al-Zn-Mg-Cu Alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 719: 89–96.
- [45] 杨则云. 高强度铝合金及其先进焊接技术研究现状及发展方向 [J]. 电焊机, 2018, 48(3): 255–259. YANG Zeyun. Research Status and Development Direction of High Strength Aluminum Alloy and Its Advanced Welding Technologies[J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(3): 255–259.
- [46] ZHAO Y H, LIAO X Z, CHENG S, et al. Simultaneously Increasing the Ductility and Strength of Nanostructured Alloys[J]. Advanced Materials, 2006, 18(17): 2280–2283.
- [47] 张小明. 日本超级铝技术开发进展 [J]. 稀有金属快报, 2002, 21(4): 1–2. ZHANG Xiaoming. Japan's Super Aluminum Technology Development Progress[J]. Rare Metals Letters, 2002, 21(4): 1–2.
- [48] CARREÑO F, RUANO O A. Superplasticity of Aerospace 7075 (Al-Zn-Mg-Cu) Aluminium Alloy Obtained by Severe Plastic Deformation[J]. Defect and Diffusion Forum, 2018, 385: 39–44.
- [49] CHEN X, XIA D B, ZHANG J L, et al. Ultrafine-Grained Al-Zn-Mg-Cu Alloy Processed via Cross Accumulative Extrusion Bonding and Subsequent Aging: Microstructure and Mechanical Properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 846: 156306.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] WANG P, LI H C, PRASHANTH K G, et al. Selective Laser Melting of Al-Zn-Mg-Cu: Heat Treatment, Microstructure and Mechanical Properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 707: 287–290.
- [53] CHEN C G, HAN W H, QI M, et al. Microstructural

- Evolution and Mechanical Properties of an Ultrahigh-Strength Al-Zn-Mg-Cu Alloy via Powder Metallurgy and Hot Extrusion[J]. *Journal of Central South University*, 2021, 28(4): 1195–1205.
- [54] 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.
LIU Wenyi, HU Xiaohui, LI Jun. Research Progress of 7085 Ultra-High Strength Aluminum Alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2021, 50(8): 10–14.
- [55] 王 祥. 7050 铝合金热处理工艺研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
WANG Xiang. Research on Heat Treatment of 7050 Aluminum Alloy[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [56] WANG H J, XU J, KANG Y L, et al. Study on Inhomogeneous Characteristics and Optimize Homogenization Treatment Parameter for Large Size DC Ingots of Al-Zn-Mg-Cu Alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 585: 19–24.
- [57] DENG Y, YIN Z M, CONG F G. Intermetallic Phase Evolution of 7050 Aluminum Alloy During Homogenization[J]. *Intermetallics*, 2012, 26: 114–121.
- [58] 贾品峰, 曹以恒, 何立子, 等. 三级均匀化对 7050 铝合金微观组织和性能的影响 [J]. 2014, 38(5): 774–779.
JIA Pinfeng, CAO Yiheng, HE Lizi, et al. Microstructure and Properties of 7050 Aluminum Alloy with Three-Step Homogenization[J]. 2014, 38(5): 774–779.
- [59] 赵金国, 李飞洸. Mn、Zr、Sc 对 7050 合金均匀化组织转变及硬化的影响 [J]. *热加工工艺*, 2020, 49(20): 139–142, 145.
ZHAO Jinguo, LI Feilong. Effects of Mn, Zr and Sc on Homogenization Microstructure Transformation and Hardening of 7050 Alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(20): 139–142, 145.
- [60] DENG Y L, WAN L, ZHANG Y, et al. Evolution of Microstructures and Textures of 7050 Al Alloy Hot-Rolled Plate During Staged Solution Heat-Treatments[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 498(1): 88–94.
- [61] 唐农杰. 固溶与时效热处理制度对 7050 铝合金组织与性能的影响 [D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
TANG Nongjie. Effect of Solution and Aging Treatment on Microstructure and Properties of 7050 Aluminum Alloy[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [62] HAN N M, ZHANG X M, LIU S D, et al. Effect of Solution Treatment on the Strength and Fracture Toughness of Aluminum Alloy 7050[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509(10): 4138–4145.
- [63] PENG X Y, LI Y, LIANG X P, et al. Precipitate Behavior and Mechanical Properties of Enhanced Solution Treated Al-Zn-Mg-Cu Alloy During Non-Isothermal Ageing[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 735: 964–974.
- [64] HUANG L P, CHEN K H, LI S. Influence of Grain-Boundary Pre-Precipitation and Corrosion Characteristics of Inter-Granular Phases on Corrosion Behaviors of an Al-Zn-Mg-Cu Alloy[J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2012, 177(11): 862–868.
- [65] WANG K N, SU R M, MA S Y, et al. Microstructure and Mechanical Properties of AA7075 Alloy with Laser High-Temperature Pre-Precipitation Process[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2020, 29(5): 3297–3304.
- [66] ZHAO J H, DENG Y L, TANG J G, et al. Effect of Gradient Grain Structures on Corrosion Resistance of Extruded Al-Zn-Mg-Cu Alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 832: 154911.
- [67] CHEMINGUI M, KHITOUNI M, JOZWIAK K, et al. Characterization of the Mechanical Properties Changes in an Al-Zn-Mg Alloy after a Two-Step Ageing Treatment at 70 °C and 135 °C [J]. *Materials & Design*, 2010, 31(6): 3134–3139.
- [68] GAZDA A, WARMUZEK M, WIERZCHOWSKI W. DTA Investigation of the Retrogression and Re-Ageing in some AlZnMgCu Alloys[J]. *Thermochimica Acta*, 1997, 303(2): 197–202.
- [69] 王 涛, 尹志民. 高强变形铝合金的研究现状和发展趋势 [J]. *稀有金属*, 2006, 30(2): 197–202.
WANG Tao, YIN Zhimin. Research Status and Development Trend of Ultra-High Strength Aluminum Alloys[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2006, 30(2): 197–202.
- [70] SHAKOURI M, ESMAILIAN M, SHABESTARI S. Development of a Heat Treatment for Increasing the Mechanical Properties and Stress Corrosion Resistance of 7000 Al Alloys[J]. *Materiali in Tehnologije*, 2017, 51(5): 831–836.
- [71] LU J T, HUANG H, WU H, et al. Mechanical Properties and Corrosion Behavior of a New RRA-Treated Al-Zn-Mg-Cu-Er-Zr Alloy[J]. *Rare Metals*, 2017: 1–8.
- [72] WANG Z X, LI H, MIAO F F, et al. Improving the Strength and Ductility of Al-Mg-Si-Cu Alloys by a Novel

- Thermo-Mechanical Treatment[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2014, 607: 313–317.
- [73] LIU C H, LI X L, WANG S H, et al. A Tuning Nano-Precipitation Approach for Achieving Enhanced Strength and Good Ductility in Al Alloys[J]. *Materials & Design* (1980–2015), 2014, 54: 144–148.
- [74] ZUO J R, HOU L G, SHU X D, et al. Grain Refinement Assisted by Deformation Enhanced Precipitates Through Thermomechanical Treatment of AA7055 Al Alloy[J]. *Metals*, 2020, 10(5): 594.
- [75] 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.
- [76] AZARNIYA A, TAHERI A K, TAHERI K K. Recent Advances in Ageing of 7 × × × Series Aluminum Alloys: A Physical Metallurgy Perspective[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 781: 945–983.
- [77] SHARMA M M. Microstructural and Mechanical Characterization of Various Modified 7 × × × Series Spray Formed Alloys[J]. *Materials Characterization*, 2008, 59(1): 91–99.
- [78] 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.
- [79] ZHANG Y A, ZHU B H, LIU H W, et al. Influence of Zn Content on Microstructure and Properties of Spray-Formed 7 × × × Series Aluminum Alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2005(7): 1013–1018.
- [80] ZHANG S J, KONTSEVOI O Y, FREEMAN A J, et al. First Principles Investigation of Zinc-Induced Embrittlement in an Aluminum Grain Boundary[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(15): 6155–6167.
- [81] MAHJOUR R, LAWS K J, STANFORD N, et al. General Trends Between Solute Segregation Tendency and Grain Boundary Character in Aluminum - an Ab Initio Study[J]. *Acta Materialia*, 2018, 158: 257–268.
- [82] 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.

(责任编辑: 邓光辉)

A Review on Ultra-High-Strength Al-Zn-Mg-Cu Alloy

FAN Caihe^{1,2}, LI Yihui³, HU Zeyi¹, SHEN Tong¹, HE Wenjing¹

- (1. College of Materials and Advanced Manufacturing, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. Research and Development Center, Anhui Jianye Science and Technology Co., Ltd., Huaibei Anhui 235000, China;
3. College of Packaging and Materials Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: The element composition and alloying mechanism of ultra-high-strength Al-Zn-Mg-Cu alloy were summarized, and the advanced preparation technology and heat treatment technology of ultra-high-strength Al-Zn-Mg-Cu alloy were introduced. The preparation principle and heat treatment strengthening and toughening mechanism of ultra-high-strength Al-Zn-Mg-Cu alloy were described, and the development trend and outlook of ultra-high-strength Al-Zn-Mg-Cu alloy with high Zn content were prospected. It was expected to provide a theoretical reference for the sustainable development of the ultra-high-strength Al-Zn-Mg-Cu alloy industry.

Keywords: Al-Zn-Mg-Cu alloy; alloying; preparation technology; heat treatment