

航空用 7050 铝合金热处理工艺的研究进展

岳邦帅

南京科瑞达电子装备有限责任公司 江苏南京 210000

DOI: 10.12238/ems.v7i3.12314

[摘要] 7050 铝合金作为航空制造领域的重要材料,其热处理工艺直接影响力学性能与服役可靠性。固溶处理方面,单级固溶通过高温保温使合金元素充分溶解,而双级固溶和逐级固溶则优化了组织均匀性与析出相分布,提升强度与韧性。时效处理包括单级、双级、回归及间断时效等方法,不同工艺组合能够改善合金的耐腐蚀性、抗疲劳性能及断裂韧性。研究进展表明,数值模拟、新型表征手段及混合结构应用为热处理工艺优化提供了新方向,有助于进一步提升 7050 铝合金的综合性能。

[关键词] 7050 铝合金;航空材料;固溶处理;时效处理

一、固溶处理

热处理中固溶阶段的关键在于将合金中第二相或过饱和相充分溶解至基体内,通过扩散过程均匀分布各主要合金元素。该步骤对 7050 铝合金的成分均匀化与后续时效强化至关重要。在保证材料整体性能的同时,也要考虑加热速度、保温时间以及冷却方式的合理设计,才能使合金获得满意的微观组织和合适的力学参数。

1. 单级固溶

单级固溶是传统且常用的升温保温模式,工艺流程相对简单。通常将铝合金在一个较高且稳定的温度区间进行加热,使 Zn、Mg、Cu 等主要元素在基体铝中充分溶解,进而形成具有过饱和态的均匀组织。由于 7050 铝合金的熔点及其固-液相线比较敏感,选取合适的固溶温度区间显得尤为重要。温度过低会导致元素未充分溶解,强化相难以在后续时效过程中得到有效析出;温度过高则可能引起晶界过烧或严重氧化,降低合金的表面质量和延展性能。常见的单级固溶温度多介于 $470^{\circ}\text{C}\sim 480^{\circ}\text{C}$,保温时间根据合金尺寸与设备性能加以调整。具体操作时,还要合理安排转移时间及冷却方式,以期在不产生裂纹或变形的前提下,获得均匀的过饱和固溶体结构。

2. 双级固溶

为进一步均匀合金成分并减少晶内与晶界偏析,双级固溶工艺应运而生。该方法在第一级将工件加热到较高温并保温,使难溶或粗大析出相初步转变或溶解;然后在第二级温度稍低的区间内续行保温,力求兼顾合金基体稳定与防止晶界熔化。这种工艺思路在某些高强铝合金的应用中,能显著改善基体内析出相分布的细化程度,并使铝合金在后续时效环节中达到更加优异的性能组合。例如,对于 7050 铝材,通过初始保温在 480°C 上下,局部区域粗大析出相被充分消除,随后将温度略降至 $465^{\circ}\text{C}\sim 470^{\circ}\text{C}$ 持续保温,可以维持平衡的扩散环境,使 Zn、Mg 及 Cu 得以均匀渗入基体,最后结合快速冷却实现微观组织的进一步细化。这种双级固溶模式相较单级固溶,在高温区与中温区的组合使用上更具灵活性,能为合金赋予较高的强度和理想的损伤容限。

3. 逐级固溶

逐级固溶处理相较于双级固溶,在温度控制上更具灵活性。双级固溶虽然能够提升固溶温度,使粗大第二相基本消除,但再结晶体积分数增大、亚晶尺寸扩大,从而导致合金的强度与断裂韧性降低。针对这一问题,研究人员开发了逐级固溶工艺,通过多阶段温度递进,使合金元素扩散更加均匀,减少晶界偏析,同时有效抑制过烧现象。这种方式不仅优化了微观组织,而且在降低强度损失的同时,提高了材料的综合力学性能。

宋丰轩等人采用逐级固溶与单级时效相结合的方式研究 7050 铝合金的第二相演变过程。实验结果表明,经过该工艺处理后,S 相基本消失,仅有少量的 $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$ 相残留。透射电子显微镜检测结果显示,这种调整方案能够有效改善合金的组织稳定性,为进一步优化热处理制度提供了可靠的实验依据。

在进一步研究中,张新明等人探讨了逐级固溶过程中温度设定对合金性能的影响。当最终固溶温度控制在 493°C 时,7050 铝合金的抗拉强度达到 534.0 MPa,屈服强度为 500.6 MPa,断裂韧性最大值提升至 $37.4\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。这一实验结果表明,通过合理调整固溶温度梯度,可以兼顾合金的高强度与韧性,为高性能铝合金材料的工程应用奠定了坚实的理论基础。

二、时效处理

时效处理是使已处于过饱和固溶状态的铝合金在特定温度区间内保持一定时间,促进析出相的形核与长大,从而提升材料强度、硬度和其他关键指标。对 7050 铝合金而言,由于其合金元素含量较高,析出相种类和形态更为复杂,因此对时效制度的精细化调控要求更高。具体工艺方案需要综合考虑温度、保温时间以及升降温速率,才能实现析出相在晶粒内外的合理分布。

1. 单级时效

单级时效通常是以一个相对稳定的温度来促进合金中 G-P 区或 η' 相等主要强化相的形成与生长。对于 7050 铝合金而言,常见的单级时效温度多分布在 $120^{\circ}\text{C}\sim 130^{\circ}\text{C}$ 范围,

而保温时间可从十几个小时到几十个小时不等,具体视构件尺寸与目标性能指标而定。单级时效工艺简单,便于批量生产,且若处理参数选择得当,能获得较高的抗拉强度和适宜的延伸率。不过,此过程对某些服役环境要求严苛的航空部件来说,在耐疲劳、抗应力腐蚀与损伤容限等方面可能仍有提高空间。为此,一些研究工作致力于摸索不同温度下析出相种类以及衍生组织形态的影响关系,进而开发更有效的工艺方案。

2. 双级时效

双级时效比单级时效多了一个中间或后续加热过程,使组织调整更加灵活。通常,第一阶段在较低温度下进行,控制较微细的析出相快速形核;第二阶段则在稍高温度下保温,让这些早期形核的强化相适度长大并在晶内、晶界实现均匀分布。这一分段设计可兼顾强度与韧性的平衡,提高合金的综合性能。针对7050铝材,典型的双级时效方案可先在120℃下保持若干小时,生成大量细小且弥散分布的析出相;再在160℃~180℃区间进行另一段时效,以获得更加成熟稳定的组织结构。该方式对抑制晶间腐蚀和提高疲劳寿命也有明显裨益。在具体实施中,需要根据合金厚度、局部应力集中程度以及未来服役条件对工艺参数进行细化,进而实现更优的结构与性能表现。

3. 回归时效

回归时效在双级时效的基础上,通过短时回火或回归处理,使晶界及晶内析出相发生部分回溶与重新分布,从而在保持良好耐腐蚀性的同时,增强合金的综合力学性能。不同回归温度和时间对析出相形态及合金性能的影响较大。在预时效120℃×24h、回归180℃×60min、再时效120℃×24h的工艺条件下,材料表现出较高的强度。研究表明,延长回归阶段的保温时间,有助于合金塑性与韧性的提升,然而不合理的回归参数可能导致析出相粗化,使强度下降。此外,通过优化回归温度,部分研究发现,当回归温度设定为200℃并结合适当时效处理时,所得7050铝合金的抗拉强度与T6态接近,而抗应力腐蚀能力则达到T7态水平。

微观组织演变分析揭示,在特定回归时效参数下,析出相的尺寸及分布发生显著变化。采用470℃×4h固溶后,在150℃×8h预时效、120℃×6h回归、135℃×12h再时效的条件下,合金内部析出相呈现团簇结构,且溶质元素分布不均,Cu和Zn在晶内析出相中占据主要成分。随着回归时间的延长,较小的析出相发生部分回溶,而较大尺寸的析出相进一步长大,晶界析出相逐渐呈现断续粗化特性。某些优化工艺还表明,当回归温度控制在190℃时,断裂韧性明显提高,断裂模式由沿晶断裂向穿晶韧窝断裂转变,从而在降低合金断裂敏感性的同时,提升其综合服役性能。

4. 间断时效

应用不同温度区间可以显著调整析出相的规模、形态和分布,这对7050铝合金的机械强度和断裂韧性具有直接的提

升效果。例如,实施177℃的初级时效再配合185℃的次级时效,显示出在T6状态下时效的合金在断裂韧性和强度上都有所增加。在间断时效的过程中,预时效的温度对材料的导电性和微观结构也起着决定性的作用。研究表明,120℃预时效与不同时间的结合处理,在120℃×(0~20)h的间断时效后,合金的电导率与T6态的峰值时效相近,并且呈现出韧窝型的穿晶断裂模式。

采用层级时效策略来细化析出相的特性,有助于提升7050铝合金的整体力学属性。通过(450℃×1.5h+480℃×0.5h)的固溶处理及随后在120℃进行的预时效,并结合65℃、85℃的次级时效,观察到合金的力学性能随时效时长的变化而变化。在65℃的次级时效条件下,随着保温时间的延长,合金的强度先是上升后降低,而断裂韧性则显示出逆向的趋势。同时,475℃×1h的固溶处理加上120℃×0.5h+65℃×240h的多级时效使7050铝合金的伸长率明显高于T6状态,同时在峰值时效状态下的强度也有所提高,晶界 η 相呈现出不连续分布,晶内析出相密集。

三、展望

随着航空工业的不断升级,7050铝合金的热处理工艺依然拥有多方面的优化契机。首先,现代数值模拟和智能化控制技术的融合为开展精确的温度场、应力场和微观组织演变研究提供了更具深度的工具,从而有望研发出更具适应性的热处理程序。其次,借助新型测试与表征手段(如三维原子探针、同步辐射X射线衍射等),人们将对析出相在各层级尺度上的动态变化进行实时观测,这不仅可为传统固溶和时效工艺的改进提供更直观的数据支持,也能推动逐级固溶、回归时效及间断时效等新思路在工程化应用中的落地。再者,随着航空器日益轻量化和高可靠性的需求,7050铝合金与其他高强材料(如纤维增强复合材料、钛合金等)的混合结构也不断丰富,如何在新型结构的复合制造与整体热处理过程中,有效激发铝合金的潜能,仍是一个值得深入研究的课题。今后,热处理工艺与制备过程的协同优化、基于失效机制的局部强化方案,以及与新兴表面改性技术的结合或将成为进一步提升7050铝合金服役性能的关键方向。综合来看,7050铝材在航空领域的应用仍具备巨大潜力,随着研究手段与工艺技术的不断完善,它在结构减重与高强度需求之间取得更佳平衡的前景令人期待。

[参考文献]

- [1]程婷. 超高强铝合金材料新技术及其发展趋势[J]. 冶金与材料, 2024, 44(10): 133-135.
- [2]宋丰轩. 7050铝合金厚板局部腐蚀敏感性研究[D]. 中南大学, 2014.
- [3]贾科,潘清林. 单级时效对7050铝合金力学性能及晶间腐蚀性能的影响[J]. 热加工工艺, 2012, 41(22): 194-197.
- [4]林洪,刘利. 双级时效对7XXX系铝合金力学性能及晶间腐蚀性能的影响[J]. 锻压技术, 2015, 40(10): 122-125.