

6061 铝合金热处理工艺探讨

梁敬钧, 陆秋子, 凌廷喜, 吴泊良*

(南宁职业技术大学, 广西 南宁 530001)

摘要 6061 铝合金是一种可热处理强化铝合金, 凭借其优良的耐腐蚀性、可加工性及中等强度等优点, 在航空、汽车等领域得到广泛应用。本文以 6061 铝合金为研究对象, 主要探讨固溶处理温度及保温时间、时效温度及时间等热处理工艺参数对材料硬度的影响规律, 旨在为促进 6061 铝合金在对强度性能有更高要求的工程领域的应用提供理论参考。通过多组对比实验的设计, 对试样在不同工艺参数下的硬度值进行系统测试, 建立工艺参数与材料硬度性能的关联性。实验结果显示: 6061 铝合金试样在固溶温度 530 °C、保温时间 60 min、时效温度 170 °C、时效时间 12 h 的工艺条件下, 硬度可达 125 HB, 比退火状态提高 78.6%。

关键词 6061 铝合金; 热处理工艺; 硬度

基金项目: 搅拌摩擦沉积增材制造铝合金强塑性协同调控 (项目编号: 2024KY16)。

中图分类号: TG146.2; TG166.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.001

0 引言

铝合金作为轻金属材料的重要代表, 在现代工业领域已成为不可或缺的关键材料, 它具有比强度高、密度小、导电导热性能优异等一系列优势。其中, 6061 铝合金相较于 2000 系和 7000 系高强度铝合金, 其耐腐蚀性和焊接性能更好, 而且成本相对较低, 因此在航空航天、汽车等多个领域得到了广泛的应用^[1-3]。6061 铝合金的强度性能主要取决于其热处理工艺。因此, 系统探讨 6061 铝合金热处理工艺参数与材料硬度及强度性能的关系, 优化热处理工艺方案, 对提升 6061 铝合金的应用价值具有重要意义^[4-5]。

本文的主要研究内容包括: (1) 设计 6061 铝合金的固溶处理实验, 探讨不同固溶温度 (500 °C、510 °C、520 °C、530 °C、540 °C) 和保温时间 (30 min、45 min、60 min、75 min、90 min) 对材料硬度的影响; (2) 在最优固溶工艺参数的基础上, 设计时效处理实验, 探讨不同时效温度 (150 °C、160 °C、170 °C、180 °C、190 °C) 和时效时间 (6 h、8 h、10 h、12 h、14 h) 对材料硬度的影响; (3) 确定获得 6061 铝合金更高强度性能的最优热处理工艺方案。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

本实验使用工业级 6061 铝合金板材作为实验材料, 其化学成分如表 1 所示。

1.2 试样制备

将 6061 铝合金板材切割成 10 mm×10 mm×10 mm 的立方体试样, 共制备 50 个试样。为消除试样在切割过程中产生的应力以及原始组织的不均匀性, 对所有试样进行退火处理。退火处理后, 对试样的表面进行打磨、抛光处理, 去除表面氧化皮和加工痕迹, 确保试样表面平整光滑, 以便后续的热处理实验和性能测试。

1.3 实验设备与仪器

本实验所用的主要设备有: (1) SX2-12-10 型箱式电阻炉, 用于进行固溶处理和时效处理, 其温度控制精度为 ± 1 °C, 能够满足热处理工艺参数的精确控制要求; (2) HB-3000B 型布氏硬度计, 用于测试试样的硬度值, 测试时采用 d2.5 mm 的硬质合金球压头, 试验力 187.5 kgf, 保压 30 s。

1.4 实验方案设计

本实验采用控制变量法, 分别探讨固溶处理温度及保温时间、时效温度及时间对 6061 铝合金硬度的影响。实验分为两个阶段: 第一阶段为固溶处理实验, 第二阶段为时效处理实验。

1. 固溶处理实验方案: 选取固溶温度和固溶保温时间为变量, 固溶冷却方式采用水淬。设计 5 个固溶温度: 500 °C、510 °C、520 °C、530 °C、540 °C; 5 个固溶保温时间: 30 min、45 min、60 min、75 min、90 min。每个工艺参数组合对应 2 个试样, 共进行 5×

作者简介: 梁敬钧 (1984-), 男, 本科, 讲师、工程师, 研究方向: 机械制造。

*通信作者: 吴泊良 (1974-), 男, 博士研究生, 副教授, 研究方向: 铝加工。E-mail: 414800963@qq.com

表1 实验材料化学成分(质量分数, %)

元素	Al	Mg	Si	Cu	Cr	Fe	Mn	Zn
含量	余量	1.02	0.65	0.28	0.15	0.30	0.10	0.12
标准要求	余量	0.8~1.2	0.4~0.8	≤0.4	0.04~0.35	≤0.7	≤0.15	≤0.25

5×2=50个试样的固溶处理实验。固溶处理后,对每个试样进行硬度测试,取每个工艺参数组合下2个试样的硬度平均值作为该工艺参数下的硬度值,通过分析硬度值的变化规律,确定最优的固溶处理工艺参数。

2. 时效处理实验方案:在第一阶段确定的最优固溶工艺参数基础上,进行时效处理实验。选取时效温度和时效时间为变量,时效冷却方式采用随炉冷却。设计5个时效温度:150℃、160℃、170℃、180℃、190℃;5个时效时间:6h、8h、10h、12h、14h。每个工艺参数组合对应2个试样,共进行5×5×2=50个试样的时效处理实验。时效处理后,对每个试样进行硬度测试,取平均值作为该工艺参数下的硬度值,分析硬度值的变化规律,确定最优的时效处理工艺参数。

1.5 性能测试

使用布氏硬度计测试热处理后的试样,每个试样选取5个不同的测试点,避开试样边缘。为了保障测试数据的准确性和可靠性,测试完成后去除最大值和最小值,取剩余3个测试点的平均值作为该试样的最终硬度值。

2 实验结果与分析

2.1 固溶处理工艺对6061铝合金硬度的影响

1. 固溶温度对硬度的影响是:在固溶保温时间为60min、水淬冷却的条件下,不同固溶温度对6061铝合金硬度的影响实验结果如表2所示。

表2 不同固溶温度下6061铝合金的硬度值(固溶保温时间60min)

固溶温度(℃)	试样1硬度(HB)	试样2硬度(HB)	平均硬度(HB)
500	65	67	66
510	72	73	72.5
520	78	79	78.5
530	85	86	85.5
540	82	83	82.5

分析表2结果可得,6061铝合金的硬度随固溶温度的升高,呈先上升后逐渐降低的变化特征。当固溶温度从500℃升高到530℃时,平均硬度从66HB逐渐升高至85.5HB,硬度提升幅度为29.5%;当固溶温

度继续升高至540℃时,平均硬度下降至82.5HB,较530℃时降低了3HB。因此,综合考虑硬度性能,6061铝合金的适宜固溶温度为530℃左右。

2. 固溶保温时间对硬度的影响是:在固溶温度为530℃、水淬冷却的条件下,不同固溶保温时间对6061铝合金硬度的影响实验结果如表3所示。

表3 不同固溶保温时间下6061铝合金的硬度值(固溶温度530℃)

固溶保温时间(min)	试样1硬度(HB)	试样2硬度(HB)	平均硬度(HB)
30	78	79	78.5
45	82	83	82.5
60	85	86	85.5
75	86	87	86.5
90	86	85	85.5

分析表3结果可得,6061铝合金的硬度随固溶保温时间的延长,呈先上升后逐渐趋于稳定的变化特征。当保温时间从30min增加到60min时,平均硬度从78.5HB升高至85.5HB,硬度提升幅度为8.9%;当保温时间延长至75min时,平均硬度略微升高至86.5HB,提升幅度仅为1.2%;当保温时间继续延长至90min时,平均硬度又下降至85.5HB。综合考虑硬度性能和生产效率,6061铝合金的适宜固溶保温时间为60min左右。

2.2 时效处理工艺对6061铝合金硬度的影响

基于上述固溶处理实验结果,确定最优固溶工艺参数为:固溶温度530℃,保温60min,采用水淬冷却。在此基础上,探讨不同时效温度和时效时间对6061铝合金硬度的影响。

1. 时效温度对硬度的影响:在时效时间为12h、随炉冷却的条件下,不同时效温度对6061铝合金硬度的影响实验结果如表4所示。

分析表4结果可得,6061铝合金的硬度随时效温度的升高,呈现先上升后逐渐降低的变化特征。当时效温度从150℃升高到170℃时,平均硬度从105.5HB升高至125.5HB,硬度提升幅度为18.9%;当时效温度升高到190℃时,平均硬度下降至98.5HB,比170℃时降低了27HB。因此,综合考虑硬度性能,6061铝合金的适宜时效温度为170℃左右。

表 4 不同时效温度下 6061 铝合金的硬度值 (时效时间 12 h, 固溶工艺: 530 °C × 60 min)

时效温度 (°C)	试样 1 硬度 (HB)	试样 2 硬度 (HB)	平均硬度 (HB)
150	105	106	105.5
160	118	119	118.5
170	125	126	125.5
180	112	113	112.5
190	98	99	98.5

2. 时效时间对硬度的影响: 在时效温度为 170 °C、随炉冷却的条件下, 不同时效时间对 6061 铝合金硬度的影响实验结果如表 5 所示。

表 5 不同时效时间下 6061 铝合金的硬度值 (时效温度 170 °C, 固溶工艺: 530 °C × 60 min)

时效时间 (h)	试样 1 硬度 (HB)	试样 2 硬度 (HB)	平均硬度 (HB)
6	95	96	95.5
8	108	109	108.5
10	120	121	120.5
12	125	126	125.5
14	124	125	124.5

分析表 5 结果可得, 6061 铝合金的硬度随时效时间的延长, 呈现先上升后逐渐趋于稳定的变化特征。当时效时间从 6 h 增加到 12 h 时, 平均硬度从 95.5 HB 升高至 125.5 HB, 硬度提升幅度为 31.4%; 当时效时间继续延长至 14 h 时, 平均硬度略微下降至 124.5 HB, 下降幅度仅为 0.8%。综合考虑硬度性能和生产效率, 6061 铝合金的适宜时效时间为 12 h 左右。

3 结论与展望

3.1 结论

本文通过系统的实验研究, 探讨了固溶处理温度及保温时间、时效温度及时间等热处理工艺参数对 6061 铝合金硬度的影响规律, 结合金相组织分析, 建立了工艺参数—金相组织—硬度性能之间的关联, 得出以下主要结论:

1. 固溶处理工艺对 6061 铝合金的硬度有显著影响。在固溶保温时间为 60 min 的条件下, 硬度随固溶温度的升高, 先上升后降低, 530 °C 时硬度达到峰值 (85.5 HB); 在固溶温度为 530 °C 的条件下, 硬度随固溶保温时间的延长, 先上升后趋于稳定, 60 min 时硬度达到较高值 (85.5 HB), 继续延长保温时间对硬

度提升作用不明显。因此, 6061 铝合金的最优固溶工艺参数为: 固溶温度 530 °C, 保温 60 min, 采用水淬冷却。

2. 时效处理工艺对 6061 铝合金的硬度有显著影响。在最优固溶工艺基础上, 时效时间为 12 h 的条件下, 硬度随时效温度的升高, 先上升后降低, 170 °C 时硬度达到峰值 (125.5 HB); 在时效温度为 170 °C 的条件下, 硬度随时效时间的延长, 先上升后逐渐趋于稳定, 12 h 时硬度达到峰值 (125.5 HB), 继续延长时效时间硬度略有下降。因此, 6061 铝合金的最优时效工艺参数为: 时效温度 170 °C, 时效时间 12 h, 冷却方式为随炉冷却。

3. 采用最优热处理工艺参数 (固溶: 530 °C × 60 min, 水淬; 时效: 170 °C × 12 h, 随炉冷却) 处理的 6061 铝合金, 硬度可达 125.5 HB, 较退火态提升 79.3%, 强度性能得到显著提升。

3.2 展望

本研究通过实验探讨了 6061 铝合金热处理工艺与硬度的关系, 确定了最优热处理工艺方案, 但仍存在一些需要进一步深入研究方向:

1. 本研究主要关注了硬度性能, 未来可进一步研究最优热处理工艺对 6061 铝合金抗拉强度、屈服强度、延伸率等其他力学性能的影响, 全面评价材料的综合性能。

2. 本研究采用的是传统的单级固溶和单级时效处理工艺, 未来可探索多级固溶、多级时效等复杂热处理工艺对 6061 铝合金性能的影响, 进一步提升材料的强度性能。

3. 未来可结合数值模拟技术, 对 6061 铝合金的热处理过程进行模拟仿真, 预测材料的组织演变和性能变化, 为热处理工艺的优化提供更高效的方法和手段。

参考文献:

- [1] 刘静安, 谢水生. 铝合金材料应用与技术开发 [M]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2022.
- [2] 王祝堂, 田荣璋. 铝合金及其加工手册 [M]. 3 版. 长沙: 中南大学出版社, 2023.
- [3] 张新明, 李慧中, 陈明安. 6000 系铝合金研究新进展 [J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(05): 1201-1218.
- [4] 刘满平, 薛周磊, 彭振, 等. 固溶温度对超细晶 6061 铝合金力学性能的影响 [J]. 金属学报, 2023, 59(05): 657-667.
- [5] 张兵, 赵鸿金, 胡玉军, 等. 时效工艺对 6061 铝合金硬度和强度的影响 [J]. 金属热处理, 2025, 50(08): 63-70.