

文章编号:1674-9669(2022)05-0023-06 DOI: 10.13264/j.cnki.ysjskx.2022.05.004

引文格式: 贺嘉宁, 贾咏馨, 于帅, 等. 高强韧铝合金非等温时效工艺的研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2022, 13(5): 23-28.

高强韧铝合金非等温时效工艺的研究进展

贺嘉宁¹, 贾咏馨¹, 于帅², 苏睿明^{*1}, 聂赛男¹

(1. 沈阳工业大学材料科学与工程学院, 沈阳 110807; 2. 一汽锻造(吉林)有限公司, 长春 130000)

摘要:非等温时效工艺作为一种新兴的时效处理方法,能够有效地提高高强韧铝合金的综合性能。通过简要归纳近些年来应用于高强韧铝合金的非等温时效工艺,总结出经不同非等温时效处理后高强韧铝合金析出相的特征、合金力学性能和腐蚀性能的变化情况。非等温时效工艺的效率相较于传统时效工艺有很大提高,并且能够同时调控高强韧铝合金内基体析出相和晶界析出相的种类、尺寸和分布情况,使高强韧铝合金兼具与 T6 峰值时效态相差不多的力学性能和近 T7x 过时效态的腐蚀性能。最后,对未来高强韧铝合金非等温时效工艺的研究和应用进行了展望。

关键词:高强韧铝合金;非等温时效;力学性能;腐蚀性能;析出相

中图分类号:TG146.2 **文献标志码:**A

Research progress in non-isothermal aging process of aluminum alloys with high strength and toughness

HE Jianing¹, JIA Yongxin¹, YU Shuai², SU Ruiming^{*1}, NIE Sainan¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. FAW Forge(Jilin) Co., Ltd., Changchun 130000, China)

Abstract: As a new aging treatment method, the nonisothermal aging process can effectively improve the comprehensive properties of aluminum alloys with high strength and toughness. The cases of nonisothermal aging process applied to aluminum alloys with high strength and toughness in recent years were briefly studied to summarize the characteristics of precipitates and the changes in mechanical properties and corrosion properties of aluminum alloy with high strength and toughness after different nonisothermal aging treatments. It is found that compared with the traditional aging process the efficiency of the nonisothermal aging process has been greatly improved. In addition, moreover, the types, sizes and distributions of matrix precipitates and grain boundary precipitates of aluminum alloy with high strength and toughness can be simultaneously controlled by a nonisothermal aging process so that aluminum alloy with high strength and toughness has mechanical properties similar to the T6 peak aging state and corrosion properties close to the T7x overaging state. Finally, future research and applications of nonisothermal aging processes for aluminum alloys with high strength and toughness are proposed.

Keywords: high strength and toughness aluminum alloy; non-isothermal aging; mechanical properties; corrosion properties; precipitates

高强韧铝合金是可通过热处理进行第二相弥散强化的变形铝合金,其中包括 2xxx 系铝合金(Al-Cu 系合金)和 7xxx 系铝合金(Al-Zn-Mg-Cu 系合金)等^[1]。高强韧铝合金因具有低密度、高比强度、优良的可焊

收稿日期:2021-11-14;修回日期:2021-12-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51574167);辽宁省自然科学基金资助项目(2021-MS-235);辽宁省教育厅科学研究项目(LJGD2020010);大学生创新创业训练计划项目

通信作者:苏睿明(1984—),男,博士,副教授,博士生导师,主要研究方向为铝合金的制备与强韧化处理。E-mail:suruiming1984@163.com

接性能和良好的可加工性能等优点,广泛应用于航空航天和汽车零部件制造等领域^[2]。高强韧铝合金经历了很多发展阶段,性能得到不断提高^[3]。在 7055 铝合金中,由于合金基体析出相(Matrix Precipitates, MPts)和晶界析出相(Grain Boundary Precipitates, GBPs)的析出特征不同,使得合金的综合性能达不到最佳,其中合金强度与耐蚀性之间的问题一直是学者们研究的重点。因此,为 7055 铝合金选择合适的热处理工艺,对调控合金内 MPts 和 GBPs 的种类、尺寸和分布情况,优化合金的综合性能尤为重要。

7055 铝合金经 T6 峰值时效处理后,能够有效提高合金的强度,但是易发生点腐蚀和剥落腐蚀等局部腐蚀现象^[4];7055 铝合金经 T7x 双级时效处理后,合金的硬度和强度较 T6 峰值时效态有所降低,但是电导率明显提高^[5],耐蚀性得到提升。为了使 7055 铝合金在保证力学性能的基础上提高耐蚀性,研究者开发了回归再时效(Retrogression and Re-Ageing, RRA)处理工艺^[6-7],但是由于回归阶段的时间很短,可能无法使 7055 铝合金厚件表面和芯部的性能保持一致^[8],使得 RRA 处理较少应用于 7055 铝合金厚件。

针对传统等温时效工艺处理时间长、效率低和成本高等缺点,STALEY 在 2007 年提出了非等温时效工艺,即以一定线性速率升温一段时间,并以 7085 铝合金为例进行了研究,发现非等温时效工艺能够用更经济的成本和更有效的时间使 7085 铝合金获得良好的综合性能^[9]。至此,非等温时效工艺开始进入大众的视野。从积分的角度来看,非等温时效工艺可以看成无数个极短等温时效的组合,使得非等温时效工艺能够创造出很多形核质点,并且可以通过改变起始、最高和终了温度点及升温和降温速率,调控合金内 MPts 和 GBPs 的析出情况。目前,对 7055 铝合金非等温时效工艺的研究还处于起步阶段,而 7055 铝合金非等温时效工艺的改良以及经非等温时效处理后 7055 铝合金的性能优化始终是学者们关注的焦点。

1 非等温时效工艺改良

1.1 单级时效

非等温单级时效工艺主要分为 3 类。第一类是将固溶后的试样放入时效炉,以一定速率升温。向剑波等将 7055 铝合金在 470 °C 固溶处理 3 h 后进行室温淬火,再从 40 °C 以 20 °C/h 的速率

升温至 60、120、160、200 °C,然后分别在室温下水冷。探索升温阶段的不同终了温度点对 7055 铝合金显微组织及性能的影响,其工艺示意图如图 1 所示^[10]。

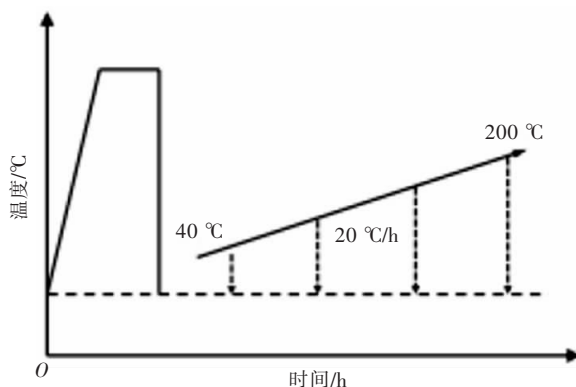


图 1 7055 铝合金非等温单级时效(升温)工艺示意^[10]

Fig. 1 Diagram of the nonisothermal aging process of 7055 aluminum alloy^[10]

第二类是将固溶后的试样放入时效炉,以一定速率降温。陈庚等对 7050 铝合金在(475±3) °C 下固溶处理 40 min,再室温水淬,将试样放到预先升温至 210 °C 的时效炉中,以 20 °C/h 的速率开始降温,分别在 190、170、150、130、110 °C 取出试样进行室温水淬,具体工艺如图 2 所示^[11]。探索降温阶段的不同终了温度点对 7050 铝合金组织及性能的影响。

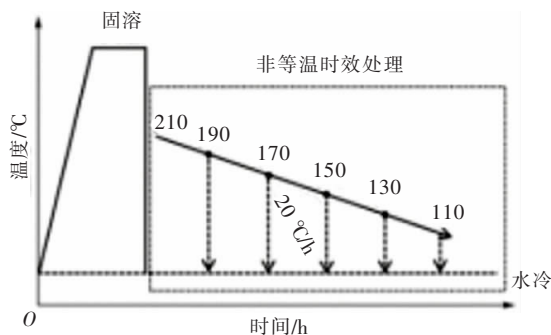


图 2 7050 铝合金非等温单级时效(降温)工艺示意^[11]

Fig. 2 Diagram of the nonisothermal aging process of 7050 aluminum alloy^[11]

第三类是将固溶后的试样放入时效炉,先以一定速率升温,升至最高温度点后再以一定速率降温,在升温和降温阶段均选择温度点进行研究,大部分非等温单级时效处理都是通过此种方法进行的。

PENG 等对 7050 铝合金进行 480 °C 固溶处理 1 h, 室温水淬, 随后将试样从 100 °C 以 40 °C/h 的速率升温至最高温度点 210 °C, 然后以 20 °C/h 的速率降温至不同的终了温度点, 时效工艺示意图如图 3 所示^[12]。研究升温 and 降温阶段的不同终了温度点对 7050 铝合金的影响。

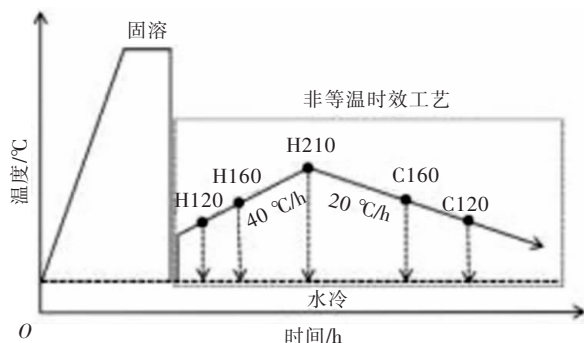


图 3 7050 铝合金非等温单级时效(升温 and 降温)工艺示意^[12]

Fig. 3 Diagram of the nonisothermal aging process of 7050 aluminum alloy^[12]

1.2 双级时效

目前, 关于非等温双级时效工艺的研究较少。李吉臣等对经 470 °C 固溶处理 1 h 后室温水淬的 7055 铝合金进行 105 °C 保温 24 h 的一级时效处理, 之后利用升温时效+降温时效处理替代双级时效中第二级等温时效处理, 其中升温速率分别为 1 °C/min 和 3 °C/min, 最高温度点为 250 °C, 将试样以约 1.3 °C/min 的速率进行炉冷降温, 对升温 and 降温至不同温度点的试样进行水冷或炉冷, 具体工艺示意图如图 4 所示^[13]。最后对不同试样进行观察和测试。

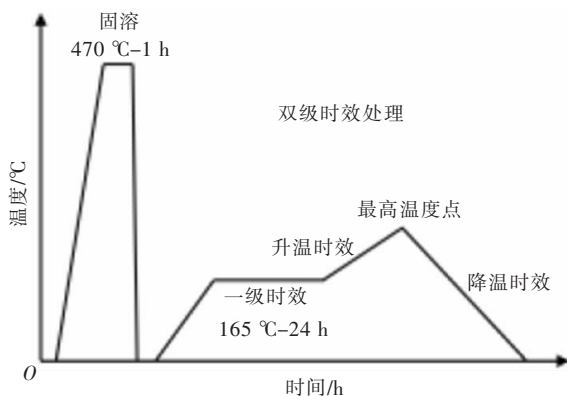


图 4 7055 铝合金非等温双级时效工艺示意^[13]

Fig. 4 Diagram of the nonisothermal aging process of 7055 aluminum alloy^[13]

1.3 多级时效

在多级时效处理过程中, 普遍对 RRA 处理的回归阶段进行非等温时效工艺的改良, 回归阶段是 RRA 处理中最重要的一个阶段, 可以调整预时效处理后合金内 MPts 和 GBPs 的数量、尺寸和分布, 即较小尺寸的 MPts 和 GBPs 回溶和较大尺寸的 MPts 和 GBPs 聚集长大, 并且为再时效处理做准备^[14], 非等温回归再时效的预时效温度、回归阶段的升温速率和回归终了温度为主要的工艺参数。吴懿萍等对 7050 铝合金进行 473 °C 固溶处理 1 h, 室温水淬后, 立即在 120 °C 预时效 24 h, 室温水淬, 随后进行非等温回归处理, 从室温以 5 °C/min 的速率升温至 160、190、220、260、300 °C, 到达终了温度后室温水淬, 最后进行 120 °C 再时效 24 h, 室温水淬, 工艺示意图如图 5 所示^[15]。探索不同回归终了温度对 7050 铝合金的影响。

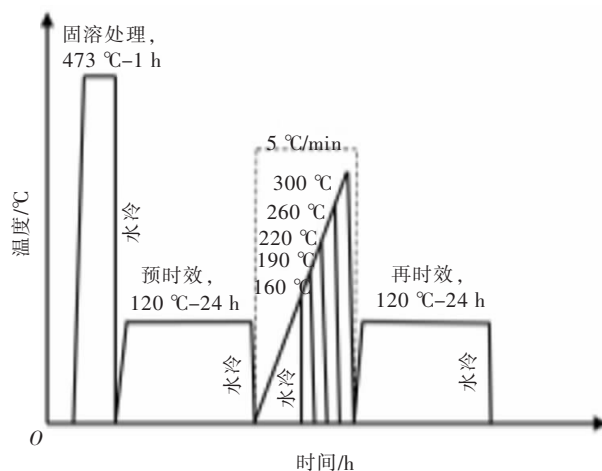


图 5 7050 铝合金非等温多级时效工艺示意^[15]

Fig. 5 Diagram of the nonisothermal aging process of 7050 aluminum alloy^[15]

还有学者对 RRA 处理中的预时效处理温度和回归阶段的升温速率进行了研究, 冯迪等对 7055 铝合金进行 470 °C 保温 1 h 后 480 °C 再保温 1 h 的固溶处理, 再分别选择 65、90、105、120 °C 预时效处理 24 h 后, 分别选择 1、3、100 °C/min 的升温速率将回归温度升至 190 °C, 并保温 50 min, 室温水淬, 最后在 120 °C 下再时效 24 h, 室温水淬, 具体工艺示意图如图 6 所示^[16]。探索不同预时效程度和升温速率对 7055 铝合金的影响。

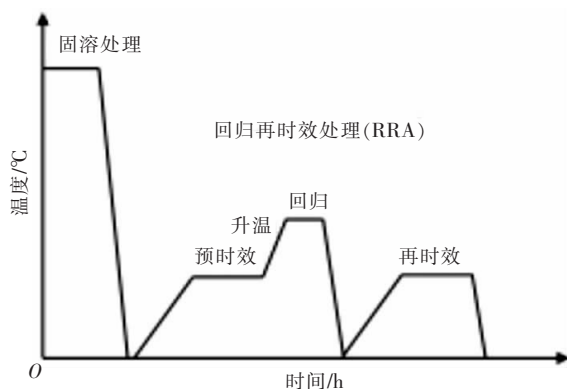


图 6 7055 铝合金非等温多级时效工艺示意^[16]

Fig. 6 Diagram of the nonisothermal aging process of 7055 aluminum alloy^[16]

2 非等温时效处理的高强韧铝合金性能优化

在时效处理过程中, 高强韧铝合金内 MPts 和 GBPs 的析出序列一般为: 固溶淬火后获得的过饱和固溶体→GP 区→过渡相→平衡相^[17-18]。合适的非等温时效工艺能够调控高强韧铝合金中 MPts 和 GBPs 的尺寸和分布情况, 使高强韧铝合金兼具良好的硬度、强度、伸长率和耐蚀性。

2.1 力学性能

在探索非等温时效工艺对高强韧铝合金力学性能的影响时, 主要对高强韧铝合金进行基体组织形貌观察、硬度测量和拉伸测试。

首先是非等温时效工艺的起始、最高和终了温度点对高强韧铝合金力学性能的影响。对于升温阶段, 起始温度点通常选在室温至 100 °C 左右, 对高强韧铝合金非等温时效工艺影响不大, 而最高温度点则起着至关重要的影响, 在非等温单级时效工艺中, 时效初期合金内的 MPts 以 GP 区为主, GP 区在时效处理过程中获得足够的能量而逐渐向过渡相转变, GP 区和过渡相能有效阻碍变形时位错的滑移^[19], 合金的硬度和强度增加, 直至达到峰值^[20], 张雪发现经线性升温处理的 7050 铝合金的峰值 HV 硬度可达 181.5, 接近于 T6 峰值硬度, 而过长的时效时间使得过渡相粗化, 并且有一部分转为平衡相, 导致合金硬度和强度降低^[21]。因此, 高强韧铝合金经升温阶段的非等温单级时效处理后, 合金内 MPts 的析出特点和力学性能的变化趋势与等温单级时效大致相同, 并且峰值硬度和强度与 T6 峰值时效态相差不大, 但是非等温单级时效工艺的效率更高; 在非等温回归再时效工艺中, 对于 Al-Zn-Mg-Cu 合金, 回归温度一般升至 190 °C 时, 合金内同时出现小尺寸和较大尺寸的 MPts, 再经

时效处理的合金综合性能较好, 硬度、抗拉强度和屈服强度分别可达 191.6 HV、620 MPa 和 593 MPa, 与 T6 峰值时效态相差较小^[22], 因此合适的非等温回归再时效工艺会使高强韧铝合金内 MPts 尺寸范围宽化, 合金获得与 T6 峰值时效态相差不多的力学性能, 并且效率比常规 RRA 处理高。对于降温阶段, 起始温度点即最高温度点一般在 200 °C 左右, 过高的起始温度点, 可能使合金内 GP 区析出的数量减少, 导致合金硬度的降低^[23], 在时效初期, 合金内逐渐形成过渡相, 随着温度逐渐降低, 合金的固溶度下降, 合金内的 MPts 发生二次析出^[24-25], 二次析出的 MPts 以 GP 区和过渡相为主, 细小弥散分布在基体中, 并且会抑制原有 MPts 长大, 使高强韧铝合金的硬度和强度升高。詹鑫等对 2A14 铝合金进行非等温时效工艺的研究发现, 与 T6 峰值时效态相比, 非等温时效态的峰值硬度、抗拉强度和屈服强度分别能提高 2.5 HV、12 MPa 和 30 MPa, 随着降温时效处理继续进行, 二次析出的 MPts 逐渐粗化, 大部分高强韧铝合金的硬度和强度有所降低^[26]。因此, 高强韧铝合金经降温阶段的非等温单级时效处理后, 合金内 MPts 二次析出现象能够使合金在较短的时效时间获得高的力学性能^[27], 并且合金的峰值硬度和强度与 T6 峰值时效态相当。

其次是非等温时效工艺的升温 and 降温速率对高强韧铝合金力学性能的影响。在非等温单级时效工艺中, 升温 and 降温速率都与最高温度点有较大的关系, 当升温 and 降温速率较低时, 低速率使时效处理时间相对增加, 过长的时效处理时间导致合金内 MPts 粗化, 所以此时非等温时效工艺的最高温度点应较低, 反之亦然^[28-29], 一般来说, 速率和最高温度点均低或均高都有利于使合金的硬度和强度达到峰值点^[30-31]。在非等温回归再时效工艺中, 经 RRA 处理后合金的力学性能对预时效温度较敏感^[32], 当回归阶段的升温速率较大时, 经 RRA 处理后合金的力学性能随预时效程度增加而提高; 当回归阶段的升温速率较小时, 经 RRA 处理后合金的力学性能随预时效程度增加而先提高后降低^[16]; 当其他条件不变时, 回归阶段升温速率增加使得经 RRA 处理后合金的硬度值增加^[33]。

因此, 选择合适的非等温时效工艺参数能够有效地提高高强韧铝合金的力学性能, 根据高强韧铝合金种类的不同, 力学性能提升的幅度有所不同。一般来说, 经适当的非等温时效处理后高强韧铝合金的硬度和强度峰值与 T6 峰值时效态相差较小, 较 T7x 过时效态均有所提高, 伸长率较 T6 峰值时效态有所提高。

2.2 腐蚀性能

在探索非等温时效工艺对高强韧铝合金腐蚀性能的影响时,除了对合金进行晶界组织形貌观察和常见的腐蚀性能测试,还经常对高强韧铝合金进行电导率测试,在其他条件不变的情况下,电导率与合金的耐蚀性呈正相关^[34],因而通过电导率的变化趋势也能得出合金腐蚀性能的变化趋势^[35]。

首先是非等温时效工艺的起始、最高和终了温度点对高强韧铝合金腐蚀性能的影响。在升温阶段,选择合适起始和最高温度点的情况下,对于非等温单级时效工艺,随着时效处理过程进行,GBPs 逐渐长大粗化,开始呈链状分布,晶界无析出带(Precipitate Free Zone, PFZ)逐渐变宽,高强韧铝合金的电导率呈现持续增加的趋势^[36],提高最高温度点可提高合金的耐蚀性;对于非等温回归再时效工艺,回归阶段的时效处理时间越长,合金经 RRA 处理后的电导率越高。冯迪等发现随着回归时间延长,经非等温回归再时效处理的 Al-8Zn-2Mg-2Cu 合金的电导率最高可达 22.9 MS/m^[22]。在降温阶段,高强韧铝合金的电导率依旧呈现持续增加的趋势,但随着时效温度不断降低,高强韧铝合金内 MPts 和 GBPs 均产生二次析出现象,粗大的 GBPs 周围分散着细小的 GBPs,电导率增加的趋势减缓。JIANG 等对 Al-Zn-Mg-Cu 合金进行先升温后降温的非等温单级处理时发现,合金的峰值电导率出现在降温阶段,为 35.3% IACS,合金在非等温时效处理降温阶段的电导率与 RRA 态相似,都表现出了良好的耐蚀性能^[37-38]。

其次是非等温时效工艺的升温 and 降温速率对高强韧铝合金腐蚀性能的影响。对非等温单级时效处理过程,降低升温 and 降温速率相当于延长时效处理时间,使更多的溶质原子向晶界扩散,GBPs 易于长大粗化,并且 PFZ 变宽,可以提高高强韧铝合金的耐蚀性^[39];对非等温双级时效处理过程,升温速率越高,硬度峰值温度点越高,降至室温后合金的电导率越高^[13],高强韧铝合金的耐蚀性越好;对非等温回归再时效处理过程,经 RRA 处理后合金的腐蚀性能对回归阶段的升温速率较敏感,降低回归阶段的升温速率有利于高强韧铝合金电导率的升高^[40],合金的耐蚀性得以提高。

因此,非等温时效工艺可以有效地提高高强韧铝合金的腐蚀性能,根据高强韧铝合金种类的不同,导致电导率提升的幅度不同,合金腐蚀性能提高的幅度也不同。通常,经非等温时效处理的高强韧铝合金的电导率远高于 T6 峰值时效态,与 T7x 过时效态相当。

选择合适的非等温时效工艺参数,能够使经非等

温时效处理的高强韧铝合金内的 MPts 弥散分布,GBPs 呈链状分布,合金具有与 T6 峰值时效态相差较小的力学性能和近 T7x 过时效态的腐蚀性能。

3 结束语与展望

随着时代的迅速发展,高强韧铝合金作为航空航天材料的代表,需要具有更加优异的综合性能。选择合适的热处理工艺对提高高强韧铝合金的综合性能和工业生产效率均具有更加深远的意义。相较于单级时效和双级时效这些传统的等温时效工艺,非等温时效工艺能够更好地调控合金内微观组织的尺寸和分布,使高强韧铝合金兼具好的力学性能和腐蚀性能,提高工业生产效率;相较于传统的 RRA 工艺,回归阶段慢速升温的非等温时效工艺更适用于厚板工件,保证厚板工件受热均匀。

除了在高强韧铝合金方面,非等温时效工艺在 Al-Li 合金和 Al-Mg-Si 合金等方面的研究也取得了进展^[41-44]。非等温时效工艺具有良好的研究意义和广泛的应用前景。因此,开发出更具应用价值的非等温时效工艺仍是未来理论研究和工业应用研究的重要方向。

参考文献:

- [1] 李念奎. 铝合金材料及其热处理技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
- [2] 张新明, 刘胜胆. 航空铝合金及其材料加工[J]. 中国材料进展, 2013, 32(1): 39-55.
- [3] 李贝贝, 王元清, 支新航, 等. 我国 7xxx 系高强铝合金及其研究进展[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(7): 1-10.
- [4] 石峰, 张智超, 王旭. 7xxx 系列铝合金时效处理工艺的研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(2): 6-10.
- [5] 刘向丽. 双级时效对 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(8): 127-129.
- [6] 王艳娟, 胡晓青, 曲庆文, 等. RRA 处理对 7085 铝合金微观组织演变及性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(8): 45-49.
- [7] 王井井, 黄元春, 刘宇, 等. 时效工艺对 Al-Zn-Mg-Cu-Zr-Er 铝合金组织与耐腐蚀性影响[J]. 有色金属科学与工程, 2018, 9(2): 47-55.
- [8] 王胜玉, 肖柱, 王正安, 等. 工业化制备 7050 铝合金厚板显微组织与力学性能[J]. 有色金属科学与工程, 2017, 8(3): 48-53.
- [9] STALEY J T. Method and process of non-isothermal aging for aluminum alloys: US, 0267113A[P]. 2007-11-22.
- [10] 向剑波, 陈伟, 熊落保, 等. 7055 铝合金的非等温时效工艺[J]. 金属热处理, 2019, 44(1): 190-194.
- [11] 陈庚, 苗景国, 方琴, 等. 非等温时效工艺对 7050 铝合金组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(3): 169-173.
- [12] PENG X Y, GUO Q, LIANG X P, et al. Mechanical properties, corrosion behavior and microstructures of a non-isothermal

- ageing treated Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 688: 146-154.
- [13] 李吉臣, 冯迪, 夏卫生, 等. 7055 铝合金的非等温双级时效行为[J]. 金属学报, 2020, 56(11): 1495-1506.
- [14] 蒋爱娟, 祝贞凤, 梁晓宁, 等. 回归温度对 7150 铝合金组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(9): 134-139.
- [15] 吴懿萍, 何臻毅, 周志纲, 等. 非等温回归再时效对 7050 铝合金组织与力学性能的影响[J]. 材料导报, 2019, 33(增刊 2): 394-397.
- [16] 冯迪, 张新明, 邓运来, 等. 预时效温度及回归加热速率对 7055 铝合金组织及性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(5): 1141-1150.
- [17] MARCEAU R K W, SHA G, LUMLEY R N, et al. Evolution of solute clustering in Al-Cu-Mg alloys during secondary ageing[J]. Acta Materialia, 2010, 58: 1795-1805.
- [18] DU Z W, SUN Z M, SHAO B L, et al. Quantitative evaluation of precipitates in an Al-Zn-Mg-Cu alloy after isothermal aging[J]. Materials Characterization, 2006, 56(2): 121-128.
- [19] MARLAUD T, DESCHAMPS A, BLEY F, et al. Evolution of precipitate microstructures during the retrogression and re-ageing heat treatment of an Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Acta Materialia, 2010, 58(14): 4814-4826.
- [20] 余罡, 向剑波, 赵忠新, 等. 非等温时效对 7003 铝合金组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(2): 143-148.
- [21] 张雪. 7050 铝合金非等温时效过程组织演变研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [22] 冯迪, 张新明, 陈洪美, 等. 非等温回归再时效对 Al-8Zn-2Mg-2Cu 合金厚板组织及性能的影响[J]. 金属学报, 2018, 54(1): 100-108.
- [23] 刘炎. 7000 系铝合金的非等温时效行为及其对力学性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [24] JIANG J T, TANG Q J, YANG L, et al. Non-isothermal ageing of an Al-8Zn-2Mg-2Cu alloy for enhanced properties[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 227: 110-116.
- [25] 唐秋菊. 7A85 铝合金降温时效工艺的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [26] 詹鑫, 李慧中, 梁霄鹏, 等. 非等温时效对 2A14 铝合金晶间腐蚀和力学性能的影响[J]. 矿冶工程, 2018, 38(6): 139-142.
- [27] LI Y, XU G F, PENG X Y, et al. Effect of non-isothermal aging on microstructure and properties of Al-5.87Zn-2.07Mg-2.42Cu alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021(10): 1-10.
- [28] MOGHANAKI S K, KAZEMINEZHAD M. Effects of non-isothermal annealing on microstructure and mechanical properties of severely deformed 2024 aluminum alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(1): 1-9.
- [29] LIU Y, LIANG S, JIANG D. Influence of repetitious non-isothermal aging on microstructure and strength of Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 689: 632-640.
- [30] LIU Y, JIANG D, LI B, et al. Heating aging behavior of Al-8.35Zn-2.5Mg-2.25Cu alloy[J]. Materials and Design, 2014, 60(8): 116-124.
- [31] LIU Y, JIANG D, LI B, et al. Effect of cooling aging on microstructure and mechanical properties of an Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Materials and Design, 2014, 57(5): 79-86.
- [32] 冯迪, 张新明, 刘胜胆, 等. 预时效温度及回归加热速率对 7150 铝合金显微组织及性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(5): 1173-1181.
- [33] 王国迎. 非等温回归及再时效对 7055 铝合金组织和性能的影响[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2018.
- [34] STARINK M J, LI X M. A model for the electrical conductivity of peak-aged and overaged Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2003, 34A(4): 899-911.
- [35] 范淑敏, 陈送义, 张星临, 等. 多级时效热处理对 7056 铝合金析出组织与耐蚀性的影响[J]. 材料工程, 2019, 47(6): 136-143.
- [36] 郭冉. 等温与非等温时效工艺对 Al-Zn-Mg 合金螺旋面挤压型材组织性能的影响规律研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [37] JIANG J T, XIAO W Q, YANG L, et al. Ageing behavior and stress corrosion cracking resistance of a non-isothermally aged Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2014, 605: 167-175.
- [38] 李吉臣, 冯迪, 夏卫生, 等. 非等温时效对 7B50 铝合金组织及性能的影响[J]. 金属学报, 2020, 56(9): 1255-1264.
- [39] JIANG D M, LIU Y, LIANG S, et al. The effects of non-isothermal aging on the strength and corrosion behavior of Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 681: 57-65.
- [40] XU D K, BIRBILIS N, ROMETSCH P A, et al. The effect of pre-ageing temperature and retrogression heating rate on the strength and corrosion behaviour of AA7150[J]. Corrosion Science, 2012, 54: 17-25.
- [41] 李劲风, 陈永来, 张绪虎, 等. 非等温时效对一种铝锂合金力学性能与微观组织的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(1): 183-188.
- [42] 吴国华, 孙江伟, 张亮, 等. 铝锂合金材料研究应用现状与展望[J]. 有色金属科学与工程, 2019, 10(2): 31-46.
- [43] YANG W, JI S, HUANG L, et al. Initial precipitation and hardening mechanism during non-isothermal aging in an Al-Mg-Si-Cu 6005A alloy[J]. Materials Characterization, 2014, 94(8): 170-177.
- [44] YAZDANMEHR M, BAHRAMI A, ANIJAN S H M. A precipitation-hardening model for non-isothermal ageing of Al-Mg-Si alloys[J]. Computational Materials Science, 2009, 45(2): 385-387.