DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.03.006

大规格铸态7005铝合金的双级均热工艺优化

何小峰[1],莫灼强[1,2],蒋秋妹[1,2],赵启忠[1,2],黄　奎[1,2]

(1. 广西南南铝加工有限公司,广西 南宁 530031; 2. 广西铝合金材料与加工重点实验室,广西 南宁 530031)

摘　要:为优化工业化生产耗时长、耗能高、效率低的旧双级均热工艺,采用OM、SEM、图像分析软件及布氏硬度计,研究了双级均热工艺对大规格铸态7005铝合金圆锭显微组织和硬度的影响。结果表明:经450 ℃×2 h+470 ℃×32 h双级均热处理后,$MgZn_2$弥散质点完全溶解,仅残留难溶的AlMnFe、AlMnFeSi等含Fe化合物相,均热效果与旧工艺的均热效果一致,可实现工业化节能降本提质增效的生态生产。

关键词:铸态7005铝合金;双级均热工艺;显微组织;硬度;节能降本

中图分类号:TG166.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)03-0223-05

Optimization of Two-stage Soaking Process for Large-size As-Cast 7005 As-Cast 7005 Aluminum Alloy

HE Xiaofeng[1,2], MO Zhuoqiang[1,2], JIANG Qiumei[1,2], ZHAO Qizhong[1,2], HUANG Kui[1,2]

(1. Guangxi Alnan Aluminum Fabrication Co., Ltd., Nanning 530031, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Materials and Processes of Aluminum Alloys, Nanning 530031, China)

Abstract: In order to optimize the old two-stage homogeneous heat treatment process, which was time-consuming, energy-consuming and inefficient in industrial production, OM, SEM, image analysis software and Brinell hardness tester were used to study the effect of two-stage homogeneous heat treatment process on microstructure and hardness of large-size as-cast 7005 aluminum alloy round ingot. The results show that the $MgZn_2$ dispersing particle is completely dissolved after the dual-stage homogenization treatment at 450 ℃×2 h+470 ℃×32 h, and only the remaining refractory phases of AlMnFe, AlMnFeSi and other Fe-containing compounds remained. The homogenization effect is consistent with that of the old process, and the ecological production of energy saving, quality improvement and efficiency enhancement could be realized in industrialization.

Key words: as-cast 7005 aluminum alloy; two-stage homogenization treatment process; microstructure; hardness; energy conservation and cost reduction

7005铝合金属于Al-Zn-Mg系可热处理强化的中高强变形铝合金,具有密度低、比强度高、耐腐蚀性能好、热变形性能稳定及焊接性能好等优良的综合性能,广泛应用于交通运输、桥梁、建筑、航空航天及武器装备等领域[1-5]。由于7005合金中Zn、Mg元素含量较高,工业上半连续铸造时由于冷却速度较大,铸锭中容易生成非平衡共晶组织,并易产生严重的枝晶偏析,影响了铸锭的后续加工变形性能[6,7],因此需要在后续生产前对铸锭进行均匀化处理,以消除非平衡共晶组织和枝晶偏析。

目前关于7005铝合金铸锭均热工艺的研究主要集中在单级均热和双级均热两个方面[6-8]。其中,单级均热的效果不明显,不能完全溶解铸锭中的非平衡共晶组织和枝晶偏析,且提高均热温度又容易使合金过烧。众多研究表明双级均热的效果明显优于单级均热,第二级均热的温度甚至可以突破单级均热的过烧温度[8,9]。然而在工业化生产中,考虑到材料形状规格、炉温均匀性等各种因素,一般均采用较保守的双级均热工艺,第二级均热温度往往低于过烧温度,尤其是对于工业化量产的大规格铸态7005铝合金,通常采用低温长时的双级均热工艺。然而,低温长时的双级均热工艺耗时长、能耗高,生产效率低。因此,本文以节约设备能耗,提高生产效率、保证生产质量为出发点,以工业化量产的大规格铸态7005铝合金为对象,研究低温短时双级均匀化工艺对铸态7005铝合金显微组织和力学性能的影响,优化低温长时旧双级均热工艺,为工业化大生产中的均匀化提供经验和技术参考。

收稿日期:2019-10-21

基金项目:广西南宁市江南区科技重大专项项目(2019010201)

作者简介:何小峰(1985-),陕西宝鸡人,硕士,工程师.主要从事铝合金及其加工技术方面的工作.
电话:0771-4950921,Email:652482785@qq.com

通讯作者:莫灼强(1985-),广西岑溪人,博士,高级工程师.主要从事铝合金及其加工技术方面的工作.
电话:0771-4950921,Email:gyzx98gb@163.com

1 实验方法

试验材料为直接水冷半连续铸造法生产的铸态 7005 圆锭，规格为 ϕ582 mm × 5 126 mm，如图 1 所示。铸态 7005 圆锭的化学成分见表 1。该铸态 7005 圆锭的工业化双级均热工艺为：420 ℃×2 h + 470 ℃×42 h，相对于吴私等[8]采用的双级均热工艺 450 ℃×12 h + 485 ℃×4 h 而言，其均热温度较低，均热时间较长。工业化低温长时的双级均热工艺耗时长、耗能高、生产效率低，从而成本高，市场竞争力较弱。因此，本文结合工业化的特点，参考吴私等的研究成果，将第一级均热工艺设定为 450 ℃×2 h，保持第二级均热温度不变，研究第二级均热时间对 7005 圆锭显微组织和力学性能的影响，具体工艺见表 2。

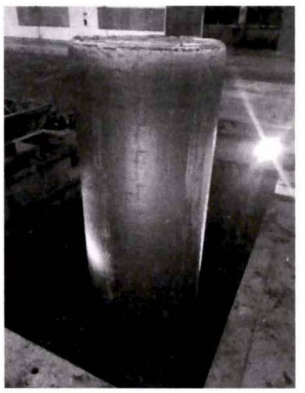


图 1 工业化铸态 7005 铝合金圆锭
Fig.1 As-cast 7005 aluminum alloy round ingots in industrialization

表1 7005铝合金的化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical compositions of 7005 aluminum alloy

Zn	Mg	Cu	Mn	Zr	Cr	Fe	Si	Ti	Al
4.42	1.28	0.06	0.36	0.14	0.12	0.16	0.03	0.03	余量

表 2 7005 铝合金铸锭的均热工艺
Tab.1 Homogenization processes of 7005 aluminum alloy ingot

试样编号	均匀化工艺	第二级均匀化时间 /h
1#	铸态(未均匀化处理)	0
2#	450 ℃×2 h + 470 ℃×12 h	12
3#	450 ℃×2 h + 470 ℃×24 h	24
4#	450 ℃×2 h + 470 ℃×32 h	32
5#	450 ℃×2 h + 470 ℃×42 h	42

分别使用扫描电子显微镜（ZEISS EVO18）、金相显微镜(ZEISS Axio Vert.A1)、金相图像分析软件及布氏硬度计(THBP-62.5)对 1#~5# 试样进行显微组织形貌观察与成分分析、化合物尺寸与面积分数分析以及硬度分析。电镜的电压为 20 KV，背散射模式；对样品先后使用 800~2 000 目砂纸粗磨，然后进行抛光至镜面，紧接着进行金相分析和 SEM 分析(抛光后的样品未经过腐蚀)。使用直径为 2.5 mm 压头检测布氏硬度，其载荷为 62.5 kg·N，保持时间为15 s。

2 实验结果与分析

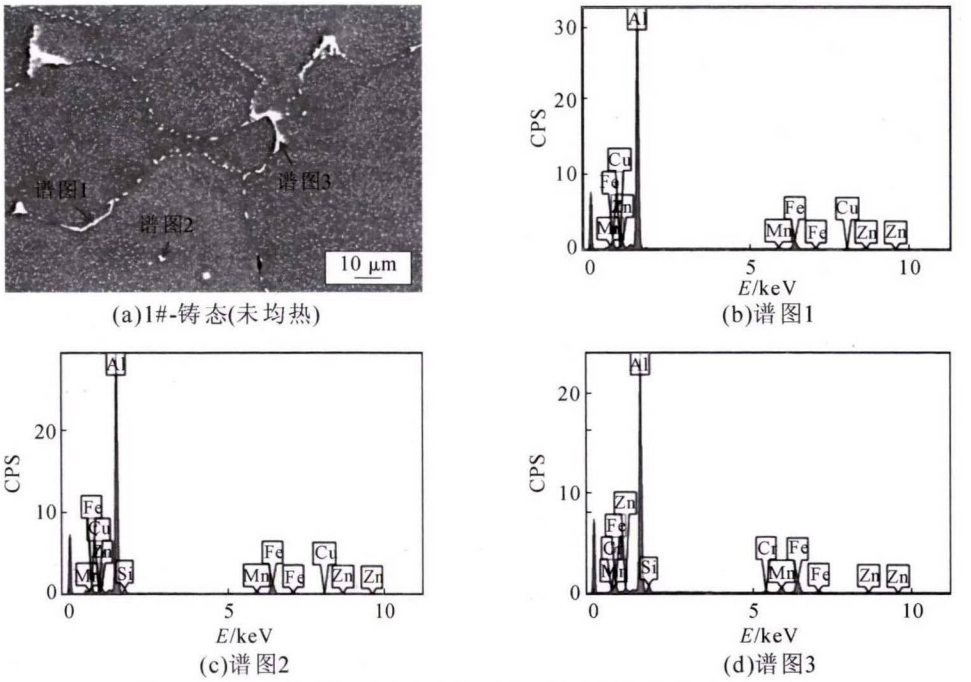
2.1 显微组织

铸态 7005 铝合金圆锭的 SEM 形貌如图 2(a)所示。从图中可以看出，铸态组织呈枝晶网状结构，枝晶偏析较严重，晶界存在着较多的非平衡共晶组织，基体上分布着较多的点状弥散质点，该弥散质点通常为 $MgZn_2$ 相，这可能是在凝固过程中由于温度的下降，使 $MgZn_2$ 相的溶解度降低，从而部分 $MgZn_2$ 相在基体上弥散析出[6,7]。对 7005 圆锭铸态组织的粗大白色化合物相进行能谱 EDS 分析，结果如图 2 中(b)~(d)所示，白色化合物相主要为 AlM nFe、AlMnFeSi、AlMnCrFeSi 和 Al_7Cu_2Fe 等难熔相，会增大合金脆性。

经过 450 ℃×2 h + 470 ℃×12 h 均热处理后，铝合金圆锭基体上的点状 $MgZn_2$ 相大部分已溶入铝基体中，晶界上的非平衡共晶组织也部分溶解扩散，只残留少量粗大的化合物相，如图 3(a)所示。经 EDS 分析表明该晶界残留化合物为含 Fe 的化合相，如图 3(e)谱图 4 所示。铸态与均热态 7005 圆锭试样化合物相的具体能谱成分见表 3(谱图 1~ 谱图 4)。对比可知，铸态 7005 合金中的 AlMnFe 和 AlMnFeSi 相中含有少量 Cu 元素，而均热态样品中基本无 Cu 元素(见谱图 4)。这表明在均热过程中，含 Cu 化合物相发生溶解，因此铸态 7005 圆锭试样经均热处理后其粗大化合物相的尺寸将会逐渐变小。将均热时间延长至 24 h，仍然有少量的 $MgZn_2$ 弥散相残留，如图 3(b)所示。当均热时间延长至 32 h 后，$MgZn_2$ 弥散相几乎完全溶入基体中，此工艺下在 SEM 形貌照片中仅观察到粗大的化合物相，如图 3(c)所示。第二级均热时间继续延长至 42 h，粗大化合物相仍然存在，其组织形貌几乎无任何变化，如图 3(d)所示。对比图 3(c)和图 3(d)可知，两者的 SEM

表 3 铸态与均匀化 7005 铝合金圆锭化合物相的 EDS 分析结果
Tab. 3 EDS results of composite phases for as-cast ingot and homogenized 7005 aluminum alloy

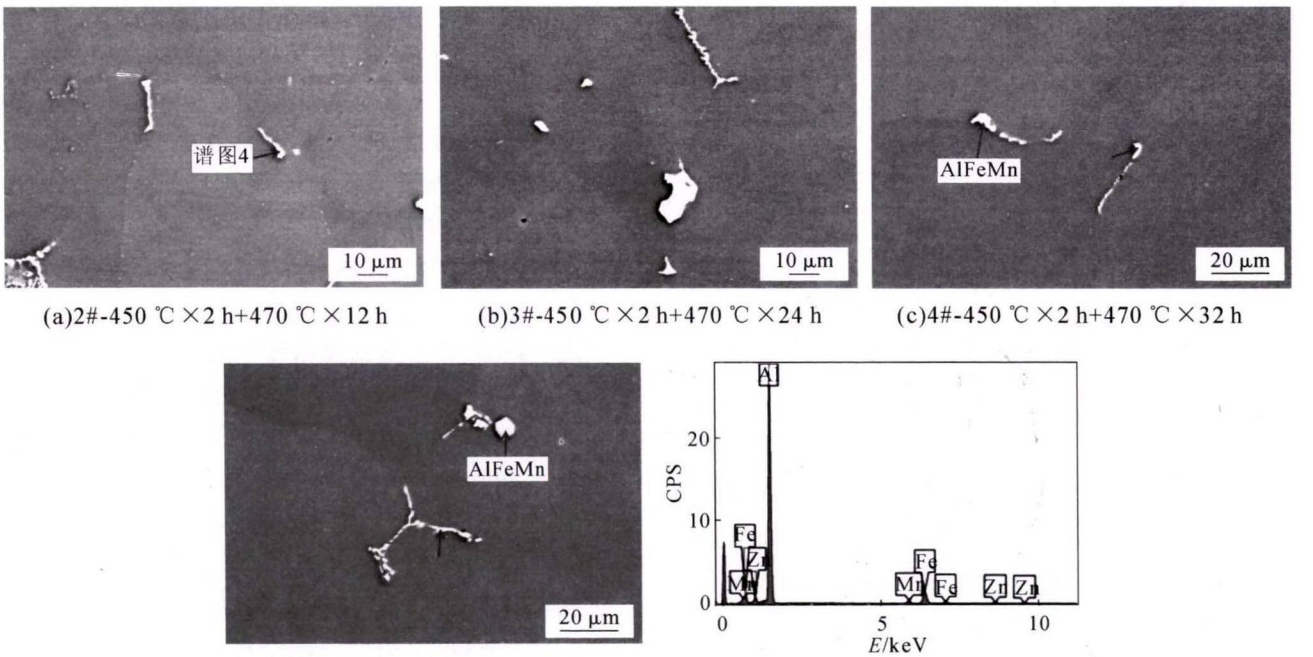
谱图编号	原子百分比(%)						
	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn
谱图 1	88.79	/	/	1.35	8.09	0.58	1.18
谱图 2	84.29	3.64	/	1.36	9.00	0.32	1.39
谱图 3	79.30	4.78	0.80	3.79	10.54	/	0.79
谱图 4	85.38	/	/	2.00	10.65	/	1.97



(a)1#-铸态(未均热)　(b)谱图1　(c)谱图2　(d)谱图3

图 2 未均匀化处理铸态 7005 铝合金的 SEM 形貌及 EDS 分析结果

Fig.2 SEM image and EDS analysis results of as-cast 7005 aluminum alloy without homogenization treatment



(a)2#-450 ℃×2 h+470 ℃×12 h　(b)3#-450 ℃×2 h+470 ℃×24 h　(c)4#-450 ℃×2 h+470 ℃×32 h

(d)5#-450 ℃×2 h+470 ℃×42 h　(e)谱图4

图 3 不同第二级均匀化时间处理 7005 铝合金铸锭的 SEM 形貌及 EDS 分析结果

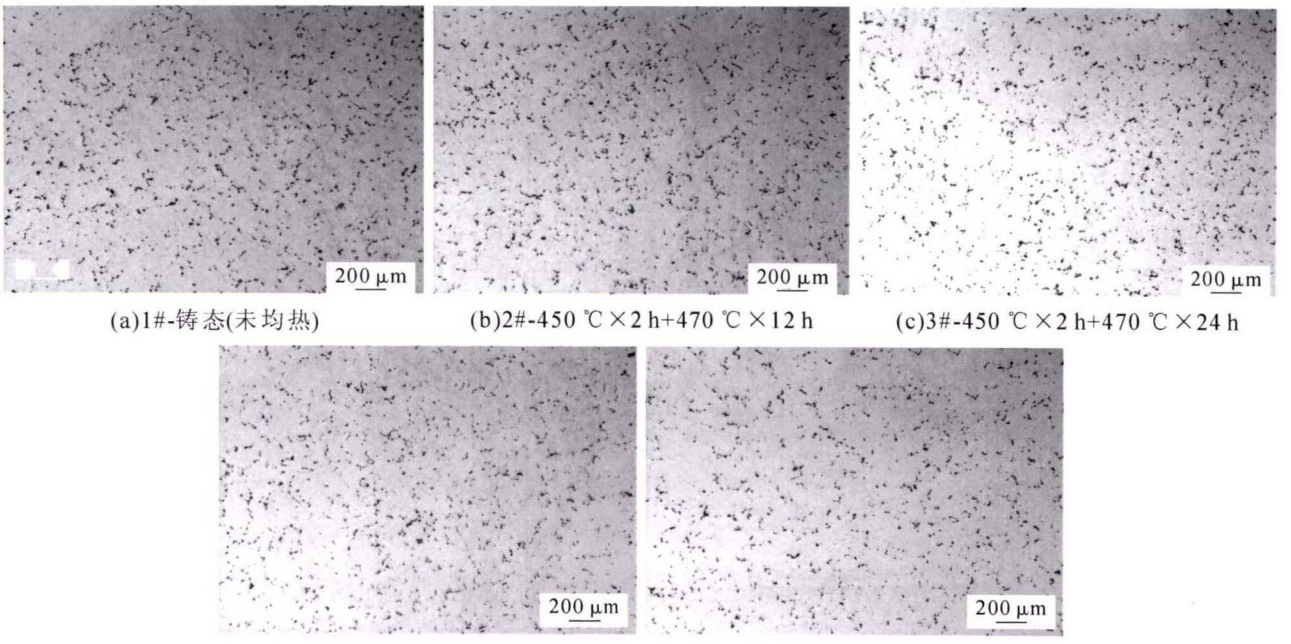
Fig.3 SEM images and EDS analysis result of 7005 aluminum alloy ingot with the different second homogenized time

形貌、第二相尺寸相近,因此旧工艺中第二级均热时间(42 h)可能过长,可进一步缩短和优化第二级均匀化的保温时间。

2.2 化合物相的尺寸与面积分数

未经腐蚀的铸态和不同第二级均热时间处理的 7005 铝合金圆锭的金相组织形貌如图 4 所示。可以看出,铸态与不同第二级均热时间处理的 7005 铝合金圆锭的粗大化合物相的分布均比较均匀,无明显聚集现象。采用金相图像分析软件测量统计粗大化合物相(图 4 红色物相)的尺寸,结果如图 5 所示。可以看出,在第二级均热温度 470 ℃下,粗大化合物相的平均尺寸和面积分数随着第二级均热时间的延长而不断减少,第二相平均尺寸从 90.59 μm 降到 64.95 μm,第二相面积分数从 1.64%降到 1.37%。

对比图 5 中曲线的变化趋势可以看出:7005 圆锭试样从第二级均热时间 0 h (铸态)、12 h 增加至 24 h 的过程中, 粗大化合物相的平均尺寸和面积分数降低的不太明显;在第二级均热时间由 24 h 延长



(a)1#-铸态(未均热)　(b)2#-450 ℃×2 h+470 ℃×12 h　(c)3#-450 ℃×2 h+470 ℃×24 h

(d)4#-450 ℃×2 h+470 ℃×32 h　(e)5#-450 ℃×2 h+470 ℃×42 h

图 4 7005 铝合金圆锭的金相组织形貌

Fig.4 Microstructures of 7005 aluminum alloy ingots

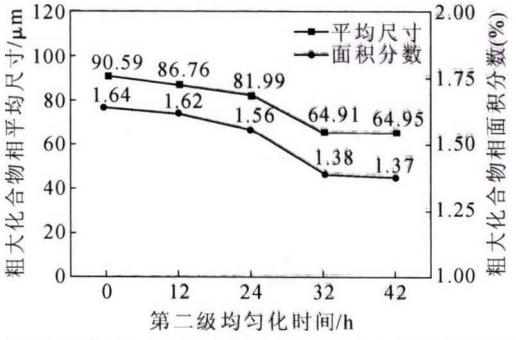


图 5 7005 铝合金圆锭粗大化合物相尺寸与面积分数随均热时间的变化曲线

Fig.5 Size and area fraction curves of coarse composite phases in 7005 aluminum alloy ingot

到 32 h 的阶段,粗大化合物相的平均尺寸和面积分数急剧下降,变化显著;当第二级均热时间继续延长至 42 h 时,粗大化合物相的平均尺寸和面积分数的减少趋于平缓。比较第二级均热时间为 32 h 和 42 h 的均热效果,发现合金粗大化合物相的平均尺寸和面积分数几乎完全一致,平均尺寸分别为 64.91 μm 和 64.95 μm,面积分数分别为 1.38%和 1.37%,说明了第二级均热 32 h 已使化合物相完成溶解,继续延长均热时间会造成能源浪费和成本提高(如均热时间从 32 h 延长至 42 h),且极有可能会使难溶第二相(如 AlMnFe、AlMnFeSi 相)更加聚集。在实际工业化生产中,7005 圆锭采用优化后的双级均热新工艺 450 ℃×2 h+470 ℃×32 h 的最终产品使用效果与旧工艺 420 ℃×2 h+470 ℃×42 h 相当。

2.3 硬度

不同均热工艺下 7005 铝合金圆锭的布氏硬度变化曲线如图 6 所示,在第一级均匀工艺和第二级均热温度恒定的前提下,7005 圆锭的硬度随着均热时间的延长从 59.3 HBW(未均热)升高至 97 HBW(均热 42 h),继续延长均热时间至 42 h,硬度略微下降至 96.5 HBW。7005 圆锭均热 12 h 后,7005 铝合金的硬度由铸态的 59.3 HBW 提高至 94.5 HBW,变化显著。这主要是在该均热工艺下不仅部分粗大化合物相溶解,还存在大量的小条点状 $MgZn_2$ 弥散质点发生回溶,使合金的晶格发生畸变,位错运动的阻力增大,从而硬度大幅度增高。继续延长第二级均热时间至 24 h,合金的硬度增高幅度趋于平缓;当第二级均热时间为 32 h 时,硬度增高至最大值 97.0 HBW。然而继续延长均热时间至 42 h 后,合金的硬度却降低至 96.5 HBW,这可能是由于均热时间过长导致少数晶粒长大,影响了合金的均热效果,使得硬度出现降低。因此,双级均匀化第二阶段的时间不宜过长,7005 圆锭的第二级均热时间为 32 h,可

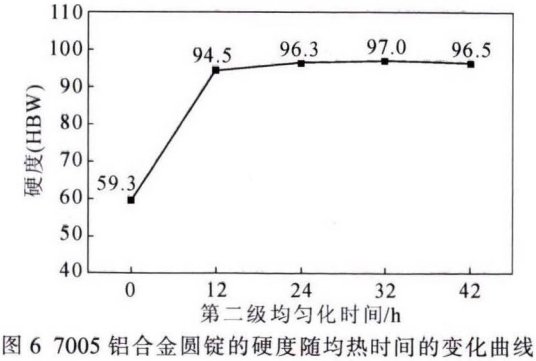


图 6 7005 铝合金圆锭的硬度随均热时间的变化曲线

Fig.6 Hardness curve of 7005 aluminum alloy ingot with homogenization treatment time

使合金的均热效果达到较优状态。

综上，结合均热前后的显微组织形貌、化合物相尺寸以及化合物相面积分数、硬度的分析结果，获得铸态 7005 铝合金圆锭较合理、较经济的均热工艺为 450 ℃×2 h+470 ℃×32 h，该均热新工艺在适用于工业化大规格 7005 铝合金圆锭的均热生产中，其综合性能优异，满足了客户的使用要求。

3　结论

(1)铸态 7005 铝合金圆锭的组织呈枝晶网状结构，枝晶偏析严重，存在较多的化合物相和点状弥散质点。

(2)7005 圆锭化合物相的平均尺寸和面积分数随第二级均热时间的延长逐渐降低。当第二级均热时间分别为 32 h 和 42 h 时，均热效果几乎一致，化合物相的平均尺寸分别为 64.91 μm 和 64.95 μm，面积分数分别为 1.38%和 1.37%。

(3)7005 圆锭的硬度随第二级均热时间的延长而逐渐提高，硬度由铸态的 59.3 HBW(未均热)提高至 97 HBW(均热 32 h)；第二级均热时间分别为 32 h 和 42 h 时，硬度无明显差异，约为 97 HBW。

(4)铸态 7005 铝合金圆锭较合理、较经济的均热工艺为 450 ℃×2 h+470 ℃×32 h，该工艺可适用于工业化大生产，综合性能满足客户的使用要求，实现工业化生产节能降本增效保质的目标。

参考文献：

[1] 王齐伟. 均匀化退火对 7005 铝合金组织及性能的影响 [D]. 郑州: 郑州大学, 2009.

[2] 李晓波，竭艳丽，梁晓宁，等. 7005 铝合金泵体型材孔洞缺陷的成因[J]. 轻合金加工技术，2019，47(5): 48-51.

[3] 王华，王岗，房洪杰，等. 7005 铝合金淬火敏感性的试验研究[J]. 轻合金加工技术，2015，43(10): 40-43.

[4] 徐从昌，叶拓，唐明，等. 动态载荷下 7005 铝合金力学行为及数值模拟[J]. 材料导报，2019，33(2): 670-673.

[5] 谭谦，邓运来，王冯权，等. 疲劳循环对 A7005 铝合金型材组织与力学性能的影响[J]. 热加工工艺，2017，46(18): 47-51.

[6] 李延军，王彦俊，陈立超，等. 7005 铝合金过烧温度的研究[J]. 热处理技术与装备，2013，34(2): 11-14.

[7] 蒋秋妹，莫灼强，刘莹，等. 大规格铸态 7050 铝合金的双级均匀化处理工艺[J]. 金属热处理，2019，44(5): 153-157.

[8] 吴私，王旭，张国福. 7005 铝合金的均匀化工艺[J]. 有色金属工程，2014，4(1): 15-19.

[9] 李学朝. 铝合金材料组织与金相图谱 [M]. 北京: 冶金工业出版社，2010.

2020 年《铸造技术》杂志征订启事

《铸造技术》杂志，月刊，1979 年创刊，中国铸造协会会刊，国内外公开发行，国内邮发代号：52-64，国外发行号：M855，中国标准刊号：ISSN1000-8365/CN61-1134/TG.

报道范围：报道国内外铸造领域的先进科技成果、应用技术、生产管理经验及信息和铸造设备，覆盖铸铁、铸钢和有色合金等铸造领域，包括砂型铸造、熔模铸造、金属型铸造、消失模铸造和压铸等特种铸造技术。

主要栏目：试验研究、工艺技术、生产技术、特种铸造、装备技术、实用成型技术、材料改性、材料开发、材料保护及表面工程、材料失效分析、应力控制与理化测试技术、今日铸造等。

发行对象：国内外铸造企业，科研院所，高等学校，铸造原辅材料厂商，设备、仪器厂商，铸件采购商等。

广告范围：刊登铸造原辅材料、铸造设备、熔炼设备、热处理设备、环保设备、检测仪器以及铸件生产、科研成果转让、企业形象宣传等相关广告。

订阅方式：请从当地邮局订阅，也可以直接从铸造技术杂志社订阅。全年 12 期，每期定价 25 元，平寄全年 300 元(含邮费)，挂号全年 336 元，快递全年 420 元。

欢迎订阅、欢迎投稿、欢迎刊登广告

地址：西安市金花南路 5 号西安理工大学 608 信箱　**邮编：**710048

联系人：李巧凤　029-83222071

电话/传真：029-82312140　**网址：**www.zhuzaojishu.net　**E-mail：**zzjs@263.net.cn

银行汇款：户　名：陕西铸造技术杂志社有限责任公司

账　号：3700 0235 0920 0091 309

开户行：中国工商银行西安市互助路支行