第32卷第7期 Volume 32 Number 7 2022年7月 July 2022

DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42042



# 真空离心铸造7055铝合金的 微观组织与力学性能

李 勇<sup>1,3</sup>,张博四<sup>1</sup>,钱晓明<sup>1,2</sup>,李新乐<sup>1</sup>,王昭东<sup>1</sup>,孟龙宙<sup>2</sup>

(1. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室,沈阳 1108192;
2. 燕山大学 国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心,秦皇岛 066004;
3. 广西先进铝加工创新中心有限责任公司,南宁 530007)

**摘 要:**采用真空离心铸造工艺制备了7055铝合金铸管坯,通过金相观察(OM)、扫描电镜(SEM)、电子探针(EPMA)分析以及硬度测试研究了铸管坯的微观组织与力学性能。结果表明:铸管坯组织呈梯度分布,从管坯的外层到内层金属间化合物面积比例、平均尺寸以及晶粒尺寸逐渐增加,晶粒形状由外层的细小等轴晶逐渐过度到内层的粗大枝晶,溶质元素浓度以及硬度逐渐增加;经均匀化热处理后,从管坯外层到内层析出相*T*相含量逐渐增加,合金外层和中层的硬度略有降低,而内层硬度大幅下降。为保证组织均匀性和性能的稳定性,该管坯厚度以不超过12 mm为宜。

关键词: 7055铝合金; T相; 真空离心铸造; 微观组织; 硬度

文章编号: 1004-0609(2022)-07-1863-09 中图分类号: TG146.2; TG249.4

文献标志码: A

**引文格式:** 李 勇,张博四,钱晓明,等.真空离心铸造7055铝合金的微观组织与力学性能[J].中国有色金属 学报,2022,32(7):1863-1871.DOI:10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42042

LI Yong, ZHANG Bo-si, QIAN Xiao-ming, et al. Effect of vacuumed centrifugal casting on microstructure and properties of 7055 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(7): 1863–1871. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42042

7XXX系铝合金由于其具有密度低、强度高以 及力学性能与加工性能良好等特点,广泛应用于航 空航天工业中。近年来,国内外大力开发新一代具 有更高的强度、韧性以及耐腐蚀性能等优点的Al-Zn-Mg-Cu铝合金,这对合金的原材料和铸锭品质 都提出了更高的要求<sup>[1-3]</sup>。

在工业生产中,半连续铸造是Al-Zn-Mg-Cu合 金铸坯的主要生产方式。然而,半连续铸造工艺制 备出的铝合金铸坯组织容易出现气孔、疏松、氧化 物夹杂等组织缺陷,大规格的铸坯中还容易出现芯 部晶粒粗大等问题,限制了其性能的进一步提 高<sup>[4]</sup>。近年来,大部分研究是通过改善现有生产技 术或优化合金成分来改善合金铸坯的组织。王睿 等<sup>[5]</sup>采用超声波辅助半连续铸造工艺制备出了具有 晶粒和第二相尺寸小、高固溶度的Al-Zn-Mg-Cu铝 合金铸锭,其抗拉强度、屈服强度和伸长率都有了 明显的提升。杨雄<sup>[6]</sup>利用受控扩散凝固的方法制备 的7075铝合金铸锭中缩松和缩孔较少,并且其晶

收稿日期: 2021-07-14; 修订日期: 2021-09-15

通信作者: 钱晓明, 讲师; 电话: 13840131519; E-mail: qxm@ysu.edu.cn

基金项目:山东省重点研发计划资助项目(2019JZZY010401);南宁市科技重大专项项目(20201041);中央高校基本科研业务费资助项目((N2007008);中央引导地方科技发展基金资助项目(206Z1601G);河北省自然科学基金资助项目(E2021203011);燕山大学科研启动经费资助项目(8190471

粒尺寸比传统铸造的小,抗拉强度和伸长率相比传统铸造的试样均有所提高。张笑宇等<sup>[7]</sup>,金辉等<sup>[8]</sup>和 YANG 等<sup>[9]</sup>通过添加微合金元素来提升 Al-Zn-Mg-Cu铝合金的组织与性能。

离心铸造作为传统的特种铸造技术,因具有铸造过程简单、金属液利用率高、铸件微观组织细密等优点。在离心铸造凝固过程中,外加力场会影响合金的凝固过程,离心力场可以加速熔体中杂质的蒸腾和排气。流场和振动通过枝晶重熔和机械破坏,同时加速熔体的散热,能够改善溶质的分布,调节晶核的生长。因此,离心铸造技术近年来得到 广泛运用<sup>[10-11]</sup>。

真空铸造是一种生产高质量铸锭的技术<sup>[12]</sup>。真 空铸造一方面可以避免熔体在熔炼铸造过程中的氧 化,另一方面,真空铸造条件下熔体中的气体更容 易在负压下从熔体中排出,从而可以更大限度地避 免气孔的出现,因此真空铸造一般可用于制备生产 高质量铸件。从理论上来讲,离心铸造与真空铸造 相结合是生产组织致密的铝合金铸坯的理想工艺原 型,可以作为提高铝合金铸坯的组织和力学性能的 一种有效手段。

本文利用真空离心铸造技术替代传统半连续铸 造工艺制备铝合金铸坯,重点对铝合金铸坯外、 中、内三层均匀化前后的显微组织以及力学性能进 行了分析,为铝合金铸管坯厚度的制定以及后续的 加工具提供理论支撑及技术参考。

#### 1 实验

本文研究的7055铝合金的化学成分如表1所 示。真空离心铸造制备的7055铝合金铸管坯是在 自行研制的真空离心铸造设备上进行的,如图1所 示,包括感应加热炉、浇注装置、漏斗、离心电 机、不锈钢金属型模具、保温包以及机械真空 泵等。

将配制好的铝合金原料投入熔炼坩埚(材质为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)内,待抽真空至气压小于10 Pa时,开启感 应加热炉进行加热,使铝合金溶液升温至740℃, 调整感应加热炉功率,使溶液温度保持在720℃并 保温10 min;然后开启离心电机,使涂有高温涂料 的模具转速达到1000 r/min后(涂完涂料的模具在安 装前会放入干燥箱在280℃温度下进行烘干处理), 将坩埚内铝液平稳浇铸至旋转的模具中;待模具内 铝液完全凝固后,停止旋转模具;最后进行脱模, 取出铝合金铸管坯。得到的离心铸造管坯尺寸为: 外径 $D_0=200$  mm、内径 $d_0=172$  mm、长度 $L_0=250$ mm、壁厚 $B_0=22$  mm(将管坯内外表面进行车圆后 的壁厚 $B_1=18$  mm)。

真空离心铸造制备得到的铸管坯的均匀化退火 过程是在高温风箱中进行的,以10℃/min的升温 速率升温至470℃,并保温24h后取出,在空气中 自然冷却。

采用 Leica DMR 型光学显微镜和 DMI5000M 型光学显微镜(OM)、SSX-550 型扫描电镜(SEM)进 行微观组织观察,电子探针(EPMA)进行元素分析, 分别于外、中、内三层(见图2)铝基体中选取8个区 域测量元素含量并取得平均值;采用了 HV-1000A 数显显微维氏硬度仪检测合金力学性能,载荷为 50 N,加载时间为15 s,分别在外层、中层和内层 的铝基体中测试16个点并取其平均值;金相试样 采用了 Keller 试剂(95 mL H<sub>2</sub>O+2.5 mL HNO<sub>3</sub>+1.5 mL HCl+1 mL HF)腐蚀以及 5%(体积分数)HBF<sub>4</sub> 阳





Fig. 1 Schematic diagram of vacuum centrifugal casting

表1 7055铝合金的化学成分

Table 1Chemical composition of 7055 aluminum alloy (mass fraction, %)

Zn	Mg	Cu	Zr	Mn	Ti	Fe	Si	Cr	Al
8.4	2.3	2.6	0.25	0.05	0.06	≤0.15	≤0.1	0.04	Bal.



图2 试样观察示意图

Fig. 2 Observation schematic diagram of specimen

极氧化。利用图像分析软件在光学显微图上进行定 量分析。

# 2 实验结果

#### 2.1 铸态组织

真空离心铸造铸坯的微观组织如图3所示。其 中,图3(a)及(a')、(b)及(b')、(c)及(c')分别代表外 层、中间层和内层的组织, 图3(a')、(b')、(c')所 示为5%(体积分数)HBF<sub>4</sub>阳极氧化后的偏光镜结果。 由图3(a)、(b)、(c)可以看出,铸态组织由铝基体和 沿枝晶边界分布的金属间化合物组成,嵌入的扫描 电镜图像分别显示了不同层金属间化合物的形貌细 节,从中观察到了一些晶界析出物具有层状形态, 这是共晶组织的典型特征。共晶结构的背散射图与 EDS结果如图4和表2所示,图谱1中灰色相含有 杂质铁元素且Cu与Fe摩尔比约为2:1,可确定为含 有Al<sub>2</sub>Cu<sub>2</sub>Fe相;图谱2中亮白色相Mg与Zn摩尔比 大致为1:2, 表明其含有 MgZn<sub>2</sub>相; 图谱3中的相 为AlZnMgCu相。从结果可以看出,晶组织主要由 AlZnMgCu相、MgZn,相以及含有少量Fe杂质的 Al<sub>7</sub>Cu<sub>2</sub>Fe相组成。由图3(a')、(b')、(c')中可以清 晰地看出,随着铸管坯的外层到内层晶粒逐渐由细 而均匀的球状等轴晶过渡到粗大的枝晶组织。为了





**Fig. 3** Microstructures of aluminum alloy by vacuumed centrifugal cast: (a), (a') Outer layers; (b), (b') Middle layer; (c), (c') Inner layer; (a), (b), (c) Optical microscope images(inset are SEM images); (a'), (b'), (c') Polarizing microscope images, anodized in 5% (volume fraction)  $HBF_4$ 



图4 共晶相的背散射像

Fig. 4 Backscattering image of eutectic phase

#### 表2 共晶相的能谱分析结果

**Table 2**Energy spectrum analysis results of eutecticphase shown in Fig. 4

Position	Mole fraction/%							
No.	Al	Zn	Mg	Cu	Fe			
1	90.13	2.80	2.49	3.45	1.12			
2	67.85	4.06	10.10	14.01	_			
3	79.75	8.69	7.94	3.63	-			

更好地说明铝合金铸管坯中金属间化合物的分布情况,对其进行了量化统计,结果如图5所示。铸管 坯中金属间化合物所占面积分数从外层到内层逐渐 增加,其面积分数从外层的4.51%增加到中层和内 层的5.30%和5.91%。晶粒的平均尺寸从外层的 102.3 μm增加到中层和内层的142.7 μm和209.5 μm,且铸管坯内层的晶粒尺寸大小不均匀,含有



图5 不同部位金属间化合物面积分数和平均晶粒尺寸 Fig. 5 Area fraction and average grain size of intermetallic compounds in different layers

少量尺寸明显大于500 µm的粗大树枝状晶粒。

#### 2.2 均匀化热处理合金组织

在470℃下均匀化热处理24h,然后在空气中 自然冷却,得到如图6所示的微观组织。由图6(a)、 (b)、(c)可以看出,不同部位中网状金属间化合物 都发生了一定程度的再溶解,但仍然存在部分残 留。实验中对均匀化热处理前后金属间化合物面积 分数及其溶解量进行了定量分析(见图7),更好地 体现出其溶解情况,均匀化热处理后剩余金属间化 合物从外层到内层仍是逐渐增加的,外层金属间化 合物面积分数为2.82%,比均匀化热处理前减少了 1.68%,即可理解为均匀化过程金属间化合物溶解



图6 均匀化处理对合金组织的影响

**Fig. 6** Effect of homogenization on microstructure of alloy: (a), (d) Outer layer; (b), (e) Middle layer; (c), (f) Inner layer; (a), (b), (c) Optical microscope images; (d), (e), (f) SEM images

1.68%; 同理, 中层金属间化合物面积分数为 3.35%, 溶解了1.94%; 内层金属间化合物面积分 数为3.83%, 溶解了2.07%; 从外层到内层金属间 化合物溶解增加。由图6(d)、(e)、(f)可以看出, 均 匀化热处理后金属间化合物部分溶解后形成少量的 颗粒状存在于晶界区域(见白色圆圈); 金属Al基体 内部发现大量细小的颗粒(见黑色矩形框)。





为了更详细地展示均匀化处理后的显微结构以 及图 6(d)、(e)、(f)中的析出相,用Keller溶液在样 品表面腐蚀5s并拍照,如图8所示。在光学显微镜 图像图8(a)、(b)、(c)中,可以看到金属晶粒内部有 大量均匀分布的颗粒状析出相,表明该过程发生了 沉淀。用扫描电镜对这些析出相进行进一步观察, 如图8(d)、(e)、(f)所示,可以看到沉淀相形态在二 维图像上呈现球状和棒状,根据文献报道该颗粒为 *T*(AlZnMgCu)相<sup>[13-14]</sup>。通过SEM像对外、中、内 层的*T*相进行定量分析,统计其长度时分别于外、 中、内三层测量了50个切面形状皆为短棒状的沉 淀颗粒的长度,并取其平均值,结果如图9所示。 由图9可知,析出相的密度由外层的1.69 µm<sup>-2</sup>增加 到中层的2.07 µm<sup>-2</sup>和内层的2.54 µm<sup>-2</sup>;析出相的 等效长度由外层的176.42 nm逐渐减少到中层的 163.96 nm和内层的150.53 nm。

为确定铝合金管坯均匀化前后铝基体中元素固 溶情况,通过电子探针对均匀化前后的合金试样的 铝基体内的元素含量进行分析,分别在外层、中层 和内层的铝基体中采取8部分区域取其平均值,(由 于是区域元素含量,所以该元素含量结果为基体与 其中T相元素含量的共同结果)。图10所示为均匀 化处理前后Cu元素都存在于金属间化合物中,很 难溶解到铝基体当中。铝合金铸坯外层与中层的 Zn、Mg含量大致相同,内层的Zn、Mg含量增加。 均匀化后Zn、Mg含量均有增加,这表明金属间化 合物在均匀化处理过程中发生了溶解,元素含量从 外层到内层逐渐减少。

### 2.3 力学性能

图 11 所示为 7055 铝合金在不同部位下的显微 硬度。从图 11 可以看出,7055 铸坯的显微硬度从



图8 均匀化热处理后合金的显微结构及析出相分布

**Fig. 8** Microstructures of alloy and dispersive phase distribution after homogenization: (a), (d) Outer layer; (b), (e) Middle layer; (c), (f) Inner layer; (a), (b), (c) Optical microscope images; (d), (e), (f) SEM images







图10 7055铝合金电子探针分析





图11 铝合金的硬度曲线

Fig. 11 Hardness curves of aluminum alloy

外层到中层与内层逐渐增加,且合金铸坯内层的硬度(132.93 HV)明显大于外层(115.45 HV)与中层(118.10 HV)。均匀化处理后,合金的外层和中层的硬度相较于均匀化处理前稍微有所下降,基本趋势保持稳定,但合金内层硬度大幅下降(104.76 HV),甚至低于外层和中层。

# 3 机理分析

铝合金熔体在离心力的作用下,凝固过程中补 缩环境可得到明显改善,缩松、缩孔等铸造类缺陷 在离心力的作用下可有效弥合(见图3)。凝固过程 具有一定方向性,熔体按照模具内壁到铸管内表面 的顺序结晶, 定向凝固使不同层的铸管具有不同的 特征。同时,随着离心铸造的进行,由于离心力逐 渐减小,所以施加在固液界面上的压力相应减少, 这是金属间化合物从外层到中层和内层的粗化倾向 的过程。此外, 散热过程是沿金属模具径向从内至 外的方向进行的。随着温度的降低,熔体外层温度 首先降低到共晶点以下,先满足金属间化合物析出 的热力学条件,并且由于金属型在与熔融金属接触 时起到冷却的作用以及模具旋转时产生的震动,使 得铸件外层金属间化合物结构尺寸较小,同时对晶 粒起到有效的细化效果,随着凝固过程的进行,冷 却速率逐渐降低,由于内层高温停留时间长为晶粒 的生长提供了时间,因此晶粒随着铸管坯由外层到 内层逐渐由细而均匀的球状等轴晶过渡到粗大的枝 晶组织(见图3)。与此同时,由于Zn、Mg等元素在 铝金属液中的溶质分配系数K<1,使得金属液中 元素含量随着固液界面向内层的移动而增加, 先析 出的粗大树枝状结晶相在离心力的作用下,向内侧 移动并被运动的固液界面捕获,使得内层的树枝状 金属间化合物要比外层的尺寸要大一些,含量也相 对多一些。

金属间化合物影响铝合金性能主要通过两种途径:一是粗大的脆性金属间化合物容易在应力荷载条件下产生应力集中,作为断裂的发生源使材料发生宏观上的断裂,因此均匀化处理过程中金属间化合物的溶解越充分,逻辑上可提升材料的力学性能,尤其是伸长率;二是金属间化合物的溶解的直接结果是更高浓度的合金元素固溶于铝基体中,影响后续析出相的数量密度及尺寸,从而影响材料的力学性能。均匀化退火是高合金含量Al-Zn-Mg-Cu合金热加工工艺的重要组成部分,可以消除成分和组织的不均匀性<sup>[15]</sup>。Al-Zn-Mg-Cu铝合金均匀化处理可分为加热、保温和冷却三个阶段。在加热和保温阶段, 会发生金属间化合物的溶解;在均匀化冷却阶段, 通常会发生二次*T*相析出;在冷却阶段初

期, Mg、Zn和Cu主要存在于Al基体中,因为它 们是从含Mg、Zn和Cu的晶间金属间化合物中释 放出来的。随着温度的降低,Mg、Zn、Cu在Al基 体中的溶解度急剧下降,过饱和固溶体通过T相的 析出发生分解<sup>[16-17]</sup>。从图7中均匀化后金属间化合 物溶解量来看,内层溶解量最多,外层最少,这也 为T相析出提供了元素条件,导致了其在Al基体中 析出的差异(见图8和9)。

通过真空离心铸造技术制备铝合金铸管的凝固 过程是非平衡过程。由于金属型散热较快,合金的 散热方向为沿径向由内向外。随着温度降低,在金 属液的最外层,温度最先降到液相线以下:随着冷 却的进行,液体中固溶的元素随着缓慢冷却逐渐迁 移至内层,内层的金属元素的固溶度要比外层的多 (见图10),因此铝合金铸管坯的内层强度要比外层 与中层高(见图11)。均匀化过程中,存在于金属间 化合物中的Zn、Mg元素溶解到铝基体当中,使铝 基体中的Zn、Mg元素含量上升(见图10)。然而, 在均匀化冷却阶段,T相的析出导致部分Mg、Zn、 Cu在Al基体中的溶解度骤然下降(以T相的形式析 出)[16-17]。即使均匀化处理后合金中金属间化合物 溶解量由外层到内层逐渐增加(见图7),但是由于T 相的析出由外层到内层逐渐增加(见图9),从而使 得均匀化处理后铝基体中合金含量由外层到内层逐 渐减少(见图10)。因此,在均匀化处理过程金属间 化合物溶解与均匀化冷却阶段 T相析出降低 Al 基体 固溶度的双重影响下,出现了均匀化处理后合金强 度低于铸态合金的强度,并且均匀化处理后内层大 量*T*相的析出,使合金内层强度在均匀化处理后大 幅度下降。

对于 7055 铝合金,均匀化处理后一般可进行 塑性加工,如挤压、锻造、轧制等。合金的变形抗 力是塑性加工的重要指标之一。变形抗力较高时, 合金的加工性能变差,容易出现开裂、表面质量 差、或需要增加中间退火等工序保证合金的加工性 能。本文中 7055 合金的硬度数据可以作为合金的 变形抗力指标的重要参考,均匀化处理后,合金的 硬度较铸态条件有所下降,改善了合金的加工性 能,且管坯内层的硬度下降最为明显,管坯的加工 性能有由外向内呈明显提升的趋势。

由实验结果可知,真空离心铸造制备出的7055 铝合金,铸坯的微观组织沿厚度方向从外层到内层 呈宏观梯度分布:无论是晶粒大小和形状,还是Al 基体中元素溶解量和硬度都呈现出该分布特征,且 外层到中层铸态组织和力学性能效果都优于内层: 均匀化退火前后铝合金外层和中层硬度变化较为平 稳,内层变化较为剧烈。硬度值对于后续的加工变 形、力学性能都有一定的对应关系,显然内层这种 剧烈变化对铝合金铸管坯后续的加工变形、力学性 能的均匀性是不利的。因此,为了获得力学性能良 好且更加稳定的铸坯,对离心铸造铸坯厚度的控制 也显得至关重要。

## 4 结论

 合金铸态组织中金属间化合物呈梯度分布, 从外层到内层金属间化合物的面积分数与平均尺寸 逐渐增加;晶粒随着铸管坯的外层到内层逐渐由细 而均匀的球状等轴晶过渡到粗大的枝晶组织,其尺 寸也逐渐增大。

2) 均匀化处理后,金属间化合物发生了溶解, T相在基体中析出;从管坯外层到内层金属间化合物溶解量逐渐增加;T相的析出从外层到内层逐渐增加。

3) 铸管坯外层的硬度最低,中层硬度略高于外层,内层的硬度大幅度高于中层;均匀化处理后,金属间化合物溶解和T相析出降低了铝基体固溶度,使得管坯外层和中层的硬度相较于均匀化处理前略有下降,内层硬度大幅下降。

4) 对于7055铝合金而言,外层和中层组织相 对比较均匀且性能相对稳定,有利于后续加工与热 变形处理,该管坯厚度以12mm为宜。

#### REFERENCES

- [1] 王国军, 王祝堂. 铝合金在中国民用航空器上的应用[J]. 轻 合金加工技术, 2017, 45(11): 1-11.
   WANG Guo-jun, WANG Zhu-tang. Application of aluminum alloy on China's civil aircraft[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2017, 45(11): 1-11.
- [2] CVIJOVIĆ Z, VRATNICA M, RAKIN M. Micromechanical modelling of fracture toughness in overaged 7000 alloy forgings[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 434(1/2): 339–346.
- [3] DUMONT D, DESCHAMPS A, BRECHET Y. On the

中国有色金属学报

2022年7月

relationship between microstructure, strength and toughness in AA7050 aluminum alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 356(1/2): 326–336.

- [4] 孙继陶. 铝合金扁锭铸造缺陷的产生及预防措施[J]. 轻合 金加工技术, 2007, 35(6): 17-22.
  SUN Ji-tao. Preventive and cause about casting defect of aluminium alloy flat ingot[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2007, 35(6): 17-22.
- [5] 王 睿,张浩宇,陈立佳,等.超声波功率对半连续铸造
   Al-Zn-Mg-Cu 合金组织与性能的影响[J].铸造技术,2019,40(4):336-340.
   WANG Rui, ZHANG Hao-yu, CHEN Li-jia, et al. Effect of

ultrasonic power on microstructure and properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy prepared by semi-continuous casting[J]. Foundry Technology, 2019, 40(4): 336–340.

[6] 杨 雄.受控扩散凝固制备7075铝合金微观组织及力学性能研究[D].兰州:兰州理工大学,2017.

YANG Xiong. Microstructure and properties of 7075 aluminum alloy fabricated by controlled diffusion solidification[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.

- [7] 张笑宇,冷利,王占军.含Zr、Sc的Al-Zn-Mg-Cu合金的低周疲劳行为[J].材料导报,2017,31(20):63-67.
  ZHANG Xiao-yu, LENG Li, WANG Zhan-jun. Low cycle fatigue behavior of Al-Zn-Mg-Cu alloy containing Zr and Sc[J]. Materials Review, 2017, 31(20): 63-67.
- [8] 金 辉, 李新梅. 微量锆、镧对 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织和性能的影响[J]. 机械工程材料, 2017, 41(2): 102-105.
   JIN Hui, LI Xin-mei. Effects of trace Zr and La on microstructure and properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy[J].
   Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41(2): 102-105.
- [9] YANG Y, TAN P, SUI Y D, et al. Influence of Zr content on microstructure and mechanical properties of As-cast Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 867: 158920.
- [10] MA Z D, PENG Q, WEI G B, et al. Improvement of microstructure, mechanical property and corrosion resistance

of Mg-9Li-3Al-1Ca alloy through centrifugal casting[J]. Metals and Materials International, 2021, 27(11): 4498–4509.

[11] 于宝义, 王 操, 郑 黎,等. 离心铸造对 AZ91 镁合金组织 及力学性能的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2018, 40(4): 380-384.

YU Bao-yi, WANG Cao, ZHENG Li, et al. Effect of centrifugal casting on microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2018, 40(4): 380–384.

- [12] XU H B, MEEK T T, HAN Q Y. Effects of ultrasonic field and vacuum on degassing of molten aluminum alloy[J]. Materials Letters, 2007, 61(4/5): 1246–1250.
- [13] PRIYA P, JOHNSON D R, KRANE M J M. Precipitation during cooling of 7XXX aluminum alloys[J]. Computational Materials Science, 2017, 139: 273–284.
- [14] LI Y, HE C S, WEI J X, et al. Correlation of local microstructures and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy build fabricated via underwater friction stir additive manufacturing[J]. Materials Science and Engineering A, 2021, 805: 140590.
- [15] 张新明,陆艳红,刘胜胆,等.分级均匀化对7055铝合金组
   织和力学性能的影响[J].中国有色金属学报,2012,22(8):
   2154-2162.

ZHANG Xin-ming, LU Yan-hong, LIU Sheng-dan, et al. Effect of step-homogenization on microstructures and mechanical properties of 7055 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(8): 2154–2162.

- [16] GHIAASIAAN R, AMIRKHIZ B S, SHANKAR S. Quantitative metallography of precipitating and secondary phases after strengthening treatment of net shaped casting of Al-Zn-Mg-Cu (7000) alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 698: 206–217.
- [17] ZOU Y, WU X D, TANG S B, et al. Co-precipitation of T'and  $\eta'$  phase in Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. Materials Characterization, 2020, 169: 110610.

# Effect of vacuumed centrifugal casting on microstructure and properties of 7055 aluminum alloy

LI Yong<sup>1, 3</sup>, ZHANG Bo-si<sup>1</sup>, QIAN Xiao-ming<sup>1, 2</sup>, LI Xin-le<sup>1</sup>, WANG Zhao-dong<sup>1</sup>, MENG Long-zhou<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling,

Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;

3. Guangxi Advanced Aluminum Processing Innovation Center Co., Ltd., Nanning 530007, China)

Abstract: The 7055 aluminum alloy casting tube was prepared by vacuumed centrifugal casting process, and the microstructure and mechanical properties of the tube were studied by metallographic observation (OM), scanning electron microscope (SEM), electron probe microanalysis (EPMA) and hardness test. The results show that the ascast microstructure presents gradient distribution. From the outer layer to the inner layer, the area fraction, average size and grain size of intermetallic compounds gradually increase, the grains gradually transit from equiaxed grains in the outer layer to dendrites in the inner layer, and the element content and hardness also gradually increase. After homogenization heat treatment, the precipitated phase (*T* phase) increases gradually from the outer layer to the inner layer of the tube, while the hardness of the outer layer and the middle layer of the alloy decreases slightly, while the hardness of the inner layer decreases greatly. In order to ensure the uniformity of microstructure and stable performance, the thickness of the tube should not exceed 12 mm.

Key words: 7055 aluminum alloy; T phase; vacuumed centrifugal casting; microstructure; mechanical properties

Foundation item: Project(2019JZZY010401) supported by the Key Research and Development Projects in Shandong Province, China; Project(20201041) supported by the Major Science and Technology Projects in Nanning, China; Project(N2007008) supported by the Basic Scientific Research Business Expenses of Central Colleges and Universities, China; Project(206Z1601G) supported by the Central Government Guides Local Science and Technology Development Fund , China; Project(E2021203011) supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province, China; Project(8190471) supported by Yanshan University Scientific Research Start-up Funds, China

Received date: 2021-07-14; Accepted date: 2021-09-15

Corresponding author: QIAN Xiao-ming, Tel: +86-13840131519; E-mail: qxmwww@126.com

(编辑 龙怀中)