

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.06.022

# “铸造合金及其熔炼”专业课创新 实验教学实践与探索

贾 征,喻 兵,赵伟博,王心彤,徐一宁,牛建平,邵一川

(沈阳大学 机械工程学院,辽宁 沈阳 110044)

**摘要:**以“铸造合金及其熔炼”专业课程为例,采用“课程教学-创新实验-探索分析-创新能力培养”的教学方法,将创新实验与其专业课程进行深度融合。结果表明,深度融合结果不仅将优秀教学资源高效整合,使教学更生动,而且可让学生深入理解课程对应关键知识点,增强学生的创新能力和积极探索能力。

**关键词:**实验教学;深度融合;创新能力培养;应用型人才

中图分类号:G642

文献标识码:A

文章编号:1000-8365(2021)06-0535-06

## Practice and Explore of Innovation Experimental Teaching on the Specialty Course: Cast Alloy and its Melting

JIA Zheng, YU Bing, ZHAO Weibo, WANG Xintong, XU Yining, NIU Jianping, SHAO Yichuan

(School of Mechanical Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

**Abstract:** Taking the course of “Cast alloy and Its Melting” as an example, the teaching method of “Course teaching-Innovative experiment-Exploration and analysis-Innovation ability cultivation” was adopted to deeply integrate the innovative experiment with its professional courses. The results show that the deep integration results can not only effectively integrate excellent teaching resources, make the teaching more vivid, but also enable students to deeply understand the corresponding key points of the course.

**Key words:** experimental teaching; deep integration; innovation ability training; applied talents

材料是人类赖以生存的和得以发展的重要物质基础,创新是一个国家进步的关键,随着社会的不断发展,创新性人才的需求量越来越大,而培养创新性人才是教育部组织实施的“高等学校本科教学质量与教学改革工程”重要内容之一。强化创新创业能力训练,增强高校学生的创新能力,以培养适应创新型国家建设需要的高水平创新人才<sup>[1-4]</sup>,这在高等教育里显得尤为重要。在材料成型与控制工程专业里,专业实验是必不可少的重要环节,也是培养学生动手能力及强化知识的重要组成部分<sup>[5-6]</sup>。

但是实验环节往往不被重视,如“验证型”实验很少涉及到学生的主观思考能力,只是让学生利用实验验证下书本上的知识点,学生的积极性也不高。如果将“专业课程”与创新专业实验深度融合,以专业实验室为“创新”平台,让学生主动愿意去探索创新,从而提高教学质量,培养出更多的创新性人才,是材料成型专业实验教学的主要努力方向之一。

“铸造合金及其熔炼”是铸造专业重要的专业基础课程之一。其中实验项目之一“物理场对合金熔体影响”教学实验是专门为材料成型专业学生开设的实验项目。这个项目一共分为3步:熔炼合金、加入外场、组织观察,本实验的目的是让学生通过外场处理的方法深入理解晶粒细化的方法,并掌握物理细化技术在材料成型中重要应用的科学手段。但是,由于专业实验课程时间非常有限,学生的创新思想和实践能力受到很大的限制。因此,通过学生查阅文献,自己设计实验,也就是课程教学-创新实验-探索分析-创新能力培养”的教学方法,将专业创新实验与材料成型专业课程进行深度融合,在创新专业实验基础上,为学生们打造更加生动的课堂,培养更多学生的科技创新能力。

收稿日期:2021-03-27

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51901037);辽宁省自然科学基金指导计划项目(2019-ZD-0561);2020年沈阳大学大学生创新创业训练计划项目(S202011035067);2020年沈阳大学教学改革重点项目;辽宁省教育厅创新人才支持计划(LR2019043);2019年省社科联项目(2020slsktyb-067)

**作者简介:**贾 征(1982—),辽宁沈阳人,博士后,副教授,研究方向:轻合金成型教学与科研方面研究。

Email:jz140@163.com

## 1 学生实验

### 1.1 课程教学实验背景

外场细化技术在 20 世纪就已经得到了人们的广泛关注。比如外场细化中的超声波细化技术,因超声波对环境无任何不良影响,改善工人劳动环境等绿色环保优势,越来越普遍的应用于各领域中<sup>[7-9]</sup>,有研究发现高频超声振动所产生的空化效应和声流的搅拌作用具有细化和除气双重作用,同时合金铸锭质量及力学性能也进一步提高,得到了国内外学者的广泛青睐<sup>[10-14]</sup>。因此,在学生掌握了上述一定的理论知识和实践技能的基础上,对外场细化进行深入研究,承担了一项国家级大创计划项目“超声场对合金细化及除气的影响”。在本次教学实验中,选用溶质含量相同的合金,也就是 Al-2X(X=Si、Cu、Mg、Sn)合金,利用高强超声场对其进行处理,考察其对细化和除气的影响。最后通过观察与分析验证其超声场细化和除气的效果。

### 1.2 学生创新设计实验

学生所用实验设备包括超声波发生器,其最大输出功率为 2 000 W,频率为 20 kHz;还包括熔体控温的控温表、井式电阻炉、超声波支架(可实现超声探头的上下前后移动)及粘土-石墨坩埚,见图 1 所示。Al-2X(X=Si、Cu、Mg、Sn)4 种合金是按照质量分数分别将工业纯铝(99.7%)与 Al-20Si 中间合金、电解铜片、纯镁与纯锡熔炼而成,熔炼时使用石墨杆多次搅拌金属熔体使成分均匀化,将浇注成型后的铸锭使用切割机切成小块,留待重熔使用。将制备好的合金小块放入一号粘土-石墨坩埚中进行重熔,每组试样的质量为 200 g 左右,当熔体温度在 730 °C 稳定 10 min 后,将超声波探针置于熔体液下 5 mm 处,分别进行超声处理 60、90、120 s 的,直至铸锭凝固至室温(20 °C 左右)后得到铸锭。将获得的铸锭密度采用阿基米德原理进行测量,最后将铸锭

从顶部向下切成对称的两块,分别用于宏观组织观察和微观组织观察,其中微观组织观察在距离超声探头 5 mm 处取样,试样大小为 10 mm×10 mm×10 mm,此试样用于微观组织观察。

### 1.3 实验结果与验证

学生研究发现,图 2 为 Al-2X 合金(X=Si、Cu、Mg、Sn)的宏观组织照片。从图中可以看出,对于未处理的溶质相同的合金铸锭,如 Al-2Si 合金,铸锭上部有少量柱状晶,中心部位为粗大等轴晶,且铸锭内部存在很多肉眼可见的气孔;对于 Al-2Cu 合金,凝固组织也较为粗大,气孔也较多;对于 Al-2Mg 合金来说,铸锭出现了粗大的等轴晶和柱状晶,尺寸十分不均匀;对于 Al-2Sn 合金,情况与 Al-2Mg 合金类似,出现粗大的柱状晶及等轴晶。但是,当超声处理时间持续延长时,发现不同溶质含量的合金以及晶粒尺寸均出现一定程度的细化且肉眼可见的气孔也越来越少;但是当处理时间达到 120 s 后,铸锭的凝固组织(如 Al-2Mg 及 Al-2Sn 合金)出现粗大的等轴晶及气孔,这是由于超声处理时间较长,导致铝液温度较低,熔体的粘度较大,气体较难“逃逸”出熔体中去,因此出现了气孔,个别铸锭凝固组织粗大是由于超声处理导致的热效应所导致,这将在后面的分析中进行详细说明。可见超声对于溶质含量相同的合金细化和除气程度不同,但是工艺条件合适时均具有较好的细化和除气效果。

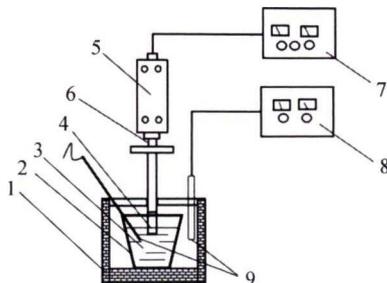
学生为了进一步分析超声处理对 Al-2X 合金(X=Si、Cu、Mg、Sn)的超声处理效果,图 3 制备了其显微组织照片,可见没有超声处理的铸锭,无论是哪一种合金,中心部位凝固组织均比较粗大,且内部分布着大小不一的气孔,这些气孔均分布在晶界左右,尤其对于 Al-2Mg 合金,凝固组织中存在大量的气孔;但经过不同超声处理时间后,可看出 Al-2Si、Al-2Cu、Al-2Mg 及 Al-2Sn 合金的组织随着处理时间的延长不断的细化、球化;且组织内部的气孔也不断的减少,凝固组织越来越致密,但是随着时间的延长至 120 s,Al-2Mg 合金及 Al-2Sn 合金的凝固组织出现了粗大的趋势。

## 2 探索分析与创新能力培养

针对上面实验结果,学生进行了相关分析,首先学生查阅资料可知,合金熔体除气率  $\eta$  定义如下<sup>[15]</sup>:

$$\eta = \frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_b - \rho_0} \quad (1)$$

式中, $\rho_0$  未除气合金试样密度, $\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $\rho_a$  除气合金试样密度, $\times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;



1- 井式电阻炉;2- 粘土-石墨坩埚;3-Al-2X 熔体;4- 超声波探针  
5- 波能转换器;6- 调速杆;7- 声波发生源;8- 测温仪;9- 热电偶

图 1 超声场装置布置示意图

Fig.1 Schematic diagram layout of ultrasonic field device

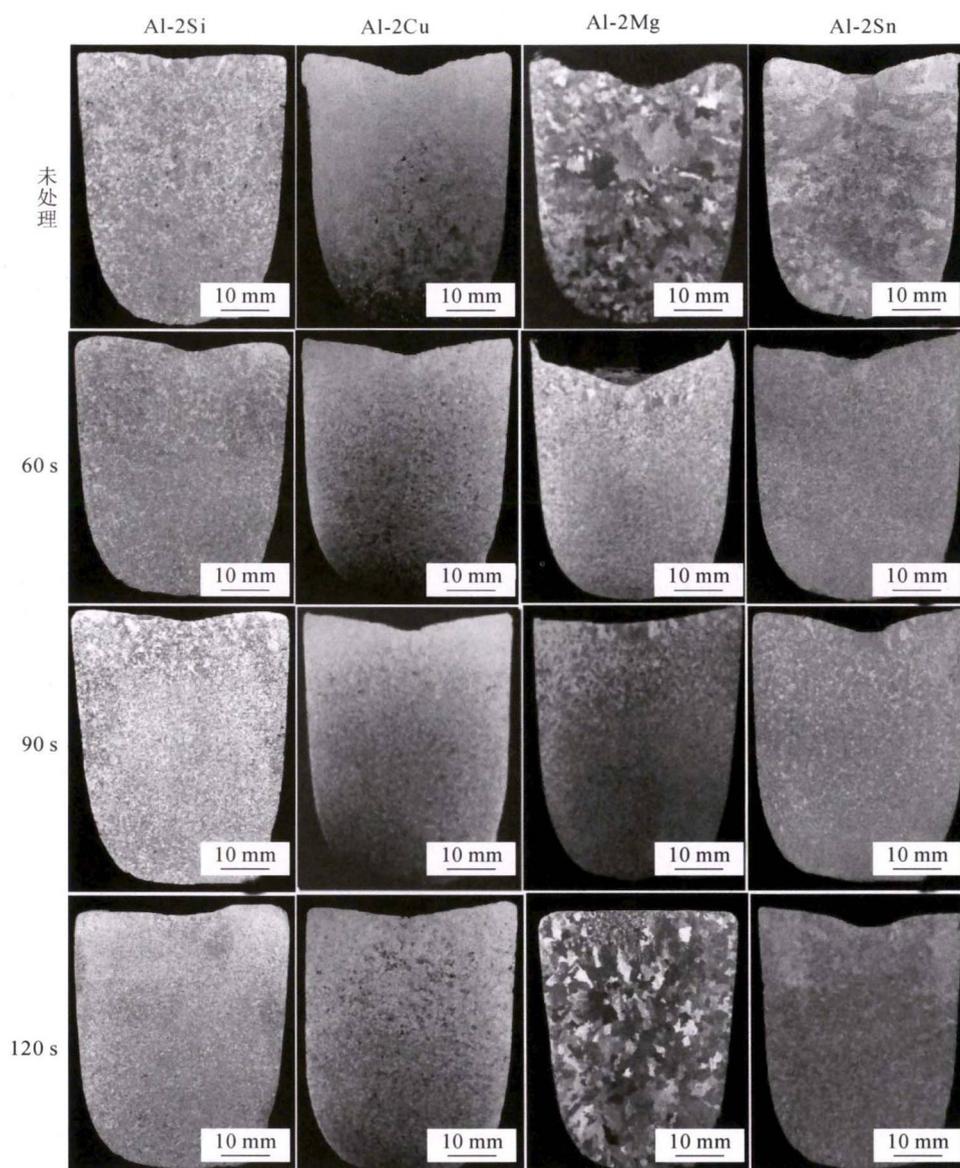


图2 不同超声处理时间下 Al-2X(X=Si、Cu、Mg、Sn)合金的宏观组织

Fig.2 Macrostructure of Al-2X(X=Si、Cu、Mg、Sn) alloy with different ultrasonic duration

$\rho_b$  合金试样理论密度 (Al-2X 合金试样理论密度 (Al-2Si、Al-2Cu、Al-2Mg 及 Al-2Sn 合金理论密度分别是  $2.6904 \times 10^3$ 、 $2.7372 \times 10^3$ 、 $2.6694$ 、 $2.7334 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )。

为了详细考察不同超声处理时间的除气效果及除气率,测定了超声处理前后铸锭的密度并计算了其除气率,结果如图4所示。从图中可以看到,对于 Al-2X(X=Si、Cu、Mg 和 Sn)合金来说,施加一定的超声处理后铸锭的密度及除气率得到了大幅度提高。对于 Al-2Si 和 Al-2Cu 合金来说,规律比较类似,60、90、120 s 的时间铸锭密度及除气率变化不大;而对于 Al-2Si 合金,60~120 s 的处理时间都是合适的,60 s 的效果较好;对于 Al-2Cu 合金时间为 90 s 时,除气效果略高于其他处理时间;而对于 Al-2Mg 及 Al-2Sn 合金,超声处理 90 s 的铸锭密度及除气率达到峰值,然后急剧下降,上述研究表明

溶质含量相同的铝合金除气工艺参数都不相同,对于这 4 种合金来说,Al-2Mg 的最佳除气率在 4 种合金中最低,为 51.9%,这是由于 Al-2Mg 合金由于加入了镁元素,导致熔体的整体含氢量较高,在凝固后的试样中也证明了这一点,如图 3。因此,在相同的工艺条件下处理导致合金铸锭密度和除气率均较低。

学生通过研究本实验结果并查阅相关资料得知,从本研究可以看出,超声进行除气过程中,铸锭的晶粒尺寸也得到了一定程度的细化。因此,这里从细化和除气两个方面进行分析。首先,当使用超声处理熔体时,产生的空化气泡会在正负周期中长大和收缩,如图 5。熔体经超声处理后晶粒细化的原因有两个:首先,空化气泡的生长可以吸收熔体中的热量,然后在气泡界面受到冷却影响而形核;随后空化气泡的破裂产生巨大能量粉碎熔体中的初始晶核和枝晶,导致晶核数量增加,晶粒尺寸变小,且产生的

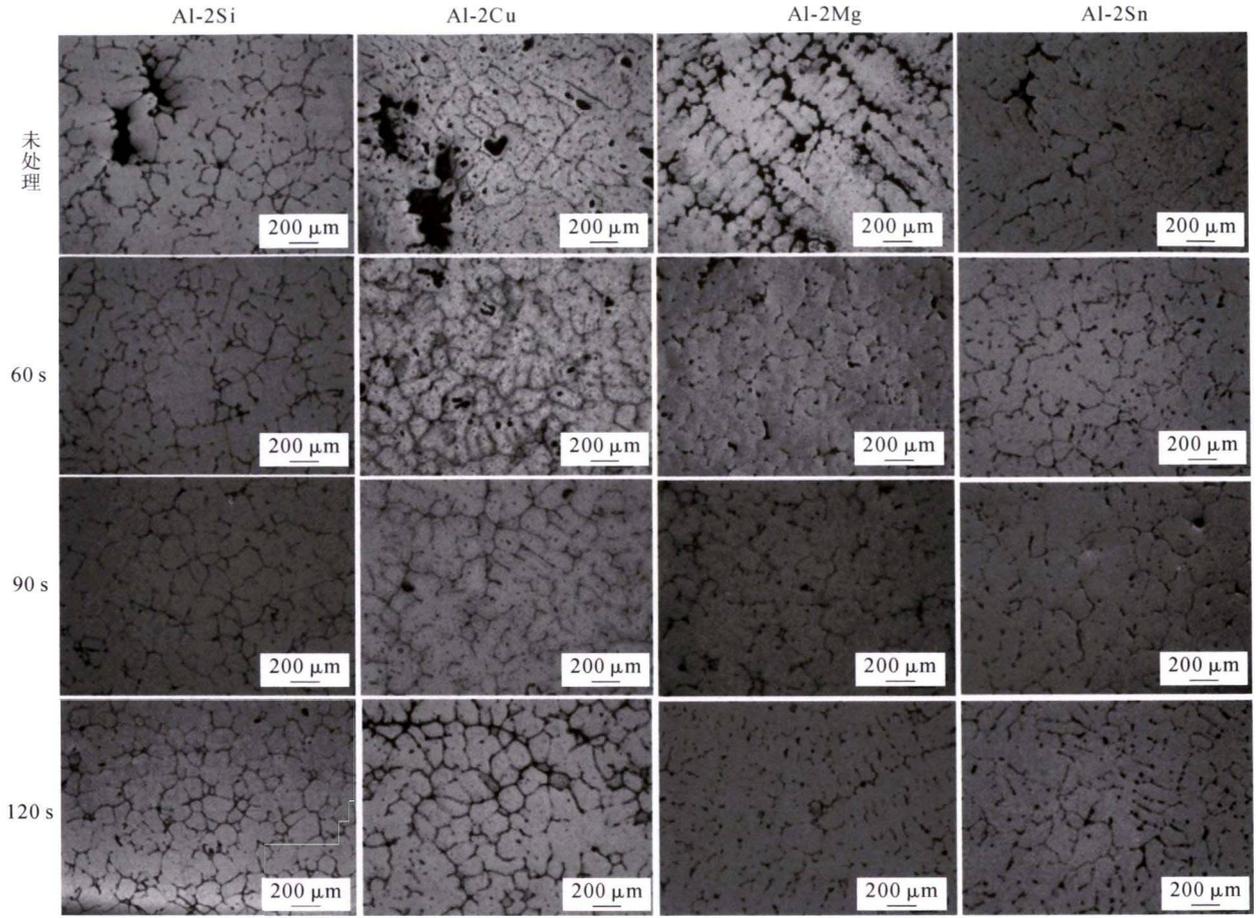


图 3 不同超声处理时间下 Al-2X(X=Si、Cu、Mg、Sn)合金的微观组织  
Fig.3 Microstructure of Al-2X(X=Si、Cu、Mg、Sn)alloy with different ultrasonic duration

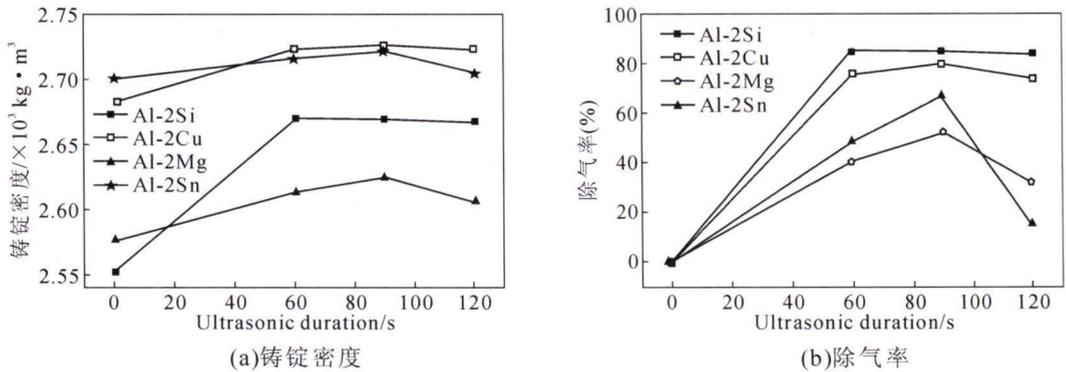


图 4 超声处理时间对 Al-2X(X=Si、Cu、Mg、Sn)合金铸锭密度及除气率的影响  
Fig.4 Effect of ultrasonic duration on density and degassing efficiency of Al-2X(X=Si、Cu、Mg、Sn)alloy ingot

声流是一种由于声压梯度引起的液体流动,也有利于晶粒细化。

从热力学角度来分析,铝液熔点  $dT$  的变化和压力  $dP$  的变化满足 Clapeyron 方程,表达式如下:

$$\frac{dT}{dP} = T_m \frac{\Delta V}{\Delta H} \quad (2)$$

式中,  $T_m$  铝液凝固点温度, K;  $\Delta V$  凝固时的体积变化,  $m^3$ ;  $\Delta H$  凝固时金属焓变化, J, 其中压力变化对焓的影响可以忽略。

因为超声引起的空化效应会对熔体微区产生高压,根据式(2),超声产生的高压冲击波导致熔体

的部分区域凝固点上升,因此过冷度增大,所以大幅度提高其形核率,空化气泡周围将不断形核,根据图 5,在声流的不断搅拌作用下,进行同向长大,晶粒细小、均匀并进一步球化,本实验主要认为是超声产生的空化效应的过冷形核起到了主要的效果。

因此,根据上面的分析,实验结果可分析如下:当 Al-2X 熔体受到高强超声作用时,铝合金熔体内发生空化效应产生大量的空化气泡,随着超声处理时间延长,空化效应和声流的搅拌作用不断增大,因此晶粒不断细化,除此之外,超声产生的热作用也是一个影响细化的主要因素。如果时间处理过长,会导

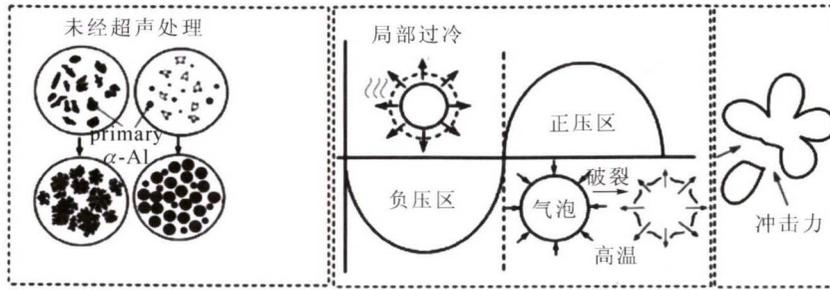


图5 晶粒细化示意图  
Fig.5 Schematic grain refinement

致熔体温度有所提升,晶核会有部分重熔导致晶粒有所粗大。本实验中,对于 Al-2Si 及 Al-2Cu 合金,合适的超声处理时间为 60~90 s,以 60 s 细化效果最佳,进一步提高时间会浪费资源;而对于 Al-2Mg 及 Al-2Sn 合金,合适的超声处理时间为 60~90 s,60 s 细化效果已经比较明显,进一步提高时间会浪费资源;而对于 Al-2Mg 及 Al-2Sn 合金,合适的超声处理时间为 90 s,进一步加长时间会导致效果变差。因此,虽然溶质含量相同,不同的合金处理工艺参数及除气率都不尽相同。

图 6 为超声除气的机理图,当施加适宜的超声波处理熔体时,产生的空化气泡吸附周围的氢原子,此时气泡会迅速长大析出,达到除气目的。因此,对于本实验除气效果可分析如下:铝熔体中一般都有过量的氢,当超声探头插入熔体中时,因为超声功率较大(2 000 W),属于空化效应的发展-发达阶段,空化气泡形成比较容易且非常活跃,气泡之间结合长大的几率大大增加,最后“逃逸”出熔体表面。所以,增大超声时间产生空化效应气泡也会增多,使合金的除气效果越来越明显。但由于铝液界面处于空气中,将会同时产生吸收氢气和逸出氢气这两种完全相反的过程,在氢含量不高的铝合金熔体中,外界的部分气体也会在超声波作用的同时进入熔体中;并且随着处理使劲延长,熔体的粘度也会下降,气泡逸出也会比较困难,因此,若超声时间过长会造成铸锭密度及除气率会有下降。

根据上述分析,学生得出以下 3 条结论:①超声对 Al-2X(X=Si、Cu、Mg、Sn)合金进行超声处理均有良好的细化及除气作用,对于 Al-2Si 及 Al-2Cu 合金,最佳的细化和除气工艺为 2 000 W×60 s;对

于 Al-2Mg 及 Al-2Sn 合金,最佳的细化和除气工艺为 2 000 W×90 s;②Al-2X(X=Si、Cu、Mg、Sn)合金在最佳超声处理条件下的除气率分别为 85.2%、79.5%、51.9%及 66.9%,这是由于溶质含量相同的铝合金性质不同,最后,Al-2X(X=Si、Cu、Mg、Sn)合金经过超声处理后晶粒得到明显细化,学生分析认为是由超声空化效应引起的过冷生核导致。

### 3 创新实验与专业实验教学与深度融合

学生在实验结束后对实验结果和方法进行了对比和分析,通过查阅文献对高强超声处理对 Al-2X 合金细化及除气的影响实验有了进一步的了解,从而对专业课也有了更深一步的认识,材料成型专业实验不同于基础学科,重视拓展学生们的专业知识,培养学生对于材料加工的进一步创新。以前,材料成型实验教学中大多采用验证性操作试验,其思维模式较为固定,而设计创新实验是培养学生创新思维最好的学习方式。这有利于学生探索新问题,深入探究书本上知识的来龙去脉,深入理解并发现更新的问题从而加以解决,且能大大提高学生的学习兴趣。创新实验与“专业课”深度融合,可以起到更好的教学效果,可充分利用学校现有的实验条件,调动学生学习的浓厚兴趣,还可将“创新实验”成果反馈实验教学,很大程度上调动与发挥学生的求知欲,契合新工科专业实验教学的培养目标。

### 4 结语

材料成型及控制工程专业以创新创业训练计划为导向,将创新实验更好的融合到课堂实验的教学

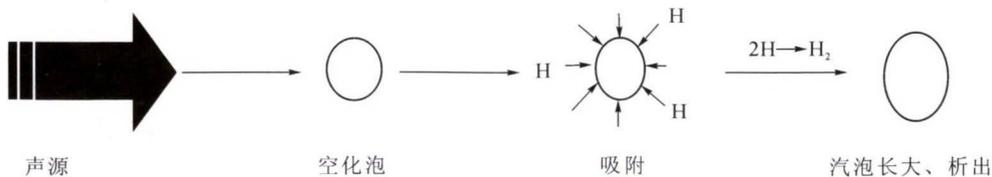


图6 超声除气机理图  
Fig.6 Mechanism diagram of ultrasonic degassing

中。深度融合结果不仅将优秀教学资源高效整合,使教学更生动,而且可让学生深入理解材料成型相对应知识点,增强学生的创新能力和积极探索能力,对培养应用型人才意义重大。专业实验取得的阶段性成果,可为下一阶段大创计划项目的立项提供理论依据与支撑,同时也可为同类兄弟院校实验室建设提供一定的参考。

**参考文献:**

[1] 梁艳峰,郭永春,杨忠,等.突出工程实践的工科专业教学体系改革研究[J].铸造技术,2018,39(3):732-735.  
 [2] 杨兵兵,王艳芳,邓志博,等.基于工学结合培养模式的高职焊接专业实践教学体系的构建[J].铸造技术,2014,35(9):2125-2127.  
 [3] 苏莹莹,梁迪,单麟婷.工业工程专业中外合作办学人才培养模式的研究[J].高教学刊,2016(4):21-22.  
 [4] 邵一川,李常迪,赵骞,等.基于均衡负载的VR Room在远程教学中的应用[J].沈阳大学学报(自然科学版),2020,32(4):323-330.  
 [5] 胡志,闫洪,艾凡荣,等.基于“卓越计划”的材料成型及控制工程专业创新实践教学体系构建[J].实验技术与管理,2019,36

(5):205-208.  
 [6] 郑超,宋立彬,王新洪,等.材料成型及控制工程专业虚拟仿真实验室的建设和实践[J].实验技术与管理,2019,36(3):261-265.  
 [7] 贾征.几种镁合金与铝合金熔体的除氢工艺研究[D].沈阳:东北大学,2014.  
 [8] 范金辉,翟启杰.物理场对金属凝固组织的影响[J].中国有色金属学报,2002(12):12.  
 [9] 张忠涛.外场对铝熔体异相粒子运动及其凝固行为影响研究[D].大连:大连理工大学,2009.  
 [10] 姜佳佳.AZ91镁合金熔体除氢工艺及其对组织与性能的影响[D].沈阳:东北大学,2014.  
 [11] 贾征,李又佳,席玖瑞,等.镁合金晶粒细化技术研究进展之一——物理细化技术[J].特种铸造及有色合金,2020,40(6):607.  
 [12] XU H B, HAN Q Y, THOMAS T M. Effects of ultrasonic vibration on degassing of aluminum alloys [J]. Materials Science Engineering A, 2008, 473: 96.  
 [13] 李军文,由向群,付莹,等.超声波共振度对铸锭内气孔生成的影响[J].铸造技术,2008,29(6):790.  
 [14] ABRAMOV O V. Ultrasound in Liquid and Solid Metals[M]. CRC Press, Boca Raton, 1994.  
 [15] LI J W, MOMONO T, YOSHINORI T, et al. Application of ultrasonic treating to degassing of metal ingots [J]. Materials Letters, 2008, 62: 4152.

均衡凝固技术资料邮购

国家科技成果重点推广计划项目 编号: I-1-5-3  
 西安理工大学均衡凝固技术科研成果汇编

**铸件充填与补缩工艺定量设计理论与实例**



《铸件充填与补缩工艺定量设计理论与实例》是西安理工大学均衡凝固技术科研成果的汇编,被列为国家科技成果重点推广计划项目,编号I-1-5-3。汇编共分6章:第一章 铸铁件均衡凝固与有限补缩。第二章 铸铁件冒口补缩设计。第三章 浇注系统当冒口补缩设计方法。第四章 浇注系统大孔出流理论与设计。第五章 铸钢白口铸铁铝钢合金铸件的均衡凝固工艺。第六章 铸件充填与补缩工艺定量设计实例。可用于铸件浇注系统,冒口补缩系统的定量设计,包括浇口、冒口的位置、大小、个数,冷铁的放置。也可用于对已有铸件浇口、冒口设计的定量评估,及对已产生的铸造缺陷的分析与防治。浇口、冒口的开设要防止几何热节、接触热节、流动热节的重合;在冒口颈处放冷铁消除冒口根缩孔、缩松缺陷;控制浇口截面比实现垂直分型等压等流量设计等技术,通过生产实例给予展现,可供生产应用参考。汇编邮购价160元。

联系地址: 710048 西安市金花南路5号 西安理工大学608信箱  
 联系人: 李巧凤 13991824906 QQ: 53985132 E-mail:53985132@qq.com  
 李亚敏 15829361158 QQ: 412008096 E-mail:412008096@qq.com  
 技术咨询: 魏兵 13609155628