DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.08.021

基于材料成型大赛与《液态成型原理》课程实验的深度融合

贾　征,喻　兵,牛建平,宋婷婷,邵一川
(沈阳大学 机械工程学院,辽宁 沈阳 110044)

摘　要:以"材料成型大赛"为例,采用"课程教学-大赛实验-探索分析-创新能力培养"的教学方法,将材料成型大赛与《液态成型原理》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相关知识点,增强学生的学习专业知识浓厚兴趣、创新能力和积极探索能力。

关键词:材料成型大赛;课程实验;深度融合;应用型人才
中图分类号:G642　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)08-0739-06

Deep Integration Based on the Material Forming Competition and the Teaching Experiment of Principle pf Liquid Forming

JIA Zheng, YU Bing, NIU Jianping, SONG Tingting, SHAO Yichuan
(School of Mechanical Engineering, Shenyang University, Shenyang 110044, China)

Abstract: Taking "Material Forming Competition" as an example, the teaching method of "course teaching-competition experiment-exploration and analysis-innovation ability cultivation" was adopted to deeply integrate the material forming competition with the course "Principle of Liquid Forming". The results show that the deep integration results can not only effectively integrate excellent teaching resources, make teaching more vivid, but also enable students to deeply understand the relevant knowledge points of the course, and enhance students´interest in learning professional knowledge, innovation ability and active exploration ability.

Key words: material forming contest; course experiment; deep integration; applied talents

材料成型及与工程专业是培养具有扎实成型专业知识、素质高、动手能力强及能够利用所学专业知识综合解决实际工程问题的人才[1-3],面对"中国制造2025"发展战略目标和"新工科"建设要求,成型专业也面临着严峻的转型问题[4-6]。《液态成型原理》课程是成型专业重要的基础课程之一,在专业建设中具有重要的支撑作用,主要是培养学生能够灵活利用所学知识分析金属的液态成型过程,从而正确来指定铸造工艺。但是,由于本课程接触实际偏多,学生理解起来非常困难,因此,本课程制定了若干个实验内容。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,如果将"成型大赛"与专业实验深入融合,以专业实验室为"大赛"平台,以"大赛"促进专业实验教学,让学生主动愿意去探索创新,从而培养出更多的创新性人才。

以材料成型及控制工程专业实验项目之一"外场对合金熔体的影响"教学实验为例,是专门为材料成型及控制工程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,将大赛项目与材料成型及控制工程专业实验进行深度融合。每年专业实验室承担成型大赛项目6~7项,并以专业实验为拓展进行承担成型大赛项目,形成以大赛项目为依托的专业实验教学。下面将从"大赛"的实验过程开始,在专业实验基础上,培养更多学生的科技创

收稿日期:2021-04-05
基金项目: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(2020lslktyb-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

新能力，这对培养具备实践创新能力的工程技术人才具有很重要的意义。

1 学生设计实验过程

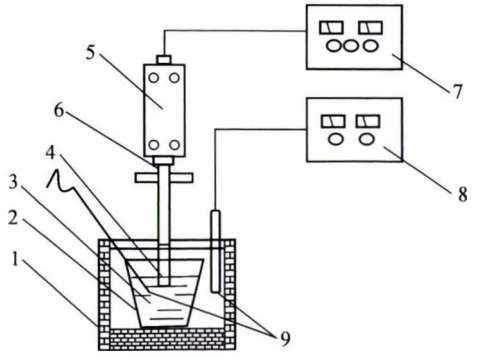
1.1 课程教学实验背景

外场细化技术在上个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，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[7-9]。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，选用合金为 Al-8Cu 简单二元合金，利用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 创新设计实验

试验原材料为 Al-8Cu 合金，采用 99.7% 的工业纯铝与电解铜熔配而成，采用 20 号粘土-石墨坩埚进行熔配，期间使用石墨杆多次搅拌金属熔体使成分均匀化，之后浇注到 1 号粘土-石墨坩埚中进行冷却，将其冷却后的铸锭进行切割成小块重熔待用。

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 1 号粘土-石墨坩埚，见图 1 所示。



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 layout of ultrasonic field device

试验为两组，共计 6 个式样。具体如下，第一组实验制取四个试样：将重熔铸锭分别放入 4 个 1 号粘土-坩埚中进行重熔，每个坩埚中大概有 200 g 熔体，当温度达到温度 700 ℃稳定后，将超声探头插入到熔体液面下进行一定时间的超声处理，处理时间分别为 60、90 及 120 s，处理完成后迅速将超声探头取出，自然冷却后得到铸锭，为了对比，也制备出没有经过超声处理的铸锭。

第二组实验制取两个试样：将 1 kg 配好的 Al-8Cu 合金进行重新熔炼，720 ℃时需要保温 10 min，此时添加六氯乙烷（熔体质量 1%）进行除气，等待 10 min，然后将 200 g 铝液浇注到一号粘土石墨坩埚中制取仅 C2Cl6 除气试样后，再将 200 g 左右熔体浇注到 1 号粘土-石墨坩埚中，进行 30 s 超声处理，得到 1% C2Cl6-超声联合处理 30 s 的试样。

所有冷却后制取的铸锭先用阿基米德法测出密度，随后将铸锭从上向下切为两半，分别作宏观组织和微观组织观察。其中，宏观组织的试样如图 2 所示；对于微观组织试样，将其距离超声探头 5 mm取样，试样大小为 10 mm × 10 mm × 10 mm。其中，Al-8Cu 合金宏观腐蚀液为：HCl∶HF∶H_2O = 15∶10∶90，显微组织腐蚀液为：5% HF 水溶液。

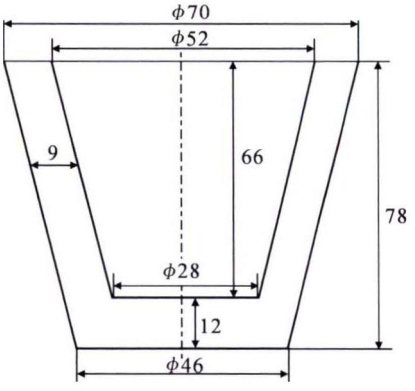


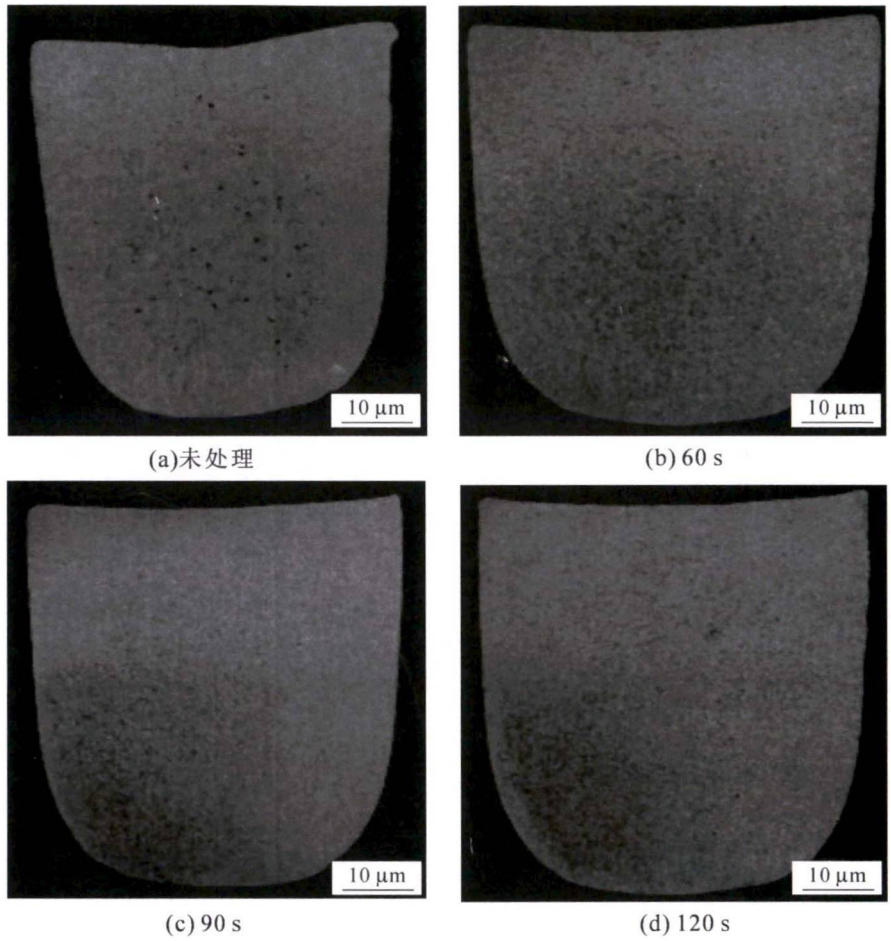
图 2 制备试样的石墨坩埚尺寸

Fig. 2 Dimension of graphite crucible for making samples

1.3 实验结果与验证

学生制备了不同处理时间对 Al-8Cu 铸锭凝固组织的宏观照片，如图 3。可看出未经过超声处理时，铸锭的断面基本上由等轴晶组成，但是，从图中明显可以看出，铸锭内部存在相当多肉眼可见的气孔，如图 3(a) 所示；当 60 s 超声处理后，可见气孔减少非常明显，铸锭的凝固组织细化的更加明显，如图 3(b) 所示；当超声处理时间延长到 90 s 及 120 s 时，形成的凝固组织由细小且均匀的等轴晶组成，但是气孔的角度来看，图 3(c) 的气孔要少于图 3(d) 的气孔，说明这种情况下超声处理 90 s 的除气效果最佳，这一点将从后面进行分析。

学生也制备了为超声处理不同时间后 Al-8Cu 合金的凝固微观组织，如图 4 所示。图 4(a) 中可见

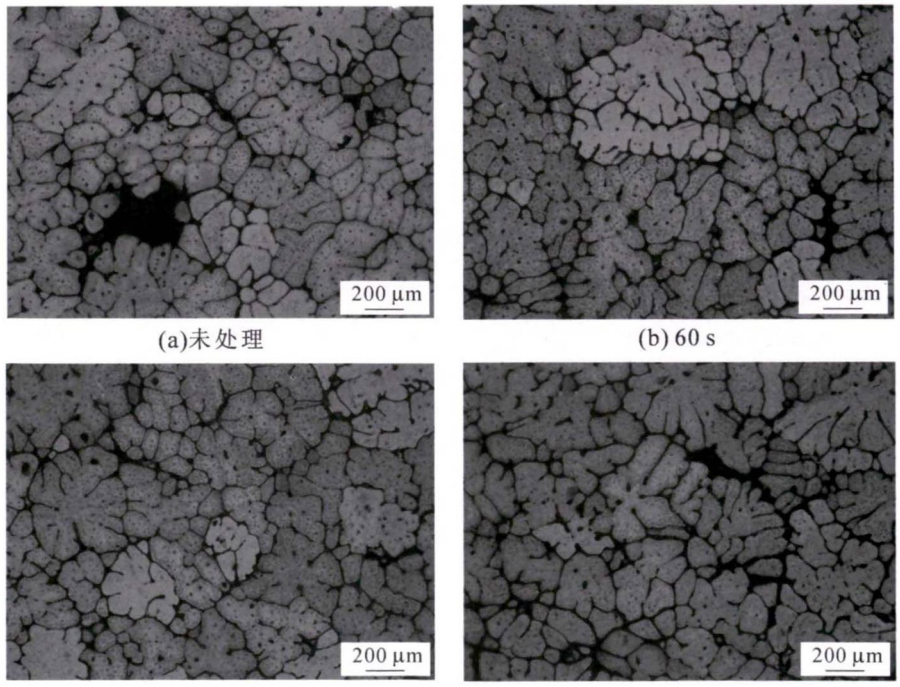


(a)未处理　(b) 60 s

(c) 90 s　(d) 120 s

图 3 Al-8Cu 合金在不同超声时间下的宏观组织

Fig. 3 Effect of ultrasonic duration on macro-structure of as-cast Al-8Cu alloy



(a)未处理　(b) 60 s

(c) 90 s　(d) 120 s

图 4 Al-8Cu 合金在不同超声时间下的微观组织

Fig. 4 Microstructure of Al-8Cu alloy by different ultrasonic duration

未经超声处理的凝固组织为略粗大的晶粒，并且组织中可以明显观察到气孔的存在；当超声处理时间达到 60 s 后，发现枝晶虽然有所减少，但是晶粒间的气孔仍然较明显，如图 4(b)所示；随着超声处理时间延长到 90 s 时，晶粒得到细化且气孔明显较少，如图 4(c)所示；而超声处理 120 s 时，气孔反而有所增多，但晶粒没有进一步细化，如图 4(d)所示。

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，合金熔体除气率定义如下[10]：

$$\eta = \frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_b - \rho_0}$$

其中，ρ_0 未除气合金试样密度，g · cm^{-3}；ρ_a 除气合金试样密度，g · cm^{-3}；ρ_b 合金试样理论密度(Al-8Cu 合金是 2.8587 g · cm^{-3})。

图 5 表示超声处理时间与 Al-8Cu 合金铸锭的除气关系。可看出随着超声时间的增加，铸锭密度和除气率的变化相同，均为先上升后下降，在实验过程中铸锭的密度最高达到 2.8423 g · cm^{-3}，除气率达到 67%；但铸锭的密度和除气率在超声处理时间达到 120 s 时呈现下降趋势。

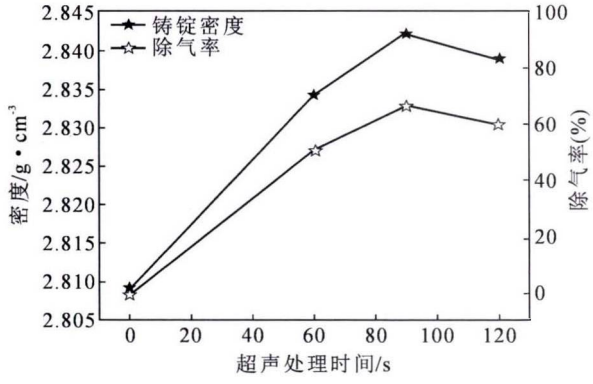
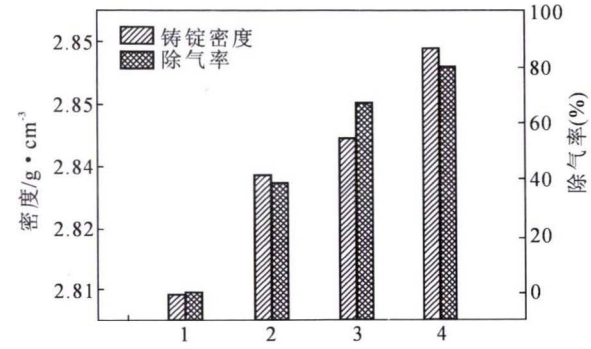


图 5 超声处理时间与 Al-8Cu 合金除气的关系

Fig. 5 The relationship between the ultrasonic duration and degassing of Al-8Cu alloy

由于只施加超声的除气效果较低，最高仅为 67%，因此，尝试利用 C_2Cl_6-超声联合处理的方法来进行除气。对比了未除气(1)、仅 1% C_2Cl_6 除气剂(2)、仅超声除气 60 s(3)及 1% C_2Cl_6-超声联合处理 30 s(4)的方法进行对比分析。可看出，仅添加 1% C_2Cl_6 除气剂的铸锭密度及除气率非常低，仅为 2.828 3 g · cm^{-3} 和 38.6%；而添加 1% C_2Cl_6-超声联合处理 30 s 后铸锭的密度和除气率为 2.848 8 g · cm^{-3} 及 80%。因此，在进行超声处理前，可添加一定质量的 C2Cl6 除气剂进行预处理以缩短超声处理的时间，如图 6 所示。



1-未除气；2-仅 C_2Cl_6 除气；3-仅超声除气 60 s；4-1% C_2Cl_6-超声联合除气 30 s

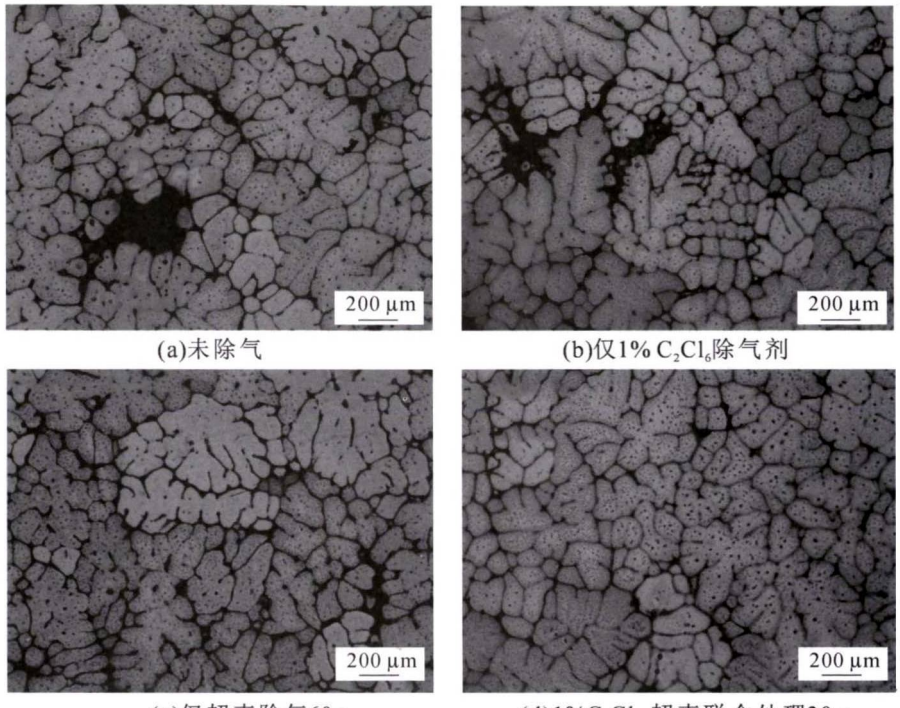
图 6 不同除气方法下 Al-8Cu 合金铸锭的密度及除气率

Fig. 6 Density and degassing efficiency of Al-8Cu alloy ingot cast by different degassing methods

图 7 为不同除气方法处理后 Al-8Cu 合金的微观组织。图 7(a)中可见未经除气处理的凝固组织为略粗大的晶粒，且组织中的气孔较多；当使用 1% C_2Cl_6 除气后，凝固组织略有粗大，这是由于加入除气剂过程中，强烈的搅拌作用导致晶核重熔所致，如图 7(b)所示；而超声处理 60 s 后气孔存在很少，如图 7(c)；1% C_2Cl_6 联合超声处理 30 s，不仅晶粒细化，而且组织非常致密，通过观察发现气孔很少，这种组织在联合处理后试样的视野内随处可见，如图 7(d)所示。

学生经过查阅文献得知，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[23]，如图 8 所示。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[11]；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[12-13]。

图 9 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，对于本文的第一组实验结果，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，由于随着时间的延长产生的剧烈空化效应，根据上面分析，可具有良好的除气效果，因此，铸锭的密度及除气率的提高可以通过超声处理实现。但超声时间不宜过长，如延长超声处理时间到 120s 后，由于铝液温度的下降导致熔体粘度过大会阻碍气体的上浮，会导致铸锭密度及除气率下降。



(a)未除气　(b)仅1% C_2Cl_6除气剂

(c)仅超声除气60 s;　(d)1%C_2Cl_6-超声联合处理30 s

图 7 不同除气方法对 Al-8Cu 合金铸锭显微组织的影响

Fig. 7 Effect of different methods on micro-structure of Al-8Cu ingot

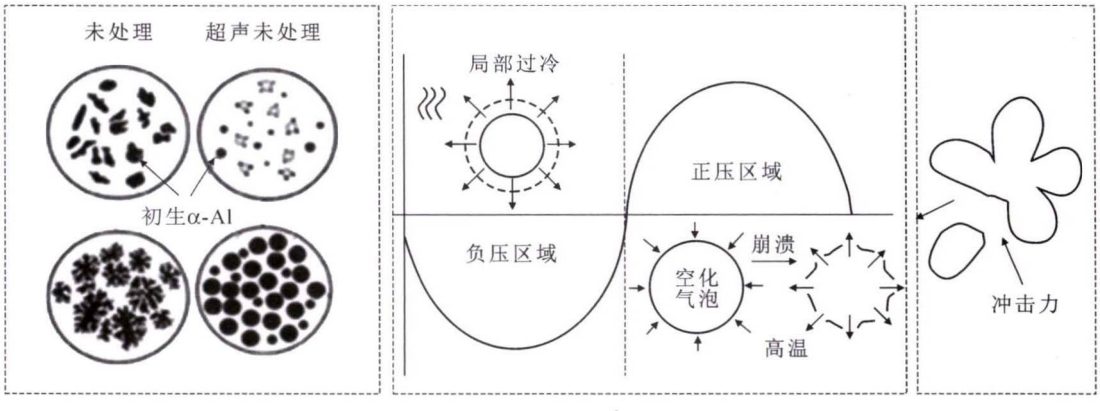


图 8 晶粒细化示意图

Fig. 8 Schematic diagram of grain refinement

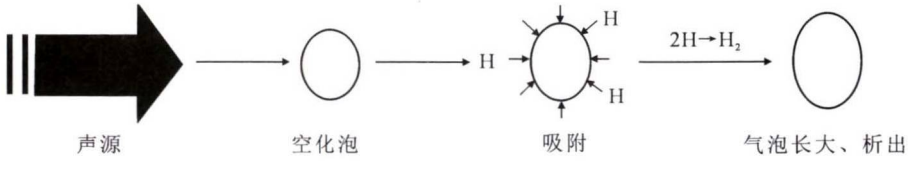


图 9 超声除气机理图

Fig. 9 Mechanism diagram of ultrasonic degassing

对于本文第二组实验情况,C_2Cl_6-超声联合处理 Al-8Cu 合金分析如下,在使用 C2Cl6 进行预除气后,此时熔体中的气体已经减少了很大一部分,而再经超声处理后,熔体中发生空化作用产生了大量的空化气泡,产生的空化气泡在熔体中会一直处于脉动状态并在熔体中快速地运动着[14],同时吸收熔体中存在的氢,只需要较短的超声时间空化气泡就会长大浮出熔体,实现除氢目的。相反,在未进行预除气的熔体中存在大量的气体,在施加超声处理熔体时,产生的大量的发达空化同样会处于脉动

状态,仍然会吸附周围的氢,但由于熔体中的氢较多,该过程持续的时间也就更久。

因此,学生分析得知,该创新实验可以得到以下几个结论:在本实验过程中,施加超声可去除 Al-8Cu 合金熔体中的气体,大幅度提高铸锭的密度及除气率,并且凝固组织发生细化,铸锭断面全部由细小等轴晶组成,最佳除气工艺为 2 000 W × 90 s,此时,铸锭密度为 2.842 3g · cm^{-3},除气率为 67%;使用 C_2Cl_6 - 超声处理可大幅度提高除气率。本实验中,1% C_2Cl_6 添加后,超声处理 30 s 就可超过仅超声处理 60 s 的铸锭密度及除气率,分别为 2.848 8 g · cm^{-3} 及 80%。

3 大赛项目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-8Cu 合金细化及除气的影响实验有了进一步的了解,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,培养学生们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,而大赛项目是培养学生创新思维最好的学习方式。因此"大赛"以专业实验教学为依托,避免了学生立项没有依据,缺乏理论知识与实践技能,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。材料成型实验教学与"大赛"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"大赛"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,将大赛项目更好的融合到课堂实验的教学中。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关对应知识点,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,可为下一阶段大赛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] 郑超,李跃堂,赵新海,等. 新工科背景下"材料成型工程设计与实践"课程建设[J]. 实验技术与管理,2020,37(8):172-177.

[2] 王再友,柳秉毅,杨少锋,等. 应用型本科院校铸造技术人才培养探索与实践[J]. 铸造技术,2014,35(2):366-368.

[3] 柳秉毅,王再友,陆文龙. 以教育教学体系的创新促进铸造技术人才培养[J]. 铸造技术,2010,31(7):935-937.

[4] 张学敏,周杰. 技术变革下"个人全面发展"的教育选择——新时代马克思核心教育思想再认识[J]. 清华大学教育研究,2020,41(6):7-17.

[5] 王震亚,左亚雪,刘亚男,等. 设计学的开放性概念与产业模型[J]. 包装工程,2020,41(20):46-56.

[6] 史丹. "十四五"时期中国工业发展战略研究[J]. 中国工业经济,2020(2):5-27.

[7] 任忠鸣,雷作胜,李传军,等. 电磁冶金技术研究新进展[J]. 金属学报,2020,56(4):583-600.

[8] 商竹贤,马麟,刘波,等. 基于扩展离散元法的超声振动粉碎装置颗粒粉碎效果分析[J]. 粉末冶金技术,2019,37(2):129-133,139.

[9] 付玄,刘自成,叶本远,等. 基于超声振动的轴上过盈配合零件拆卸系统设计与试验[J]. 航空发动机,2018,44(6):97-102.

[10] LI J W,MOMONO Tadashi,TAYU Yoshinori,et al. Application of ultrasonic treating to degassing of metal ingots[J]. Materials Letters,2008,62:4152-4154.

[11] MIAO L,LU Y P,ZHANG Y B,et al. Effect of ultrasonic treatment and Sr addition on microstructure of Al-20% Si alloy[J]. China Foundry,2013,10(4):213-216.

[12] A. R,MA Q,B. D,et al. Potency of high-intensity ultrasonic treatment for grain refinement of magnesium alloys[J]. Scripta Materialia,2008,59(1):19-22.

[13] X. J,H. X,T. T. M,et al. Effect of power ultrasound on solidification of aluminum A356 alloy[J]. Materials. Letters,2004,59(2):190-193.

[14] 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.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2021 年《铸造技术》杂志

国内邮发代号:52 - 64　国外发行号:M855　国内定价:25 元/本　海外定价:25 美元/本