

陆必旺, 梁昌旺, 黄耀光. 科研实验融入材料成型及控制工程专业教学实践——双金属复合材料制备及分析[J]. 广东化工, 2024, 51(3): 194-196
DOI:10.3969/j.issn.1007-1865.2024.03.061

科研实验融入材料成型及控制工程专业教学实践 ——双金属复合材料制备及分析

陆必旺, 梁昌旺, 黄耀光*
(百色学院, 广西 百色 533000)

[摘 要]设计了一个基于双金属固-液熔铸法的钆/铜功能复合材料制备实验, 并采用现代材料分析技术对钆/铜界面结合形貌进行观测和分析。通过将科研项目实验融入专业实践应用教学, 学生可以锻炼材料制备成型和分析的能力, 熟悉稀土金属钆和铜的反应特性, 掌握熔铸复合成型设备、扫描电镜和金相显微镜的使用和分析方法, 获得具有良好结合界面的双金属功能复合材料及其工艺参数, 巩固所学专业基础知识, 了解科学前沿, 培养工匠精神, 提升综合应用能力和科学素养。

[关键词]双金属复合材料; 材料成型; 熔铸结合; 教学实践; 科研实验
[中图分类号]TQ [文献标识码]A

[文章编号]1007-1865(2024)03-0194-03

Integrating Scientific Research Experiments into the Teaching Practice of Materials Forming and Control Engineering——Preparation and Analysis of Bimetal Composite Material

Lu Biwang, Liang Changwang, Huang Yaoguang*
(Baize University, Baize 533000, China)

Abstract: A preparation experiment of gadolinium/copper functional composite material based on bimetallic solid-liquid fusion casting method was designed, and modern material analysis techniques were used to observe and analyze the microstructure of gadolinium/copper interface bonding. By integrating the experiments of research project into practical application and teaching, students can exercise their abilities in material preparation, forming and analysis, become familiar with the reaction characteristics of rare-earth metal gadolinium and copper, master the use and analysis methods of fusion casting composite forming equipment, scanning electron microscopy, and metallographic microscopy, obtain bimetallic functional composite materials with good bonding interfaces and their process parameters, consolidate specialized knowledge, understand the forefront of science, cultivate the spirit of craftsmanship, enhance comprehensive application ability and scientific literacy.

Keywords: bimetal composite materials; material forming; fusion casting bonding; teaching practice; scientific research experiments

在国家推动创新驱动发展、实施“中国制造 2025”等重大战略的背景下, 工程科技人才的培养有了更高的要求, 迫切需要加快工程教育改革创新, 推行新工科教学改革、产出导向教育(OBE)和工程教育认证等理念。对于培养应用型人才的高校而言, 需要反思和避免人才培养工作中出现“重知识理论, 轻实践能力”的问题, 注重培养学生综合应用所学专业基础知识来解决实际工程技术问题^[1-2]。材料成型及控制工程专业是材料科学、机械工程、材料化学等多学科交叉融合的工程技术专业, 致力于研究加工过程中的相关工艺因素对材料的微观结构、宏观性能和表面形状的影响, 以及材料成型相关的新材料研发及应用, 具有较强的实践性和应用性。因此, 让材料成型及控制工程专业本科生参与科研项目实验, 并以大学生创新创业训练计划项目为切入点, 在一定的目标和要求下完成研究实践工作, 是培养本科生实践能力、工匠精神和创新能力的一种有效方法^[3-6]。

双金属复合材料的界面层结合是金属元素扩散的结果, 界面结合的影响因素是双金属复合材料工艺研究的关键。双金属复合界面层随着工艺参数的变化, 界面将发生一系列不同的物理和化学变化, 对复合材料的性质以及复合后的耦合性能产生影响^[7]。该冶金结合过程在理论教学中较为抽象, 学生难以直观理解和认识工艺参数对界面结合效果的影响, 学习积极性不高、效果不佳, 与前沿科学研究的联系不直接、不紧密。多年来, 笔者在科研项目工作中开展了双金属功能复合材料方面的

研究, 研究了不同复合结合方法的界面特性以及功能性^[8]。探索将双金属固-液复合材料制备实验与大学生创新训练相结合的方式, 以学生为主体开展研究实践活动。学生在承担大学生创新创业训练计划项目的前提下, 会更加具有积极性、主动性和责任感, 充分发挥自己的主观能动性, 利用所学专业基础知识或者通过更加深入地查阅教材及调研相关文献资料, 来完成所需的实验操作并使用仪器设备对样品结果进行表征分析。经过上述实践训练, 既巩固学生所学的专业知识, 锻炼学生分析和解决工程技术问题的能力, 也培养了学生的工匠精神、创新思维和科学素养, 提升综合应用能力。

1 实验目的

稀土金属钆(Gd)是磁制冷技术研究中应用最广泛的磁热材料, 其绝热温变温变大, 绝热温变曲线的半峰宽较宽, 且具有良好的机械加工性能, 但是缺点是导热系数低, 仅为 10.6 W/(m·K), 限制了磁制冷性能。铜(Cu)的导热系数仅次于银, 导热系数可达 380 W/(m·K)。将 Gd 和 Cu 两种金属通过一定的方法复合在一起, 制备成双金属功能复合材料, 可以充分发挥 Gd 的磁热效应和 Cu 的导热优势, 获得综合制冷性能良好的磁制冷复合材料^[8]。该研究思路具有一定创新性, 研究方法涉及到双金属复合制备等前沿科学研究, 可以让学生了解到与专业相关的前沿研究内容。但是目前双金属复合材料的研究主要集中在力

[收稿日期] 2023-09-22

[基金项目] 广西职业教育教学改革研究项目(GXGZJG2020B001); 国家自然科学基金青年科学基金项目(52206002); 大学生创新创业训练计划项目(202310609004)

[作者简介] 陆必旺(1991-), 男, 广西百色人, 讲师, 博士, 主要研究方向为双金属复合材料在磁制冷方面的应用。*为通讯作者。

学性能,对传热性能的双金属功能复合材料的研究较少。因此需要结合指导老师在研的相关科研项目,开展传热双金属功能复合材料的制备与界面层的分析测试方法等方面的研究。学生通过整理上述研究方案并申请大学生创新创业训练计划项目,指导老师在项目执行和实验过程中,融合材料成型基础知识和材料现代分析测试方法的教学,以培养学生的复合材料制备及分析能力,达到巩固所学专业知识和掌握专业应用技能的目标。

2 实验原理

基于稀土 Gd 的优良磁热效应及 Cu 的高导热系数特性,利用固-液熔铸复合法制备钆/铜双金属功能复合材料。固-液熔铸复合法是指将固态基体材料(Gd)表面预热到一定温度后,放入铸模型腔内,再向型腔内浇注复合金属(Cu)溶液,或是将处理后的基体材料直接浸入装满复合金属液的铸模型腔内,冷却凝固后形成复合材料的工艺。整个双金属复合制备过程需在真空或气氛保护下完成,以防止稀土材料 Gd 在高温下氧化变性。可使用带浇注平台的真空感应熔炼炉或真空电弧炉等设备完成该复合过程。此类复合成型方法常用在铜-钢、铜-铝等常见材料的复合板材、线材的制备中。指导学生通过文献调研了解相关的制备工艺及分析方法后,结合 Gd-Cu 二元合金相图中的参数^[9],作为稀土金属 Gd 及 Cu 复合成型实验的参考,从而保证实验方案的可行性,但具体工艺参数仍需要通过实验确定。经过一系列 Gd/Cu 双金属复合材料制备实验获得样品后,采用扫描电镜和金相分析等手段,即可结合理论知识来分析不同铜液浇注温度对双金属复合界面层形貌和扩散层厚度的影响,获得兼顾磁热特性和传热能力的磁制冷复合结构工质块的工艺参数。

3 材料与设备

本次实验所使用原材料为商业级钆块(99.5 wt.%)和 T2 紫铜块,学生根据供应商提供的参数并查阅对比相关教材和文献中的数据后,得出材料的物性参数如表 1 所示。本实验采用的设备为带浇注平台的真空感应熔炼炉,配合使用石墨坩埚和石墨模具,如图 1 所示。处理钆块和铜块时需要使用到线切割机、铣床、超声波清洗机、砂纸等辅助设备和材料。使用扫描电子显微镜(SEM, Hitachi SU5000)和金相显微镜对样品进行形貌观察和分析。

表 1 材料的物性参数
Tab.1 Physical parameters of materials

材料	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度/(kg·m ⁻³)	熔点/℃
钆	10.6	7900	1313
铜	380	8960	1083

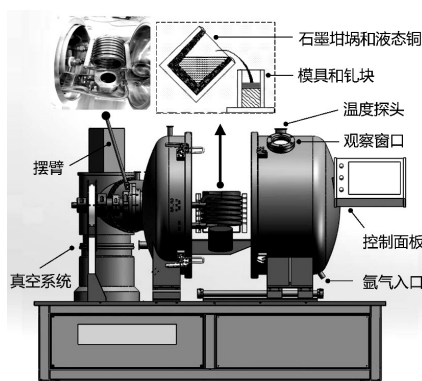


图 1 带浇注平台的真空感应熔炼炉

Fig.1 Vacuum melting furnace with pouring platform

4 实验步骤

4.1 钆块和铜块的准备

根据石墨坩埚和石墨模具的内腔尺寸,学生采用线切割的方法,将原料钆块和铜块切割成直径 40 mm 的圆饼状,再将

上下两个表面用铣床加工平整。清洗去除表面切屑液和杂质后,用砂纸逐步将钆块和铜块表面打磨光亮至 1200#砂纸,使用丙酮超声波清洗 10 min,取出快速吹干后放入真空柜储存,以防止表面自然氧化。上述设备和技能是材料成型及控制工程专业学生必学的内容。

4.2 钆/铜双金属复合材料制备

在本实验其他条件不变的情况下,学生采用控制变量法,将真空固-液熔铸复合法的主要工艺参数确定为铜液浇注温度。铜液浇注温度对钆/铜复合界面有着重要的影响,随着浇注温度的变化,双金属复合材料的界面会发生不同程度的物理和化学变化,产生不同的界面结合质量和形貌结构,以及不同的中间金属间化合物成分和厚度。考虑到 Gd 的熔点为 1313 ℃,Cu 的熔点为 1083 ℃,将本实验铜液的浇注温度分别设定为 1100 ℃、1200 ℃、1300 ℃和 1400 ℃。

熔铸复合是在氩气气氛下进行,首先将真空熔炼炉抽真空至压力低于 10⁻² Pa,随后充入高纯氩气至 50 kPa 以上,以防止在极低压力和较高温度下金属发生汽化。随后加热融化铜块,在液态铜加热到各预设温度后,停止加热并抽出温度探头,立即操作浇注摆臂将铜液倒入模具中,如图 1 所示。铜液将与钆块反应结合形成双金属复合块,等待自然冷却后取出。学生按照金相技能的要求,将双金属复合块切割打磨制成金相及扫描电镜及观测样品。

5 结果与分析

5.1 不同工艺参数下钆/铜复合样品的界面层

Gd/Cu 双金属复合块样品示例如图 2(a)所示。Gd/Cu 复合界面的冶金结合是高温下的 Cu 元素扩散和 Gd/Cu 反应的结果。当浇注温度为 1100 ℃时,如图 2(b)所示,较低温度液态铜的快速冷却和凝固导致元素扩散和与 Gd 基体的反应不充分,Gd 基体和 Cu 基体之间出现分层和间隙。学生经过查阅教材及文献,得出产生分层和间隙的原因主要是由于 Cu 具有较大的凝固收缩率(2%),在 Gd/Cu 界面结合强度不足的情况下,收缩过程产生的热应力破坏显著影响了界面层的结合效果,导致界面分层、热阻增大和力学性能下降。当铜液浇注温度从 1200 ℃提高到 1400 ℃时,Cu 元素扩散和反应形成金属间化合物的程度增加,使得界面层的厚度及其对基体材料的影响都逐渐增加。这种宏观的颜色变化是较为容易观察的,学生可以结合理论知识和实际观测两个层面,来理解和认识双金属复合过程中的元素扩散及中间层反应结合的过程和结果。虽然界面结合在在较高的浇注温度下表现更好,如图 2(d)和图 2(e)所示,但是由扩散和反应引起的较厚的界面层会影响基体材料的量。界面层中形成的 Gd-Cu 二元合金既没有良好的磁热效应,也没有良好的导热性。因此,由 Gd-Cu 二元合金组成的界面层越厚,越不利于 Gd/Cu 复合材料功能性的利用,并且会阻碍热量的传递。当浇注温度约为 1200 ℃时,如图 2(c)所示,界面层的厚度最小,界面结合效果也较理想,无明显分层间隙和过厚的界面层,保持基体材料性质的同时也减小了传热热阻,是符合科研项目和实验设计要求的 Gd/Cu 双金属复合块样品。

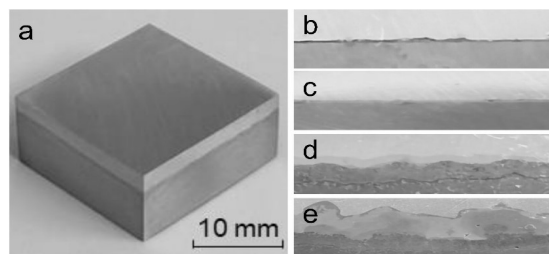


图 2 熔铸结合样品照片及其界面、过渡层宏观形貌: (a)熔铸结合样品示意; (b)1100 ℃样品界面层; (c)1200 ℃样品界面层; (d)1300 ℃样品界面层; (e)1400 ℃样品界面层

Fig.2 Photos of fusion cast bonded samples and their macroscopic structures of interface and transition layer: (a) Schematic diagram of fusion casting sample, (b) the interfacial layer of 1100 ℃ sample, (c) the interfacial layer of 1200 ℃ sample, (d) the interfacial layer of 1300 ℃ sample, (e) the interfacial layer of 1400 ℃ sample

5.2 钆/铜复合界面扫描电镜分析

采用SU5000型扫描电镜对熔铸复合后的Gd/Cu结合界面进行点扫描分析,以图2(d)的样品为例来解释元素扩散和反应程度,扫描分析结果如图3所示。根据扫描电镜图中的颜色深浅,Gd为浅色,Cu为深色,可以看出Gd/Cu界面之间有不同层次的中间过渡层。这是由于Gd/Cu界面处的元素扩散和反应过程中,整体温度一直在降低,界面反应温度也降低。学生通过查阅Gd/Cu二元合金相图^[9],了解到出现上述现象的原因主要是在不同的温度下,Gd与Cu会反应生成不同的金属间化合物GdCu、GdCu₂、GdCu₃或GdCu₅或GdCu₆,同时Cu元素的扩散程度也不同。各点位Cu元素的EDS能谱分析结果如表2所示,从Gd基体到Cu基体(即点1到点5),Cu元素的含量在不同的层次中是有一个逐渐增加的规律。此外,从复合界面的扫描电镜图中还可以看出,中间过渡层的主要颜色为浅色的Gd。针对该现象,学生进一步查阅材料科学基础教材和相关文献,回顾和分析了元素扩散机制,即小直径原子可在大直径原子中的空隙扩散。Gd和Cu的原子直径存在着较大的差异,因此扩散过程主要是Cu原子往Gd基体中扩散。学生可以通过上述扫描电镜图和能谱结果,直观地看到元素扩散和反应结果,并且通过进一步查阅相关教材和文献,结合实际图像和具体数据,加深了对理论知识的理解,锻炼了分析实验现象和解决问题的能力。

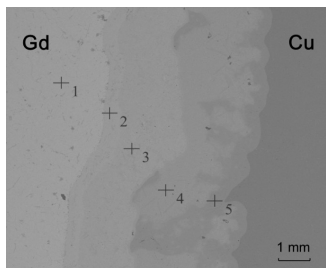


图3 复合界面及中间过渡层的SEM形貌和点位EDS能谱分析

Fig.3 SEM photo and EDS analysis of the composite interface and intermediate transition layer

表2 各点位Cu元素分析结果

Tab.2 Element analysis result of Cu at each point

点位	Cu/wt. %
1	0
2	4.43
3	9.38
4	23.63
5	53.75

6 实践教学建议

在上述实验过程和分析过程中,包含着许多重要的材料成型及控制、材料科学基础和材料化学的相关专业知识,仅通过课堂讲授很难让学生理解和掌握。因此本实验应在大学三年级开展,这时候的学生已经学习过材料科学基础和材料化学等专业基础课程,且开始作为项目负责人组建团队申请大学生创新创业训练计划项目,对专业实验和科学研究具有较高的兴趣和积极性。

此类科研实验融入专业教学实践的教学改革方案建议分

为三个模块。首先是准备模块,指导老师将所需的研究内容和实验工作向学生们做介绍,学生通过分工合作,从指导老师提供的参考资料和中国知网等不同数据库检索到的文献中,了解和实验相关的研究背景和科学前沿发展动态,明确实验过程中涉及到的专业知识,并对相关专业知识进行复习,与指导老师讨论后确定实验方案,并撰写大学生创新创业训练计划项目申请书;其次是工作模块,在开展实验工作和使用仪器设备等过程中,采用师生共同讨论、合作解决问题的方式,指导老师在其中发挥引导和监督作用,鼓励学生主动思考、分析和解决问题,并对学生不正确、不规范的操作进行指正,达到理论联系实际、培养实践应用能力的目的;最后是总结模块,学生结合前期的相关文献资料查阅和整理、中期的实验过程和后期的结果表征分析和结论,形成详细大学生创新创业训练计划项目的结题报告,并进一步整理形成科技论文。指导老师再对结题报告和科技论文进行批阅,提出修改意见让学生完善,使学生既掌握了研究报告撰写能力,也锻炼了科技论文写作能力,有利于今后的工作和职业发展。

7 总结

针对双金属复合材料制备及分析这一科学前沿研究,以科研项目和大学生的创新创业训练计划项目作为切入点,为材料成型及控制工程的本科生设计了一个钆/铜双金属功能复合材料的制备实验。经过对钆/铜复合样品进行观测和表征分析,钆/铜复合界面是元素扩散和反应的结果,实验现象明显,钆/铜复合界面有明显的分层和颜色变化,符合本科生实验实践课的直观、趣味、新颖等特点。学生在开展科研实验过程中,对材料成型及控制、材料科学基础和材料化学的相关专业知识有了更深入的理解,丰富和拓展了理论教学内容。学生在学好专业理论知识的同时,做到理论联系实际,能够发现问题并解决问题,培养学以致用、精益求精和不断创新的应用能力和科学素养。综上所述,将科研实验与专业教学实践有机融合,是一种有效的科研促教学、教学促科研的教学改革方法和应用型人才培养方式。

参考文献

- [1]聂小武,蔡明灯.专业认证和新工科建设下应用型高校材料成型及控制工程专业人才培养体系构建[J].上海教育评估研究,2021,10(02):56-61.
- [2]徐开芸,陈桂,赵涛,等.应用型本科院校科研成果转化为工程实践教学资源研究[J].中国现代教育装备,2019(21):55-58.
- [3]李蓉芳.科研成果向本科教学内容转化的机制研究[D].武汉理工大学,2021.
- [4]张俊玲,白志毅,陈立婧,等.“双一流”背景下科研反哺教学促创新人才培养的探索与实践[J].高教学刊,2022,8(09):33-36.
- [5]李国四,胡楠,高雷雷,等.科研成果融入《生物化学与分子生物学》实验教学——双酶偶联系统的构建及其在红景天苷化工生产中的应用[J].广东化工,2023,50(16):234-236+228.
- [6]付哲,阎丽芳,程易.科研实验引入本科反应工程教学——将理想化处理与非理想化的实验相结合实现气液反应动力学测量[J].广东化工,2023,50(16):200-202+206.
- [7]刘平,刘腾,王渠东.固液双金属复合铸造研究进展[J].材料导报,2014,28(01):26-30.
- [8]Biwang Lu, Jianghong Wu, Jing He, et al. Heat transfer optimization of a fully solid state micro-unit regeneration magnetic refrigerator [J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 98: 42-50.
- [9]郑建宣,曾令民.Gd-Cu二元系合金相图[J].物理学报,1983(11):1443-1448.

(上接第168页)

参考文献

- [1]安燕.工科物理化学课程思政教学改革与实践探索研究[J].大学,2022(18):97-100.
- [2]朱志昂.物理化学课程教学内容和教学方法的改革[J].大学化学,2012,27(05):9-13.
- [3]赵杰.《物理化学》课程教学改革初探[J].广州化工,2022,50(11):222-226.
- [4]许艳旗,陈硕平.冶金反应工程学的课程思政教学初探[J].广东化工,2022,49(2):178-179.

- [5]曹小漫,孙志佳,张庆国,等.基于课程思政理念下的物理化学课程改革探索[J].广州化工,2022,50(4):136-144.
- [6]张树永.当前“课程思政”建设存在的不足及未来建设重点——以化学类专业课程为例[J].中国大学教学,2021(8):42-46.
- [7]苗荣荣,廖文波.《物理化学》教学中思政元素的挖掘与探索[J].广东化工,2021,48(4):170-171.
- [8]郑晓芳,汪继光,刘沈如.工程教育认证背景下建筑结构抗震课程思政教学探索[J].高等建筑教育,2022,31(1):186-193.