

课程思政

液态金属结构与性质教学中的课程思政

王海鹏 常 健

(西北工业大学物理科学与技术学院, 陕西 西安 710072)

摘 要 针对“液态金属结构与性质”前沿、交叉、抽象的课程特色、围绕学校的办学特色和材料物理专业的人才培养目标,践行“立德树人”根本任务,本文从教材建设、教学过程两大方面介绍液态金属结构与性质课程教学中课程思政的探索与实践。重点介绍了如何结合党中央要求和国家的重大战略部署进行教材建设,充分挖掘教学过程的核心元素,润物无声施教,将思政元素融入液态金属结构与性质课堂教学全过程,总结了通过教学改革,教学过程设计、教学案例遴选等方面的探索和实践。

关键词 课程思政;教学改革;液态金属;教材建设;高温合金

IDEOLOGICAL AND POLITICAL EDUCATION IN THE TEACHING OF LIQUID METAL STRUCTURE AND PROPERTIES

WANG Haipeng CHANG Jian

(School of Physical Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072)

Abstract In view of the frontier, cross and abstract course characteristics of liquid metal structure and properties, in order to implement the fundamental task of building morality and cultivating people, this paper introduces the exploration and practice of curriculum ideological and political education in the teaching of liquid metal structure and properties from two aspects of textbook construction and teaching process, focusing on the school-running characteristics and the talent training objectives of material physics. It focuses on how to combine the requirements of the Central Committee of the Party and the major strategic deployment of the country to carry out the textbook construction, fully excavate the core elements of the teaching process, integrate the ideological and political elements into the whole process of classroom teaching, and finally it summarizes the exploration and practice of teaching reform, teaching process design and teaching case selection.

Key words ideological and political education; teaching reform; liquid metals; textbook construction; superalloys

习近平总书记在学校思想政治理论课教师座谈会上的讲话指出:知识是载体,价值是目的,要寓价值观引导于知识传授之中。思政元素融入“液态金属结构与性质”课程的教学内容,充分发挥课程思政的育人功能^[1-4],既是支撑“双万计划”一流本科专业建设的内涵需求,又是传授液态金

属结构与性质系统知识、培养材料物理领域具有家国情怀、追求卓越、引领未来的领军人才的基本保障,更是落实党中央要求、心怀“国之大者”、在液态金属结构与性质教学中践行“立德树人”根本任务的光荣使命。

液态金属结构与性质课程是支撑西北工业大

收稿日期: 2021-12-01

基金项目: 西北工业大学教育教学改革研究项目(2021JGZ15、2022JGZ27);西北工业大学 2021 年度“课程思政”示范课程建设项目(U11M11009)。

作者简介: 王海鹏,男,教授,主要从事材料物理教学科研工作, hpwang@nwpu.edu.cn;常健,男,副教授,主要从事液态金属物理教学科研工作, jchang@nwpu.edu.cn。

引文格式: 王海鹏,常健. 液态金属结构与性质教学中的课程思政[J]. 物理与工程, 2022, 32(6): 183-188.

Cite this article: WANG H P, CHANG J. Ideological and political education in the teaching of liquid metal structure and properties[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(6): 183-188. (in Chinese)

学“材料物理”国家一流专业建设的核心课程,该课程的知识体系旨在阐明液态金属的基本结构与性质,介绍液态金属的中短程结构、典型物理性质、基本理论模型、液态金属晶体生长热力学、动力学等知识,使学生对液态金属的结构与性质有实质性的理解,能从本质上认识和分析液态金属结构与性质对材料产生的影响并提出解决的途径。该课程知识体系具有“前沿、交叉、抽象”的特点,从知识点本身看,教学内容偏重基础,50%的内容极为抽象,如双体分布函数、结构因子、多面体团簇等等,同时,该课程内容又充分面向世界科技前沿、面向国家重大需求。作者既是该课程的创建者,又是教学团队负责人,如何上好这门课,尤其是如何发挥课程思政的作用,如何寓价值观引导于知识传授之中,是摆在授课教师面前亟待解决的教学难题。

针对这一教学难题,作者将“坚定不移跟党走,矢志不渝报效祖国”的家国情怀深植于液态金属结构与性质的教材建设和课堂教学,将培养“大写的人”作为课程育人的首要目标;在教学过程中,贯彻习近平新时代中国特色社会主义思想,在“液态金属结构与性质”领域对学生坚持“四个面向”能力的培养,作为课堂教学的指引;深度挖掘《液态金属结构与性质》知识体系中蕴含的思想政治教育元素和所承载的思想政治教育功能,将液态金属结构与性质的思政内容进教材、进课堂、进头脑。作者认真研究教学规律和教学法,在《液态金属结构与性质》课程建设中推进教学改革^[5],积极发挥课程思政的强大功能,从教材建设、教学过程设计、教学案例遴选等方面进行了探索和实践,取得了初步的教学成效。

1 筑牢教材阵地,将课程思政元素纳入液态金属结构与性质的教材建设

教材是课程建设的关键核心,是价值塑造和知识传播的重要载体^[6-7]。筑牢教材阵地,将思政元素写入液态金属结构与性质课程的教材内容,从课程思政的源头做起,在传播液态金属结构与性质知识的同时,融入国家战略和国家需求,将“国之大者”厚植学生心中。作者针对当前尚无适合高年级本科生和研究生使用的《液态金属结构与性质》教材的现状,编写了教材,较为系统地介绍了液态金属的物理性质和原子尺度的结构,旨在使读者能够学习金属材料在高温熔融状态下较为全面的知识,并启发读者利用液态金属结构与性质的知

识研发新型金属材料。尤其是,充分体现课程思政的要求,以习近平总书记关于教材建设的重要论述为指引,将总书记的重要讲话、国家重大战略部署写进教材,引导学生树立报效祖国的远大志向。

1) 以习近平总书记关于教材建设的重要论述为指引,将国家重大战略部署写进教材,引导材料物理专业的学生树立报效祖国的远大志向和家国情怀

以习近平总书记关于教材建设的重要论述为指引,准确把握新时代高等教育教材建设的新要求,为了承载培养材料物理领域拔尖创新人才的光荣使命,将国家重大战略部署写进《液态金属结构与性质》专业课教材具有重要的时代意义。

作者在教材中,适当引入了国家的重大战略部署,相关内容如^[8]:2021年3月12日,《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》正式发布,在“强化国家战略科技力量”部分,将“加强原创性引领性科技攻关”“持之以恒加强基础研究”予以明确表述,将“加强基础学科拔尖学生培养”作为“培养造就高水平人才队伍”的规划内容,将“推进基础学科高层次人才培养模式改革”作为“提高高等教育质量”的规划内容。教材中体现思政元素的内容还有^[8]:2021年3月16日出版的第6期《求是》杂志发表了习近平总书记重要文章《努力成为世界主要科学中心和创新高地》,文章指出,我国基础科学研究短板依然突出,企业对基础研究重视不够,重大原创性成果缺乏……

进一步总结为^[8]:液态金属结构与性质是材料科学与工程、凝聚态物理学的基础前沿科学问题,又与新型金属材料制备、成形、服役等材料工程密切相关,但是,本领域的基础知识和规律仍然十分匮乏,从而制约了金属材料的升级换代……引导材料物理专业的学生在材料科学发展的大历史观下树立投身材料科学事业、报效祖国的远大志向和家国情怀。

2) 将习近平总书记的部分重要讲话写进教材,强化教材建设中的课程思政

为了让学生深刻领会党中央对基础研究的高度重视,作者在编写《液态金属结构与性质》教材过程中认真学习了习近平总书记关于基础科学研究领域的相关讲话内容,并将部分讲话内容写入教材^[8]:2020年9月11日,习近平总书记在主持召开科学家座谈会上指出,基础研究是科技创新的源头,我国基础研究虽然取得显著进步,但同国际

先进水平的差距还是明显的;我国面临的很多“卡脖子”技术问题,根子是基础理论研究跟不上,源头和底层的东西没有搞清楚……进一步将总书记对基础研究的重视与该课程的特点紧密关联,在教材中还写到^[8]:围绕液态金属性质与结构的研究,已经为深入研究液态金属理论的建立打下了坚实的基础,尽管研究难度很大,但是从促进金属材料制备和新型材料研发的最新进展的角度看,液态金属结构与性质研究展现出了巨大的生命力,液态金属进一步的研究成果势必对金属材料的发展产生更大的作用……引导学生以肩负国家使命的重任,重视液态金属结构与性质基础知识的学习和能力的提升。

3) 充分体现系统思维和辩证法的内涵,将液态金属结构与性质的系统知识融入金属材料发展的历史长河

教材内容融入金属材料的历史发展,让学生从宽阔的视野切入,聚焦液态金属结构与性质的知识内容。教材中写道^[8]:金属材料在人类社会的发展进程中发挥着不可磨灭的作用,在各个历史阶段均占有举足轻重的地位……从青铜器到铁器,再到现如今的超强钢、钛合金、镍合金、钨合金等各种新型合金和先进金属材料,一次次促进生产力进步,为人类的生存生活创造了物质前提,为人们对美好生活的向往提供了基本保障。

教材内容既勾勒历史,又体现金属材料在新时代的新特征。教材中写道^[8]:已为人类所用的所有金属材料,80%以上来自液态金属……现在颇为流行的金属材料 3D 打印技术,依然是将金属粉末熔化为液态,然后喷至相应的位置凝固;当前最为先进的金属材料悬浮制造……将之熔化为液态,然后凝固成形制造。

此外,教材还以集大成的方式将传统的研究方法与现代先进的技术手段相融合,马克思主义唯物史观的方式方法贯穿其中,对于一个知识点(如密度)的研究,既全面系统介绍各种测定方法,又说明每种方法的优缺点和适用条件,让读者感受到系统思维的魅力和辩证法的内涵。

2 润物无声施教,将思政元素融入液态金属结构与性质课堂教学全过程

2020 年 5 月 28 日,教育部印发《高等学校课程思政建设指导纲要》,全面推进高校课程思政建设,发挥好每门课程的育人作用,提高高校人才培

养质量,指出:必须将价值塑造、知识传授和能力培养三者融为一体、不可割裂。全面推进课程思政建设,就是要寓价值观引导于知识传授和能力培养之中,帮助学生塑造正确的世界观、人生观、价值观,这是人才培养的应有之义,更是必备内容。作者通过课堂教学探索与实践,在以下四方面推进课程思政育人工作。

1) “扣好第一粒扣子”,第一节课至关重要,将液态金属结构与性质的系统知识所体现的马克思主义唯物史观融入课堂

习近平总书记在庆祝中国共产党成立 100 周年大会上的讲话强调:中国共产党为什么能,中国特色社会主义为什么好,归根到底是因为马克思主义行!习近平总书记在哲学社会科学工作座谈会上的讲话中指出:马克思主义揭示了事物的本质、内在联系及发展规律,是“伟大的认识工具”,是人们观察世界、分析问题的有力思想武器。作为理工科专业课教师,作者研究并遵循传授知识与思想教育相统一的教学过程基本规律,对教学内容进行布局设计,对教学活动进行系统规划,探寻学生从感性认识到理性认识的认知规律,使学生掌握学科体系的重要知识和思维方法,将液态金属结构与性质的系统知识所体现的马克思主义唯物史观融入课堂,在长期的教学过程中,发现第一节对激发学生的学习兴趣至关重要。

在第一节课的课程教学中,作者常常以历史的维度、广阔的视角、通俗的语言,将马克思主义唯物史观融入课堂,如为什么先有铜器时代后是铁器时代,固液气三态的互为转变在气候调节、工业生产如何发挥作用等,从而讲授液态金属结构与性质的知识体系的重要性,具体为三个方面:一是用历史发展的观点介绍金属材料的发展,传授金属材料在人类社会的发展中扮演着不可磨灭的贡献,进而引出液态金属;二是用辩证思维传授液态金属与固态金属的关系,引入金属材料在航空航天、兵器、核工业等领域典型应用的具体事例;三是介绍液态金属结构与性质的体现“四个面向”的作用,把该课程知识体系具有“前沿、交叉、抽象”的特点,与世界科技前沿和国家重大需求充分结合。

尤其是教学过程中必须以“唯物”“求是”的观点,讲授液态金属结构与性质的展望:虽然液态金属领域已经有长足发展,建立了密度、表面张力等性质与温度和成分的关系,但是各类关系曲线具有明显的局限性,大多仅适用于某一具体合金,尚未建立普适的理论模型或者数学关系。但是,从

液态金属研究领域涌现的同步辐射、中子散射等先进科学技术方法的国际发展态势来看^[9-11],从马克思主义唯物史观角度分析,液态金属结构与性质将在高维中短程结构解析、团簇演变、相选择等若干方面出现飞跃性式的突破……从而激发学生的“高站位”的学习兴趣。

2) 坚持面向世界科技前沿、面向国家重大需求,将传统固态金属的知识体系拓展至液态金属这一新的学术领域

液态金属结构与性质既是金属材料科学技术领域的世界科技前沿,又是解决高性能金属材料及构件国家重大需求的基础^[12-13]。在教学过程中,坚持“四个面向”,将传统固态金属的知识体系拓展至液态金属这一新的学术领域,教学内容既讲授液态金属结构与性质基本规律的科技前沿问题,又讲解如何将液态金属结构与性质用于指导液固相变,进而研发国家重大需求的先进金属材料。

从面向世界科技前沿角度,这样讲到:液态金属的结构与性质是金属材料科学问题的关键内涵,实施固态金属材料制备过程控制迫切需要获取液态金属物理化学性质和中短程结构,物理化学性质对于推动凝固过程相变热力学和动力学向精确量化发展具有关键作用,而中短程结构则有利于推动从原子组态出发制备新的金属材料乃至性能提升;并结合作者指导的博士生开展的原始创新工作,讲述身边人如何攻克世界科技前沿问题,如博士生赵炯飞在难熔合金体系中发现新的金属相,博士生吕鹏在包晶合金体系中共生生长,博士生邹鹏飞发现液态钛镍合金密度的非线性关系等等。

从面向国家重大需求角度,这样讲到:国家实施的载人航天、大飞机、先进战机、深远海等重大工程,先进金属材料的自主可控极为关键,液态金属的结构与性质是研发先进金属材料的基石;以先进战机所需的钛合金研发为例,讲解钛合金晶体形核与生长控制,迫切需要液态钛合金的比热、焓等基础数据,仅靠经验或者半定量的数据,形核率等参数的计算结果与实际情况偏离几个数量级……这样的教学过程设计,也是作者经过多年教学总结出来的,发现从国家重大需求出发,再将基础问题讲深讲透,可以起到良好的教学效果。

3) 将高温合金熔体研究的难度和面临的挑战纳入教学内容,启发学生的深度思考,“航天精神”“弘扬科学家精神”自然引出

“高温、高活性”是多数液态金属最显著的特

点,这既是开展液态金属结构与性质研究的难点所在,又是解决液态金属基础前沿难题的挑战所在^[14-15],为此,必须将高温熔体研究的难度和面临的挑战讲透彻,才有助于塑造学生在攀登科学高峰道路上攻坚克难的精神品质。

针对液态金属“高温、高活性”的特点,这样讲到:高温合金熔融态温度多在 1500K 以上,钛合金则达 2000K 以上,如此高温条件下,测温、量热、粘流内耗、接触角等实验测定均十分困难,加之熔融态的高温合金均有很高的化学活性,以钛合金为例,在熔融条件下几乎能与所有材质坩埚容器反应,反应物污染了钛合金自身,在此条件下测定物理化学性质的精度无法保证。因此,如何根据熔融状态的特征精确测定液态金属的物理化学性质成为关键问题。

再进一步讲到:传统接触式实验方法的局限性仅能获取部分物理化学性质,因为传统实验方法均为接触式测定,一方面测定过程会对测定熔融高温多元合金产生影响甚至发生反应,另一方面接触式测定对于高温多元合金深过冷热力学亚稳态的物理化学性质更是无能为力,这是由于一旦测定过程接触合金熔体,形核过程立刻发生从而破坏了深过冷这一亚稳条件,过冷范围的数据难以保证,为此,发展新的测定方法成为本项目研究的关键,如利用空间环境另辟蹊径地发展无容器实验新方法,并结合具体实例,如在地面条件下如何创造出空间环境的物理特征,如何利用我国的载人航天工程开展搭载实验。基于上述内容的讲解,润物无声地将“特别能吃苦、特别能战斗、特别能攻关、特别能奉献”的航天精神向同学们讲授,进一步,弘扬科学家精神融入课堂:“胸怀祖国、服务人民的爱国精神,勇攀高峰、敢为人先的创新精神,追求真理、严谨治学的求实精神,淡泊名利、潜心研究的奉献精神,集智攻关、团结协作的协同精神,甘为人梯、奖掖后学的育人精神。”

4) 选取航空航天领域典型金属材料,“铸国之重器,育栋梁之才”的三航精神引入课堂教学

作者所在的西北工业大学是一所以发展航空、航天、航海(三航)等领域人才培养和科学研究为特色的研究型大学,“铸国之重器,育栋梁之才”是学校的重要使命。在教学过程中,三航精神引入课堂教学,凸显学校的“三航”特色是每个老师的基本职责。为此,作者在《液态金属结构与性质》课堂教学中,选择的金属材料,均是航空航天领域具有重大工程背景的典型金属材料。

教学过程专门讲到:航空航天用高性能金属材料已经从“单纯引入高温、高强组元”向“优化组元分布、实现微观组织和化学成分精确调控并实现应用性能主动控制”发展,航空航天领域对高性能新材料的战略需求,使得液态金属的相变过程主动控制传统技术和理论面临新的挑战,发展超常途径将引领未来金属材料制备加工领域的前沿性研究,如以钛合金和钢铁为例,均是航空航天领域核心基础构件的关键材料,是先进战机和大型民航客机的大梁、起落架、发动机主轴等关键部件的主要选材。还讲到:钛合金和超强钢凝固制备过程存在的“复相生长难控、多组元偏析、晶格错配”等严重先天不足的难题,迫切需要开展钛合金和钢铁熔体物理化学性质及相变控制研究。

进一步,在具体的知识点同样选取航空航天领域典型金属材料^[16-17],如在讲授液态金属密度这一节,以航空发动机关键材料 Inconel718 合金和航天用的 Ti-Ni 合金为例,在讲授液态金属结构这一节,以高温 Ni-Zr 合金为例,在讲授液态金属振荡动力学时,以金属 Zr 为例……这些铸国之重器所需的材料几乎融入了每一节课,潜移默化地传播了国家的重大需求,鼓励学生报效祖国、投身国家重大需求。

3 结语

本文总结了在教材建设和教学过程中课程思政的探索和实践。在教材建设方面,结合材料物理专业核心课程特点,从课程思政的源头做起,以习近平总书记关于教材建设的重要论述为指引,将党中央的要求和国家十四五规划关于“强化国家战略科技力量”“加强原创性引领性科技攻关”“加强基础学科拔尖学生培养”等国家重大战略部署写进教材,筑牢教材阵地,引导材料物理专业的学生树立报效祖国的远大志向和家国情怀。在教学过程中,润物无声施教,将思政元素融入液态金属结构与性质课堂教学全过程,具体为:将液态金属结构与性质的系统知识所体现的马克思主义唯物史观融入课堂;坚持面向世界科技前沿、面向国家重大需求,选取航空航天领域典型金属材料作为案例,启发学生的深度思考,将传统固态金属的知识体系拓展至液态金属这一新的学术领域,“铸国之重器,育栋梁之材”的三航精神引入课堂教学,潜移默化地传播了思想政治工作要求,鼓励学生报效祖国、投身党的伟大事业之中。

在液态金属结构与性质课程思政建设过程中,作者通过将思想政治教育元素和最新科技成果引入课程教材,将国际形势变化和国家重大需求引入课程教学,使“价值塑造、能力培养和知识传授”有机融合。对液态金属结构与性质课程思政的建设取得了初步的成效。成绩统计和与学生交流等方式显示,该课程教学内容丰富,引用了大量实践案例教学;通过专业前沿案例学习,激发了学生创新意识,培养了学生的家国情怀。课程配套新编教材《液态金属结构与性质》在高等教育出版社出版,已进入 20 多所高校图书馆,并被相关领域研究团队参考使用。

液态金属结构与性质是国际前沿的领域,新知识不断涌现,在未来教学过程中,继续坚持“四个面向”,针对本课程的特点,发挥教学团队成员的作用,充分挖掘液态金属科学发现背后的科学故事,将科学家精神深入融入课堂教学,丰富更新课程思政案例库,将进一步优化教学内容设计,达到将思想政治教育更加有机地融入到学生学习的全过程,为培养具有家国情怀、追求卓越、引领未来的金属材料物理领域领军人才提供支撑。

参 考 文 献

- [1] 王青, 忻蓓. 物理专业课程思政建设的认识与思考[J]. 中国大学教学, 2021, 03: 52-54.
WANG Q, XIN B. Understanding and thinking on the ideological and political construction of physics professional courses[J]. China University Teaching, 2021, 03: 52-54. (in Chinese)
- [2] 王小力. 大学物理课程思政研究与实践[J]. 中国大学教学, 2020, 10: 54-57.
WANG X L. Research and practice of ideological and political education in university physics [J]. China University Teaching, 2020, 10: 54-57. (in Chinese)
- [3] 于歆杰. 理工科核心课中的课程思政——为什么做与怎么做[J]. 中国大学教学, 2019, 09: 56-60.
YU X J. Ideological and political education in professional core courses of science and engineering—why and how to do[J]. China University Teaching, 2019, 09: 56-60. (in Chinese)
- [4] 董桂伟, 赵国群, 王桂龙, 等. 科研成果转化为实验教学资源的探索[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(4): 114-117, 124.
DONG G W, ZHAO G Q, WANG G L, et al. Exploration on transformation of scientific research achievements into experimental teaching resources[J]. Experimental Technology and Management, 2019, 36(4): 114-117, 124. (in Chinese)
- [5] 王海鹏, 王庆. 表征液态金属结构双体分布函数的讲授方法[J]. 物理与工程, 2022, 32(2): 00-00.
WANG H P, WANG Q. Teaching method of pair distribution function to characterize liquid alloy structure[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(2): 00-00. (in Chinese)

- [6] 余宏亮. 建设教材强国: 时代使命、主要标志与基本路径[J]. 课程. 教材. 教法, 2020, 40(3): 95-103.
YU H L. On the construction of a powerful country in textbooks: historical mission, landmark achievements and promotion paths[J]. Curriculum, Teaching Material and Method, 2020, 40(3): 95-103. (in Chinese)
- [7] 蔡瑶. 优化高校思政课课堂教学的“启拓教学”改革探索[J]. 思想理论教育导刊, 2018(6): 111-115.
CAI Y. Exploration and reform of cultivation and development in the teaching ecology of college ideological and political courses[J]. Leading Journal of Ideological & Theoretical Education, 2018(6): 111-115. (in Chinese)
- [8] 王海鹏. 液态金属结构与性质[M]. 北京: 高等教育出版社, 2021: 321-322.
- [9] DAHLBORG U, KRAMER M J, BESSER M, et al. Structure of molten Al and eutectic Al-Si alloy studied by neutron diffraction[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2013, 361: 63-69.
- [10] SRIRANGAM P, KRAMER M J, SHANKAR S. Effect of strontium on liquid structure of Al-Si hypoeutectic alloys using high-energy X-ray diffraction[J]. Acta Materialia, 2011, 59(2): 503-513.
- [11] LEE J, RODRIGUEZ J E, HYERS R W, et al. Measurement of density of Fe-Co alloys using electrostatic levitation[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2015, 46(6): 2470-2475.
- [12] 谢曼, 干勇, 王慧. 面向 2035 的新材料强国战略研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 1-9.
XIE M, GAN Y, WANG H. Research on new material power strategy by 2035 [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 1-9. (in Chinese)
- [13] 坚增运, 朱满, 介万奇. 金属熔体结构及其控制技术的研究进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(7): 20-26, 41.
JIAN Z Y, ZHU M, JIE W Q. Progress in the research of melt structure and its controlling technology[J]. Materials China, 2010, 29(7): 20-26, 41. (in Chinese)
- [14] 翟薇, 常健, 耿德路, 等. 金属材料凝固过程研究现状与未来展望[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1953-2008.
ZHAI W, CHANG J, GENG D L, et al. Progress and prospect of solidification research for metallic materials[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1953-2008. (in Chinese)
- [15] 王海锋, 苏海军, 张军, 等. 熔体过热处理技术及其在镍基高温合金中的应用研究进展[J]. 精密成形工程, 2017, 9(3): 55-64.
WANG H F, SU H J, ZHANG J, et al. Progress on melt overheating treatment technology and its application in Ni-based superalloys[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9(3): 55-64. (in Chinese)
- [16] 师昌绪, 仲增墉. 我国高温合金的发展与创新[J]. 金属学报, 2010, 46(11): 1281-1288.
SHI C X, ZHONG Z Y. Development and innovation of superalloy in China[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(11): 1281-1288. (in Chinese)
- [17] 蔡建明, 弭光宝, 高帆, 等. 航空发动机用先进高温钛合金材料技术研究与发展[J]. 材料工程, 2016, 44(8): 1-10.
CAI J M, MI G B, GAO F, et al. Research and development of some advanced high temperature titanium alloys for aero-engine [J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(8): 1-10. (in Chinese)
- (上接第 147 页)
- [9] LIN P, MA J, LIU T Y, et al. An experimental study of the “faster-is-slower” effect using mice under panic[J]. Physica A, 2016, 452, 157-166.
- [10] TIAN B, SUN W P, LI M, et al. Flowrate behavior and clustering of self-driven robots in a channel[J]. Chinese Physics B, 2018, 27(3), 038902: 1-6.
- [11] BAROIS T, BOUDET J F, LANCHON N, et al. Characterization and control of a bottleneck-induced traffic-jam transition for self-propelled particles in a track[J]. Physics Review E, 2019, 99, 052605-1-052605-9.
- [12] 麻礼东, 杨光辉, 张晟, 等. 三维漏斗中颗粒物质堵塞问题的数值实验研究[J]. 物理学报, 2018, 67(4): 112-117.
MA L D, YANG G H, ZHANG S, et al. Numerical experiment studies of clogging during the discharge of granular matter in a three-dimensional hopper[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(4): 112-117. (in Chinese)
- [13] YU Q C, ZHENG N, SHI Q F. Clogging of granular materials in a horizontal hopper; Effect of outlet size, hopper angle, and driving velocity[J]. Physical Review E, 2021, 103, 052902-1-052902-10.
- [14] STICCOIM, CORNESH E, FRANK G A, et al. Beyond the faster-is-slower effect[J]. Physical Review E, 2017, 96, 052303-1-052303-9.
- [15] GARCIMARTÍN A, PASTOR J M, FERRERL M, et al. Flow and clogging of a sheep herd passing through a bottleneck[J]. Physical Review E, 2015, 91, 022808-1-022808-7.
- [16] ZURIGUELI, PARISID R, HIDALGO C, et al. Clogging transition of many-particle systems flowing through bottlenecks[J]. Scientific Reports, 2014, 4(7324): 1-8.
- [17] CLAUSETA, SHALIZIC R, NEWMAN M E J. Power-law distributions in empirical data [J]. SIAM Review, 2009, 51(4): 661-703.
- [18] JANDA A, ZURIGUELI, GARCIMARTÍN A, et al. Jamming and critical outlet size in the discharge of a two-dimensional silo [J]. Europhysics Letters, 2008, 84, 44002-p1-44002-p6.