

《焊接过程的数值模拟》课程思政教学案例

开课学院：材料科学与工程学院

制作人：张义福

课程名称	焊接过程的数值模拟	授课对象所属专业	焊接技术与工程
课程类型	专业教育	开课年级	大学本科四年级
课程性质	必修课	课程总学时	32

一、课程简介（300 字左右）

《焊接过程的数值模拟》是一门实践学强的专业课，是焊接技术与工程本科专业核心课程。主要围绕“理论介绍、数值模拟实现方法、具体应用案例”展开，以通用数值模拟软件和实用算例为支撑，深入探讨常见焊接方法及涉及的热、力、微组织相变、电弧及溶池流体等物理过程的数值模拟实现方法。学生通过课程学习，掌握焊接过程数值模拟的基本原理、方法和思路，以及常用焊接方法的温度场、应力场及焊后变形计算方法。并根据计算结果对焊接工艺及焊接结构进行设定和初步优化设计。课程注重科研反哺教学，线上线下混合/项目式教学衔接，在线课程建设符合学生认知规律。课程深入挖掘思政元素，强调社会主义核心价值观和中华优秀传统文化教育，以专业知识技能为载体，实现知识传授、能力培养、价值塑造三位一体目标。扎实推进课程思政建设，协同专业教育与思政教育，实现同向同行的育人格局。

二、案例基本信息

- 1.案例名称：畅游深蓝——“奋斗者”号深潜器耐压舱体焊接模拟
- 2.对应章节：第四章 钛合金 TIG 焊/电子束焊热-力模拟
- 3.课程讲次：第九讲

三、案例教学目标

知识目标：理解钛合金在深潜器耐压舱体的作用以及焊接技术难点。

能力目标：理解钛合金超厚板焊接技术的挑战和特点、掌握有色金属熔焊焊接模拟技巧及深潜器耐压舱体常用焊接方法。

素质目标：培养学生的团队协作精神、解决实际问题的能力、职业道德和爱国情怀。

四、案例主要内容

海洋科技与工程是海洋强国建设的基础。在深海工程装备领域，中国初步形成了具备“奋斗者”号载人潜水器、“海斗”号无人潜水器等不同类型、覆盖全海深的深海进入和探测装备的谱系化，为认知深海提供了重要技术支撑与装备平台。中国载人深潜起步较晚，实现重大突破并达到国际主流技术水平始于“十一五”期间研制的“蛟龙”号潜水器，后发优势使中国跨越了国际上载人潜水器早期的技术路线。图1列出了世界上不同时期研制的主要载人潜水器及其载人舱壳体特征，包括载人舱乘员人数、材料屈服强度级别和材料类别。

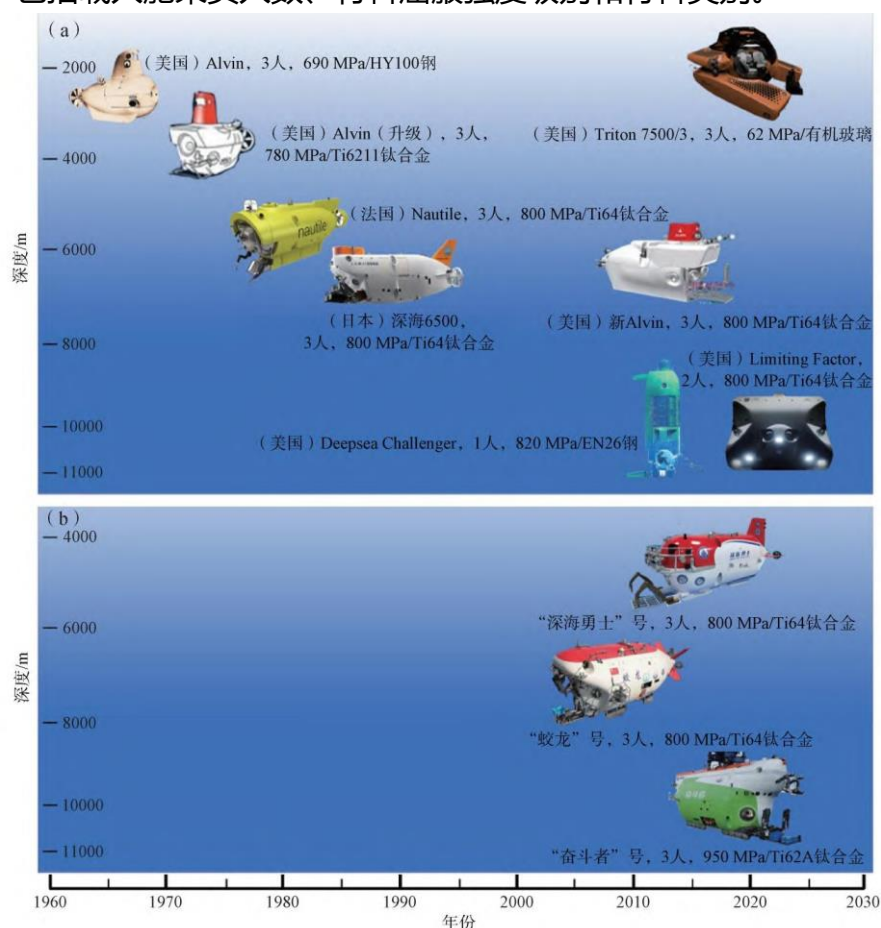


图1 国际上 (a) 及中国 (b) 在不同时期研制的主要载人潜水器及其载人舱壳体特征

2012年著名导演、探险家詹姆斯·卡梅隆团队研制的“Deepsea Challenger”号载人舱球壳采用820MPa的澳标EN26钢，采用半球整体冲压成型、焊后高温整体热处理的制造方案。图2为“Deepsea Challenger”号载人潜水器的单

人载人舱建造过程。该单人球舱限制了其在深海作业方面的能力，并未实现万米常规科考。2019年，美国深海探险服务公司 EYOS Expeditions 和深潜器制造公司 Triton Submarines 联合研制的“Limiting Factor”号选择了搭载2人的设计方案，其载人舱采用了800MPa的Ti6Al4V钛合金，载人舱内径1.5m、壁厚90mm，并且其观察窗、钛合金赤道缝均选择了螺栓连接（图3），而非美国自1964年“Alvin”号沿用至今的焊接工艺。转变连接工艺的原因在于对于厚度90mm、连续长度超过4.5m的焊缝，保障焊接质量稳定性及控制缺陷具有一定的技术挑战，而采用螺栓连接则施工周期短，技术较为成熟，但后续维护成本较高（真空电子束焊接是目前载人舱制备的主流连接工艺）。

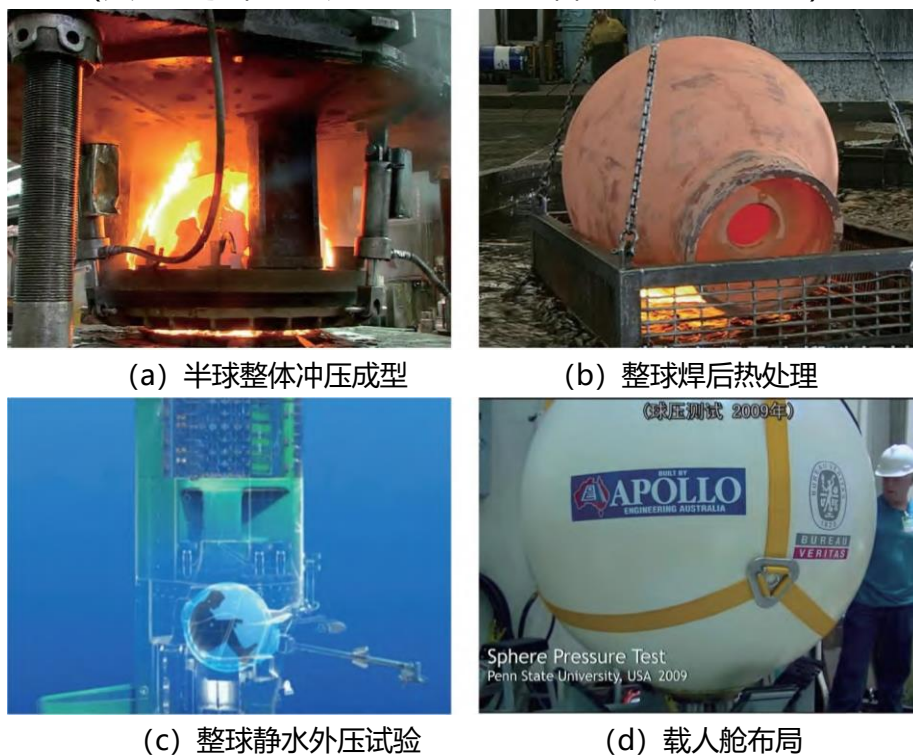


图2 “Deepsea Challenger”号载人潜水器的单人载人舱建造过程

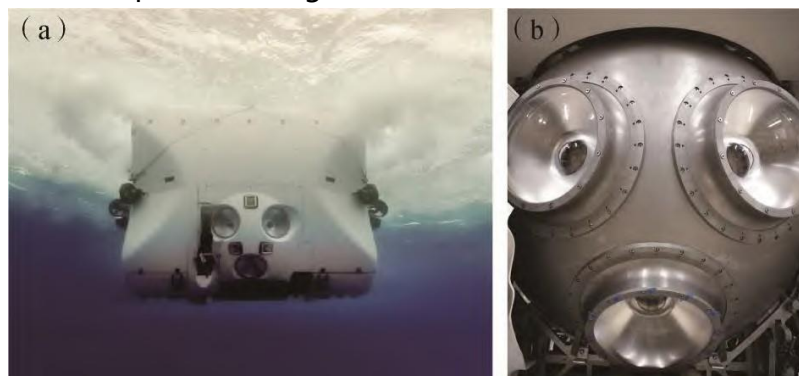


图3 “Limiting Factor”号全海深载人潜水器 (a) 及其2人钛合金载人舱 (b)

我国在“十一五”、“十二五”期间研制的 7000 米级“蛟龙”号和 4500 米级“深海勇士”号载人潜水器的基础上(采用 Ti6Al4V 合金制造载人壳体), 2016 年国家重点研发计划“深海关键技术与装备”重点专项启动了全海深载人潜水器研制工作。中国科学院金属研究所自主研发了 950MPa 级别高强韧钛合金, 组建载人舱技术攻关“国家队”, 研制了世界上首个载 3 人的全海深钛合金球舱, 使“奋斗者”号载人潜水器在 2020 年创造了 10909m 的中国载人深潜纪录。图 4 展示了“奋斗者”号载人潜水器钛合金载人舱建造关键过程, 包括宽幅超厚板材制备、半球整体冲压成型、整球电子束焊接等。自 2021 年起, “奋斗者”号已经开展了系列常规科考作业。目前中国已成为世界上万米深潜次数和人数最多的国家。

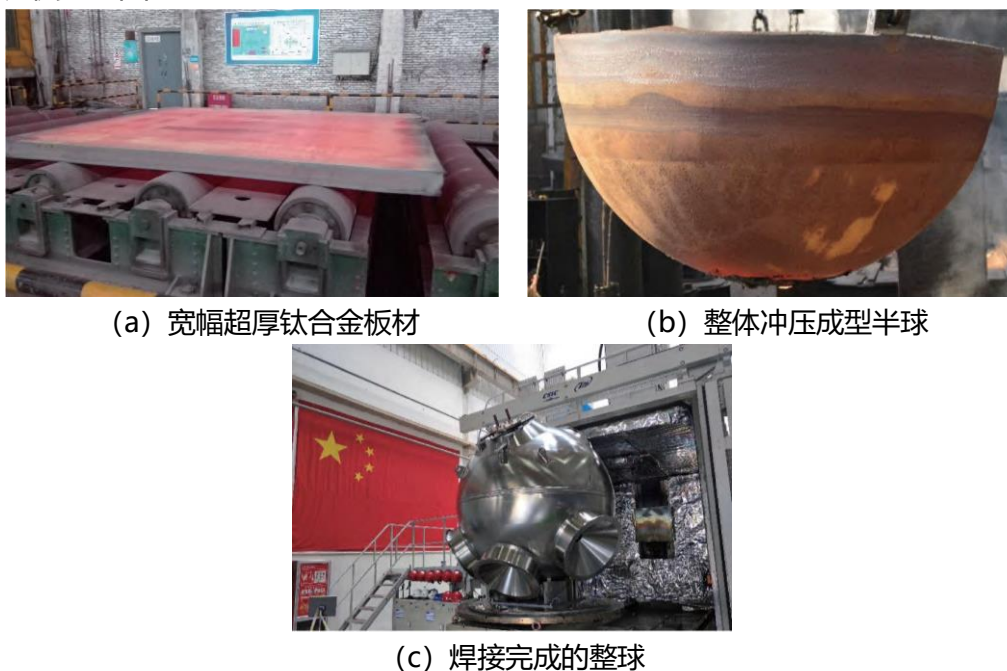


图 4 “奋斗者”号载人潜水器钛合金载人舱建造关键过程

钛合金耐压球壳的耐压性能已成为限制深潜器下潜深度的主要因素。焊接是制造深海大型钛合金耐压壳体必不可少的工艺方法, 通常包括气体保护窄间隙焊接、真空高能束如电子束焊接。对于制造直径 3m、厚度 50mm 的大型钛合金耐压壳体。目前采用逐层堆积的窄间隙焊接, 但施工周期漫长, 单个环缝焊接花费数月。采用真空电子束焊接效率可大幅度提升, 但对焊接真空环境要求苛刻。

“奋斗者”号潜水器钛合金板材宽度 3m、厚度 120mm、单重约 8t。其耐压舱体采用 TIG 窄间隙焊接和电子束焊。外压球壳在焊接过程中会产生较大残余应

力。而且，断裂的位置大多数在焊接应力集中的区域。钛合金耐压球壳的不圆度形状超差对结构承载能力影响极大。深潜器上分布多条焊缝，不同的焊接顺序、焊接方向均会大幅度影响接头的残余应力。为此在钛合金耐压壳体焊接制造之前，通过焊接数值模拟技术计算超厚钛合金板 TIG 窄间隙焊接和电子束焊焊后残余应力分布对于优化焊接工艺参数以及焊接方向、焊接顺序具有重要意义。

在“蛟龙”号、“深海勇士”号载人潜水器的基础上，通过“奋斗者”号载人潜水器研制的总体牵引，中国深海工程技术研究及应用取得了突破性、系统性进展。向海图强、向海而兴。2022年4月10日，习近平总书记在海南视察海洋科技发展时再次强调，“建设海洋强国是实现中华民族伟大复兴的重大战略任务。要推动海洋科技实现高水平自立自强，加强原创性、引领性科技攻关，把装备制造牢牢抓在自己手里”。

五、案例教学设计

1、引入案例（5分钟）

通过展示7000米级“蛟龙”号、4500米级“深海勇士”号和10909m级“奋斗者”号载人潜水器的图片和视频，引导学生思考该工程所面临的挑战和焊接技术的运用。

2、案例分析（15分钟）

深入分析大型钛合金耐压壳体逐层堆积的窄间隙焊接和电子束焊接的焊接技术，主要包括与本课程相关的数值计算难点、解决方案和实施过程以及计算结果对工艺的指导作用。引导学生关注其中的思政元素，如大国重器制造中的挑战与机遇、民族自信与社会主义道路自信等。

3、小组讨论（10分钟）

学生分组讨论，针对超厚钛合金板材焊接难点和挑战，结合案例中的实际操作，探讨如何更好地应用所学知识解决问题，同时培养学生的团队协作精神。

4、实践探索（10分钟）

利用线上资源，探索钛合金耐压球壳焊接过程，让学生掌握操作技巧和安全规范。同时强调在实际操作中应遵循的职业道德和安全意识。

5、总结与反思 (5 分钟)

总结案例中的关键点,反思教学过程中的不足,为以后的教学提供改进的方向。同时强调在未来的职业生涯中,应牢记社会主义核心价值观,为祖国的建设贡献自己的力量。



图 5 畅游深蓝——“奋斗者”号深潜器耐压舱体焊接模拟思政教学设计流程图

六、教学反思

通过展示不同级别的载人潜水器图片和视频,成功激发了学生学习热情,使他们更加关注工程所面临的挑战和焊接技术的运用。达到了知识传授、技能提高和价值塑造三维一体的教学目标。对逐层堆积的窄间隙焊接和电子束焊接的技术难点和解决方案的着重讲解分析,可引导学生思考如何运用所学知识解决实际问题。同时,通过“课程思政”教学让学生能够在案例中学习课程前沿知识,提高专业技能,进一步提高分析问题、解决问题的能力。使学生认识到焊接技术在大国重器制造中的应用与挑战,以及对经济建设、社会发展和国防安全的重要性,能够增强民族自信、社会主义道路自信和文化自信,提高学生的爱国热情,树立良好的为人民服务的职业道德和职业理想。同时能够培养学生的焊接专业情怀,更加热爱本专业。

在实践探索环节,由于线上资源的限制,学生无法亲身体验钛合金耐压球壳焊接的真实场景。在今后的教学中,将尽量争取线下实践机会,让学生能够更加直观地了解焊接技术的实际应用。此外,可以进一步丰富案例内容,引入更多相关的实际工程案例,以帮助学生更好地理解高强高韧钛合金超厚板焊接模拟技术的实际应用和发展趋势。最后,深化“课程思政教育”理念,做到“潜移默化、润物细无声”。“课程思政”是一系统工程,其建设和改革必须持续探索、深化和完善,这就需要在借鉴、总结已有成功实践的基础上,结合所授课程特点,形成适合该门课程的教学体系。