

# 加强轻量化研究,实现制造业可持续发展

## ——走进金属轻量化成形制造北京市重点实验室

Strengthen Lightweight Research to Achieve Sustainable Development of Manufacturing

[编者按] 金属轻量化成形制造北京市重点实验室于2016年12月被批准成立,针对航空、汽车、轨道交通等高端制造领域对轻量化成形制造的重大需求,开展了高性能关键零部件轻量化成形制造新工艺、新技术等应用基础研究,构建了从基础研究到核心技术开发的创新平台,为轻量化成形技术提供创新理论,为节约能源与资源、减少排放提供重要的技术支撑。自成立以来,实验室承担了国家自然科学基金、国家科技重大专项、国家重点研发计划、北京市科技重大专项等国家级、省部级项目,发表SCI/EI期刊论文百余篇,授权发明专利50多项。

### 研究方向

实验室依托北京科技大学“机械工程”与“材料科学与工程”两个主要学科,两个学科都是北京科技大学国家“211工程”和“优势学科创新平台”等重点建设项目的重点学科方向,依托的二级学科机械设计及理论和材料加工工程都是国家重点学科,在历次学科评估中均名列前茅,在国际上有重要影响。经过发展,形成了以下研究方向:(1)先进高强钢轻量化成形制造;(2)铝镁钛等轻质合金轻量化成形制造;(3)空心零件轧制成形制造;(4)金属复合板管成形制造;(5)轻量化增材制造。实验室通过创新研究,构筑从基础研究到核心技术开发的技术创新平台,持续为轻量化成形制造技术提供技术创新理论。

### 研究项目及成果

(1)在先进高强钢轻量化成形制造方面,在多项自然科学基金、北

京市科技重大专项的支持下,先后与首钢、宝钢、北汽集团等大型企业合作,研究了高强钢在热成形条件下的高温变形行为,基于连续介质损伤力学建立了耦合损伤的统一粘塑性本构方程,对不同变形条件下高强钢的成形极限进行了有效预测。研究了高强钢热冲压成形过程中加热温度、保温时间、成形温度、保压时间以及模具温度等因素对成形后零件性能及组织的影响规律,并通过工艺参数优化,获得了具有良好综合力学性能的热冲压零件。完成了车门防撞梁热冲压模具的设计及试模,并制定了模具的设计及调试规范;实现了车门防撞梁热冲压零件的小批量生产,开发出工程试验样件,抗拉强度达到1500MPa级,尺寸精度达到 $\pm 0.5\text{mm}$ 以上,且硬度分布均匀,综合性能满足主机厂对热成形零部件的各项指标要求。

开发了分区加热冲压工艺生产变强度高强钢的新方法,揭示了分区加热冲压的变强度机理,建立了分区

加热过程的奥氏体相变动力学模型,研究了分区加热冲压新工艺的参数优化,为变强度汽车零件的制造提供了新方法和新思路。

围绕高强/超高强度钢成形、超高强度钢强化机理方向,针对多种先进材料塑性变形过程多种变形机制难以定量描述的问题,团队进行了深入的试验和理论研究。分别基于滑移、滑移-孪生、滑移-相变及滑移-孪生-相变多种变形机制耦合的晶体塑性模型来描述FCC晶体结构合金及TWIP钢的塑性力学行为,建立了考虑滑移-孪生-相变三机制耦合的细观理论模型,提出了加工过程多机制作用的多尺度建模理论方法,为材料加工过程更精细的模拟提供可能。

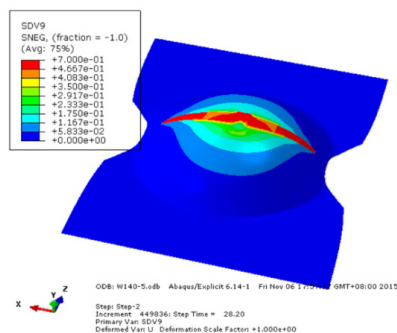
(2)铝镁钛等轻质合金轻量化成形制造。

铝材作为航空、轨道交通和汽车等交通运输用的第二大金属材料,在轻量化过程中占有举足轻重的作用。

研究了 AZ31、AZ80、MB26 等镁合金热加工过程的失稳机理和成形性能,建立了多种合金的本构关系和热加工图,并成功应用于典型合金的流动应力和组织演化预测。提出了基于热加工图和组织演化的挤压极限理论,预测热挤压过程的开裂和表面质量缺陷等。开发了稀土镁合金带高筋圆盖板等温锻造成形工艺,探索出采用等温锻造成形工艺来实现稀土镁合金带高筋圆盖板零件的成形和性能提高工艺方法,成形的高筋盖板类零件尺寸精度高,平均晶粒尺寸达到  $5\ \mu\text{m}$  以下,其屈服强度达到 260MPa,抗拉强度达到 350MPa,静载试验超过设计使用要求 2 倍。

在钛合金热成形领域,与哈工大合作开展了 TA15 管材热态内压成形组织演变与塑性损伤预测的研究。揭示了双态组织 TA15 钛合金热变形的微观组织演化机理,建立了基于球化机理的 TA15 钛合金热成形微观组织演变预测模型。揭示了 TA15 钛合金高温流动软化和塑性损伤机理,建立了以位错密度、 $\beta$  相体积分数、塑性损伤等为内变量的 TA15 钛合金粘塑性损伤本构模型,通过热-力-组织-损伤多场耦合数值仿真模型的建立,实现了 TA15 钛合金热成形过程的损伤演化与破裂预测,为钛合金钣金热成形极限和破裂缺陷预测提供了新方法。

(3) 针对轻量化发展带来的空



冲压模具三维模型板料破裂情况仿真

心轴类零件的大量需求,开发了基于芯棒控制的空心轴类零件楔横轧精确成形制造新技术,在实现空心轴件外形精确成形的同时实现轴孔的精确成形,并实现材料微观组织性能的控制,是一种轻量化、精密化、高效化的空心轴类零件近净成形新技术。楔横轧带芯棒轧制空心轴类零件,使轧件在外壁压下的同时,强迫壁厚减薄。因为楔横轧工艺轧件的成形特征是径向压缩,轴向延伸,而带芯棒轧制空心零件过程中,当径向压缩量和轴向延伸量匹配不好时,轧件很容易发生横向变形,产生较大的椭圆,导致轧制过程中断或者得不到合格的零件,因而成形难度大。实验室团队经过多年的深入研究,建立了楔横轧空心轴的精确成形理论及技术。揭示了空心零件成形过程中轧件椭圆化机理并建立了预测模型,突破了控制内孔精度的关键技术;掌握了控制楔横轧空心零件成形质量的关键技术,提出了内壁裂纹的控制策略,解决了单向空心台阶轴轴向窜动问题及质量缺陷;基于楔横轧带芯棒空心零件的成形特征提出了双孔型两圈成形工艺,实现了工艺方案的优化设计。

(4) 金属层合板/管是利用固-固或固-液相等复合技术使两种或两种以上物理、化学、力学性能不同的金属在界面上实现牢固结合而制成的一类新型先进复合材料,由于其能够同时兼顾结构、功能及成本,成为解决结构-性能轻量化设计制造的重要途径。实验室团队研究了双金属复合管热挤压冶金复合界面理论,建立了考虑变形影响的复合界面过渡区元素扩散模型,对热挤压生产复合管进行了数值模拟计算,研究了坯料几何参数、挤压工艺参数等对管材成形的影响,揭示了复合管热挤压过渡区变形和缺陷的分布规律。研究团队与企业建立联合研发中心,围绕 5 万 t 热挤压机组,研究解决大口

径双金属冶金复合管界面层微观组织演化、界面层金属流动规律、模具与工艺优化等现场工艺技术难题,并合作挤压出碳钢/不锈钢双金属冶金结合复合管。

(5) 增材制造技术实现了直接从数字模型通过材料堆积来生产三维实体,因而能够更精确地根据零件承载特性设计复杂的零件形态,实现结构的大幅减重轻量化。实验室团队在金属基复合材料增材制造技术领域,重点开展了 3D 冷打印先进装备的设计研发及 3D 冷打印工艺控制模型的研究工作。设计完成了流态金属粉末喷射沉积系统及喷头多轴联动数控扫描系统,建立了 3D 冷打印坯体的干燥热-湿-应力耦合预测模型,实现了坯体干燥过程的湿度迁移及变形预测。

## ▀ 梯队建设 ▀

轻量化成形制造北京市重点实验室现有固定研究人员 30 余人,由学科布局完善、年龄和职称结构合理、学位层次高、有强势发展潜力的科研人员组成,其中有中国工程院院士、英国皇家工程院院士、“国家千人计划”等在内的教授/研究员 13 人,80% 以上的研究人员有博士学位,45 岁以下研发骨干占 50% 以上,教授、副教授大都具有海外留学及访问与合作交流经历。实验室总面积达  $2000\text{m}^2$ ,仪器设备总原值达 1000 余万元,大型设备 36 台套。拥有模具加工中心、零件轧制成形、金属热成形、金属性能测试等多个实验室。专业的研发队伍和科研条件为本实验室的科技攻关以及丰硕科研成果的获得奠定了良好的基础。

本实验室依托的国家级重点学科,具有学士、硕士和博士全部学位的授予权并设有博士后流动站,还与英、美、德、意、澳大利亚等国的大学合作培养博士/硕士研究生。

(采访 李丹)