

# 致力于塑性加工精确成形 推动空天复杂构件制造技术发展

## ——走进中国科学院金属研究所塑性加工先进技术团队

Committed to Plastic Processing Precision Forming to Promote Aerospace Complex  
Component Manufacturing Technology

[编者按] 中国科学院金属研究所塑性加工先进技术团队始建于1999年,面向航空航天、新能源汽车、高铁、核电以及电子信息等国家重大科技工程高端装备领域,解决高精度、整体化、长寿命、轻量化、高可靠性发展的重大迫切工程需求,以发展高性能金属复杂薄壁曲面构件的精确塑性成形技术和原理为主题,以提高复杂管/板类零件的成形能力和成形质量为主线,致力于实现形性协同调控的塑性加工共性科学问题和关键技术的研究,同时依托材料加工工程专业为工程领域培养了大批高水平科研人员。

### 研究方向和科研成果

中国科学院金属研究所塑性加工先进技术团队在张士宏研究员的带领下致力于高性能金属材料的塑性加工新技术、新理论、新方法和新设备的开发研究。主要研究方向包括:

(1) 板类零件高速冲击液压成形技术。

复杂薄壁钣金零件在航空制造业中占有非常重要的地位,构成飞机机体的框架和气动外形,具有总数多、零件尺寸不一、形状复杂等特性。钣金零件制造对飞机制造质量、周期和成本有着重要影响。钛合金、高温合金以及铝合金等典型航空航天材料在采用传统成形工艺生产复杂薄壁板类零件时,存在生产效率低、尺寸精度低及表面质量差等缺点,严重制约了高性能钣金零件从多品种、小批量向大批量生产阶段转型的进度。基于材料的高速率增塑机制,将冲击

成形的高应变率特性与液压成形的柔性特点有机结合,提出全新的冲击液压成形工艺方法。揭示了固-液冲击传载过程中液体压力传播时的时空特性和高应变率下铝合金的动态力学响应规律及增塑机理,阐明了铝合金初始状态-冲击液压成形的应变速率区间-宏观成形性能之间的内在联系。提出了基于固-液-力多场耦合的冲击液压成形性能的评价方法,建立了高应变速率下铝合金板材成形极限的预测模型。

团队研制的高速冲击液压成形设备,采用新型气-液复合动力源和新型驱动机构实现了高速、高能量冲击源的输出及精确控制,攻克了冲击体加速过程的动态减阻技术以及模具密封的动态锁模技术,可保证最大输出速度不低于50m/s,能量大于90kJ。采用新型高速冲击液压成形技术及装备,已成功开发出飞机加强框、锥形罩、深腔回转体构件等多种

航空用复杂薄壁钣金构件。

(2) 管类零件先进柔性成形技术。

在飞行器的所有系统(如燃油、液压、环控、废水等)均涉及不同材料规格、不同类型的管路零件,被称为飞行器的“血管”,其几何结构呈现出轴线空间化、弯曲连续化、截面异形化等特征。采用传统冲压拼焊的组合工艺,零件形状、尺寸以及性能的一致性都难以得到保证,极易产生“跑、冒、滴、漏”等工程故障,降低了导管的使用寿命。为此,团队先后开发了多项先进柔性成形技术和装备,实现了耦合材料特性和零件特征的短流程量化工艺设计,显著提高了材料成形性能和零件的精度质量。

a. 脉动液压成形技术。对具有大膨胀率和大截面变化比的金属异形整体管类零件液压成形时,在液体压力升高的同时,通过调节其周期性升降,显著降低成形过程中的摩

擦力,增加补料量;针对具有亚稳结构,通过相变增塑效应进一步提高管材成形极限和变形均匀性材料,有效解决了起皱和开裂并存的难题。

b. 柔性液压锻造技术。除了将液体作为主动传力介质,还需配合刚性机构对管坯局部位置实施加载,在液压力与机械力的协同作用下,改变管坯的应力/应变路径,从而提高零件的局部流动性和成形能力,最终实现零件局部特征的精确成形。

c. 内外高压复合成形技术。通过在管材的内外表面分别施加液体高压,实现单层管或多层管材的同步或非同步变形,解决形状更加复杂的空心构件成形难题,实现了大变形量的有效分解以及特殊结构的高质量制造,大幅提升了材料和零件的成形性能。

d. 颗粒介质辅助薄壁管推弯技术。在传统推弯工艺基础上,将颗粒作为填料对管材进行弯曲成形,而颗粒填料在弯管过程中初始弯曲段的内压明显高于其他区域,这对于同样处在弯曲变形区的管件起到了重要的支撑作用,可以减轻弯管横截面椭圆畸变,抑制弯管内侧壁失稳起皱的发生,该技术可用于成形具有薄壁和小弯曲半径特征的弯管。

### (3) 板式楔横轧精确成形技术。

a. 难变形合金叶片类零件的精确制坯技术。面对高温合金、钛合金航空发动机锻造叶片对坯料加工高效、优质的迫切需求,结合板式楔横轧技术成形精度高、组织一致性好、材料利用率高、模具成本低、安装调试方便的优势,实现了难变形合金叶片类零件的精确制坯,提出了材料楔横轧成形性能的评价方法和指标,建立了相应的评价测试平台,实现了材料楔横轧成形性能的量化评价与工艺参数优化。

b. 高精度板式楔横轧机的研制。辊式楔横轧机是目前工业应用最为广泛的机型,但其模具开发制造过

程复杂且成本较高,难以保证模具和轧件尺寸精度。为满足难变形合金叶片类零件精确制坯对成形精度( $\leq \pm 0.2\text{mm}$ )的要求,采用开放式支撑立柱预应力装配的框架结构设计来提高板式楔横轧机的结构刚度,实现工作区域可视化;采用楔形滑块机构连续调节上下模具间距;采用伺服电机驱动的液压控制系统实现工艺参数精确控制,突破传统设备的控制难点。

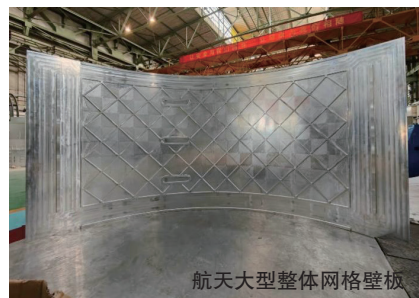
(4) 壁板柔性介质辅助滚弯成形技术。

整体网格壁板是一种具有高加强筋、薄蒙皮的大型结构件,具有强度高、质量轻、可靠性高以及气密性好等优点。网格壁板在空弯时由于蒙皮与筋的不协调变形,成形后存在曲率及直线度超差较大的缺陷,大大降低了壁板的弯曲成形精度,影响后续生产装配环节,无法满足飞行器对制造精度、效率和可靠性的要求。

为此,团队提出了整体网格壁板的柔性介质辅助滚弯成形方法,可有效改善网格壁板弯曲时的受力状态,提高壁板筋条和蒙皮协调变形性;建立了整体网格壁板柔性介质辅助弯曲变形和回弹有限元计算模型,结合壁板与柔性介质滚弯受压的力学解析,阐明不同柔性介质压力特性下筋条、蒙皮变形和回弹规律;针对不同形式和特征尺寸的网格壁板柔性介质辅助滚弯成形工艺进行计算分析与试验验证,揭示了柔性介质压力特性对成形缺陷的作用机制。

## 交流与合作

团队与白俄罗斯科学院物理技术研究所、丹麦奥尔堡大学、意大利巴里大学、罗马尼亚克卢日·纳波卡技术大学、韩国首尔大学等世界知名高校和科研机构建立了长期稳定的合作交流关系,建立了中国-白俄罗斯塑性加工联合实验室、中国-罗马尼亚板成形技术联合实验室及中国



航天大型整体网格壁板

- 韩国框架合作协议,获得了意大利商业部科研项目资助和丹麦有关科研项目资助。相关合作研究成果获得国家科技部、中科院和沈阳市政府科研项目资助和奖励。

塑性加工先进技术团队为国际板成形会(IDDRG)和国际金属成形方法数值模拟组织(NUMIFORM)的牵头单位,张士宏研究员为两个国际组织的中方执行委员,为促进国内同行参与国际学术活动、组织国际学术会议发挥了重要作用。团队注重高能力科研人才培养,扩大企业合作和国际合作交流,共建企业产学研合作平台,进一步建设中-白和中-罗联合实验室,打造国际一流学术交流平台和人才培养高地。

## 未来规划和研发重点

塑性加工团队将以“材料-工艺-模具-设备一体化”为思路,以探索提高成形能力和精度质量的共性科学问题为创新源泉,根据材料特性创新工艺、装备和模具,不断攻克金属塑性加工领域的共性科学难题,逐步实现技术与设备创新,成为专业领域创新技术的发源地。

进一步创新异型管件脉动加载及内外压复合成形、复杂钣金件冲击液压成形技术和装备,推进新技术在航发钛合金、高温合金、铝合金钣金件、汽车板件与传动件、航天钣金件和壁板件等方面的应用;依托中白国际合作,研发新型板式楔横轧机,创新模具设计方法,形成叶片类零件的高效、高可靠性近净成形新技术,拓展新工艺和新应用。(采访 大溪)