



科 创 中 国  
INNOVATION CHINA



# 低应力增材装备



徐春广

北京理工大学

康硕（山西）低应力制造系统技术研究院

2022年8月10日



13701099129



北京海淀区中关村南大街5号



<https://www.bit.edu.cn/>

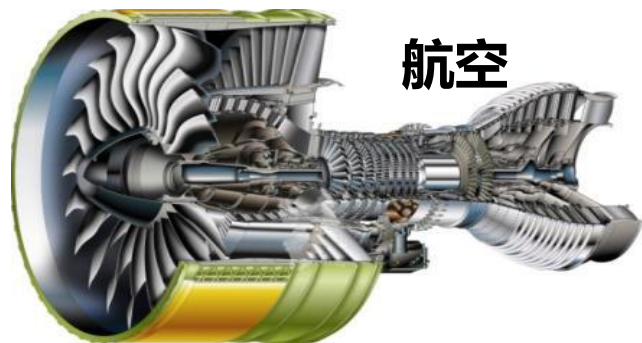
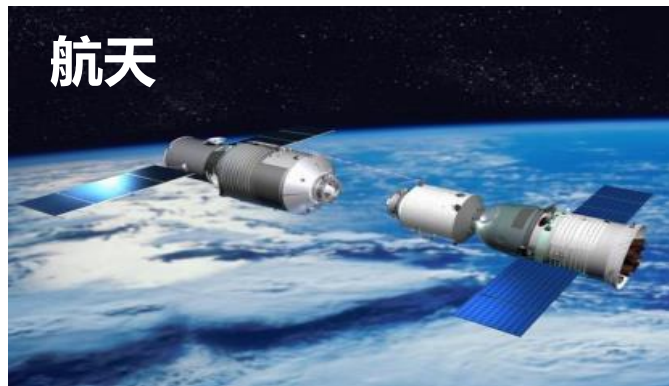
# 目 录



- (一) 需求与研发背景**
- (二) 解决的主要问题**
- (三) 低应力增材技术**
- (四) 试验验证与应用**

# (一) 需求与研发背景

- 1) 残余应力存在于几乎所有机械构件和装备;
- 2) 残余应力量化检测与原位消除成为工业界“顽疾”。



# (一) 需求与研发背景

我国高尖端装备的单件、小批量、变批量、多品种和复杂内  
外形廓构件对金属增材制造技术有迫切需求



航空发动机涡轮叶片



汽车发动机缸体



吨级船用螺旋桨



导弹战斗部壳体



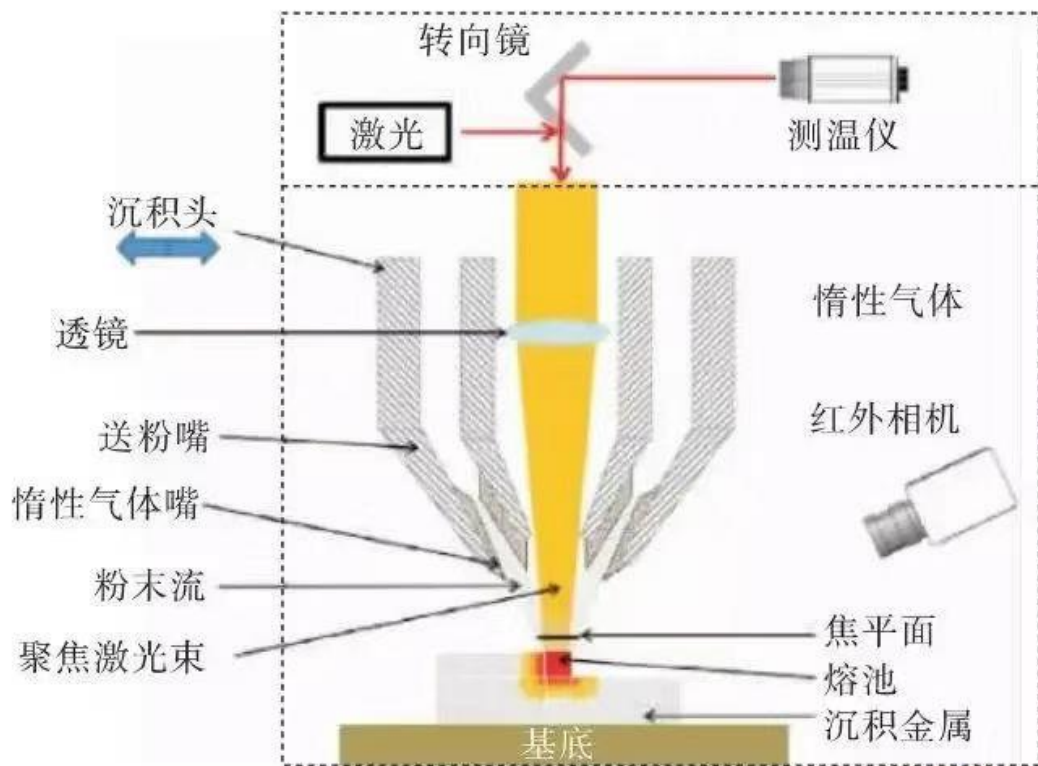
铸造复杂箱体



燃料喷嘴

# (一) 需求与研发背景

**金属增材制造工艺特点：金属材料熔融冷凝过程产生不均匀温度场，  
温度梯度导致材料不均匀变形而产生残余应力**



**激光粉末熔覆工艺  
适合高精度小尺度复杂构件**



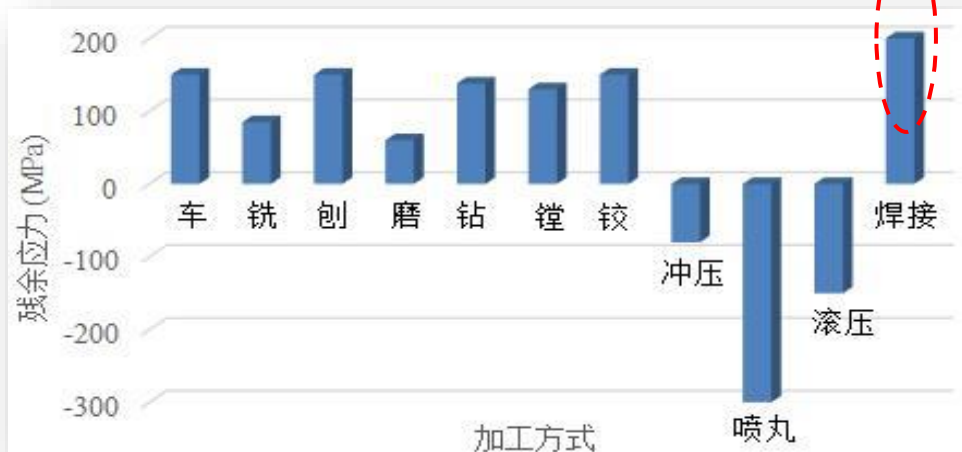
**电弧送丝堆焊工艺  
适合大尺度内外轮廓复杂构件**

# (一) 需求与研发背景

## 电弧增材构件残余应力的来源

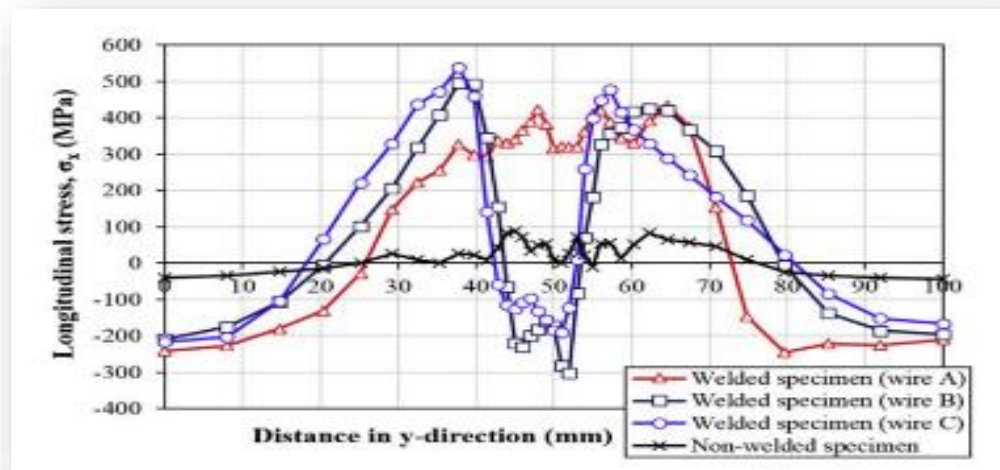
焊接过程大量残余应力，电弧增材类似层叠堆焊过程，具有焊接结构所有的缺陷特征：  
**残余应力集中、拉伸应力过大、材料性能下降、**  
**内部气孔、夹杂缺陷、不完全熔焊、容易氧化等。**

不同加工方式 残余应力分布不同



**残余应力集中或非平衡分布**

焊接残余应力分布 (垂直焊缝)

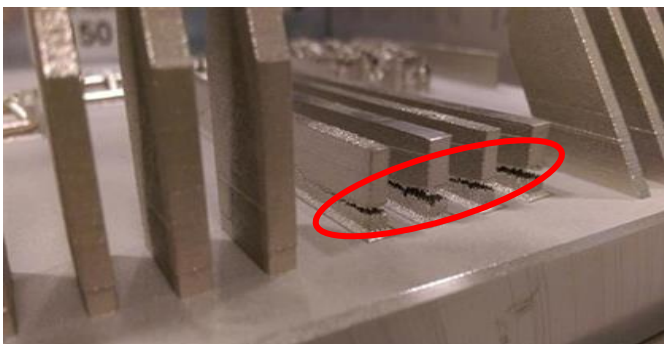


**变形 开裂**

# (一) 需求与研发背景

## 增材构件内部残余应力分布不均

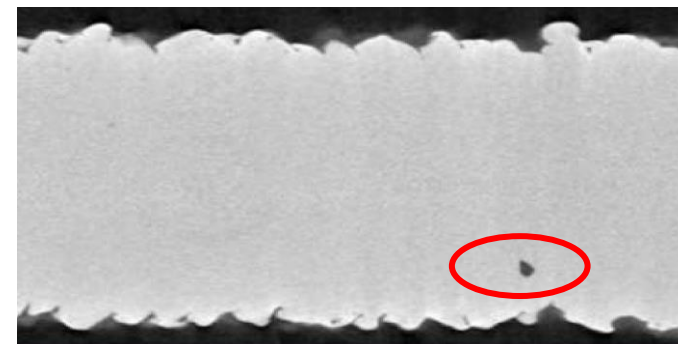
是导致增材构件材料性能下降、内部缺陷、变形和开裂的主要原因



开裂 (来源互联网)



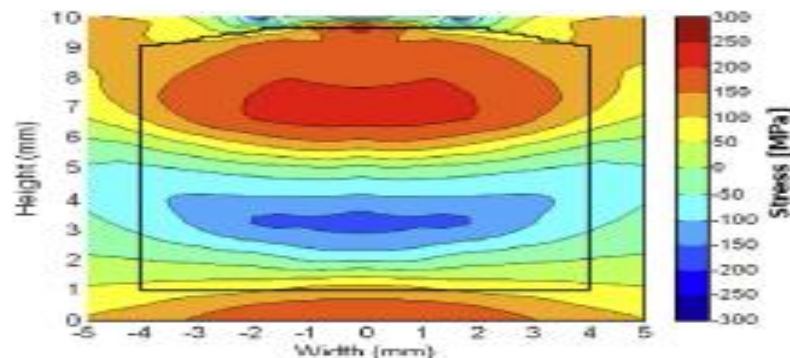
边缘翘曲



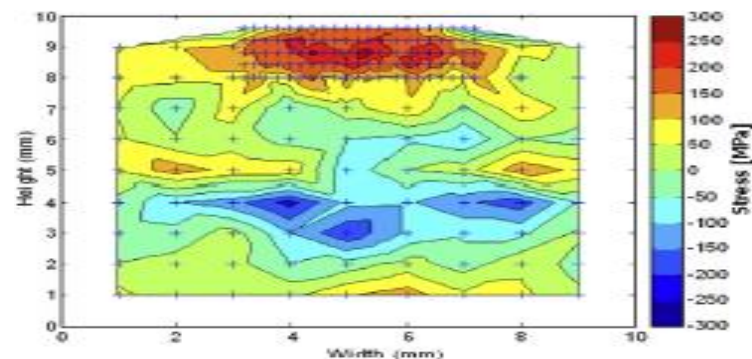
孔隙



增材构件



预测残余应力分布



实际残余应力分布

残余应力检测与调控 是提升增材构件制造质量和服役安全的先决条件

## (二) 解决的主要问题

### ➤ 满足国家**智能制造**战略发展的急需：

我国《第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》明确了，发展增材制造在**制造业核心竞争力提升与智能制造技术发展**方面的重要性，将增材制造作为未来规划发展的重点领域。

### ➤ 满足国家**高端装备**研发和产业急需：

各种高端装备增材构件**变形大、保形能力差、服役安全隐患**，分布不均匀的**残余应力严重影响**增材构件的制造精度，导致增材构件出现**变形、裂纹和失效**，**航空航天、兵器船舶、航母潜艇、核安全、交通高铁、石油化工**涉及面广、影响力大、意义重大。

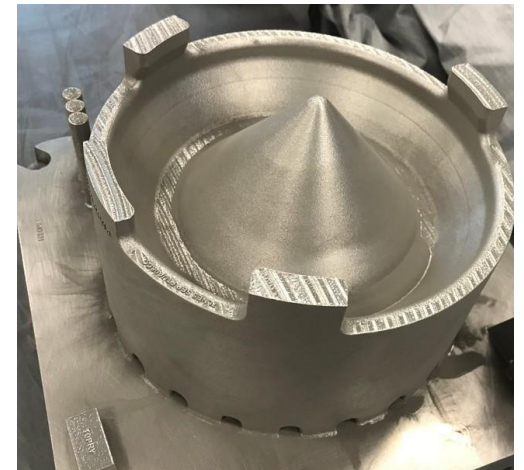


增材产品



## (二) 解决的主要问题

- 增材构件内部**热应力控制、变形开裂预防**，改善构件内部质量和力学性能；
- 特别适合**弱刚度构件**的增材制造；
- 将**多源高能超声波**注入增材构件内部，实现**无损原位**地消减和均化内部残余应力。
  
- 满足航空航天兵器等**框架、异形筒体类等弱刚度结构和弱刚度箱体类构件**的低应力增材；
  
- **低应力增材**：提供了一个无损、经济而普适的残余应力消减均化方法；
- **填补技术空白**：提升增材构件质量、使用范围广、复现性好、质量稳定一致。

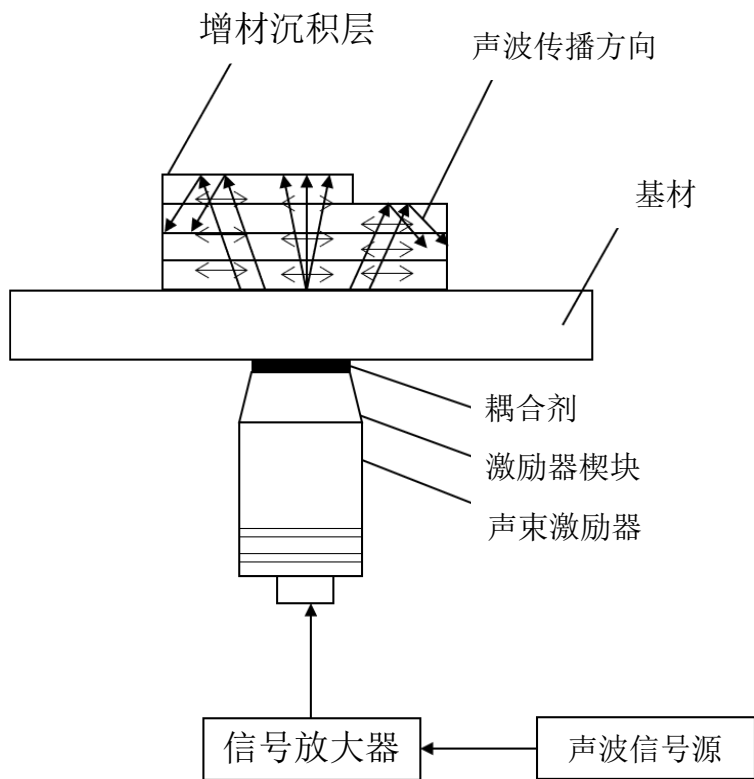


增材油箱盖（图片来自GE公司）

# (三) 低应力增材技术

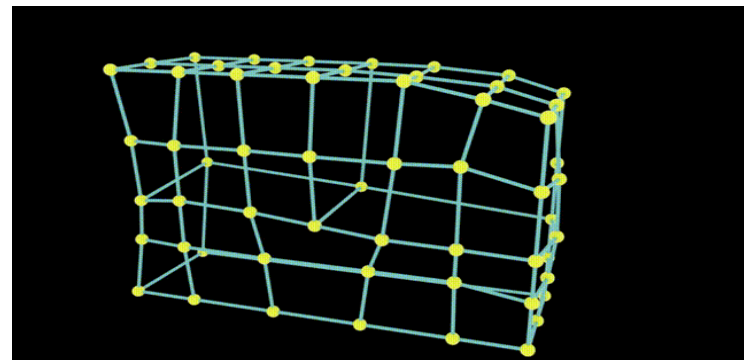
## 残余应力高能声束调控方法

国家标准《金属材料 残余应力 声束控制法》(GB/T38811-2020)

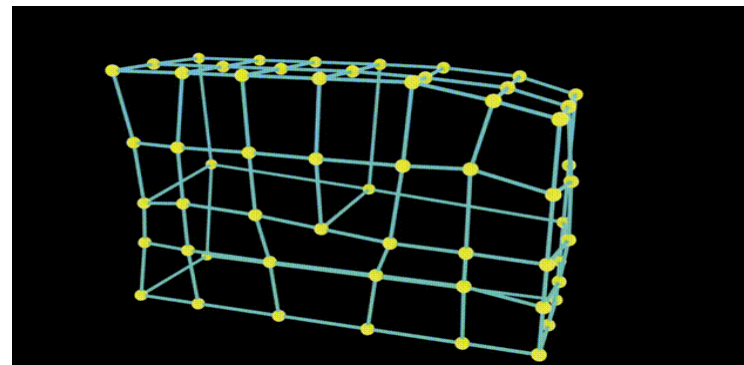


低应力增材原理

当超声波能量大于晶格位错能时  
残余应力消减和均衡



纵波调控与质点运动方向一致的残余应力



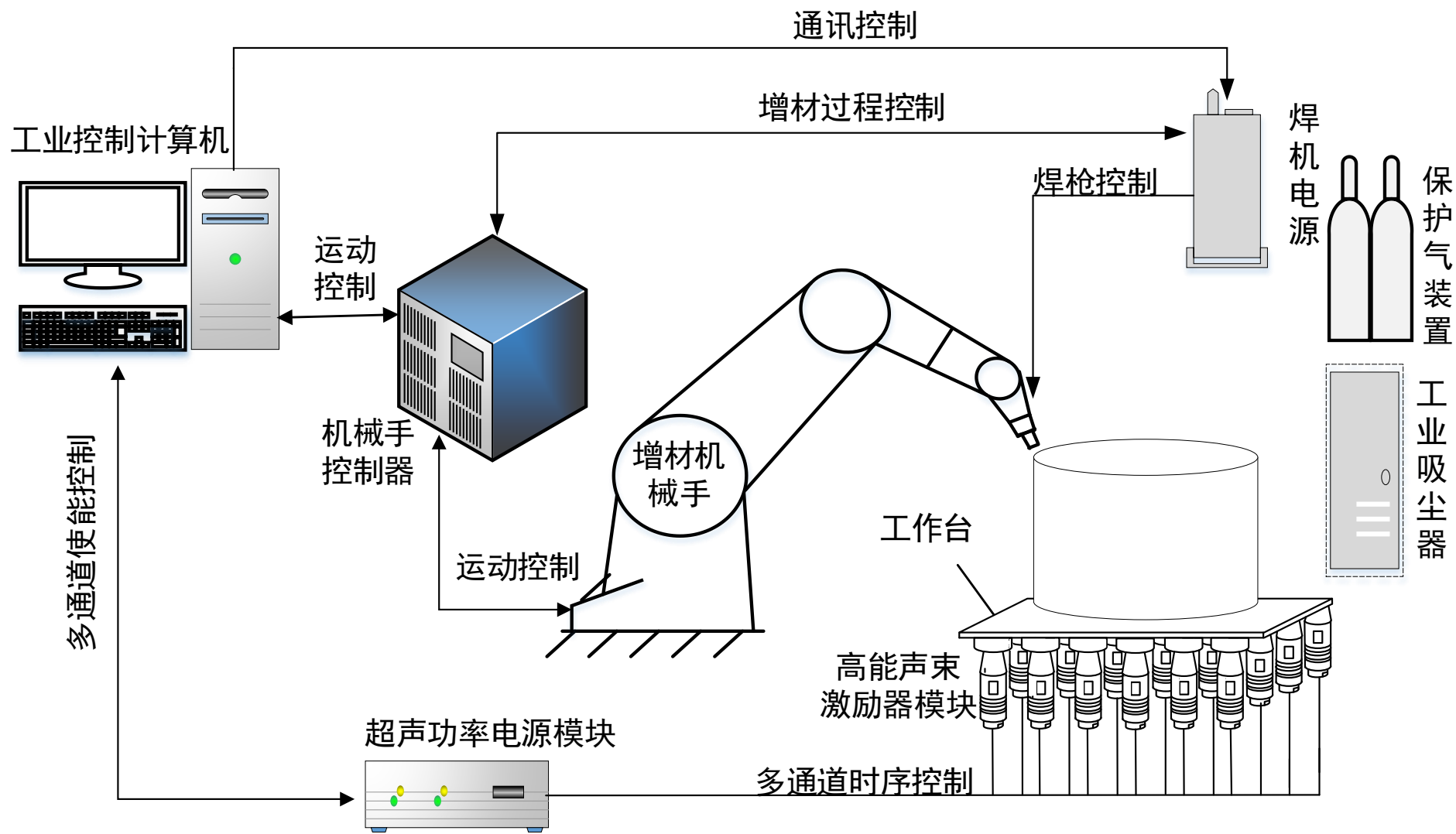
横波调控与质点运动方向垂直的残余应力

start

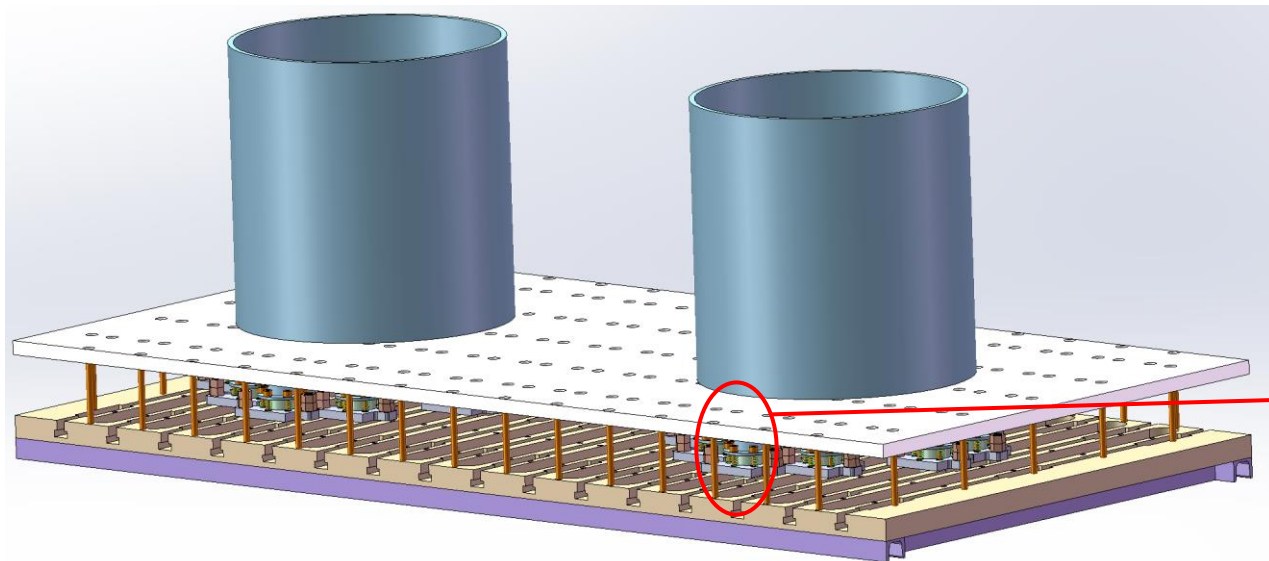
stop

# (三) 低应力增材技术

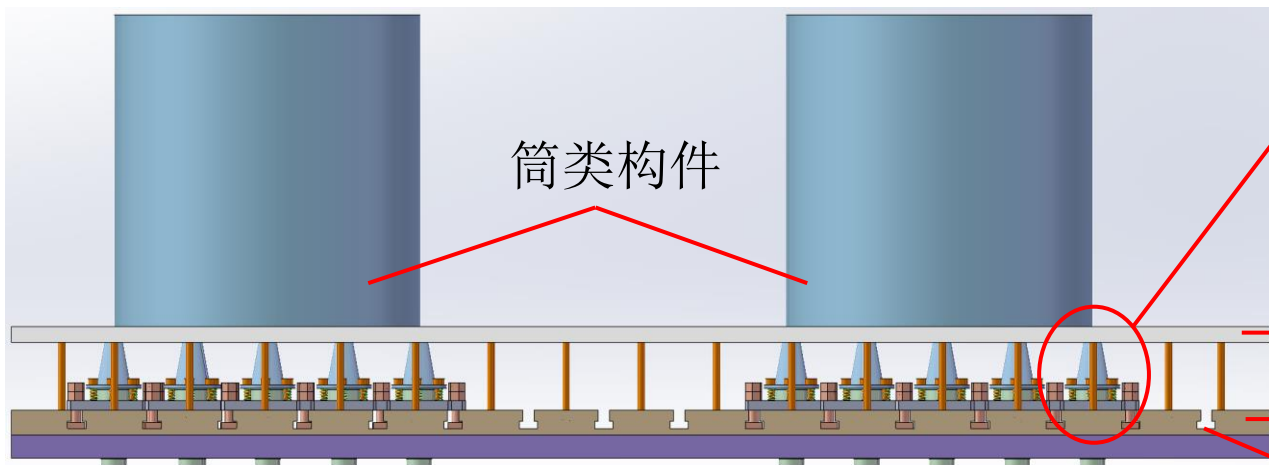
## □ 低应力增材制造系统构成原理图 (适合激光铺粉和电弧送丝)



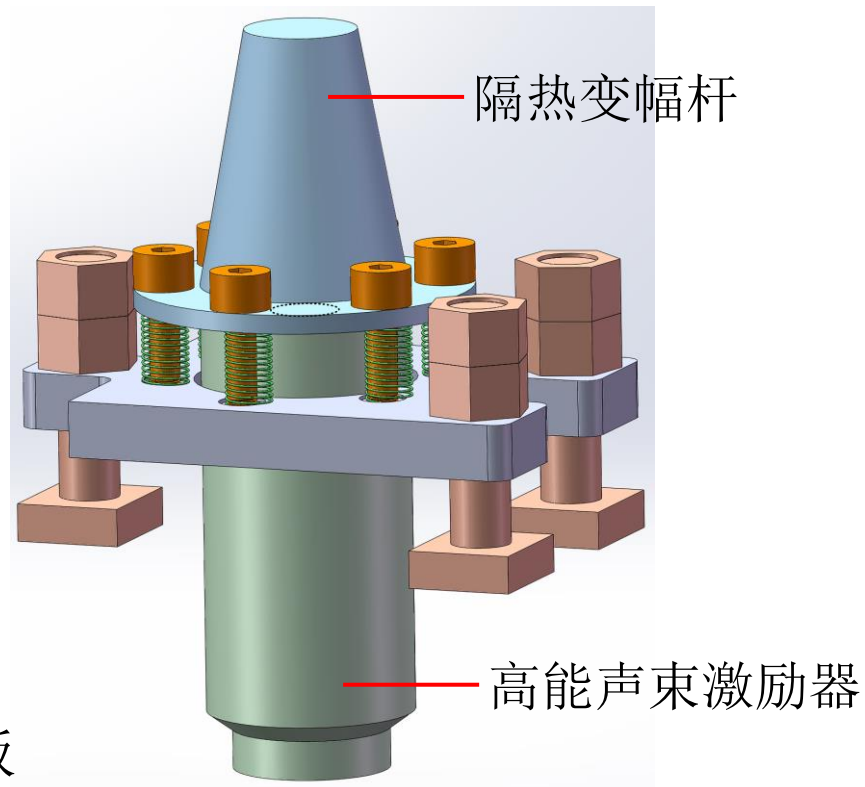
# (四) 试验验证与应用



高能声束低应力增材平台示意图



高能声束低应力增材平台示意图-正面



高能声束调控单元

增材基板

转台基板

T型滑槽

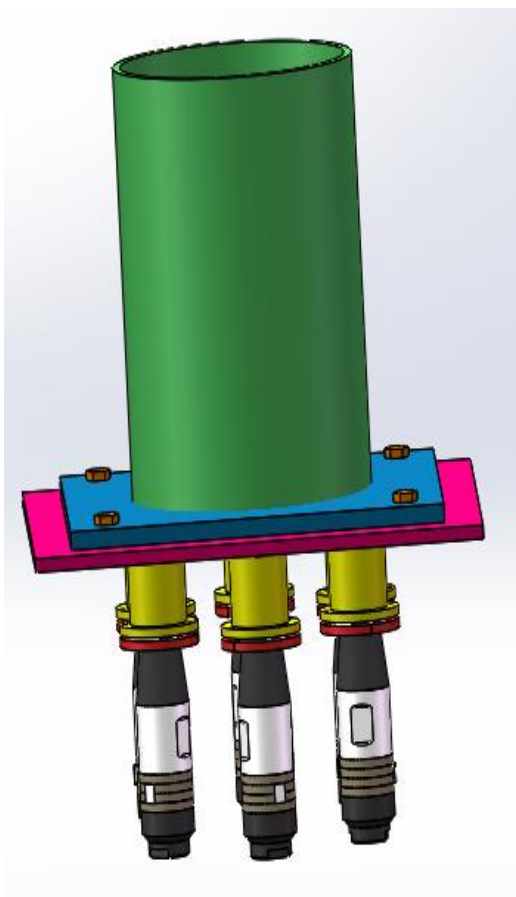
隔热变幅杆

高能声束激励器

## (四) 试验验证与应用



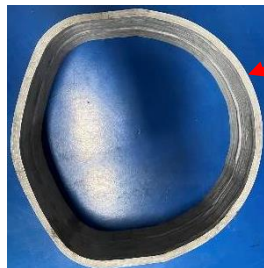
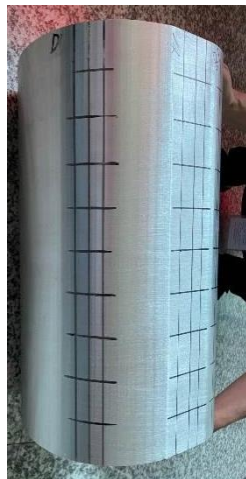
### 铝合金壳体低应力增材现场



# (四) 试验验证与应用



复杂壳体低应力增材—残余应力均匀、无变形、抗拉强度提高50%



# (四) 试验验证与应用



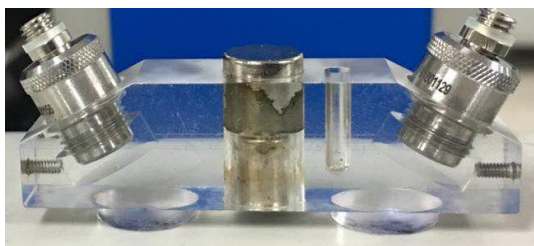
## 异性铝合金壳体低应力增材现场



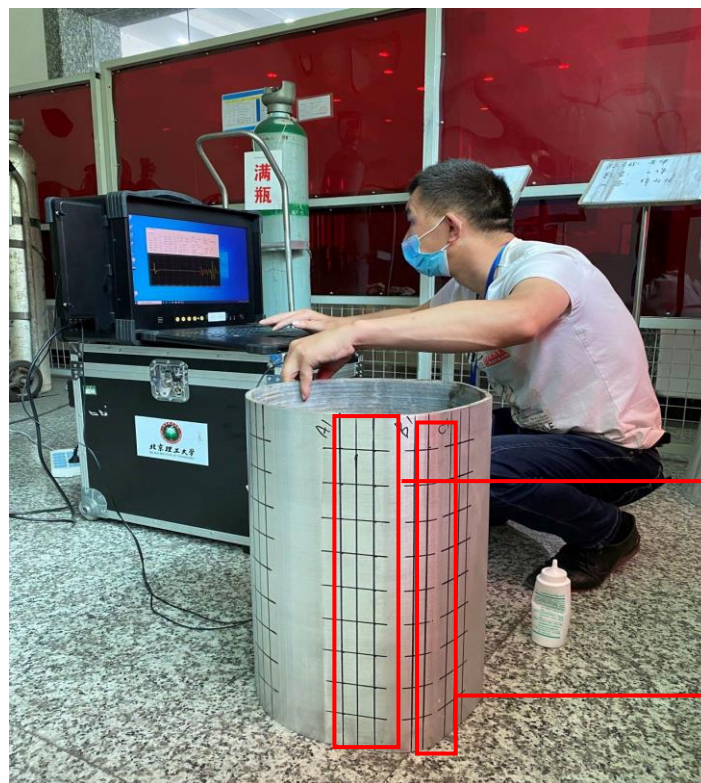
# (四) 试验验证与应用



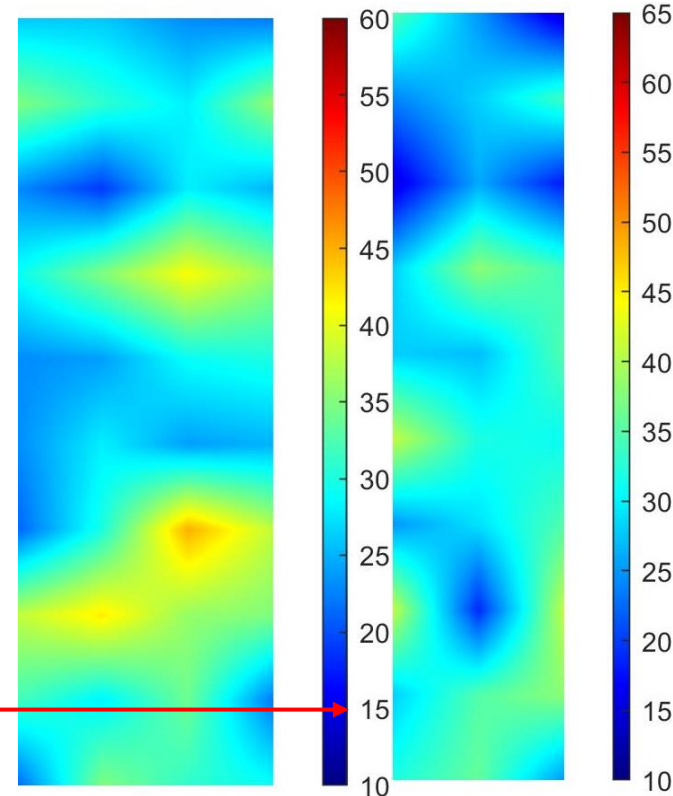
残余应力超声无损检测仪



超声检测探头



残余应力检测



应力云图

增材构件内部残余应力检测标准:

国家标准《无损检测 残余应力的超声临界折射纵波方法》(GB/T 32073-2015)

**低应力增材构件残余应力水平较低分布均匀, 变形量和力学性能均满足指标要求。**



# (四) 试验验证与应用——114A铝合金低应力电弧增材性能比对



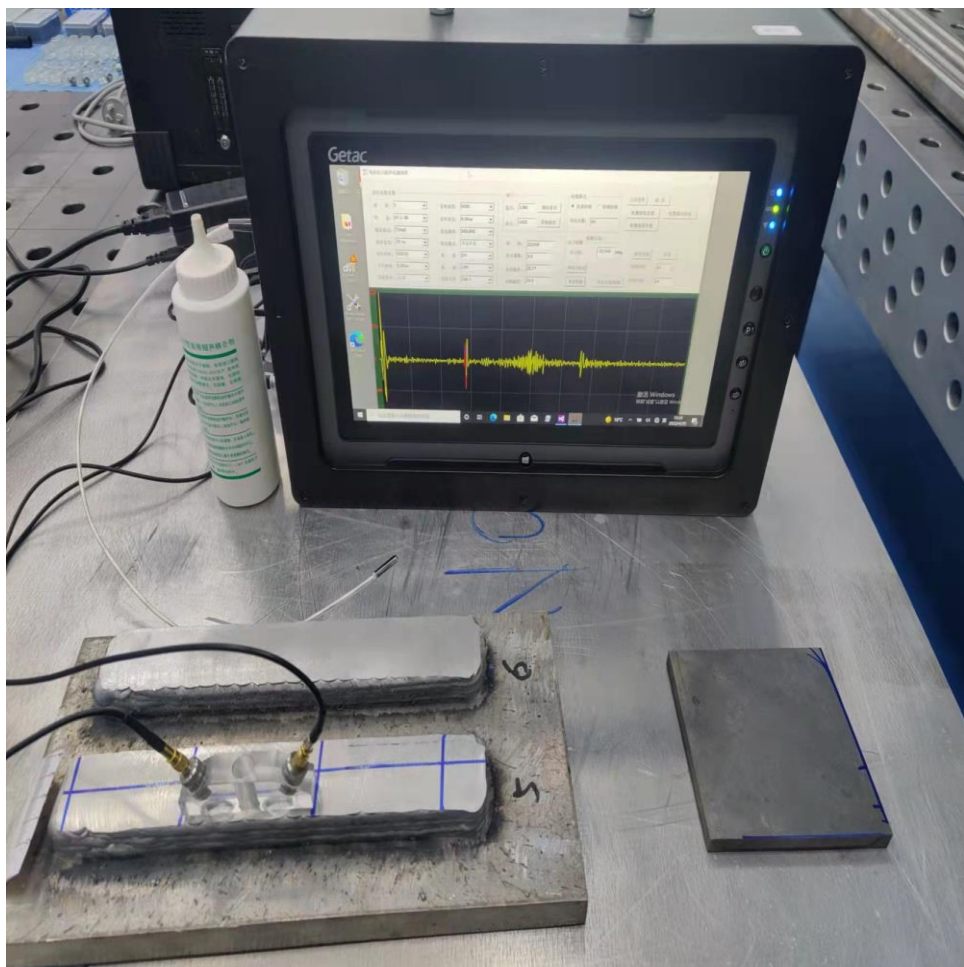
低应力增材系统



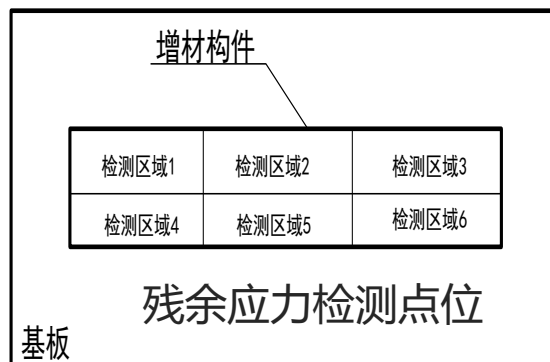
低应力增材试样



# (四) 试验验证与应用——114A铝合金增材试样残余应力超声检测



114A铝合金增材试样残余应力超声检测现场



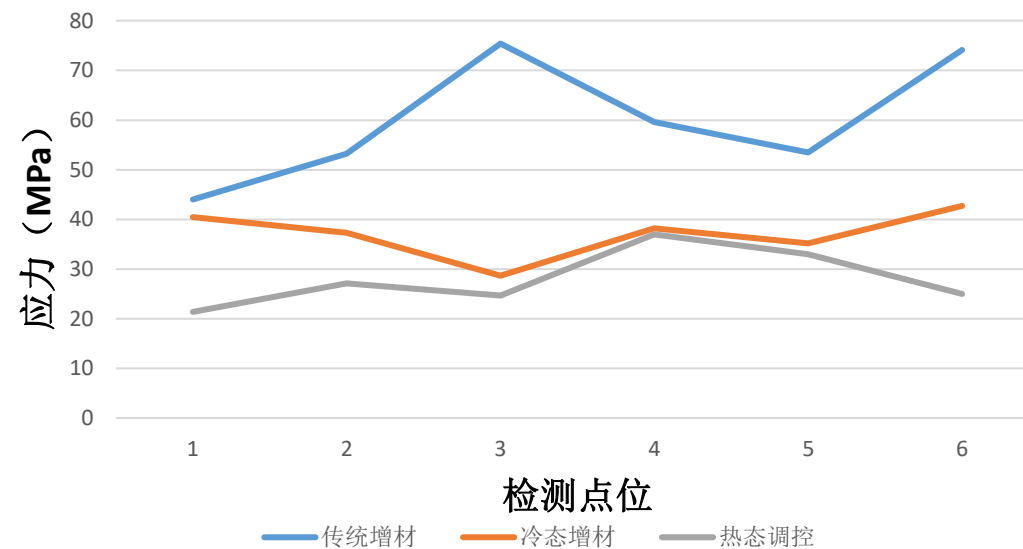
## 无固溶和时效情况

**低应力增材残余应力检测:**

**冷态调控应力同比消减率: 24.8%**

**热态调控应力同比消减率: 35.7%**

增材制造试样残余应力分布



# (四) 试验验证与应用——114A铝合金力学性能验证实验



## 力学性能对比

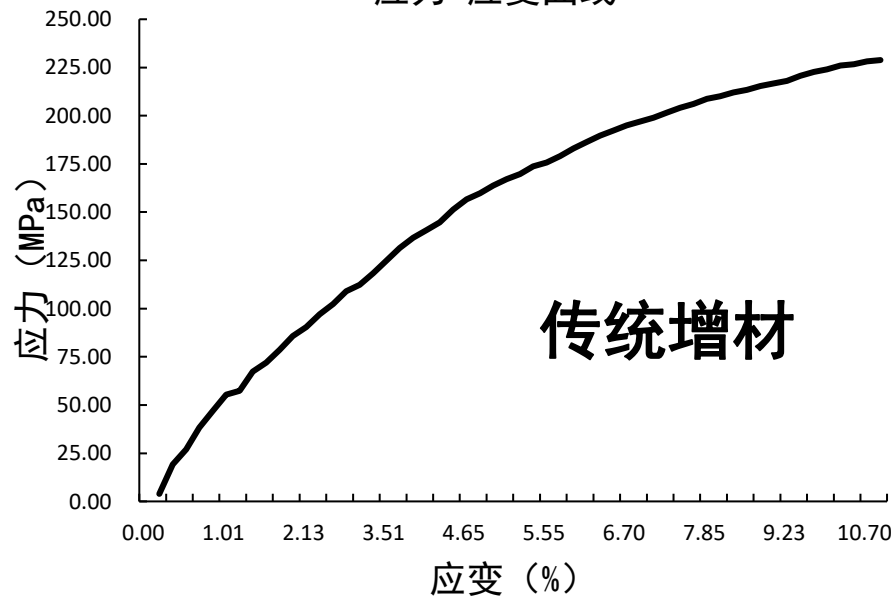
### 传统增材

屈服强度 ( $R_p$ ) : 142MPa  
抗拉强度 ( $R_m$ ) : 222MPa  
伸长率A: 5.5%

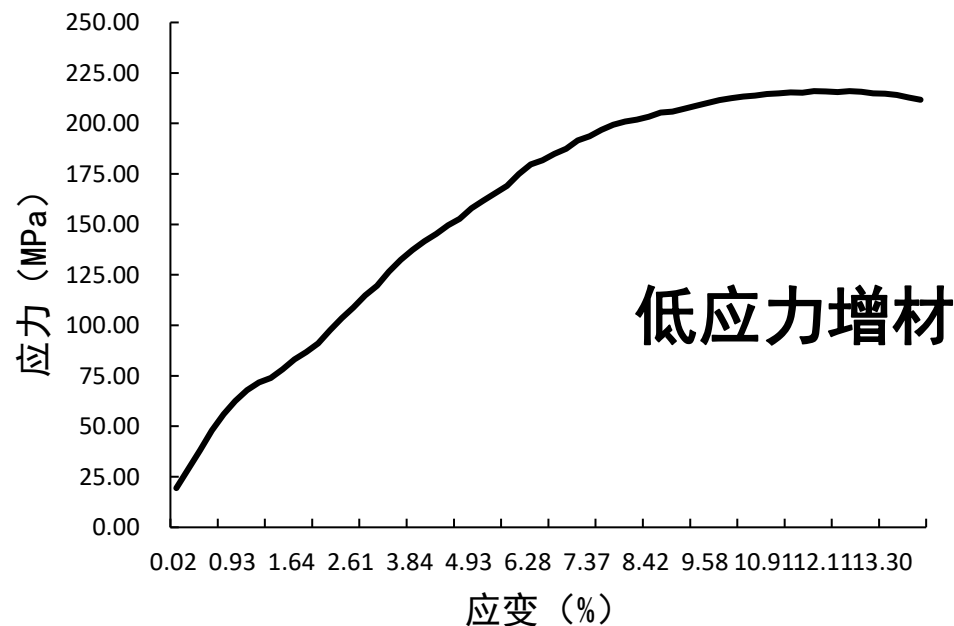
### 低应力增材

屈服强度 ( $R_p$ ) : 155MPa (提升9.1%)  
抗拉强度 ( $R_m$ ) : 238MPa (提升7.2%)  
伸长率A: 9.0% (提升63.0%)

应力-应变曲线



应力-应变曲线





各位嘉宾、各位领导、各位同行

## 装备性能：

**适用材料：** 铝合金、不锈钢、铜合金、低碳钢等

**优势特点：** 快速工艺开发、空间利用率高、成形质量好

**成型范围：** 400\*400\*500mm

**超声功率电源：** 20K、15K

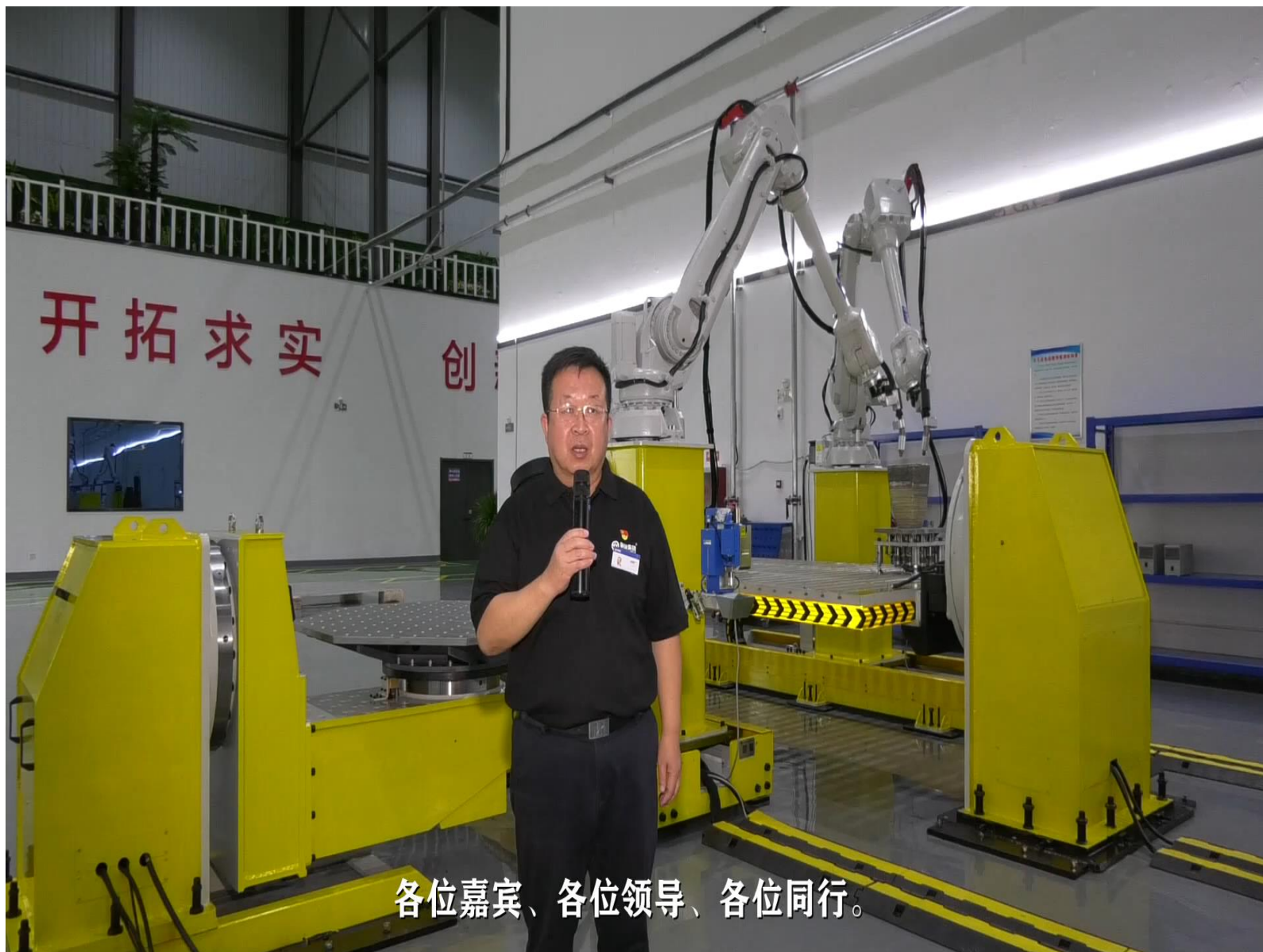
**钛合金变幅杆：** 20K、15K

**设备尺寸：**

**1400\*1500\*2020mm**

**执行机构：** 六轴机器人

**配置软件：** LUNGOPNT



## 装备性能：

**适用材料：** 铝合金、不锈钢、铜合金、低碳钢等

**优势特点：** 大尺寸复杂构件快速工艺开发、短周期制造、成形质量好

**成型范围：**

**4000\*2000\*1000mm**

**超声功率电源：20K、15K**

**钛合金变幅杆：20K、15K**

**执行机构：六轴双机械手**

**配置软件：LUNGOPNT**

# THANKS

---

谢谢!

---