

重型高端复杂锻件制造技术变革性创新

王宝忠

中国一重集团有限公司

2022年8月23日 甘肃 武威

提 纲

1. 项目背景

2. 原创性技术路线

3. 变革性实践

4. 标志性成果

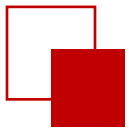
5. 原创技术CYD 建设

contents



1. 项目背景





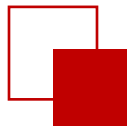
1. 项目背景



责无旁贷



中国一重是中国制造的第一重地



1. 项目背景



组建团队

2019年1月成立“重型高端复杂锻件制造技术变革性创新能力建设”项目工作领导小组

中国第一重型机械股份 公司文件

一重规划发〔2019〕1号

中国第一重型机械股份公司关于成立 “重型高端复杂锻件制造技术变革性 创新能力建设”项目工作 领导小组的通知

有关单位:

根据公司发展战略,经总经理办公会讨论,同意开展“重型
高端复杂锻件制造技术变革性创新能力建设”项目前期工作。为
保证稳步、高效开展后续工作,公司决定成立项目工作领导小组,

现将有关事项通知如下:

一、领导小组组成人员

组 长:隋炳利

副组长:王宝忠

成 员:刘昕宇 袁国明 赵席春

二、工作机构

领导小组下设办公室,负责领导小组日常管理工作。

办公室主任:刘昕宇(兼)

成 员:王领军 王 嘉 程 鑫

三、领导小组主要职责

全面领导项目建设工作,总体把握项目建设目标和方向,统
筹规划项目建设进度,合理调配相关资源,协调解决项目建设过
程中存在的重大问题,确保高质量、高效率完成各项工作。

中国第一重型机械股份公司

2019年1月7日

抄送:集团公司董事长,总经理,正副书记,党委常委,纪委书记,
工会主席。

股份公司董事长,总经理及其他高级管理人员,监事会主席;
总经理助理,副总工程师,总法律顾问,总经济师;存档。

中国第一重型机械股份公司办公厅

2019年1月7日印发

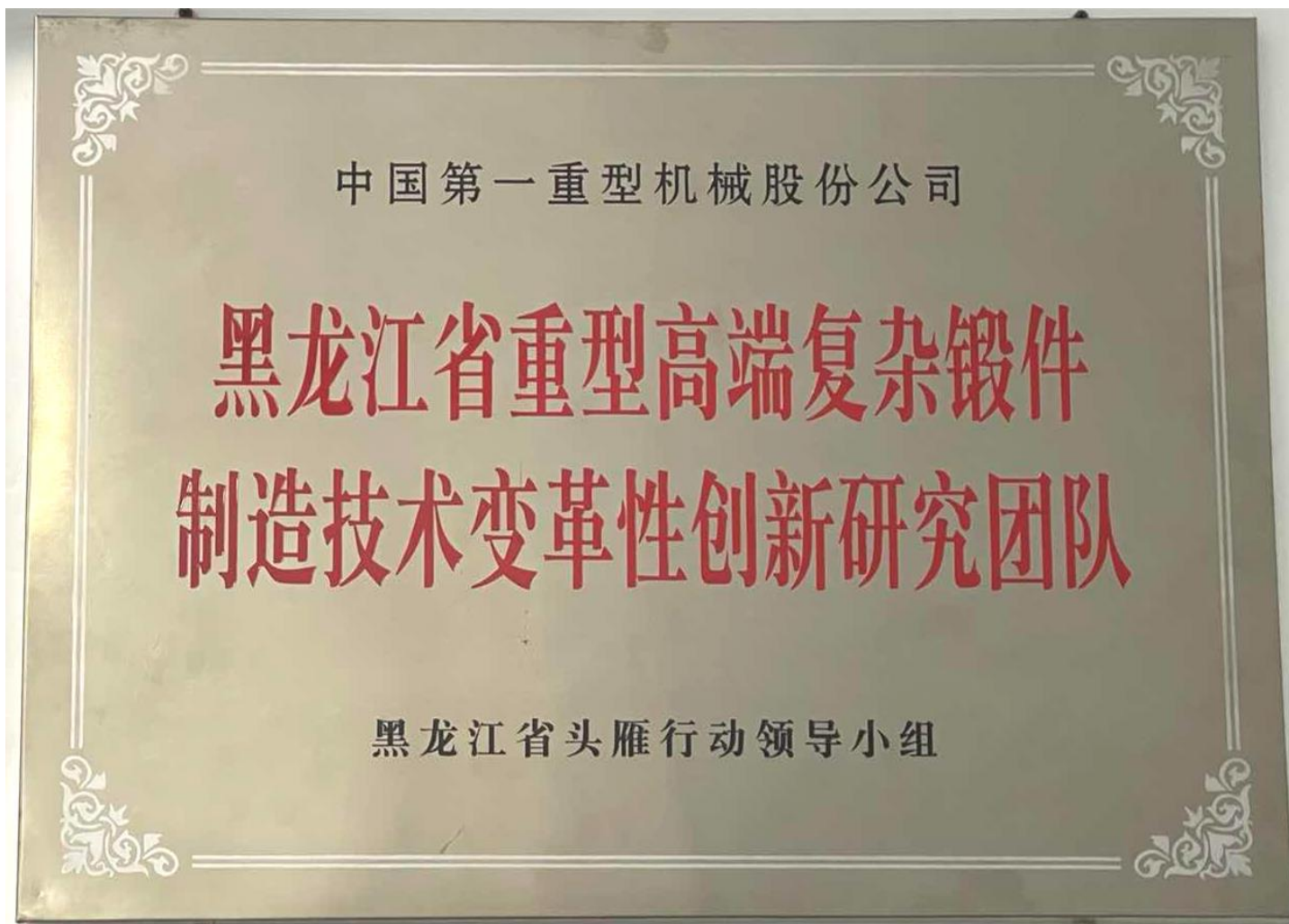


1. 项目背景



组建团队

2019年分别入选黑龙江省和中央企业相关团队



中央企业优秀科技创新团队

国务院国有资产监督管理委员会

关于印发“中央企业优秀科技创新团队支持计划”
入选结果的通知

中国一重集团有限公司：

你公司“重型高端复杂锻件制造技术变革性创新研究团队”入选“中央企业优秀科技创新团队支持计划”名单。请按照《关于中央企业优秀科技创新团队支持计划实施方案》要求，落实好各项支持政策和措施。其中：针对入选的创新团队，国资委将采取工资总额单列方式给予每个团队500万元的奖励额度，对团队负责人及核心成员的工资总额，纳入特殊事项清单管理范畴。





1. 项目背景



国家重点支持

制造业核心竞争力提升之超重型热模锻压力机自主创新工程

国家发展和改革委员会文件

发改产业〔2021〕389号

国家发展改革委关于印发《制造业核心竞争力提升五年行动计划（2021-2025年）》及重点领域关键技术产业化实施要点的通知

（十）超重型热模锻压力机自主创新工程。由用户牵头，联合重大技术装备骨干企业、有关大学及科研院所，研制超重型的热模锻压力机成套装备。主要包括挤压和模锻相结合的公称压力1500MN左右的大开挡、大工作台超重型的热模锻压力机组，大容量加热炉、制坯机等，解决我国核电机组、石化容器、大飞机、火箭运载、潜水器等核心整体结构件零部件一体化整体成形制造难题。

1. 创新模式：用户牵头，联合研制
2. 功能：挤压和模锻
3. 成套设备：热模锻压力机组，大容量加热炉、制坯机等
4. 压机公称：1500MN左右的大开挡、大工作台超重型
5. 目标：解决我国整体结构件**零部件一体化整体成形**制造难题
6. 服务领域：核电机组、石化容器、大飞机、火箭运载、潜水器等



2. 原创性技术路线





2. 原创性技术路线

制定路线

制定了解决偏析、夹杂、有害相等共性问题的**增材制坯技术路线**

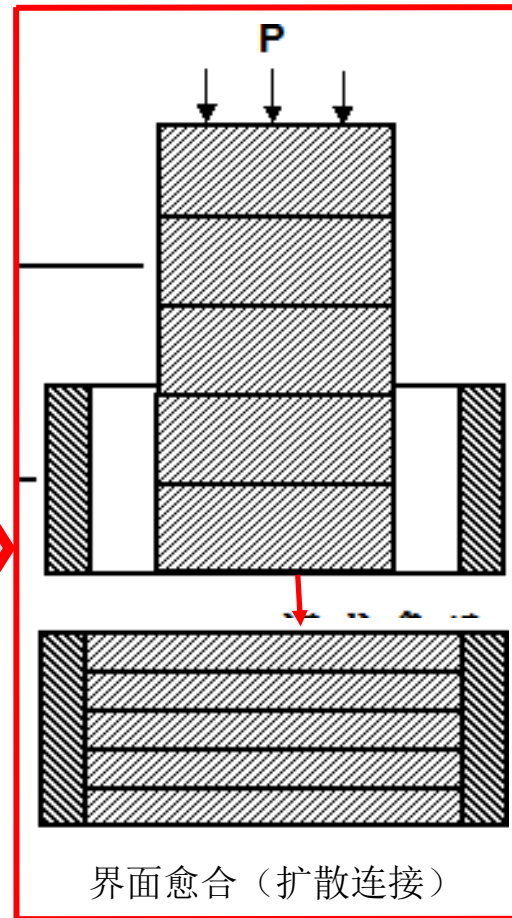
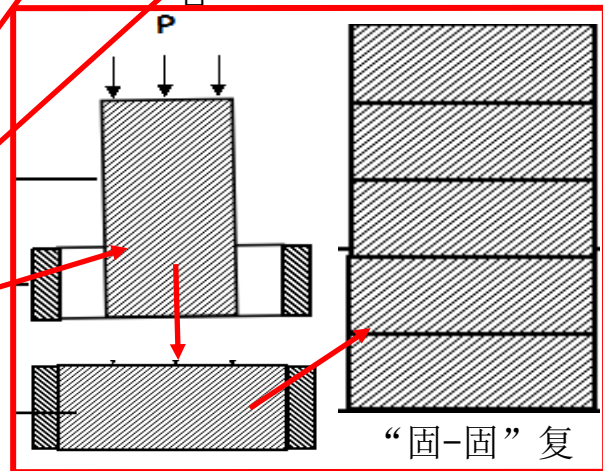
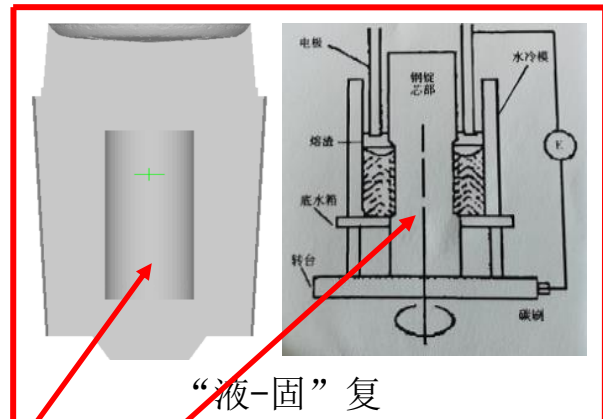
洁净钢冶炼	均质无害化 基材制备	单层或多层 “液-固”复	多层一次性 “固-固”复	界面“愈合”	组织均匀化
<p>研发途径： 高炉→ 电炉→ 精炼炉/ 真空感应炉</p> <p>研制目标： 低P、S、T.O； 少B类夹杂物</p>	<p>研发途径： SC/ESR</p> <p>研制目标： C偏析 ±0.02% 无有害的 第二相</p>	<p>研发途径： ESR/ 真空注坯</p> <p>研制目标： 大型支承辊复 合坯料、 合金钢坯料 450t；高温合 金坯料 φ>600mm</p>	<p>研发途径： 电子束/感应 加热封焊 一次叠压成形</p> <p>研制目标： 合金钢坯料 450t；不锈钢 坯料250t</p>	<p>研发途径： 大变形量、均 匀变形</p> <p>研制目标： 原子键充分结 合、氧化膜破 碎、位错密度 充分积累</p>	<p>研发途径： “揉”、重/再 结晶</p> <p>研制目标： 氧化膜分解产 物均匀分布； 晶粒均匀、细 小</p>

系统解决问题

2. 原创性技术路线

制定路线

增材制坯图解



2. 原创性技术路线

制定路线

制定了解决锻件余量大、混晶、裂纹等共性问题的“FGS”锻造路线

轴类件闭式墩粗+挤压成形	“头上长角”的封头类锻件模锻成形	“身上长刺”的筒/管类锻件模锻成形	“空心”及其他异形锻件的模锻成形	“轻量化”、易拆装的组合模具研制	组织演变及“可视化”模拟与验证
<p>研发途径： 数值模拟、比例试验、产业化</p> <p>研制目标： 复合材料工作辊、支承辊；风机轴、水机轴、船用轴等锻件全压应力成形</p>	<p>研发途径： 数值模拟、比例试验、产业化</p> <p>研制目标： 带超长向心/非向心管嘴的各类容器的上、下封头锻件</p>	<p>研发途径： 数值模拟、比例试验、产业化</p> <p>研制目标： 核反应堆压力容器一体化接管段、主管道热段A</p>	<p>研发途径： 数值模拟、比例试验、产业化</p> <p>研制目标： 不锈钢主管道、泵壳锻件；曲拐锻件</p>	<p>研发途径： 数值模拟、中间试验、产业化</p> <p>研制目标： 组合模具、通用外模、易于拆装、批量生产</p>	<p>研发途径： 数值模拟、解剖验证、软件开发</p> <p>研制目标： 开发出可用于指导工艺编制的软件，为智能化制造奠定基础</p>

FGS锻造：将坯料在多向压应力下近净成形，以便获得均匀、细小晶粒的锻件。



3. 变革性实践





3. 变革性实践

3.1 “液-固”复合——轧辊材料铸造复合试验

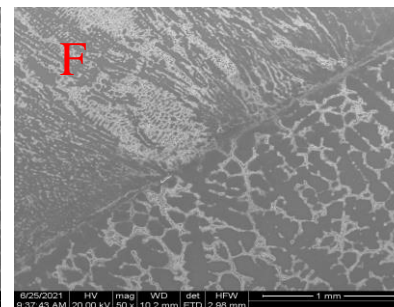
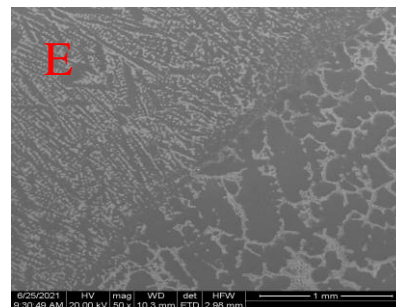
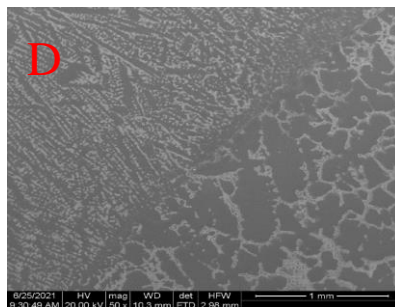


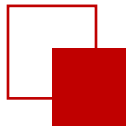
“液-固”复合界面经锻造修复结合良好，满足支承辊UT检测要求。



3. 变革性实践

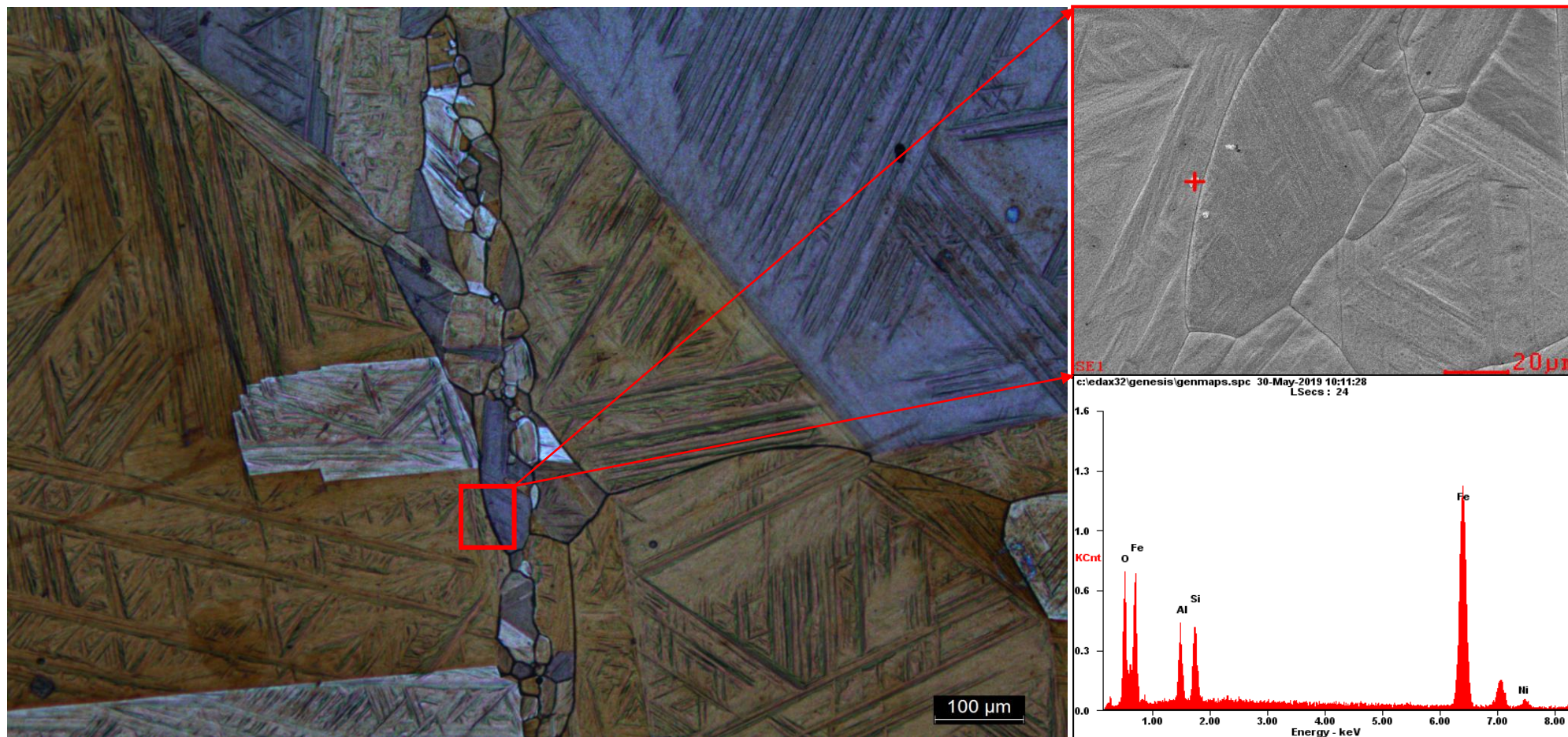
3.1 “液-固”复合——IN718合金铸造复合试验





3. 变革性实践

3.2 “固-固”复合——高温金相分析

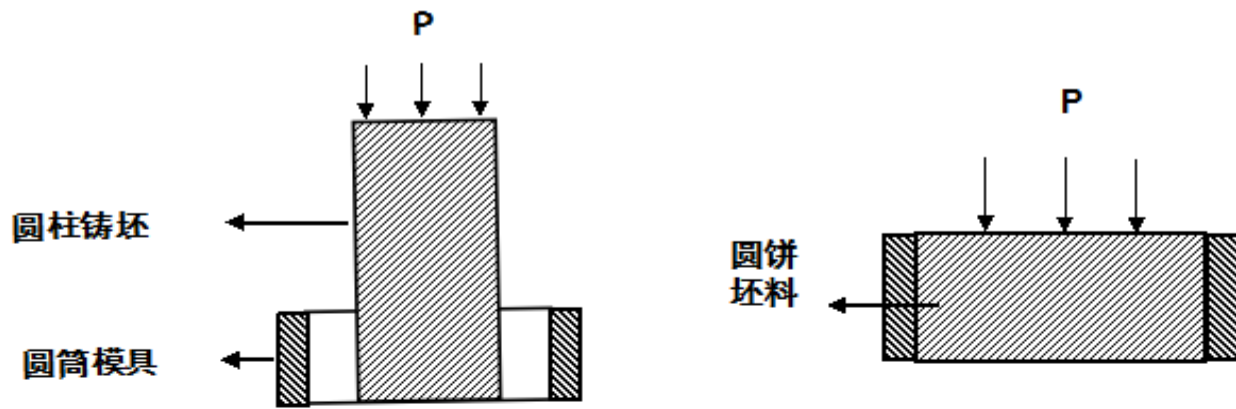


经高温金相后观察界面，界面清晰，基本无界面氧化物，界面形成约 $50\mu\text{m}$ 宽细晶区；
经高温处理后，氧化物弥散，颗粒尺寸显著减小，界面附近存在少量的Al氧化夹杂。

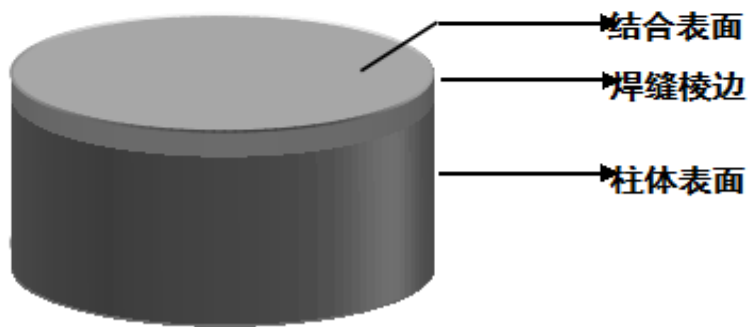


3. 变革性实践

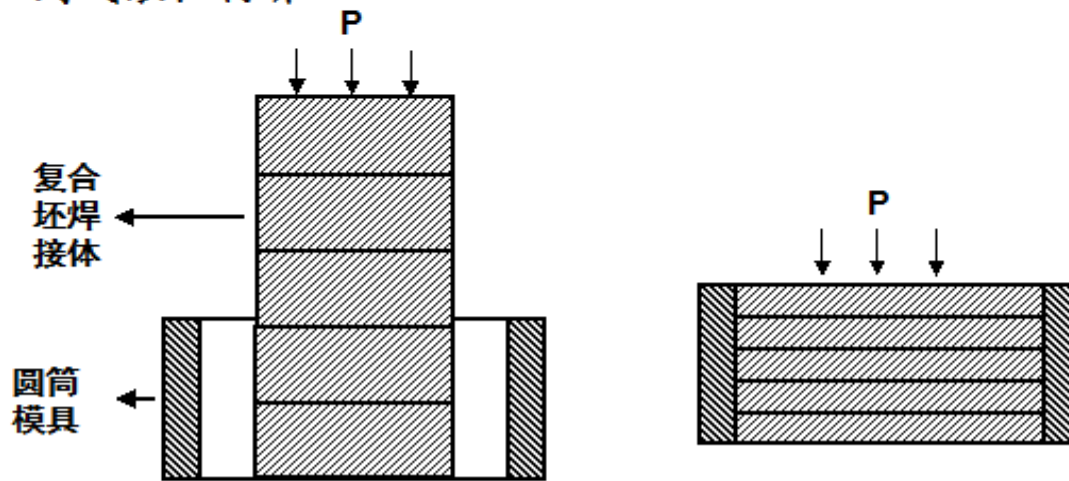
3.2 “固-固”复合——减少难变形区及结合面的措施



闭式墩粗制饼



圆饼体表面加工示意图

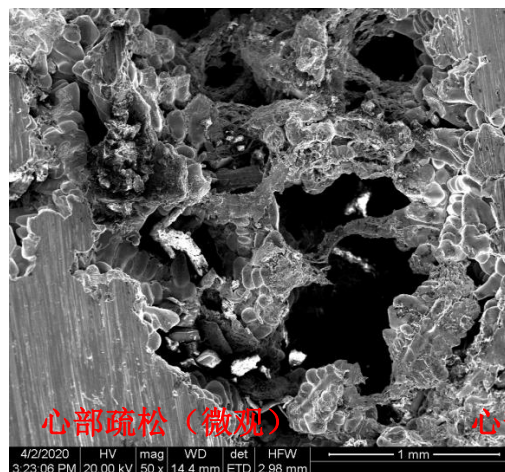
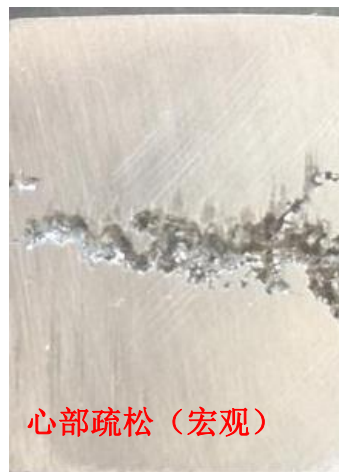
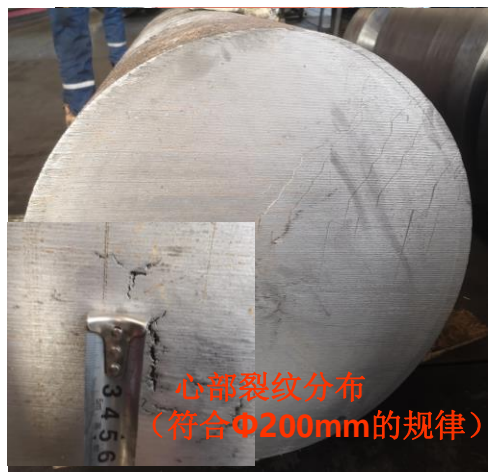


闭式多层一次性叠压复合制坯

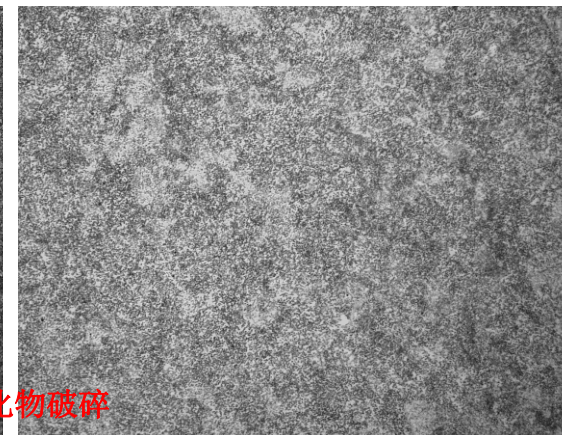
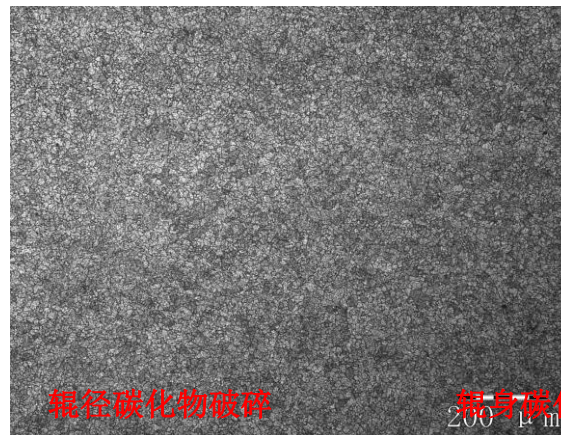
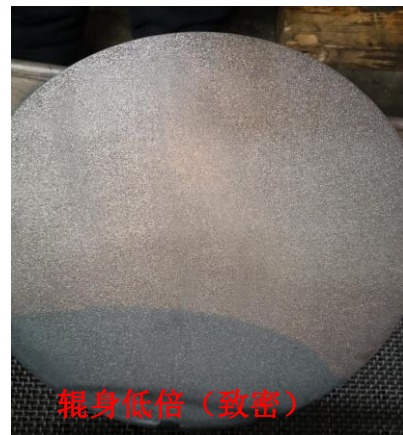
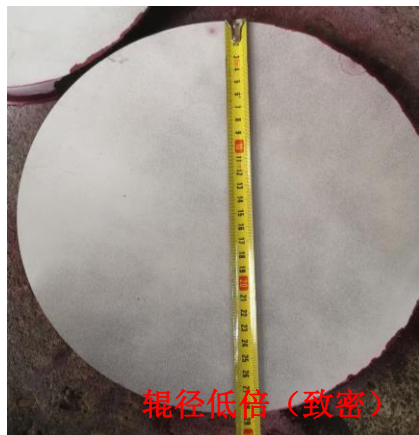


3. 变革性实践

3.3 FGS锻造——小轧辊模锻成形



挤压前 (裂纹、疏松、网状碳化物)



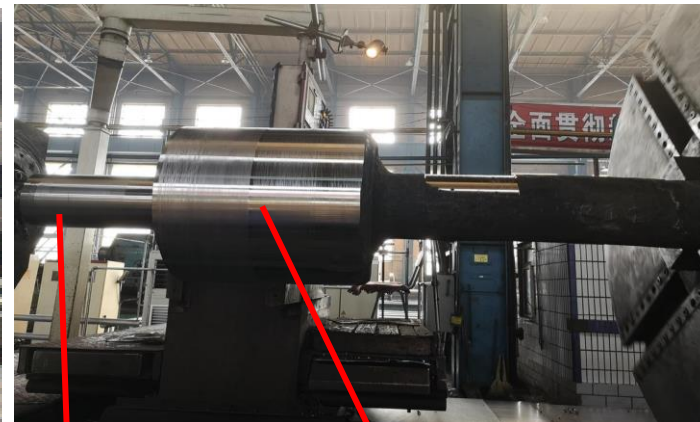
挤压后全断面晶粒均匀细小，碳化物弥散分布。



3. 变革性实践



3.3 FGS锻造——小轧辊模锻成形



超声波探伤检验报告
REPORT OF ULTRASONIC TEST

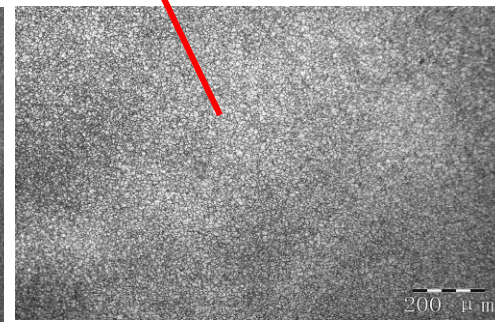
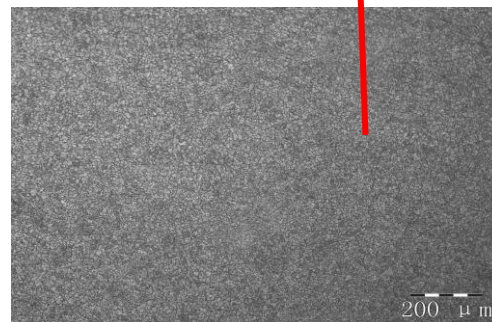
质保-11-061

合同号: Contract No.	/	试验编号: Test No.	02T21M0209
委托单位: Commission Dept	2K	工单号: Order No.	KY20KJ00902
零件名称: Part Name	MCS 挤压模锻试验件 3	一重图号: CFHI drawing No.	KY20KJ00902000003
含有图号: Original Drawing No.	/	材料牌号: Material	MCS
炉号: Heat No.	/	卡号/顺序号: Forging No./Serial No.	/
检验阶段: Test Stage	机加后(磨削)		

检验条件				
Test Condition		探头规格		
设备型号: Equipment Model:	HS-511	型号	晶片尺寸	频率
表面状态: Surface Condition	Ra ≤ 0.8	Type	Crystal Size	Frequency
耦合剂: Couplant	机油 machine oil	WB90-2E	20×22	2MHz
灵敏度: Sensitivity	本体直角棱边 80% (+12dB)	检验方法: Test means	DAC	
曲率补偿: Curvature compensation	/	验收标准: Acceptance standard	JB/T10814-2007	
检测方法: Testing Record	未发现记录缺陷显示。			

结果: ● 合格 Acceptable
Result: ○ 不合格 Reject

检验日期: 2021.09.16 检验: UT 级 批准: 批准:
Test Date Tester UT Level Approved by



挤压后碳化物弥散分布
各部位晶粒度均为8级

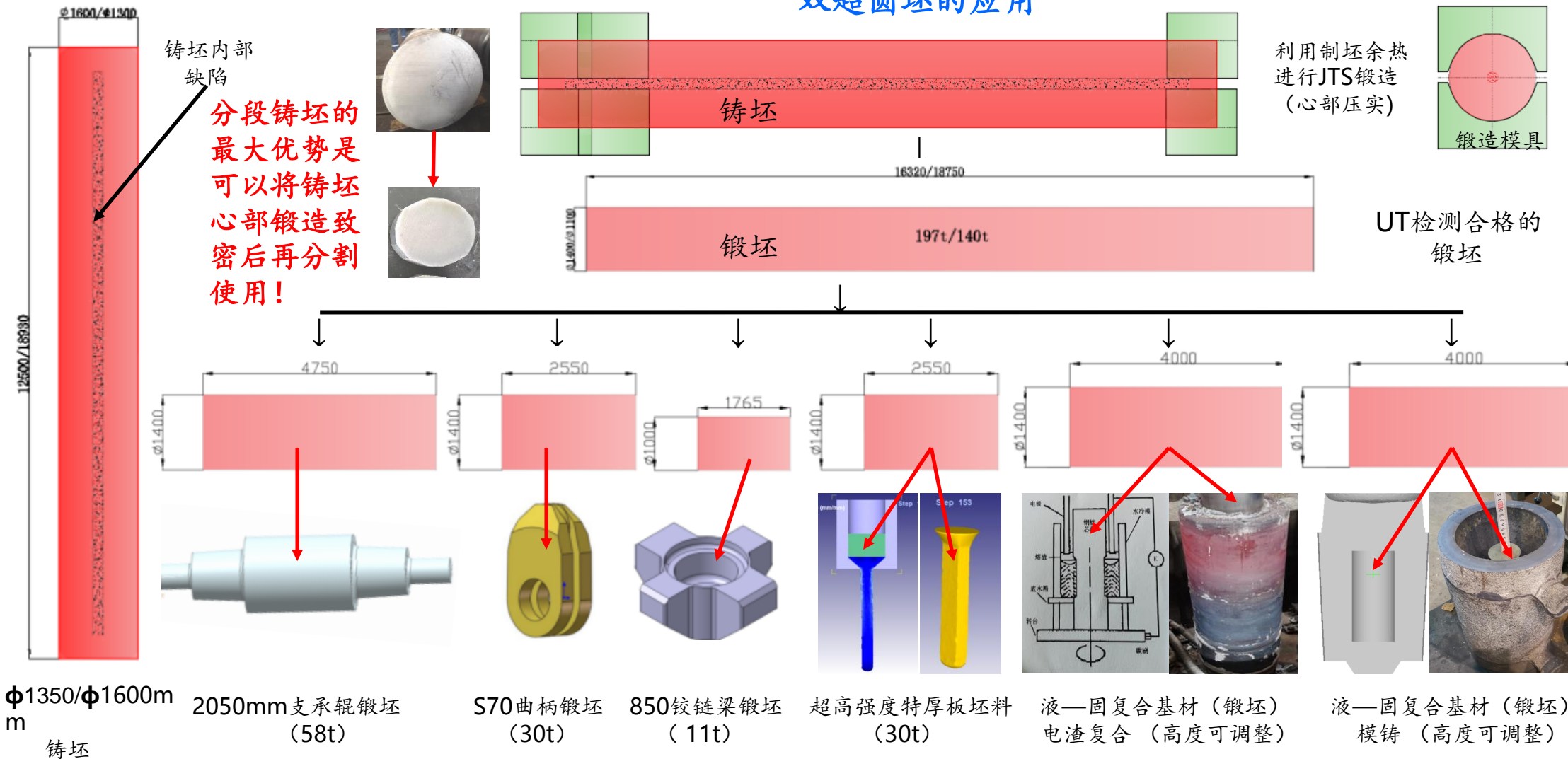
φ600mm连铸坯挤压后表面波检测合格



3. 变革性实践

3.4 $\phi 1350/\phi 1600$ mm立式半连铸机

双超圆坯的应用





4. 标志性成果





4. 标志性成果

4.1 FGS锻造——快堆支承环



1次闭式镦粗+挤压晶粒度均匀细小

锻轧及锻焊支承环相关指标要求及检测结果对比

	晶粒度	疲劳性能 (循环次数)	室温屈服/ $R_{p0.2}$	冲击/ KV_2	高温持久
1号堆研制技术条件	2~5级	循环次数不低于24000次	$\geq 205\text{MPa}$ 同方向 $\leq 30\text{MPa}$ 不同方向 $\leq 40\text{MPa}$	$\geq 225\text{ J}$ 均匀性 $\leq 50\text{J}$	$\geq 3000\text{h}$ 不小于134MPa
锻-焊结构锻件评定结果	2~4级	16853~18624次	225~275Mpa 均匀性 $\leq 50\text{MPa}$	366J~407J 波动范围41J	3100、3157、3690小时
1号堆-整体锻-轧支承环检测结果	主容器: 0.74~2.19 保护容器: 0.11~4.32	主容器: 11792~24506次 保护容器: 11889~25933次	主容器支承环 290MPa~346MPa 均匀性 $\leq 56\text{MPa}$	主容器: 347J~419J 波动范围72J	主容器支承环: 2476、2766、2923h
2号堆-整体锻-轧技术条件	1级或更细	待最终结果确定	同向 $\leq 70\text{MPa}$; 异向 $\leq 80\text{MPa}$	$\leq 80\text{J}$	提供数据



4. 标志性成果

4.1 FGS锻造——不锈钢泵壳

中国一重牵头，联合沈鼓、728及宏润优化不锈钢锻造泵壳模锻成形

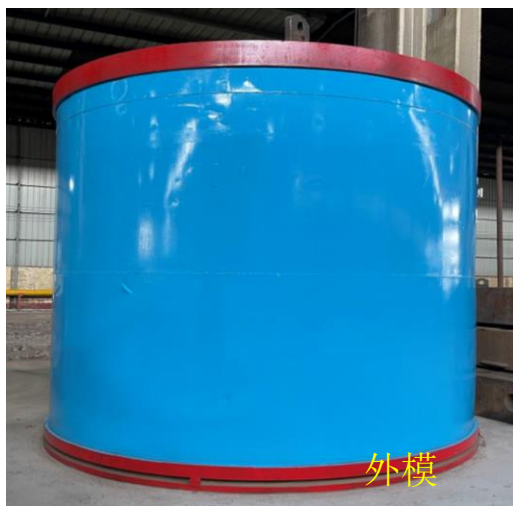




4. 标志性成果

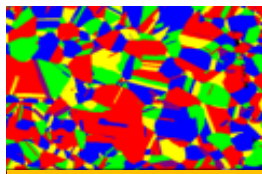
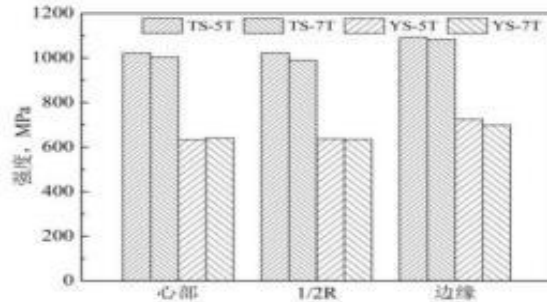
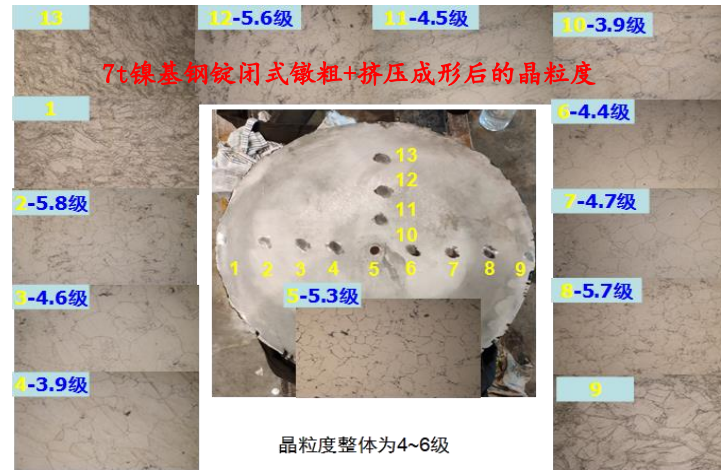
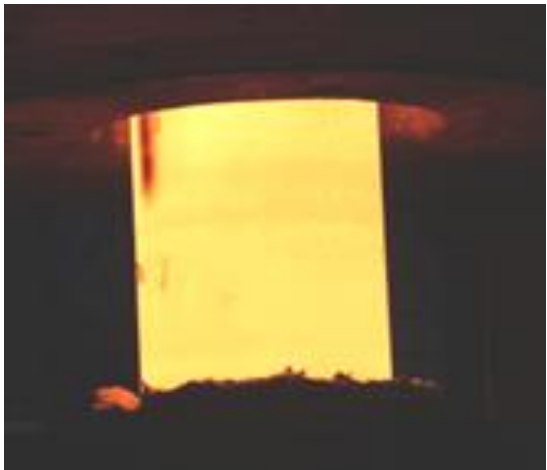
4.1 FGS锻造——主泵接管

中国一重牵头，联合核动力院及宏润研制主泵接管模锻成形

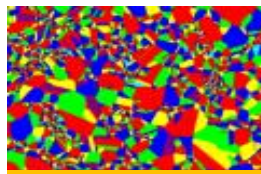


4. 标志性成果

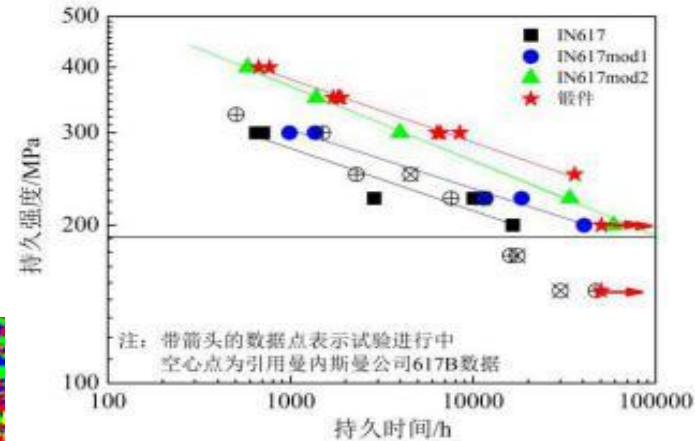
4.1 FGS锻造——7t镍基钢锭闭式镦粗+挤压成形



5t3次镦粗+3次拔长心部纵截面



7t闭式镦粗+挤压-心部纵截面



完全满足转子锻件的性能要求
单个试样最长已超过6万小时

1次闭式镦粗+挤压效果优于3次镦粗+3次拔长的自由锻造

7t镍基合金锻件， $\varnothing 850\text{mm}$ ，
锻态晶粒度2-4级，热处理态约3级



4. 标志性成果

4.1 FGS锻造——细晶棒料挤压成形

GH4169细晶棒料研制（解决“卡脖子”问题）

冶炼方式：VIM+VAR（抚钢）

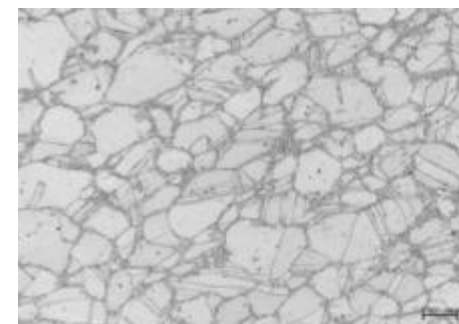
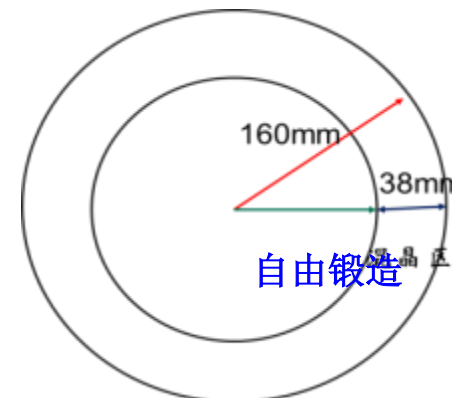
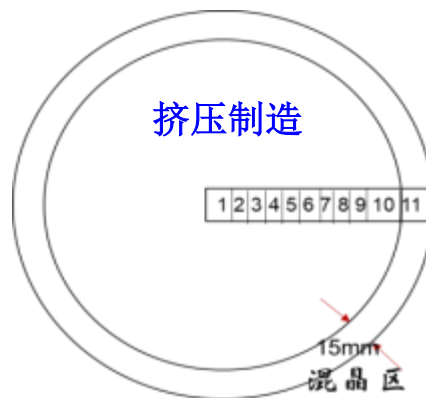
锻造方式：自由锻制坯+挤压（可以进一步优化为取消自由锻制坯）

供货尺寸：Ø305mm×910mm（超出国内供货截面）

晶粒度：5.5（心部）-7.0（表面）

持久性能：650°C/690MPa 条件下 183h（要求值25h）

预计到2025年，全国的高温合金细晶棒料需求量将到5万吨，按目前进口价格计算，产值150亿元。





4. 标志性成果

4.2 直连式封头对比试验（双真空铸锭：“无痕构筑”）



双真空钢锭



无痕构筑



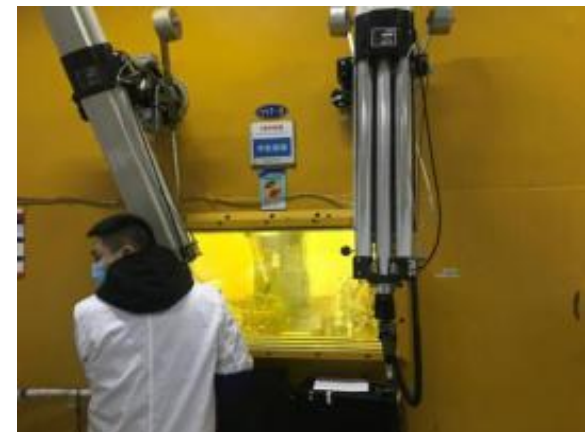


4. 标志性成果

4.3 新材料开发

在国内首次实现核级508-4材质极限工程化制造（ $\phi 4000\text{mm} \times 1000\text{mm}$ ），常规性能和辐照性能均满足要求，在国际上实现了并跑。

合金成分设计



装入高通量辐照堆接受堆芯辐射， $3 \times 10^{19}\text{n/cm}^2$ ，辐照温度为 230°C

4. 标志性成果



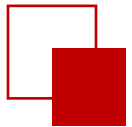
4.4 获奖情况





5. 原创技术CYD建设





5. 原创技术CYD建设



国家战略

2022年2月28日中央全面深化改革委员会第二十四次会议，审议通过了《关于加快建设世界一流企业的指导意见》、《推进普惠金融高质量发展的实施意见》、《关于加强基础学科人才培养的意见》、**《关于推进国有企业打造原创技术策源地的指导意见》**。

推进国有企业打造原创技术策源地，要把准战略方向，围绕事关国家安全、产业核心竞争力、民生改善的重大战略任务，加强原创技术供给，**超前布局前沿技术和颠覆性技术**，在集聚创新要素、深化创新协同、促进成果转化、优化创新生态上下功夫，全方位培养、引进、用好人才。

会议强调，要推动国有企业完善创新体系，增强创新能力，激发创新活力，促进产业链、创新链深度融合，提升国有企业原创技术“需求牵引，源头拱结，资源配置，转化应用”能力打造原创技术的策源地。

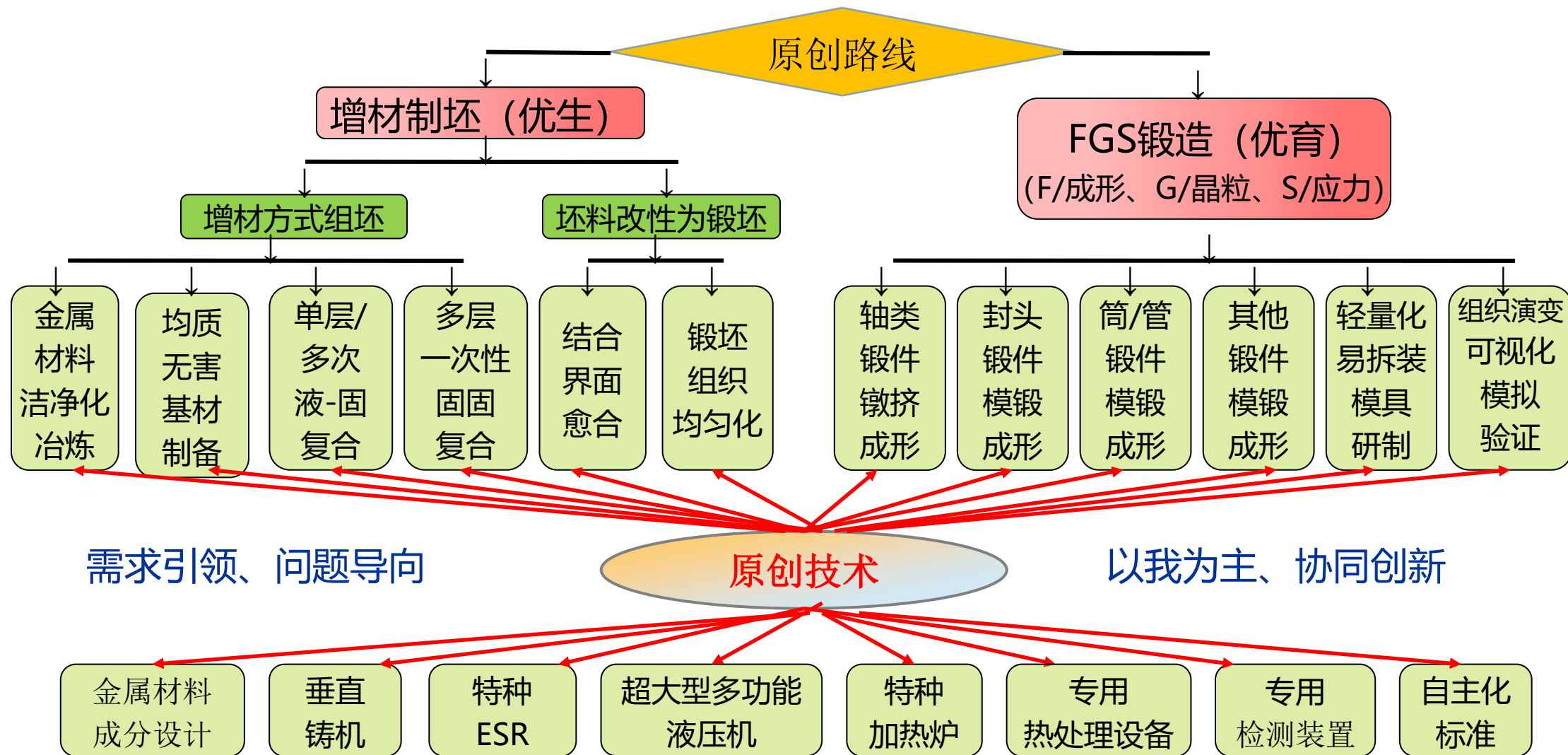
首批**29家**策源地企业率先出成果、出经验。按照国务院国资委的规划，未来这些企业将参与国家实验室建设，重组全国重点实验室等国家级创新基地。

国资委成立科技创新局，着力推动国有企业打造原创技术策源地



5. 原创技术CYD建设

拟定了大型锻件原创技术策源地规划





5. 原创技术CYD建设



实施后效果（提高材料利用率**37.87%**，降低能耗**52.57%**。

传统工艺与新工艺（增材制坯+模锻成形）对比表

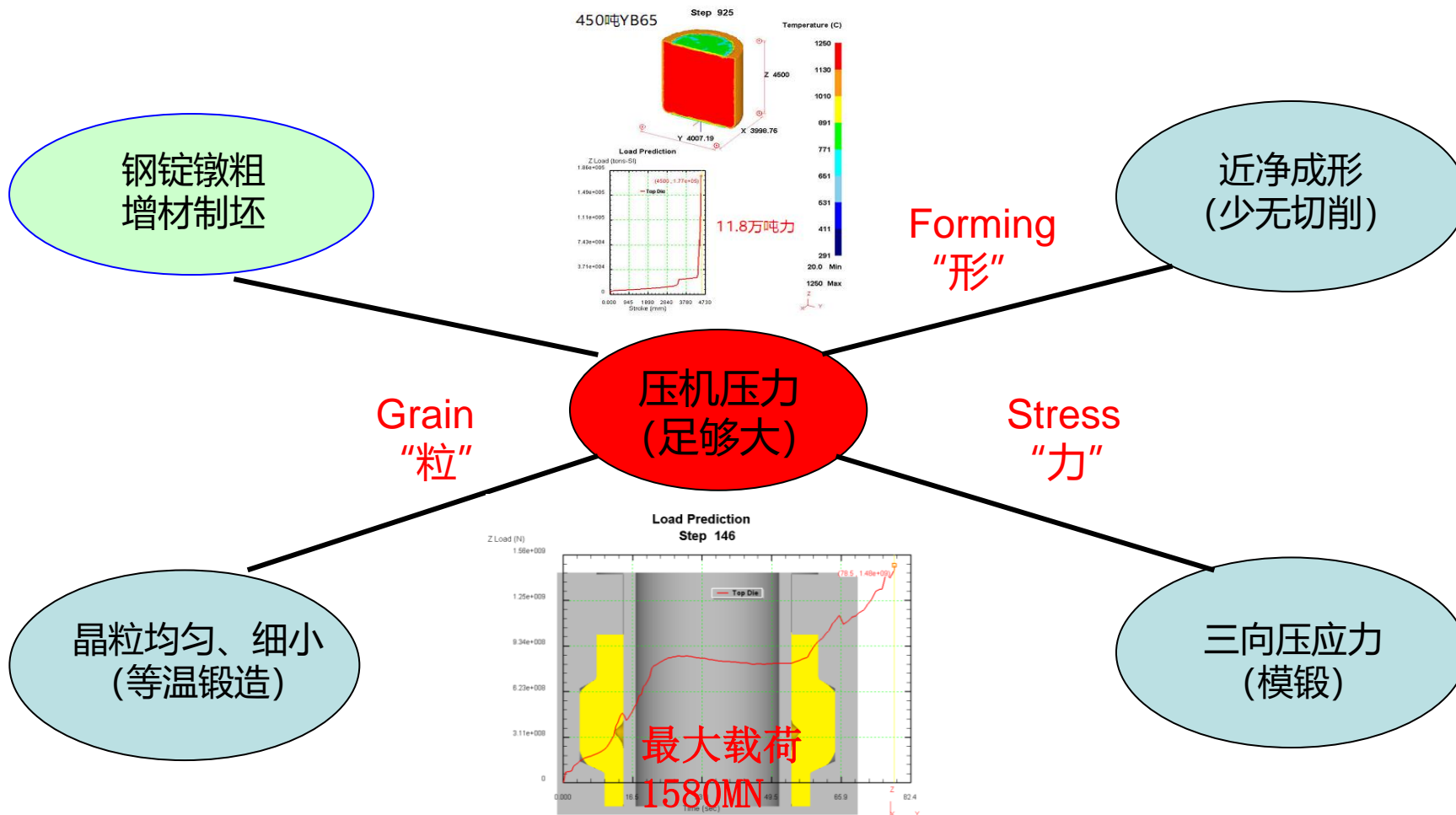
序号	产品名称	毛坯质量（t）				能源消耗（火次）			
		传统工艺	新工艺	减重	减重比例%	传统工艺	新工艺	降耗	降耗比例%
1	一体化顶盖	388	265	123	31.70	9	3	6	66.67
2	一体化底封头	259	165	94	36.29	9	3	6	66.67
3	一体化水室封头*	459	333	126	27.47	12	3	9	75
4	一体化接管段	938	588	350	35.43	25	10	15	60
5	主泵泵壳	123	74	49	39.80	3	2	1	33.33
6	主泵接管	83	44	39	46.99	3	3	1	33.33
7	主管道（热锻）	135	63	72	53.33	23	5	18	78.26
8	稳压器上封头	97	67	30	30.90	4	2	2	50
9	支承辊	114	67.13	46.87	41.11	4	2	2	50
10	管模	145	86	59	40.70	4	3	1	25
11	加氢一体化封头	323	217	106	32.80	10	6	4	40
平均					37.87				52.57

* 与胎模锻（已较自由锻造提高材料利用率30%以上）对比



5. 原创技术CYD建设

集制坯、挤压、模锻为一体的超大型多功能液压机

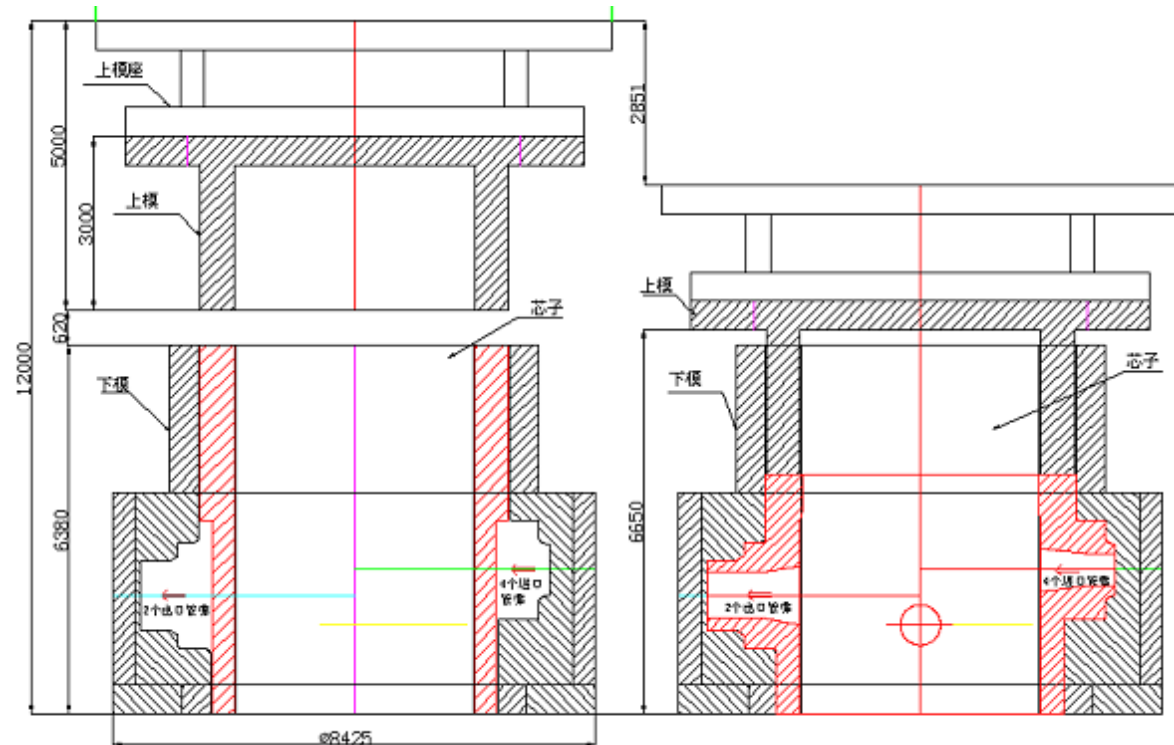


5. 原创技术CYD建设

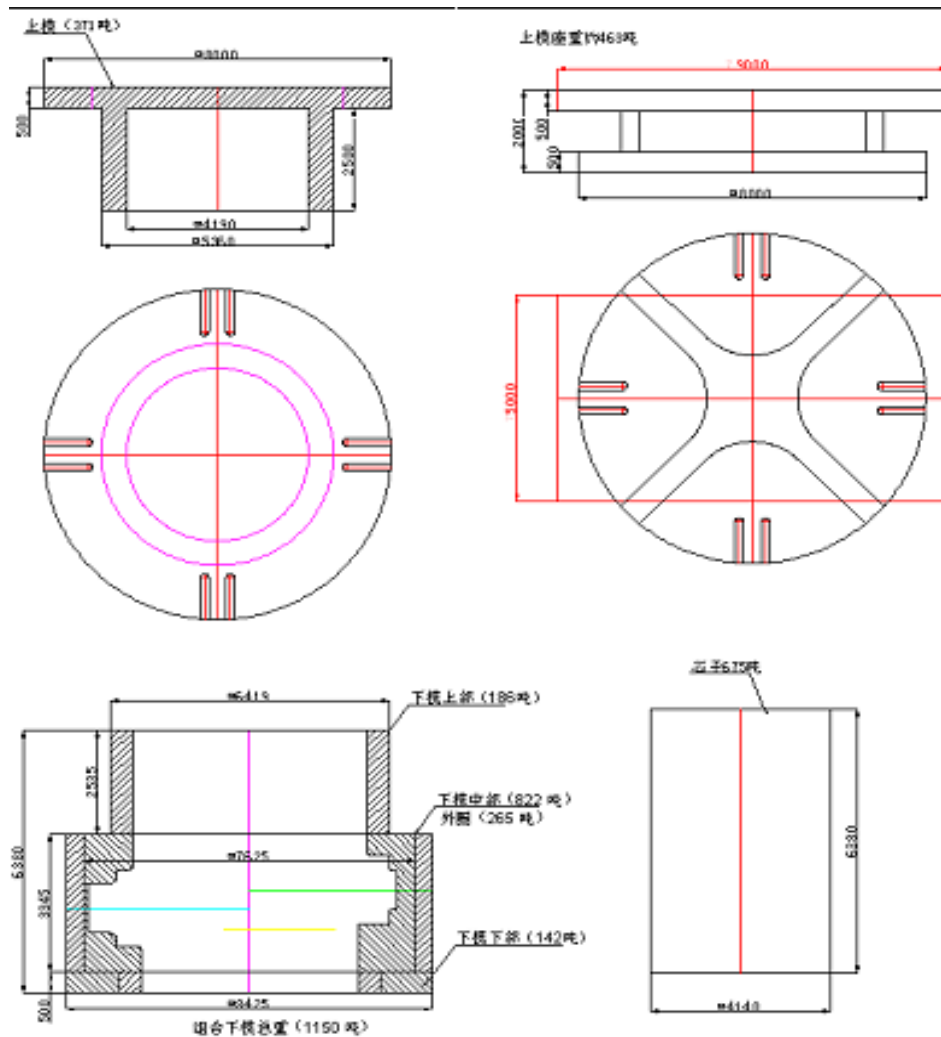
核电锻件FGS锻造

液压机净空尺寸

“国和”1#RPV一体化接管段



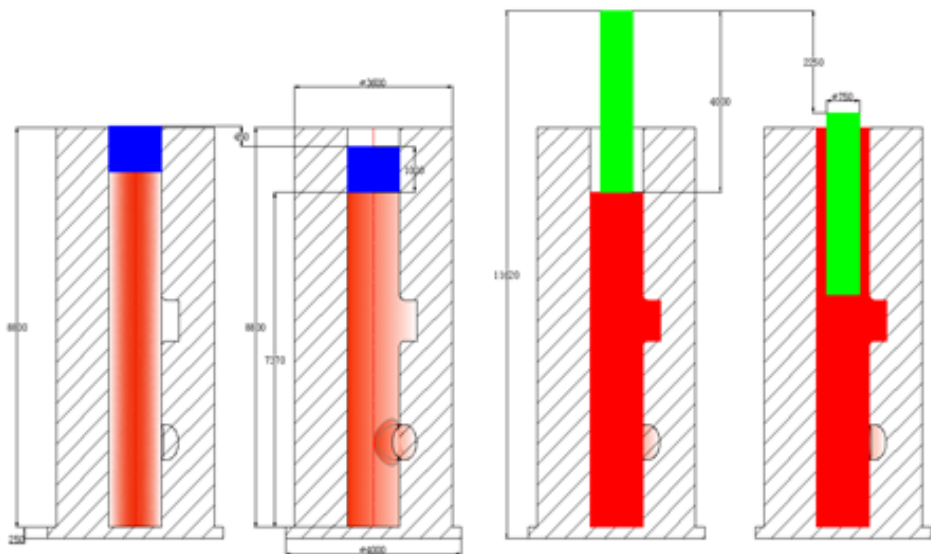
工作台总承载**2180t**（其中：组合下模**1150t**；锻件**355t**；芯子**675t**。）
上部运动部件**834t**。



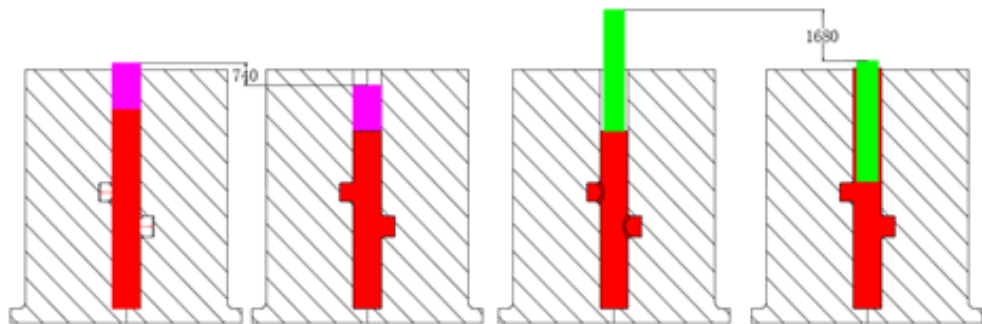


5. 原创技术CYD建设

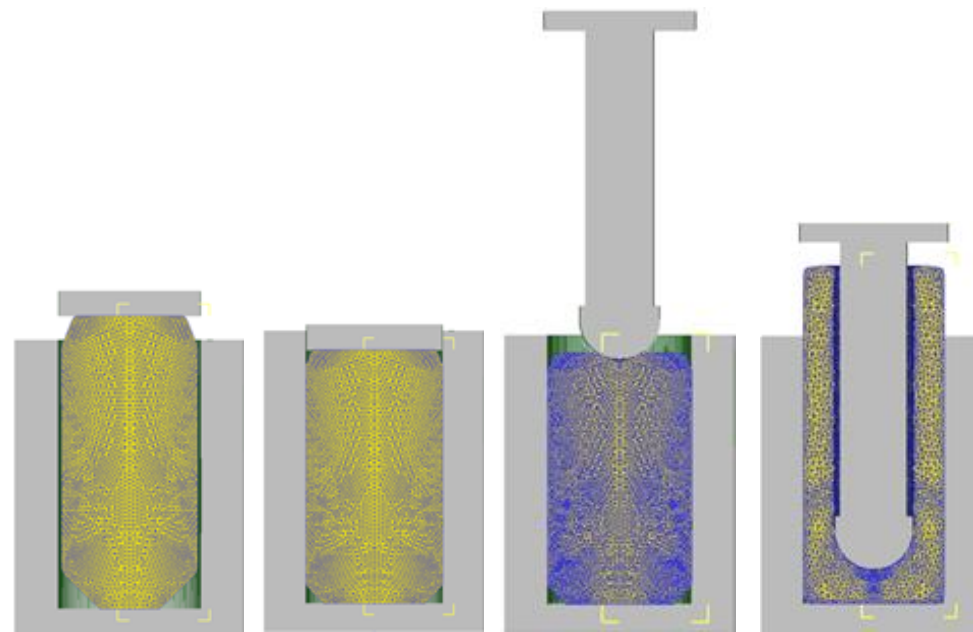
核电锻件FGS锻造



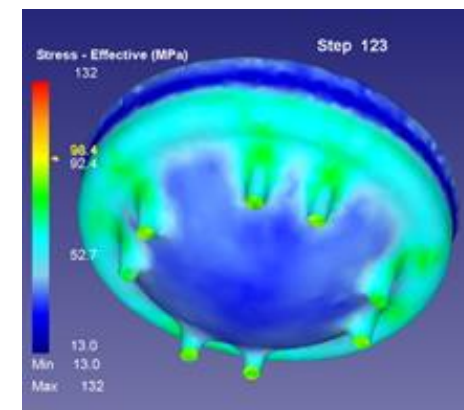
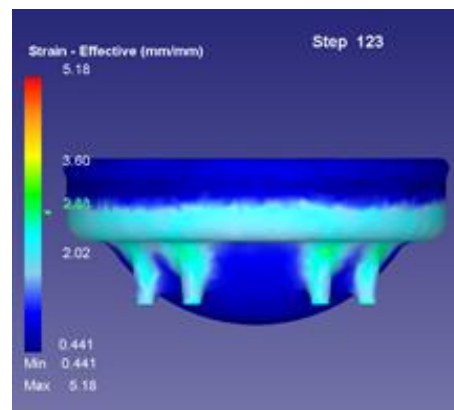
国和一号主管道热段AFGS锻造成形工艺



华龙一号主管道热段FGS锻造成形工艺



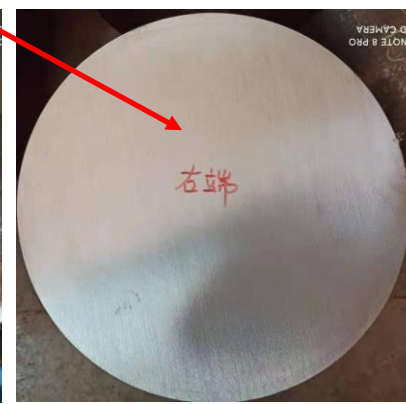
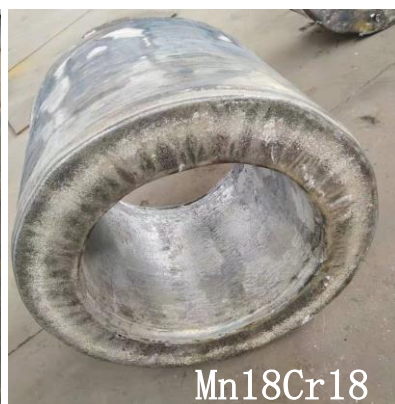
不锈钢乏燃料罐FGS锻造数值模拟



国和一号一体化上封头FGS锻造数值模拟

5. 原创技术CYD建设

特种电渣重熔 (ESR) —— 制备大断面 ($\leq 3000\text{mm}$, $\leq 350\text{t}$) 实心电渣锭及空心电渣锭





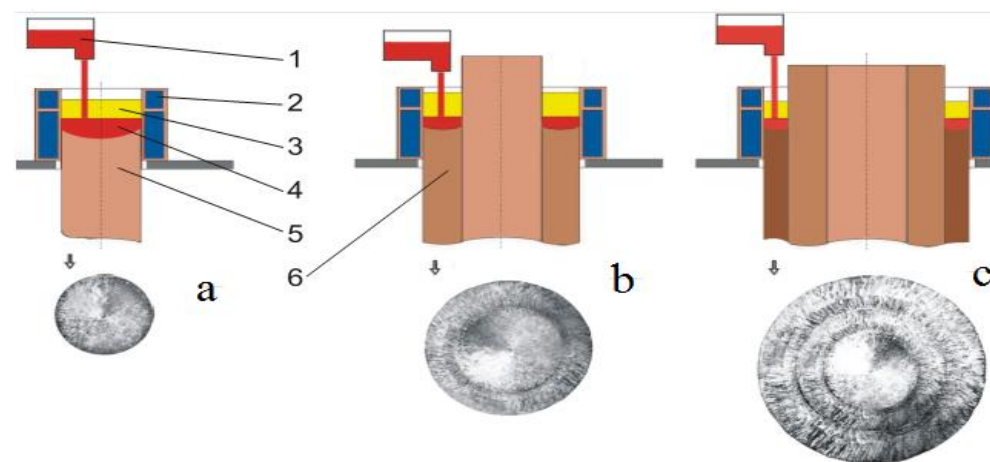
5. 原创技术CYD建设



大断面高温合金坯料的制备——外购基材，引进“液-固”复合技术

涉及产品种类及铸锭需求

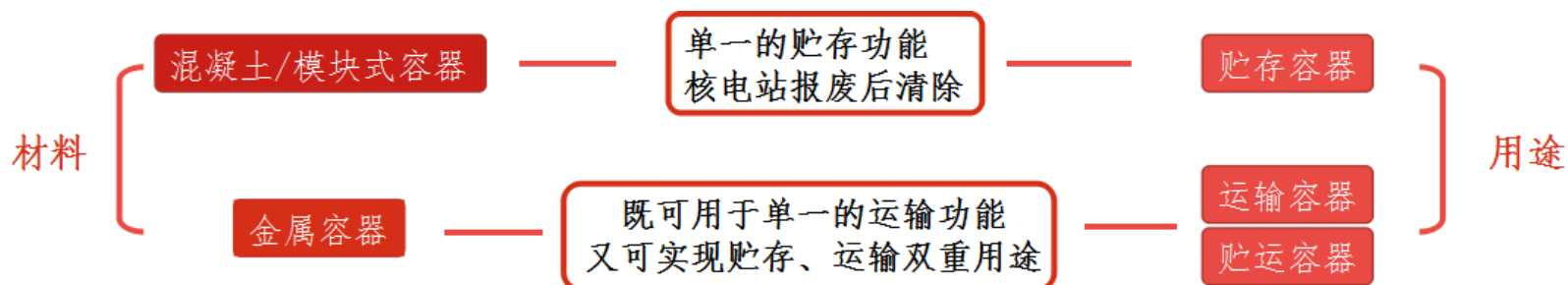
名称	材质	规格需求	冶炼路线	已用锭型	现路线	采购厂家
镍基转子	GH617mod	≥10T (Ø920mm)	VIM+PESR+VAR/VIM+PESR	Ø810mm (7T)、 Ø660mm (5T)、 Ø375mm (1.5T)	VIM+PESR+VAR、 VIM+PESR、	抚钢 图南合金
细晶棒料	GH4169	2.5~5T (Ø508、 Ø660mm)	VIM+PESR+VAR	Ø508mm (2.5T)	VIM+VAR	抚钢
重燃轮盘	GH4169/GH4706	最大15T (Ø920mm)	VIM+PESR+VAR			
耐蚀合金管	GH8825	20T (Ø1235mm)	VIM+PESR			



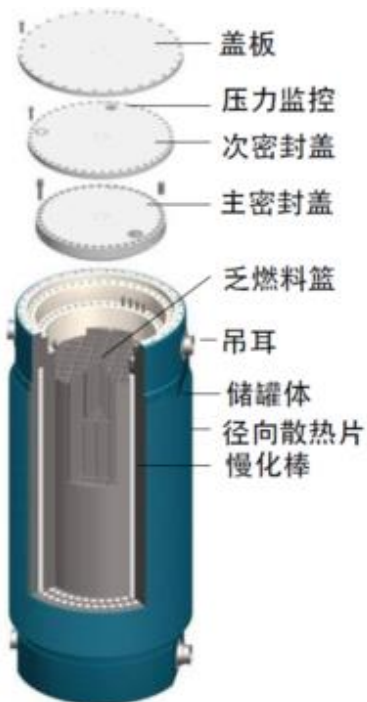
在电渣熔化过程中，会产生对非金属夹杂物等的渣滤，可减少有害杂质。

5. 原创技术CYD建设

核电乏燃料罐



集成化发展
满足贮存及公路铁路海运联合运输需求



筒体材料

- 不锈钢铅屏
- 锻钢
- 球墨铸铁

成本极高、生产周期长
仅适用于运输

成本高、生产效率高
贮运双重用途
专利壁垒、技术转让失败
国内尚无辐射屏蔽材料灌注技术
国内无设计单位

成本低、生产效率高、安全性好
贮运双重用途
国内研发重点方向

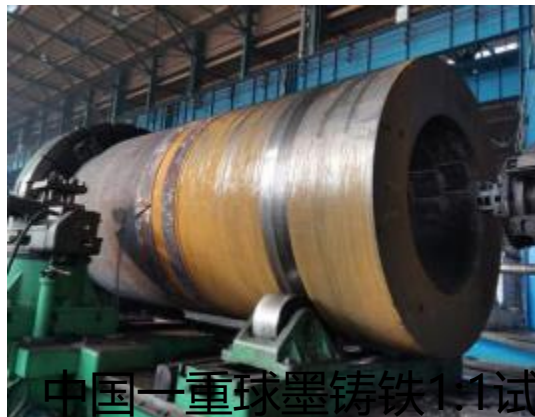
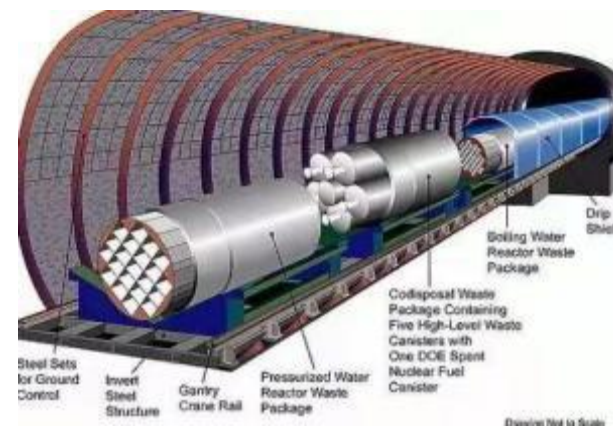


5. 原创技术CYD建设

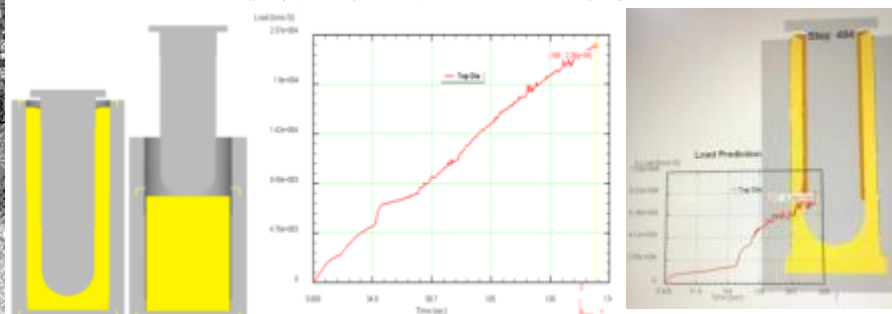


核废料储罐是一种消耗品，运输用的专用核废料储罐，一年需用两次。储存用的核废料储罐，随着核废料一起放入海底/地下40年。

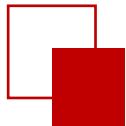
随着国内核电站的加速建设，将来对核废料储罐的需求会很大，目前都是从国外进口。法国高捷玛 (COGEMA) 公司于平均年生产和使用核废料储罐2000支以上。2005年更是生产3000多支核废料储罐。



反挤压成形，坯料尺寸 $\Phi 2120 \times 3700$ ，坯料重102T，钢锭重165T
SA508 Gr.4，模拟成形力4.4万吨。316LN 模拟成形力8万吨。



中国一重球墨铸铁1:1试验件在加工 SA508 Gr.4:1试验锻件



感谢聆听，敬请指正！

