以大数据为依据 编制自主创新的锻件标准

王宝忠
中国一重集团有限公司

2022年8月27日 山东威海

提纲

contents

1. 大数据基础
2. 一体化锻件
3. 重型复杂锻件
4. 新材料
5. 原创技术CYD建设
6. 标准自主化建议

1. 大数据基础

1. 大数据基础

依托项目：国家“十一五”科技支撑计划和先进压水堆重大专项

项目历时10余年；累积投入研发资金10亿余元

课题任务书编号：2007BAF02B01　　密级：公开

005-BA-2007-125413-7

国家科技支撑计划课题任务书

项目名称：大型铸锻件制造关键技术及装备研制

课题名称：百万千瓦级核电设备大型铸锻件关键制造技术研究

项目组织单位：中国机械工业联合会

课题承担单位：中国第一重型机械集团公司

课题负责人：王 宝 忠

起止年限：2007 年 10 月 31 日至 2010 年 06 月 30 日

中华人民共和国科学技术部

2007 年 12 月 31 日

国家科技重大专项课题任务合同书

专项名称：大型先进压水堆及高温气冷堆核电站

课题编号：2013ZX06002-004

课题名称：CAP1400 反应堆压力容器研制

课题责任单位：中国第一重型机械股份公司

课题组长：王宝忠

起止年限：2013 年 1 月至 2015 年 12 月

中华人民共和国科学技术部制

二〇一二 年十二月

密级：公开

国家科技重大专项课题任务合同书

专项名称：大型先进压水堆及高温气冷堆核电站

课题编号：2013ZX06002-004

课题名称：CAP1400 反应堆压力容器研制

课题责任单位：中国第一重型机械股份公司

课题组长：王宝忠

起止年限：2013 年 1 月至 2015 年 12 月

中华人民共和国科学技术部制

二〇一二 年十二月

密级：公开

国家科技重大专项后立项后补助课题协议书

专项名称：大型先进压水堆及高温气冷堆核电站

课题编号：2020ZX06004001

课题名称：核电设备用超大型锻件关键工艺优化与标准化研究

课题牵头承担单位：中国第一重型机械股份公司

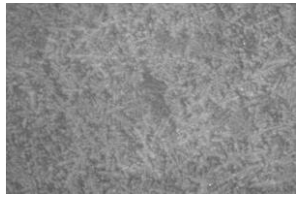
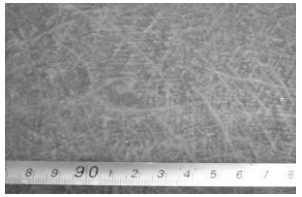
课题组长：王宝忠

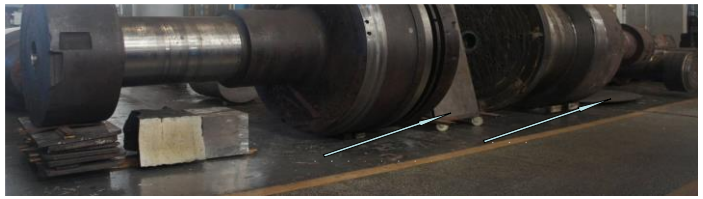
起止年限：2011 年 1 月至 2018 年 12 月

二〇二〇年十一月

1. 大数据基础

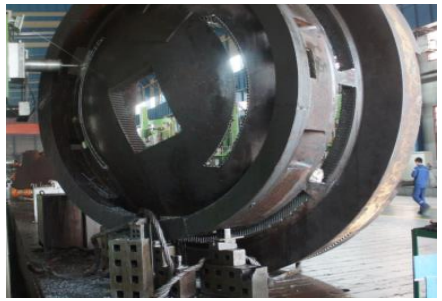
掌握了丰富的钢锭及常规岛整锻低压转子锻件1:1解剖评定大数据

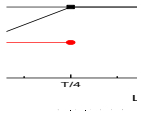





1. 大数据基础

掌握了丰富的核岛锻件1:1解剖评定大数据





1. 大数据基础

超大型钢锭及超大型锻件制造技术达到国际领先水平

鉴 定 意 见

2010年11月25日，由黑龙江省科学技术厅在天津组织了由中国第一重型机械集团公司完成的《超大型钢锭(600吨以上级)研制及共性技术研究》项目的成果鉴定会。鉴定委员会专家听取了课题组的项目汇报，经过认真讨论，形成如下意见：

1、提供的鉴定材料齐全、完整，完成了项目合同书规定的各项任务指标，符合鉴定要求；

2、本项目针对600吨级超大型钢锭制造，开发出超纯净冶炼技术，P达到0.003%，S达到0.002%；

3、本项目开发了以下创新技术：多包合浇差异化成份控制技术；优质耐火材料整体塞杆及100吨椭圆型中间包控流技术；有效控制超大型钢锭宏观偏析技术等。使后续的锻件UT检查的缺陷当量直径小于1.6mm，成功地制备出600吨级钢锭；

综上所述，该项目整体技术填补了国内空白，达到了国际领先水平。

建议：在大钢锭内部偏析及疏松问题要进一步加强研究。

鉴定委员会主任：

2010 年 11 月 25 日

鉴 定 意 见

2012年12月20日，中国机械工业联合会在大连组织召开了由中国第一重型机械股份公司完成的“大型先进压水堆核电核岛主设备超大型锻件”项目成果鉴定会。鉴定委员会（名单见附件）听取了项目汇报，经过质询、讨论，形成如下鉴定意见：

1. 提供的鉴定材料齐全、完整，符合鉴定要求。

2. 该项目完成了大型先进压水堆核电核岛压力容器（RPV）整体顶盖、接管段，蒸汽发生器（SG）水室封头、椭球封头、锥形筒体、管板，稳压器（PRZ）下封头等超大型锻件制造，其性能指标满足第三代核电主设备技术规格书要求。

3. 该项目的主要创新点如下：

（1）创新地提出了低Si控Al钢制造技术，获得高纯净的特大型钢锭，使大型钢锭的宏观偏析、夹杂物含量、锻件晶粒度超过国外同类产品的技术指标，大幅度提高了实心锻件的合格率。

（2）首次提出了双端不对称同步压下变截面筒体类锻件的成形技术，解决了大型非对称筒体类锻件的成形难点，提高了锻件质量和材料利用率。该技术所包括的变截面坯料、大角度锤头、异形内套及双端不对称同步压下锻造成形等技术属于重大创新。

（3）开发了带接管一体化大型封头锻件旋转仿形整体锻造技术，该技术优于国际同类锻件的成形方法；开发了高致密特厚巨型管板胎模锻造技术；开发了带管嘴的封头类锻件及管嘴部位全流线成形技术。

4. 开发的锻件主要技术指标达到或超过国外同类产品，实现了大型先进压水堆核电核岛主设备超大型锻件国产化。

鉴定委员会一致认为：该项目的研制成功，解决了制约我国核电发展的大型锻件瓶颈问题，拥有自主知识产权，达到国际领先水平，其经济和社会效益十分显著。

希望进一步固化工艺，为我国核电事业做出更大贡献。

鉴定委员会主任：

副主任：、

2012 年 12 月 20 日

鉴 定 意 见

受国家能源局委托，中国机械工业联合会于2014年8月10日，在黑龙江富拉尔基组织召开了由中国第一重型机械股份公司完成的“CAP1400核电站反应堆压力容器大型关键锻件”鉴定会。鉴定委员会(专家名单见附件）听取了项目汇报，考察了现场，经过质询、讨论，形成鉴定意见如下：

1. 提供的文件资料齐全、完整，符合鉴定要求。

2. 研制的CAP1400核电反应堆压力容器整体顶盖、一体化接管段及一体化底封头等三种1:1的试验件，进行了典型部位全截面解剖检验，其性能指标满足核岛主设备技术规格书要求。在此基础上所制造出的整体顶盖、一体化接管段锻件已实现工程应用。

3. 主要创新点如下：

（1）发明了带Quick-loc管的一体化整体顶盖锻件旋转仿形制造技术，进一步提高了顶盖整体质量，可降低成本、缩短制造周期。

（2）发明了高强韧性一体化接管段的新型热处理工艺技术，显著提高了一体化接管段锻件的韧性，确保了锻件性能的一次合格率。

（3）发明了过渡段和底封头合为一体的大型整体底封头锻件旋转仿形和拉深相结合的组合锻造及内外表面全覆盖喷淬技术，实现了超大型锻件全纤维半模锻成形，提高了锻件的性能和底封头的性能要求，缩短了制造周期及核反应堆在役检查时间。

4. 研制单位工艺装备和试验检测手段先进，核质保体系完善有效，具备了批量生产的条件。

综上所述，该锻件研制是成功的，其整体锻造和热处理技术达到了国际领先水平，为我国CAP1400等三代核电压力容器等核岛主设备的制造奠定了坚实基础，具有显著的经济效益和社会效益。

鉴定委员会一致同意通过鉴定。建议尽快推广应用。

鉴定委员会主任：

副主任：

2014 年 8 月 10 日

1. 大数据基础

项目获奖情况

科学技术奖证书

为表彰在推动科技进步、促进我省经济和社会发展中做出贡献的单位，特颁发此证书。

项目名称：600吨级超大型钢锭研制及工程应用

获奖单位：中国第一重型机械股份公司

奖励等级：特等奖（进步）

证书号：2012-001

中国机械工业科学技术奖

特等奖

大型先进压水堆核电核岛主设备超大型锻件研制及工程应用

中国第一重型机械股份公司

机械工业联合会　中国机械工程学会

二〇一四年度

绿色制造科学技术进步奖

第五届绿色制造科学技术进步奖

证书

一等奖

大型先进压水堆核岛超纯净超大型锻件绿色制造技术与工程应用

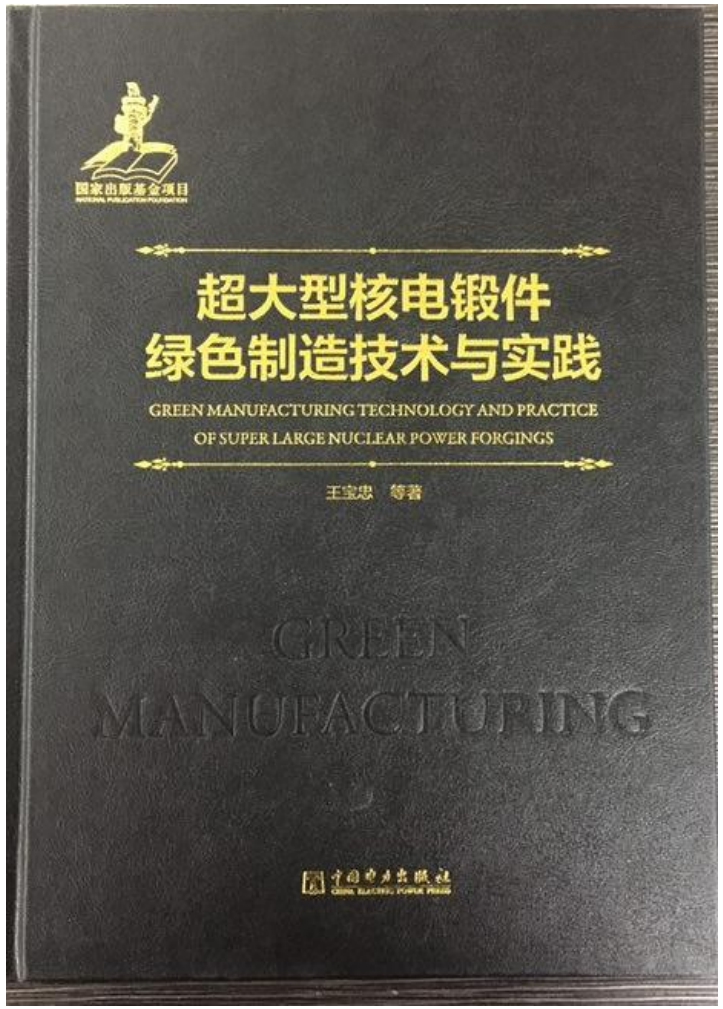
中国第一重型机械股份公司
钢铁研究总院
清华大学

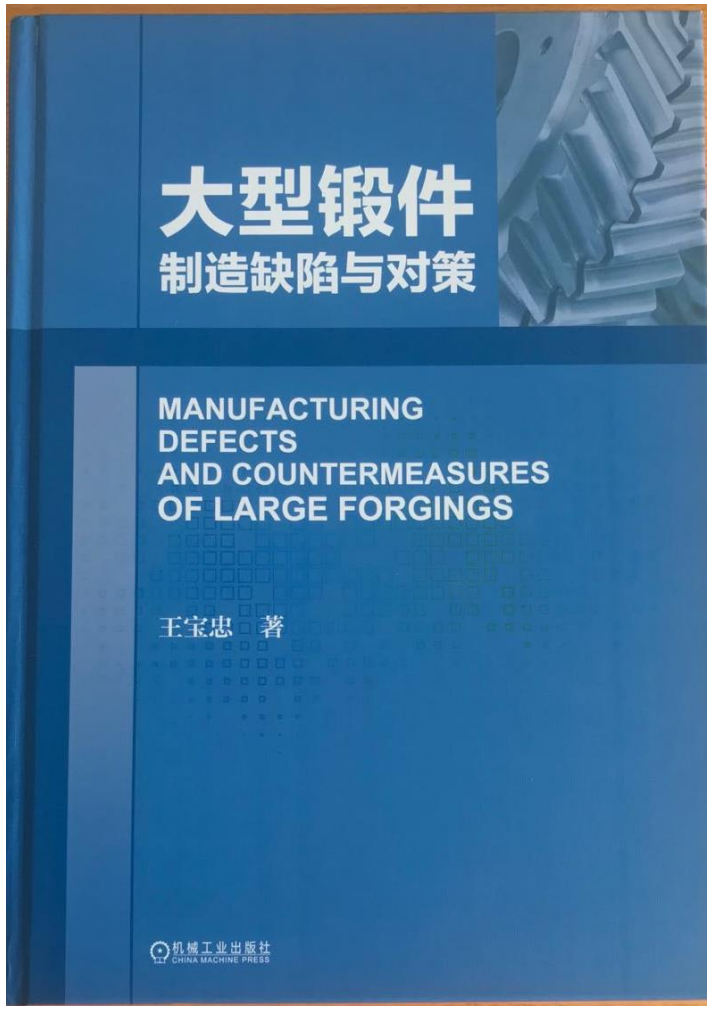
主要完成人：王宝忠 吴生富 高建军 刘 颖 马 克 刘海澜 张文辉 刘正东 刘凯泉 罗 英 马庆贤 傅万堂 曲在文 郭 义 杨建春

证书编号：2015A01　中国机械工程学会 CHINESE MECHANICAL ENGINEERING SOCIETY　二零一五年十一月

1. 大数据基础

出版发行的相关专著

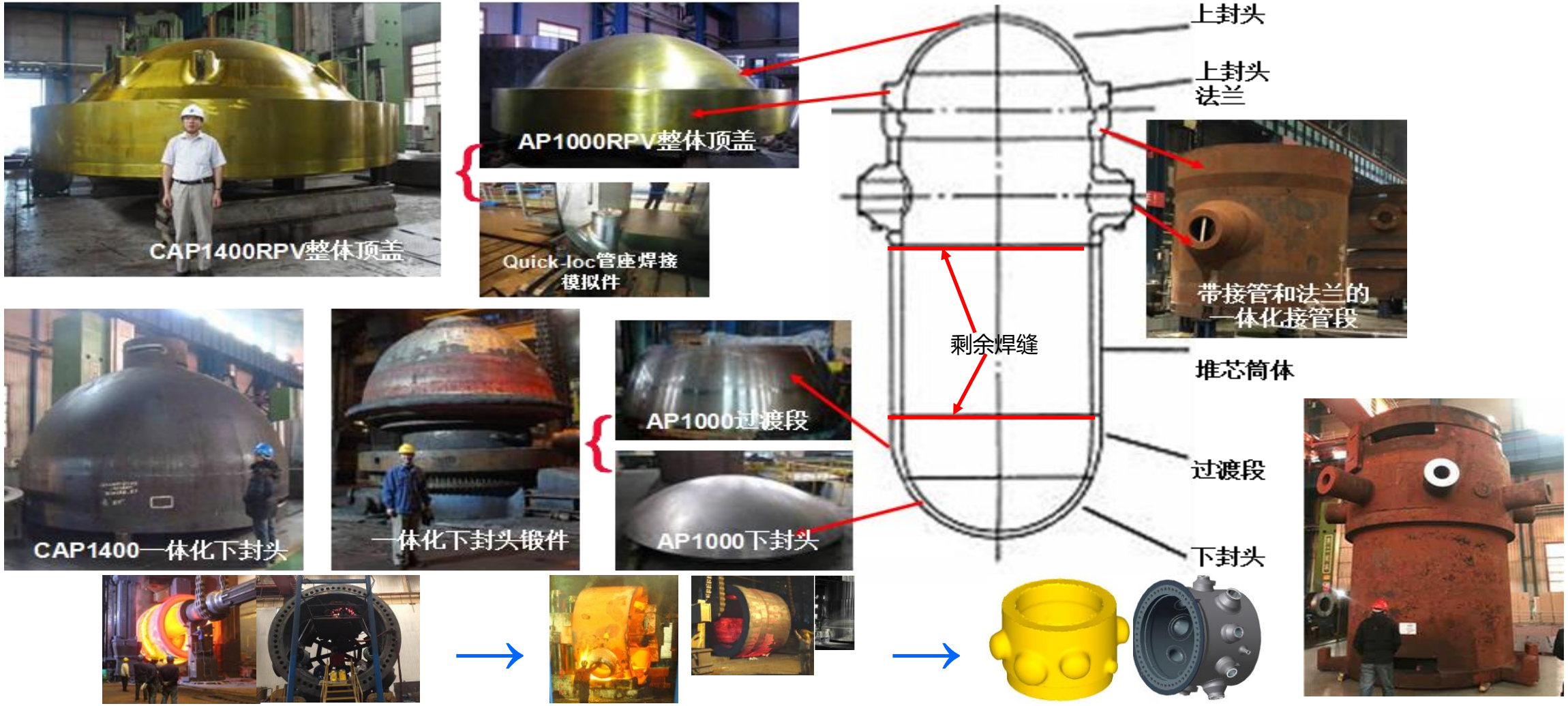




2. 一体化锻件

2. 一体化锻件

RPV锻件一体化



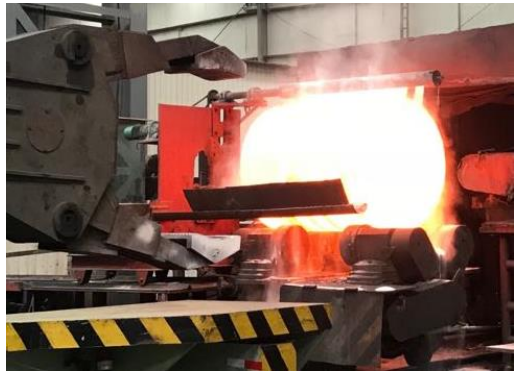
2. 一体化锻件

代表着热加工最高水平的核电常规岛整锻低压转子批量生产

3. 重型复杂锻件

3. 重型复杂锻件

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

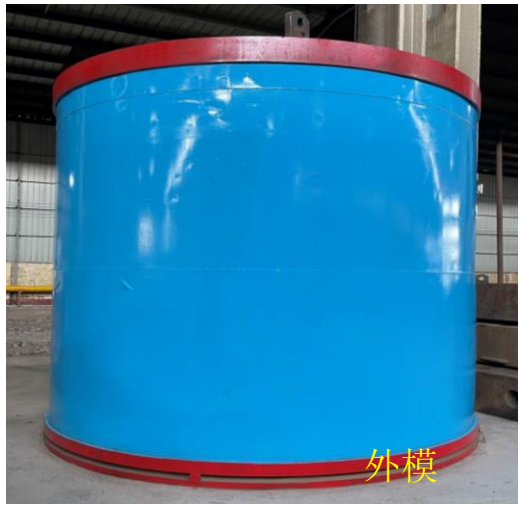
	晶粒度	疲劳性能（循环次数）	室温屈服/$R_{p0.2}$	冲击/KV_2	高温持久
1号堆研制技术条件	2~5级	循环次数不低于24000次	≥205MPa 同方向≤30MPa 不同方向≤40MPa	≥225 J 均匀性≤50J	≥3000h 不小于134MPa
锻-焊结构锻件评定结果	2~4级	16853~18624次	225~275Mpa 均匀性≤50MPa	366J~407J 波动范围41J	3100、3157、3690小时
1号堆-整体锻-轧支承环检测结果	主容器：0.74~2.19 保护容器：0.11~4.32	主容器：11792~24506次 保护容器：11889~25933次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

3. 重型复杂锻件

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

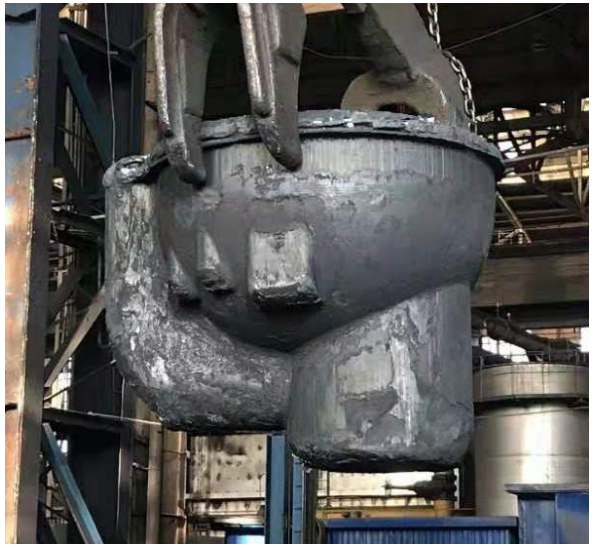
3. 重型复杂锻件

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



3. 重型复杂锻件

直连式封头对比试验（双真空铸锭：“无痕构筑”）



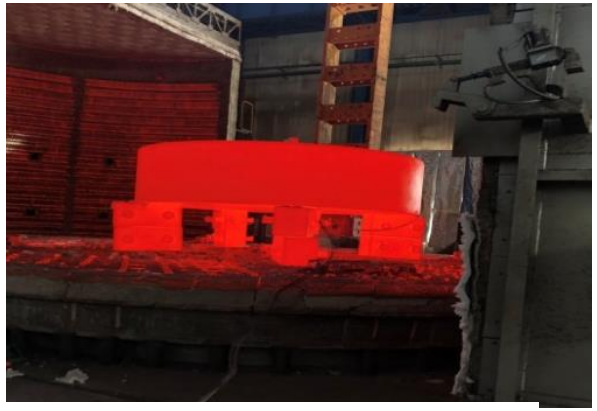
4. 新材料

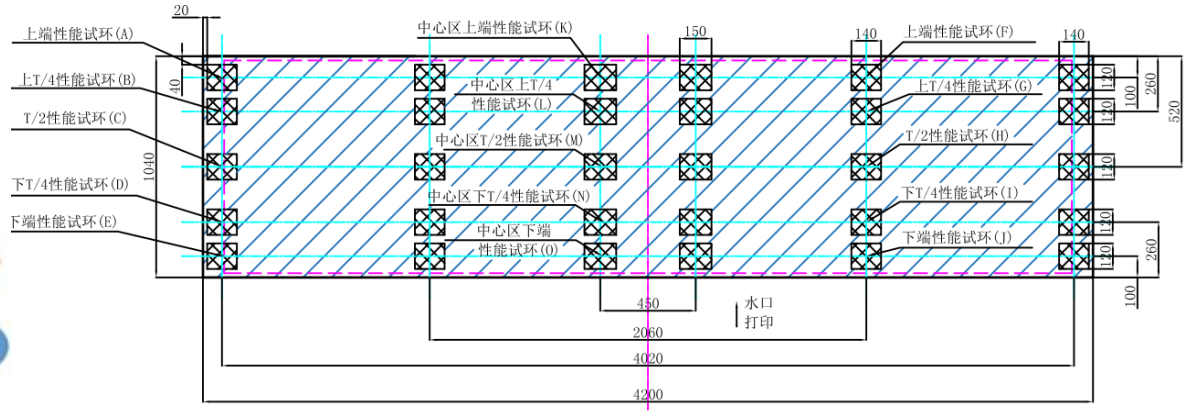
4. 新材料

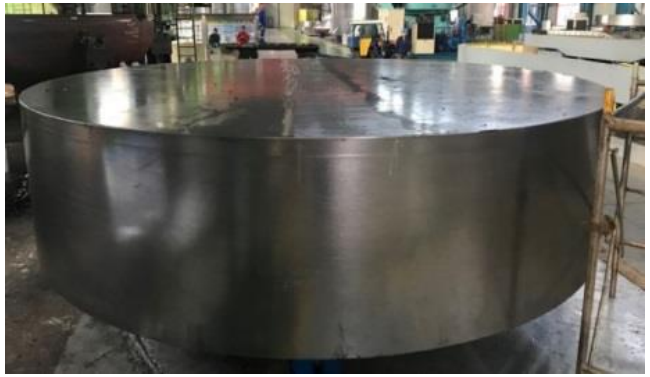
1. SA-508M Gr.4N 材料

200吨级φ4000×1000mm大锻件研制

十三五期间（2017年~2020年），中国一重在十二五期间的优秀科研成果基础上，再接再厉，研制了SA508Gr.4N Cl.1钢200吨级特厚大锻件，并进行了解剖工作





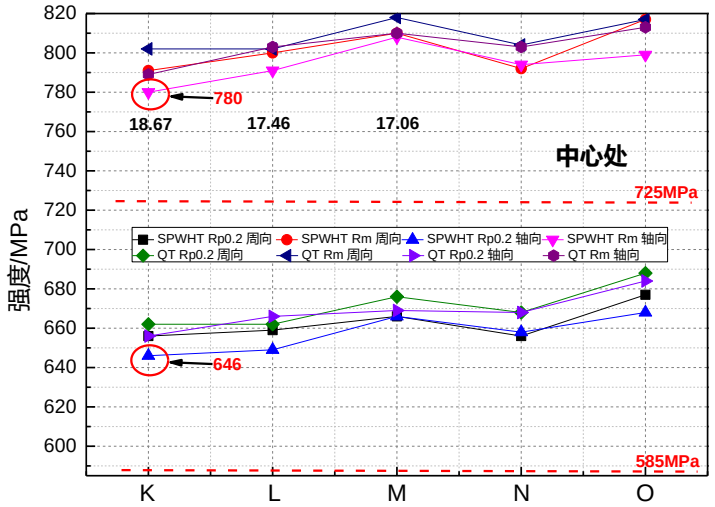


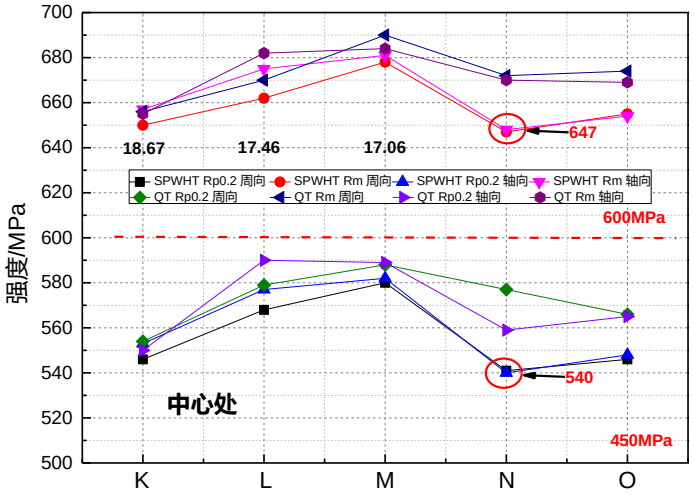
4. 新材料

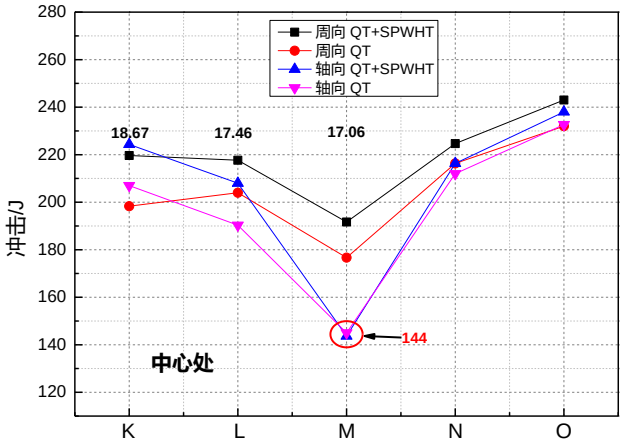
1. SA-508M Gr.4N 材料

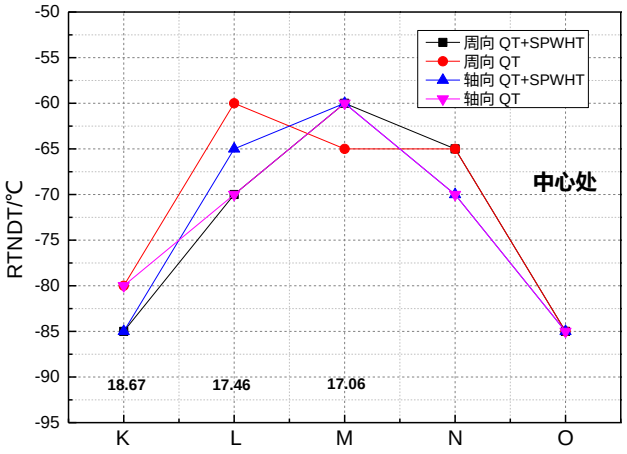
200吨级φ4000×1000mm大锻件研制

中心处性能









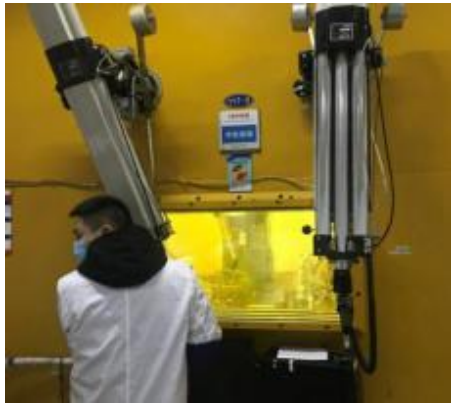
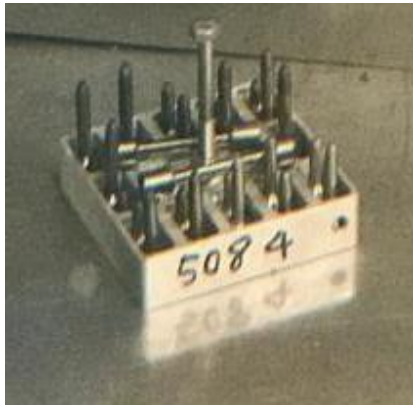
- 常温拉伸性能：屈服650~690MPa，抗拉780~820MPa
- 350℃高温拉伸性能：屈服540~590MPa，抗拉650MPa~690MPa
- -30℃冲击：145~245J
- RTNDT=-60~-85℃

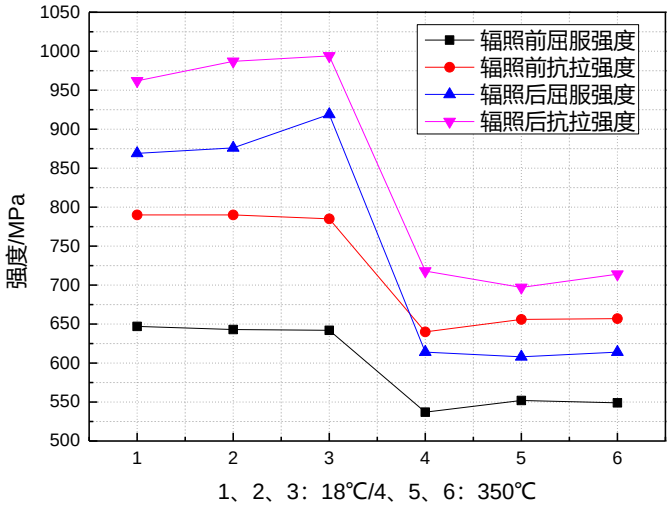
性能余量很大

4. 新材料

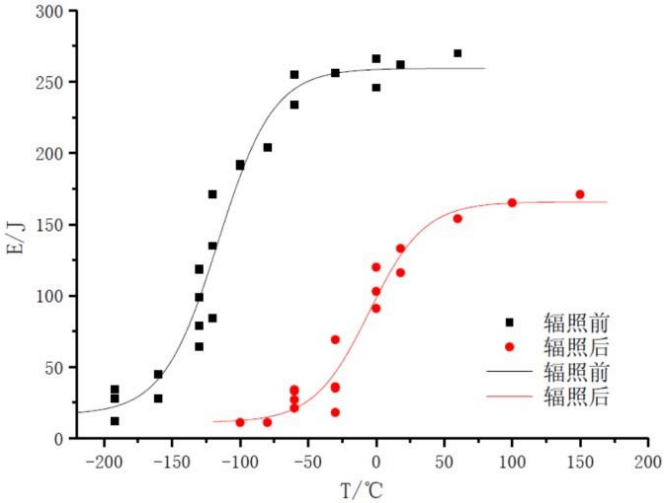
1. SA-508M Gr.4N 材料

装入高通量辐照堆接受堆芯辐射，3×10^{19}n/cm^2，辐照温度为230℃

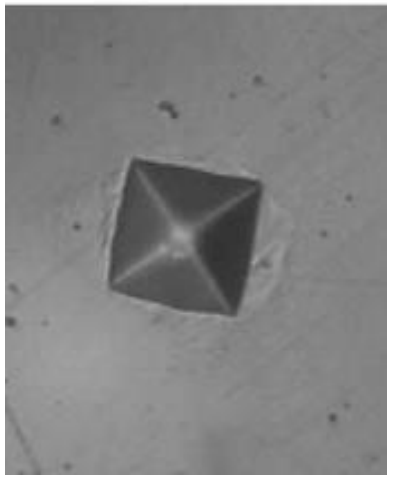
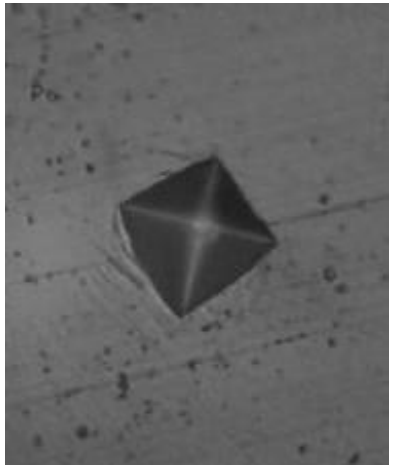





辐照前后拉伸性能对比



钢辐照前后试样能量-温度转变曲线对比

辐照前后硬度测试压痕对比

4. 新材料

2. SA-508M Gr.1 材料

成分优化：提高Ceq增加强度、控制微合金量、N/Al细化晶粒提高韧性

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al	N	Ceq
熔炼分析	≤0.35	≤0.40	0.40~1.05	≤0.025	≤0.025	≤0.25	≤0.40	≤0.10	≤0.05	≤0.025	/	/
产品分析	≤0.35	≤0.40	0.33~1.12	≤0.025	≤0.025	≤0.30	≤0.43	≤0.13	≤0.06	≤0.025	/	/
内控目标值	0.21	0.30	1.00	≤0.005	≤0.005	0.24	0.40	0.10	0.04	0.02	100ppm	0.475

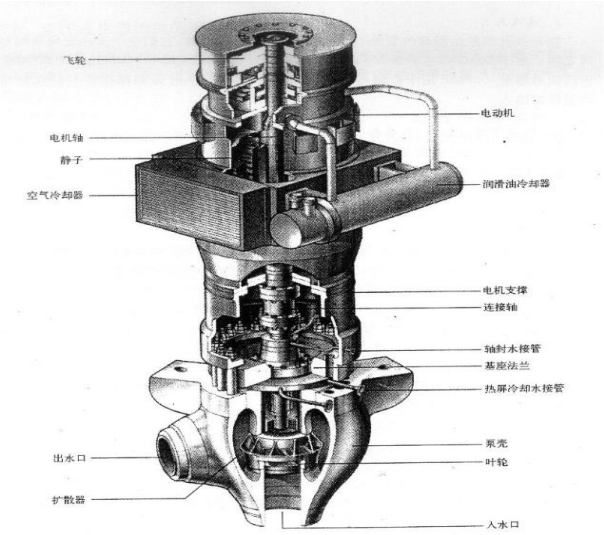
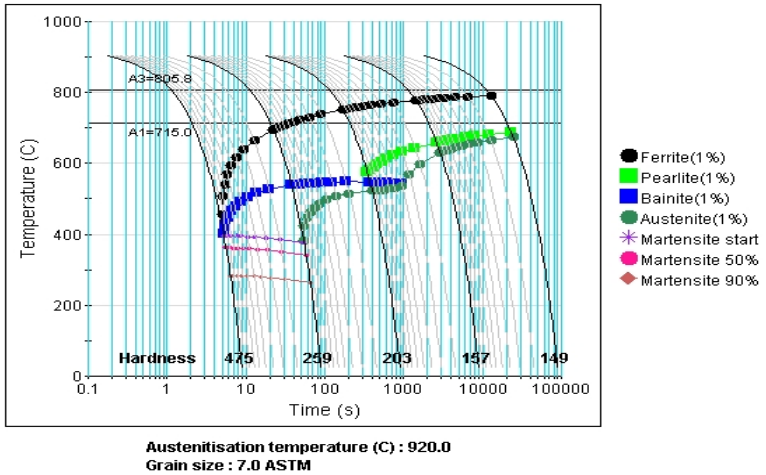
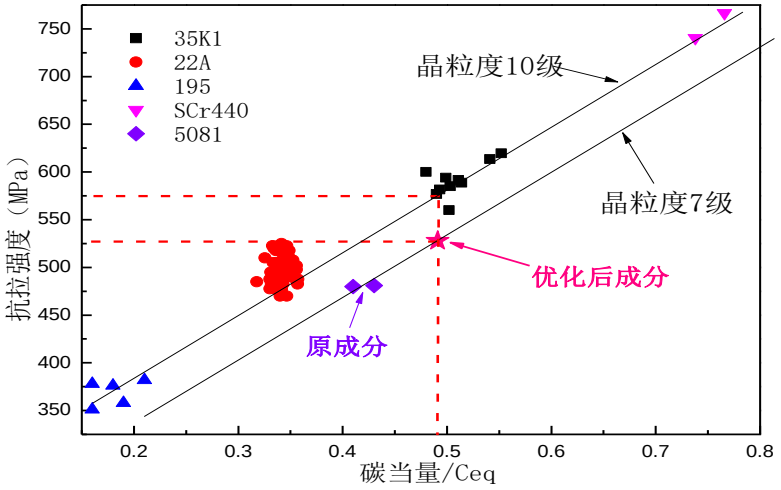


图 3.16 主泵结构总图



SA-508M Gr.1材料成分优化后CCT曲线计算结果

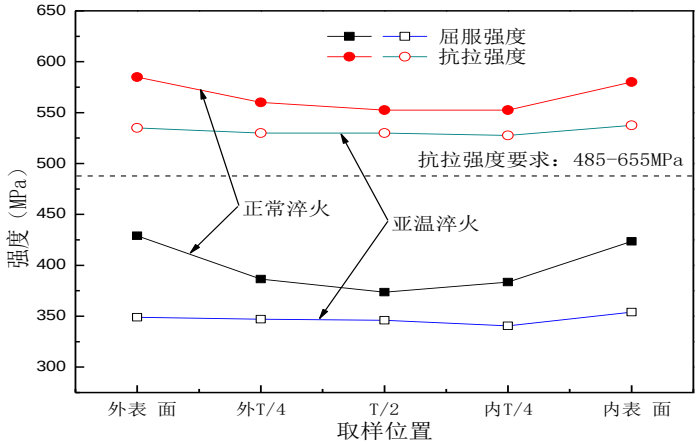


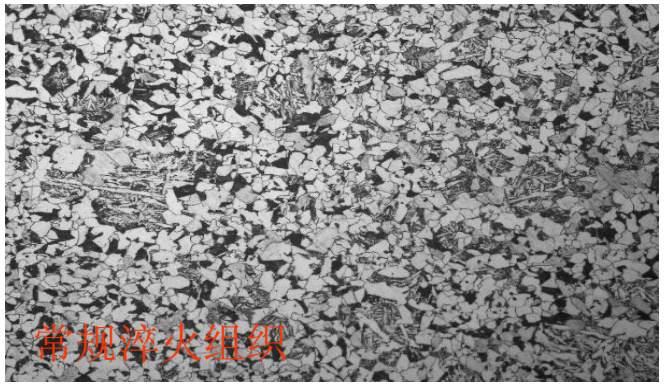
SA-508M Gr.1材料成分优化后强度计算结果

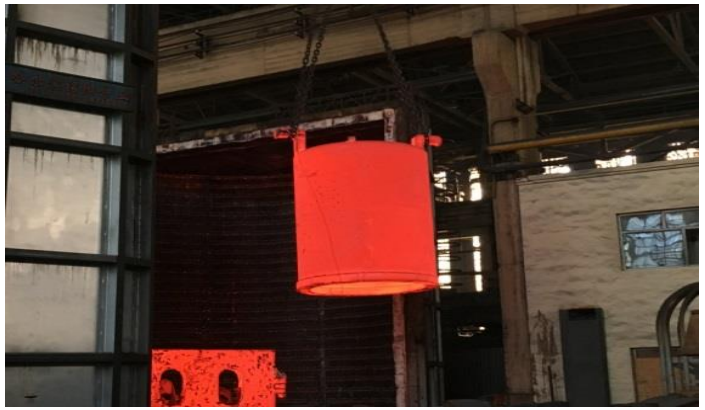
4. 新材料

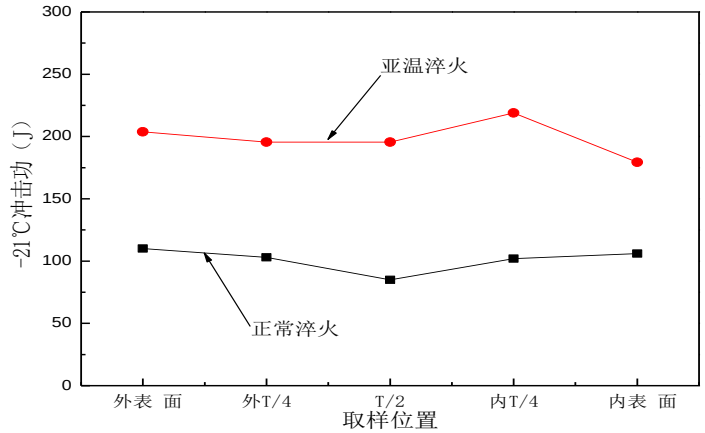
2. SA-508M Gr.1 材料

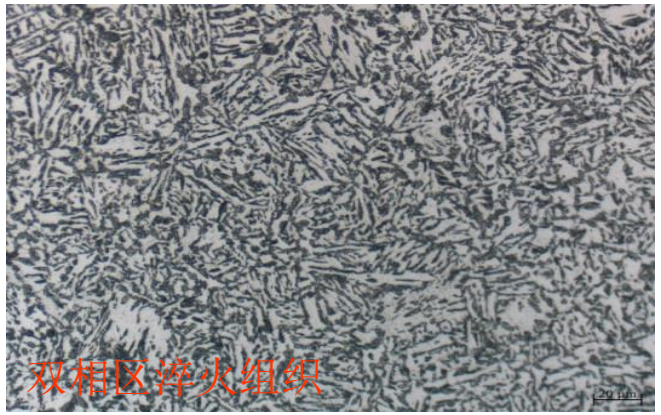
热处理优化：双相区淬火，SA-508M Gr.1材料锻件抗拉强度仅降低约25~50MPa，而韧性（低温冲击）则提高约一倍。











5. 原创技术CYD建设

5. 原创技术CYD建设

巩固和发展第一重地的需要

2018年9月26日习近平总书记视察中国一重并发表重要讲话“中国一重在共和国历史上是立过功的“。”国际上，先进技术、关键核心技术越来越难以获得……,中国最终还是要靠自己“。

中国一重是中国的第一重地。要肩负起历史重任，制定好发展路线图。

5. 原创技术CYD建设

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

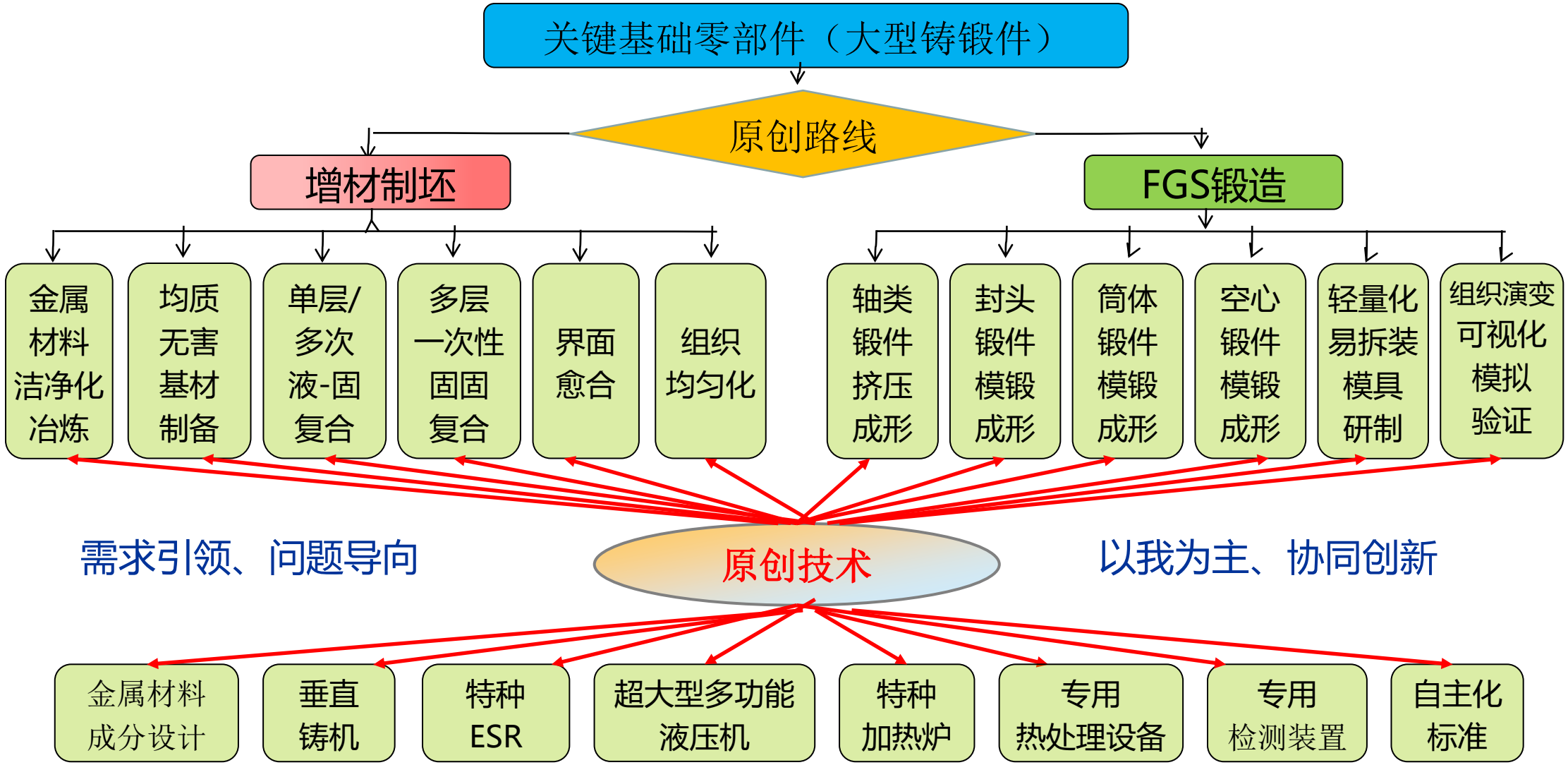
发改产业〔2021〕389号

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

5. 原创技术CYD建设


关键基础零部件（大型铸锻件）
原创路线
增材制坯
FGS锻造
金属材料洁净化冶炼
均质无害基材制备
单层/多次液-固复合
多层一次性固固复合
界面愈合
组织均匀化
轴类锻件挤压成形
封头锻件模锻成形
筒体锻件模锻成形
空心锻件模锻成形
轻量化易拆装模具研制
组织演变可视化模拟验证
需求引领、问题导向
原创技术
以我为主、协同创新
金属材料成分设计
垂直铸机
特种ESR
超大型多功能液压机
特种加热炉
专用热处理设备
专用检测装置
自主化标准

6. 标准自主化建议

6. 标准自主化建议

我国核电材料所依据的技术标准主要是ASME和RCC-M标准，国外制造企业和研究机构在标准制定过程中均进行了大量的基础数据研究工作。我国核电大型铸锻件的制造经过30多年的高速发展，核岛超大型锻件的制造技术已完全实现国产化，但对于材料基础数据的系列化研究工作不足，往往只能完全照搬标准的要求。国内核电锻件制造技术现状分析：

（1）随着核电技术的发展，超大型、复杂结构锻件逐渐增多且性能要求并未降低，在制造技术方面已处于极限制造，所**依据的标准很多已不能覆盖**；

（2）根据掌握的国内外数据，超大型锻件的组织、性能控制已十分困难，工艺窗口窄；

（3）以构筑成形为代表的新制坯技术已经出现，但相应的材料工程化研究尚未深入进行、数据严重缺乏。

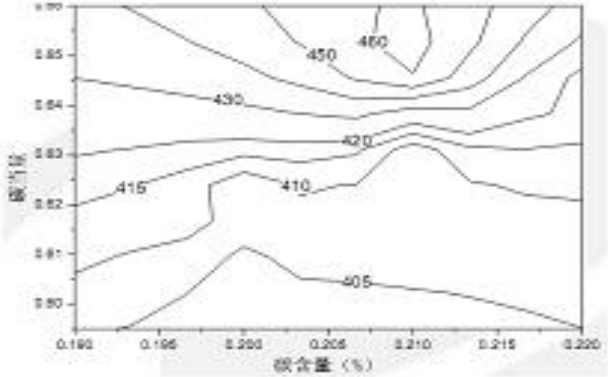
补课工作势在必行1

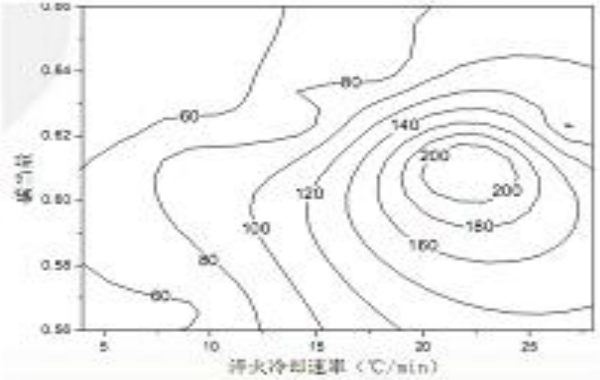
6. 标准自主化建议

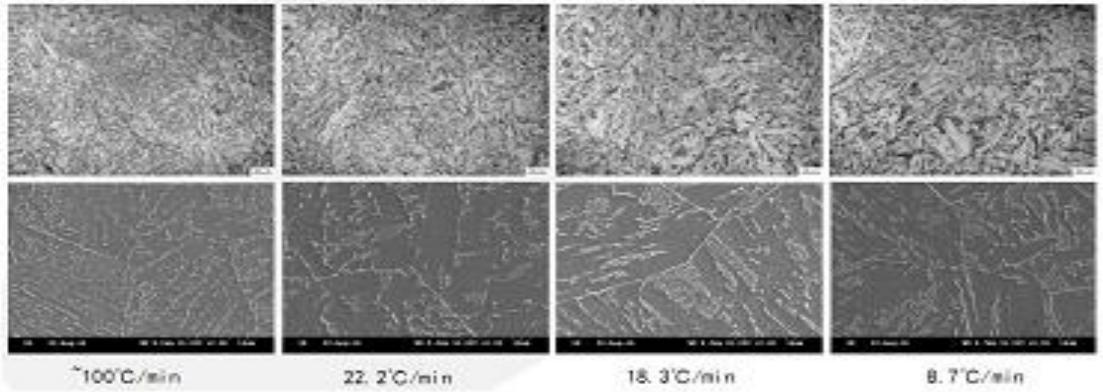
依据大数据编写相关标准

一重核电产品典型锻件制造情况（499吨钢锭）：

序号	项目	年份	锻件名称	数量	状态	序号	项目	年份	锻件名称	数量	状态
1	CAP1400	2013	接管段	2	交货	10	漳州1号	2018	接管段	1	交货
2	CAP1400科研	2013	接管段	1	结束	11	宁德6号	2018	接管段	1	交货
3	福清5号	2013	接管段	1	交货	12	惠州1号	2018	接管段	1	交货
4	福清6号	2014	接管段	1	交货	13	惠州2号	2018	接管段	1	交货
5	K2	2014	接管段	1	交货	14	昌江小堆	2019	支承段筒体	1	交货
6	K3	2014	接管段	1	交货	15	漳州2号	2019	接管段	1	交货
7	防城港3号	2016	接管段	1	交货	16	昌江3号	2020	接管段	1	交货
8	防城港4号	2016	接管段	1	交货	17	昌江4号	2020	接管段	1	交货
9	宁德5号	2017	接管段	1	交货	18	三澳2号	2020	接管段	1	在制





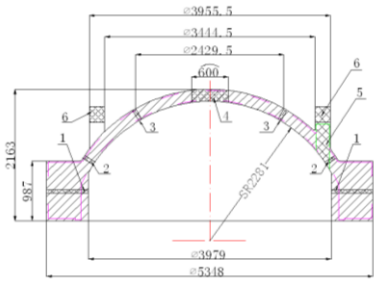


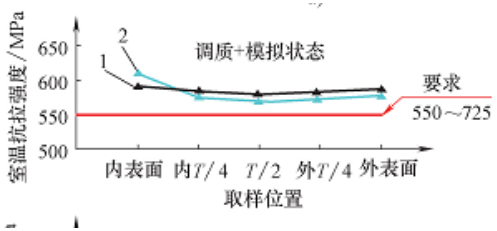
正确选材、合理用材、成分发挥材料的潜力。

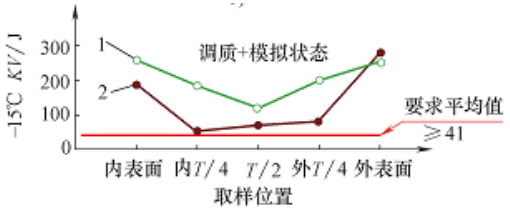
6. 标准自主化建议

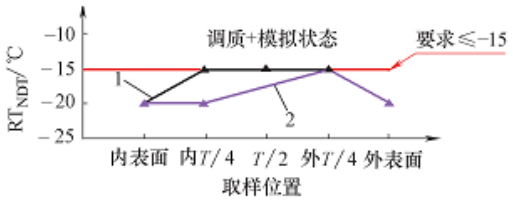
按断面选择性能

16MND5 厚度	室温拉伸		高温拉伸		-20℃冲击功	RT_{NDT}
	屈服强度	抗拉强度	屈服强度	抗拉强度		
180mm	451-471	590-609	360-399	520-562	202-266	-35~-42
215mm	445-470	585-604	377-402	536-560	142-257	-30~-50
250mm	442-455	578-580	372-384	520-547	210-296	-35
260mm	430-454	572-596	366-396	523-558	135-272	-35~-45
270mm	432-464	574-600	369-395	522-568	138-277	-30~-35
280mm	422-438	568-582	365-374	524-542	145-217	-30
325-575mm	412-445	579-627	351-402	530-569	145-288	-25~-40









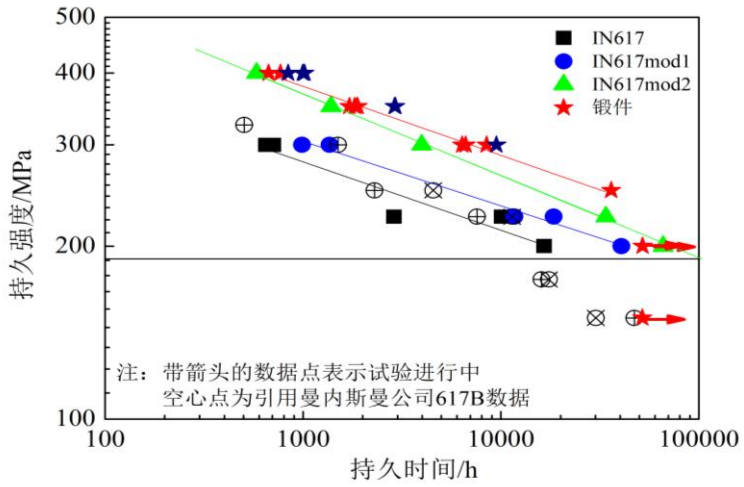
6. 标准自主化建议

长寿期材料特殊性能试验

转子用镍基合金高温持久性能试验

617镍基合金转子锻件研制：

采用优化成分研制的锻件，国内率先获得单个试样持久时间达到**7万小时**。在**700℃，外推10万小时条件下持久强度达到185MPa**，完全满足转子锻件的使用性能要求。



Alloy	Rm，MPa	Rp0.2，MPa	A，%	Z，%
标准617	830	365	54	55
617mod1	817	353	55	56
617mod2	1087	655	32.1	29.9

结语

中国一重 CFHI

感谢聆听，敬请指正！