



上大股份 航空高温合金部件循环制造

中和上大航空材料股份有限公司

二〇二六年六月

C 目录

CONTENTS



材料兴国

强军富民

守正创新

精准严谨

01

中和上大简介

About us of ZHSD

02

核心技术及应用

Core Technologies and Applications

03

战略意义

Strategic Significance

公司简介



- 公司成立于2007年8月，于2024年10月在创业板上市（股票代码：301522）
- 注册资金2.789亿元，总资产30亿元
- 占地466亩
- 员工1100人，专业技术人员占比15%
- 年生产能力12万吨，其中高温合金产线产能5000吨。

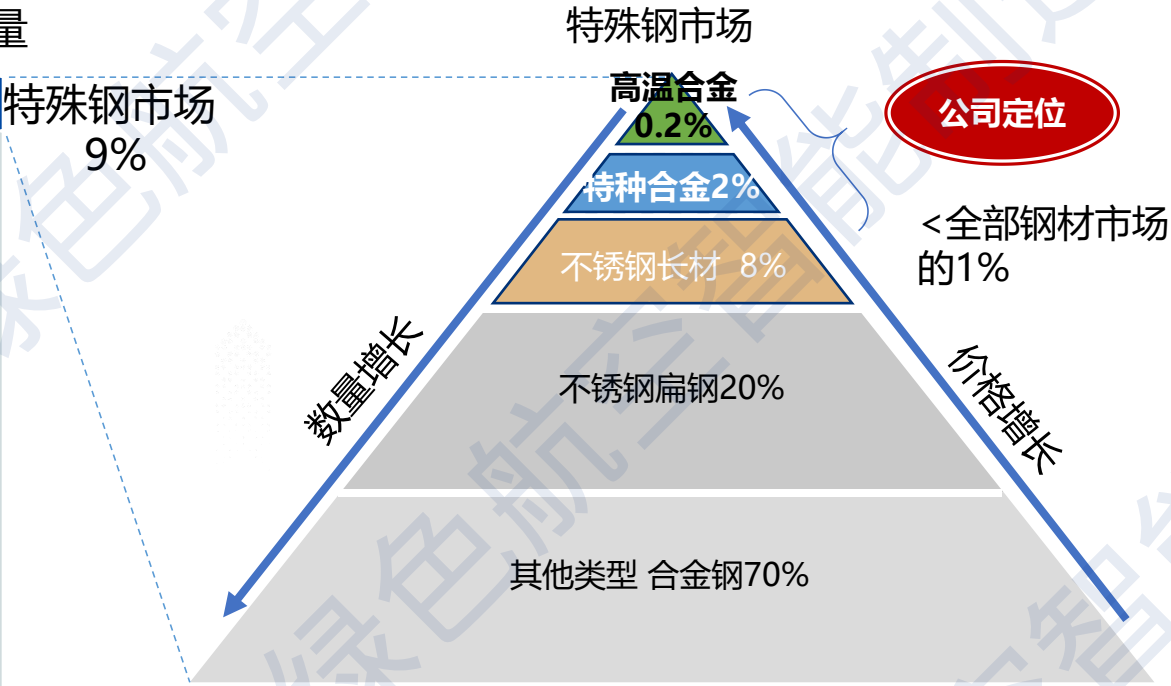
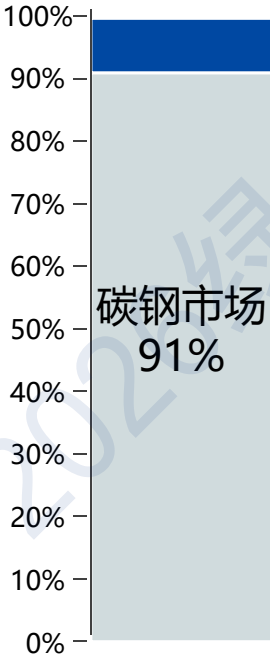


产品及市场定位

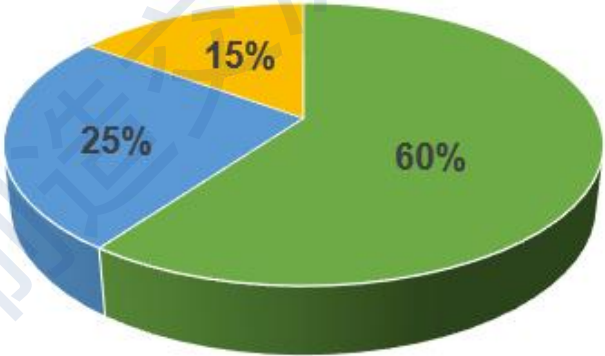


产品等级	主要类别	目标市场
关键战略材料	高温合金、超高强合金、航空轴承钢、精密合金等	航空、航天、舰船、兵器、核电、燃气轮机、电子等
替代进口高端材料	超级奥氏体不锈钢、超级双相不锈钢、超高强沉淀硬化不锈钢等	舰船、核电、汽轮机、石化、机械等
国内先进材料	特殊行业用特种不锈钢、高档模具材料等	舰船、兵器、核电、汽轮机、石化、机械等

全球钢铁产量



未来3至5年可实现目标产品结构



■ 关键战略材料 ■ 替代进口高端材料 ■ 国内先进材料



主要生产能力和设备情况

返回料预处理产线



全自动无污染车屑料清洗线



高温合金块料清洗线

- 国内首条产业化清洗线；
- 通过英国罗罗公司认证；
- 清洗返回料已应用于国内航空发动机高温合金生产。

“三联真空”熔炼产线



3+1台真空感应炉（1-12吨）



19台电渣炉



6+2台真空自耗炉

- 真空感应炉从1吨到12吨，可满足研发、中试和批产要求，适合航空航天多品种、小批量、高标准的要求；
- 各项参数达国际领先水平。

特种钢纯净化熔炼产线



电炉（EAF）



氩氧精炼炉（AOD）



钢包精炼炉（AOD）



真空脱碳炉（VOD）

- 特冶设备齐全，满足所有航空航天高温合金、超高强度钢、特种不锈钢、精钢材等材料生产；
- 20吨炉型兼顾研发与批产。

特种合金成型产线



2500吨快锻



6000吨快锻



450/320热轧



6-60吨冷拔

- 快锻机锻造速度快、周转快，有利于难变形合金生产和组织均匀控制；
- 热轧机轧速慢、轧制力大，生产组织灵活；冷拔机拉力大，带固体润滑。

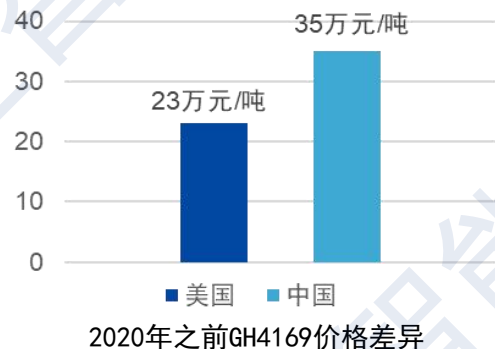


航空用高温合金领域中美差距

- 我国高温合金制造基础薄弱，技术落后，与美国差距巨大，严重依赖进口（2018年进口比例“大棒”>60%，“小棒”>90%）
- 美国禁止对我国出口高等级高温合金，特别是对涉及军用发动机材料的领域更是严格控制，出口中国的多为低等级民用材料，导致我国军用航空发动机性能无法与美国抗衡；中美贸易战及后疫情时代，美国已明确军工用高温合金材料完全禁止出口中国
- 高温合金保障问题已成为“两机工程”极为紧迫的“卡脖子”问题

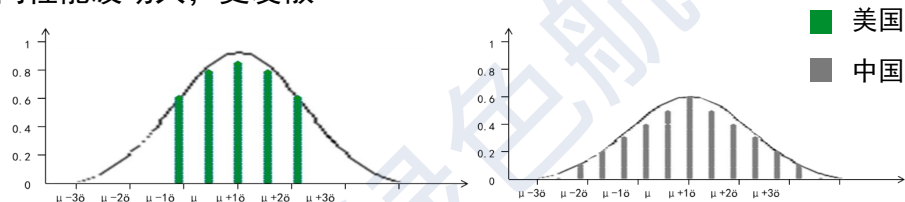
生产能力差距

- 美国变形高温合金年产量>15万吨，中国约1-1.5万吨；
- 据航发集团2021年数据，国内高温合金订单及时交付率约40%，供不应求；
- 2020年美国对中国高温合金禁运之前，国产价格高50%以上。

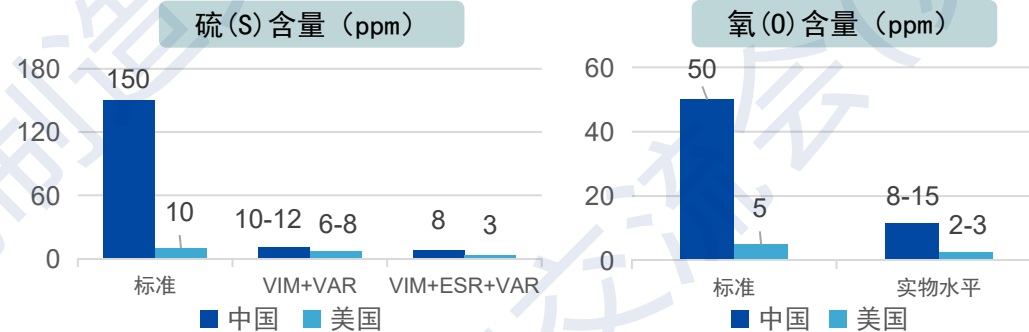


质量差距——稳定性

- 美国材料每批次性能指标在均值附近波动更小，更收敛；而国内材料每批次之间性能波动大，更发散

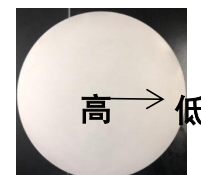
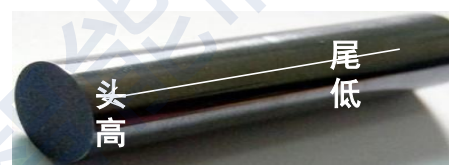


质量差距——纯净度



质量差距——晶粒度级差

- 国内高温合金锻材晶粒度最高可达6~8级，而美国晶粒度可达10~12级
- 美国高温合金材料晶粒度等级高、级差小，晶粒更细，组织更均匀



公司使命——着眼中美差距，打造材料闭环



航空发动机高温合金“飞天率”低

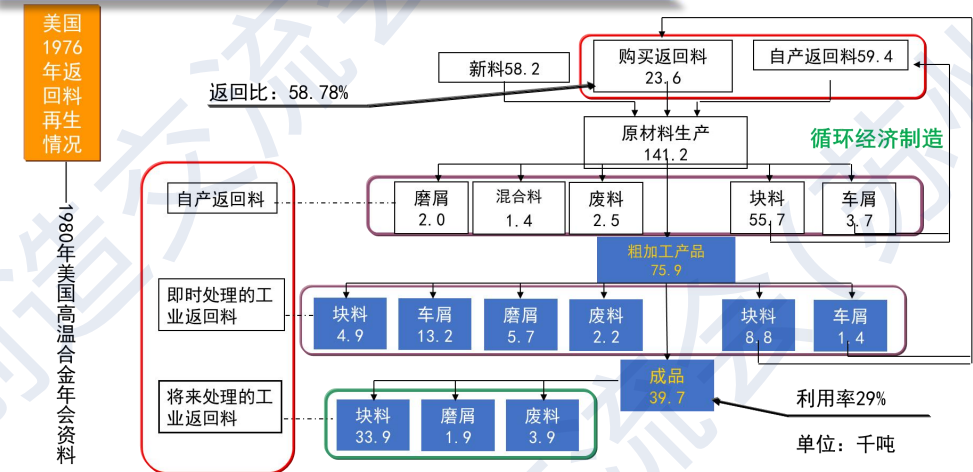
- X型号发动机GH4169压气机盘有效利用率5-8%，涡轮盘12-13%。
- 西罗公司铸造叶片有效利用率5-7%，国内3-5%。
- 国际上，高温合金综合“飞天率”也基本上不超过15%。

序号	零件名称	下料重量 /Kg	零件重量 /Kg	返回料重量 /Kg	利用率 /%
1	四级高压压气机盘	145	10.77	134.23	7.428
2	五级高压压气机盘	125	7.99	117.01	6.392
3	六级高压压气机盘	125	7.41	117.59	5.928
4	七级高压压气机盘	125	7.44	117.56	5.952
5	八级高压压气机盘	125	7.48	117.52	5.984
6	九级高压压气机盘	190	10.69	179.31	5.626
7	低压一级涡轮盘	174	22.33	151.67	12.833
8	低压二级涡轮盘	150	18.09	131.91	12.060

➢85%以上高温合金材料成为切头尾、切边等块料或者车铣屑料，流入废品回收站后被低值利用，浪费严重



美国目前返回料使用比例70-80%



打造航空材料产业链闭环



C 目录

CONTENTS



材料兴国

强军富民

守正创新

精准严谨

01

中和上大简介

About us of ZHSD

02

核心技术及应用

Core Technologies and Applications

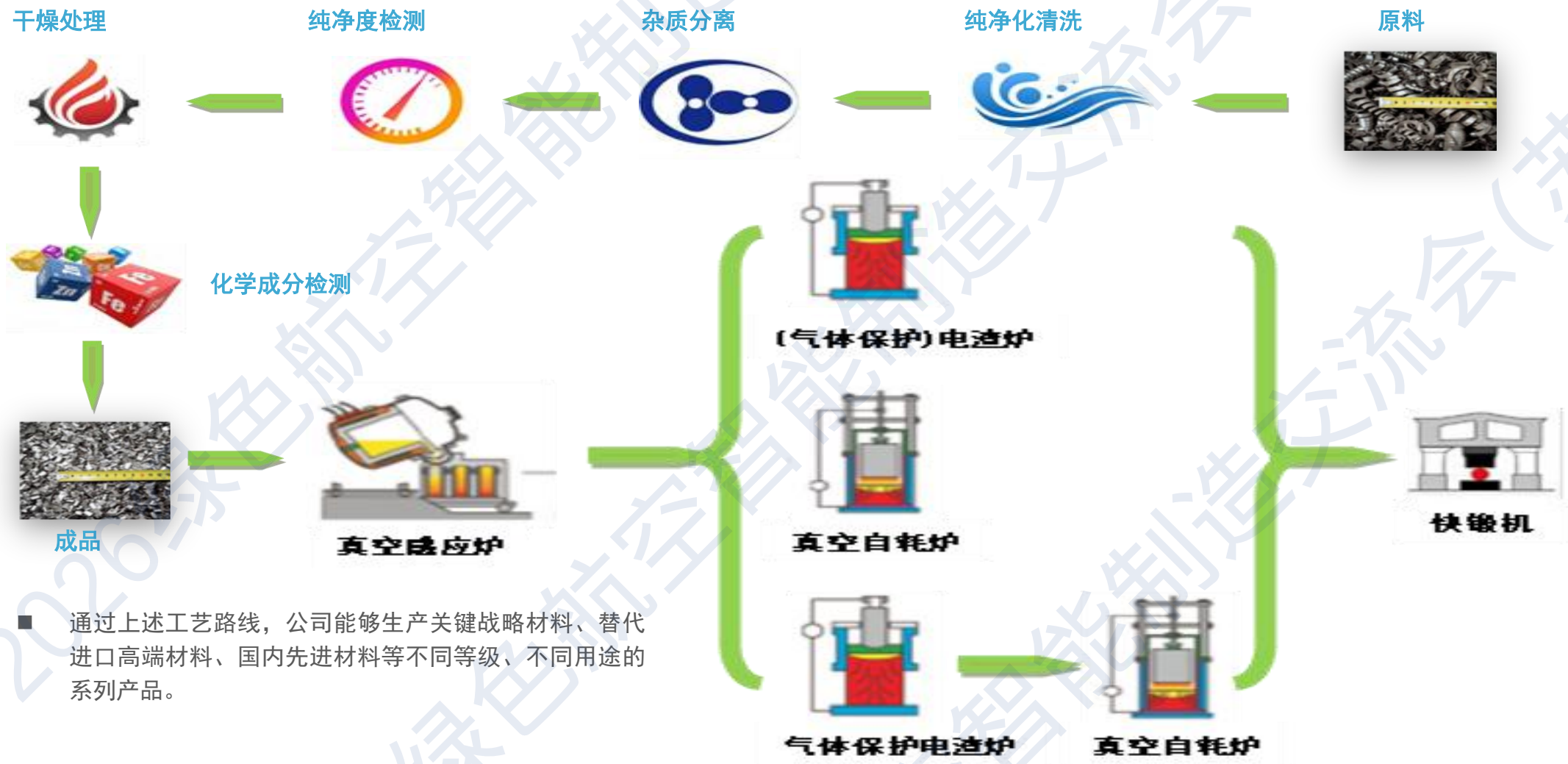
03

战略意义

Strategic Significance



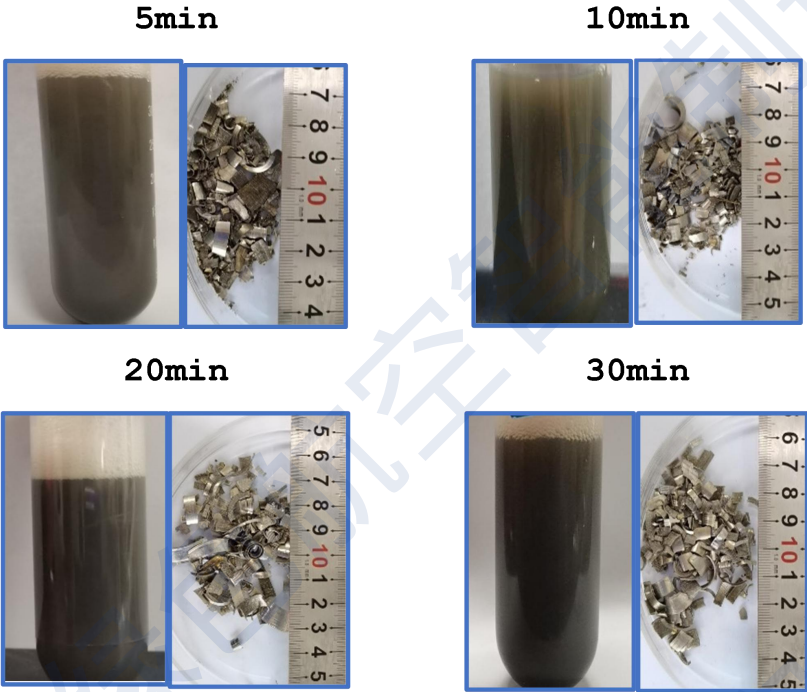
公司技术独创领先——国内首创“第二种高温合金工艺路线”



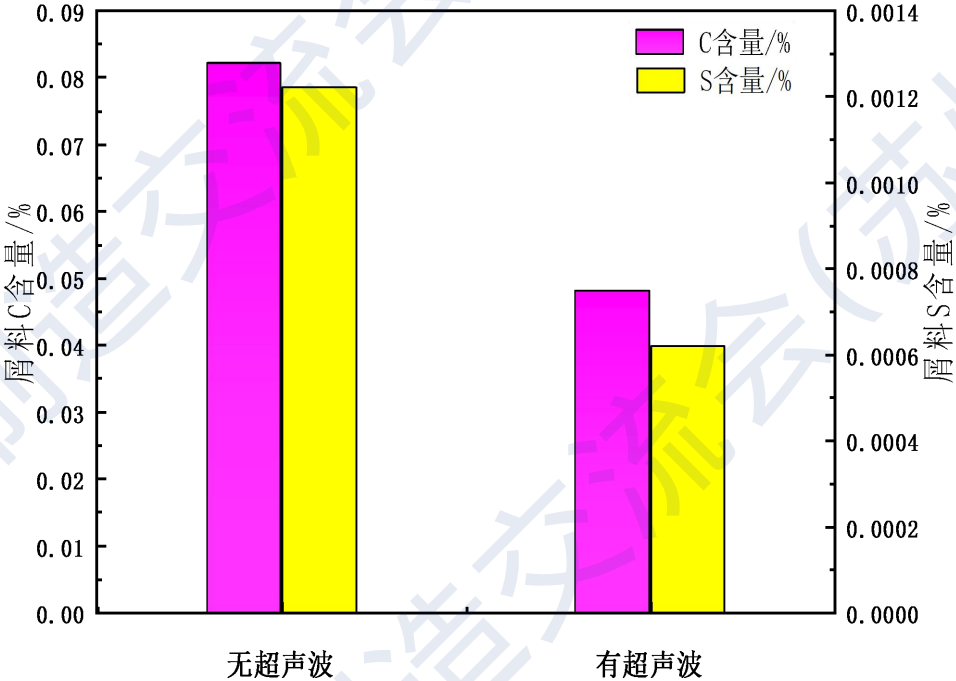
返回料全自动纯净化处理成套技术与装备



关键技术1 返回料全自动纯净化清洗成套技术



清洗剂配制



超声波清洗效果

研究应用分离净化、浸泡、滚动摩擦、高压水射流、超声波等5种清洗技术，国内首次建立了航空航天用高温合金返回料预处理技术体系，有效去除机械加工及储运过程中产生的各类金属及非金属杂质等污染物，提高了返回料纯净度，从源头解决了因返回料杂质影响产品纯净度和稳定性的问题。

返回料全自动纯净化处理成套技术与装备



关键技术2 自主设计了国内首条屑状返回料全自动清洗生产线



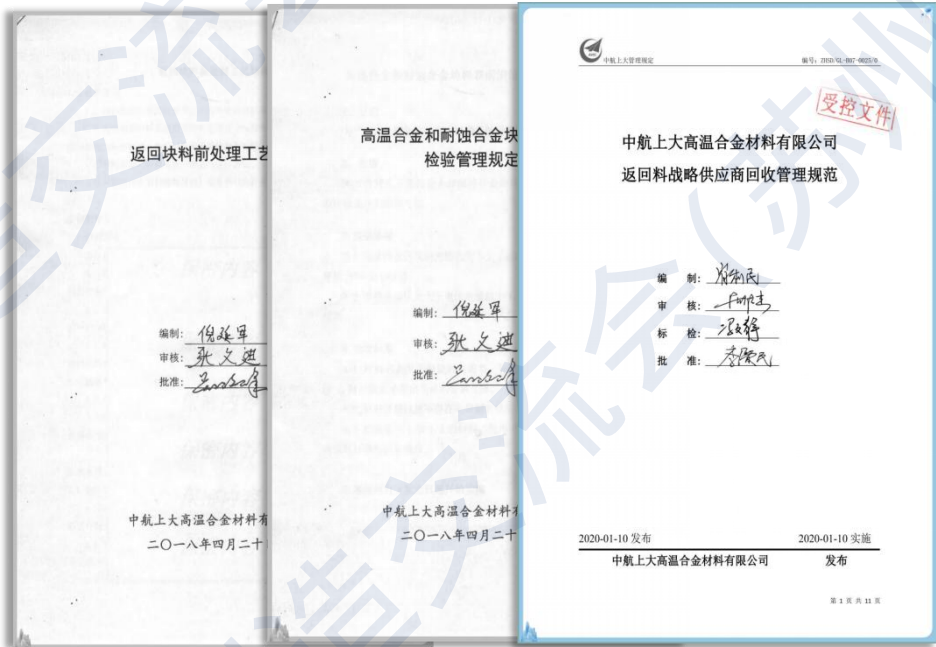
- 针对高温合金屑料无法直接用于高温合金冶炼的难题，研究了高温合金屑状返回料分离净化、超声波等多种清洗方式，自主设计并建立了高温合金屑状返回料全自动清洗生产线，解决了国内屑料无法直接使用的难题。清洗后的屑料浊度 $< 10\text{NTU}$ ，可直接用于高温合金冶炼，满足高温合金快速制造和使用要求。

返回料全自动纯净化处理成套技术与装备



关键技术3 建立了返回料分级管理制度和管理规范

屑料评定级别	达到标准	容许最大使用比例	产品用途
X1	AAA	70%	军品
X2	AA+B	60%	
X3	A+BB	55%	
X4	AA+C	50%	
X5	A+BC	45%	
X6	A+CC	40%	民品
X7	BBB	35%	
X8	BB+C	30%	
X9	B+CC	25%	
X10	CCC	20%	

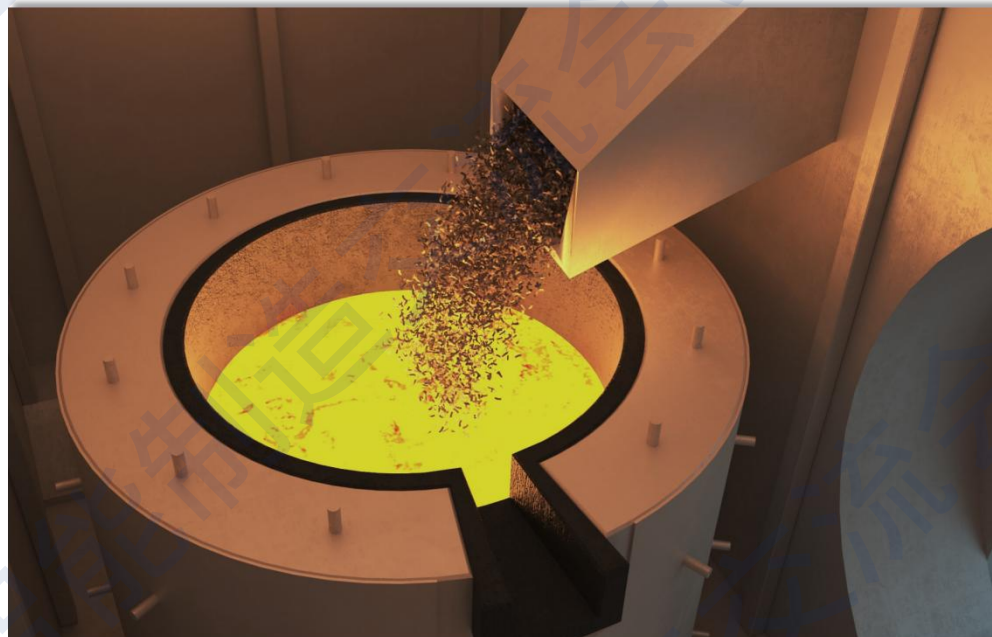
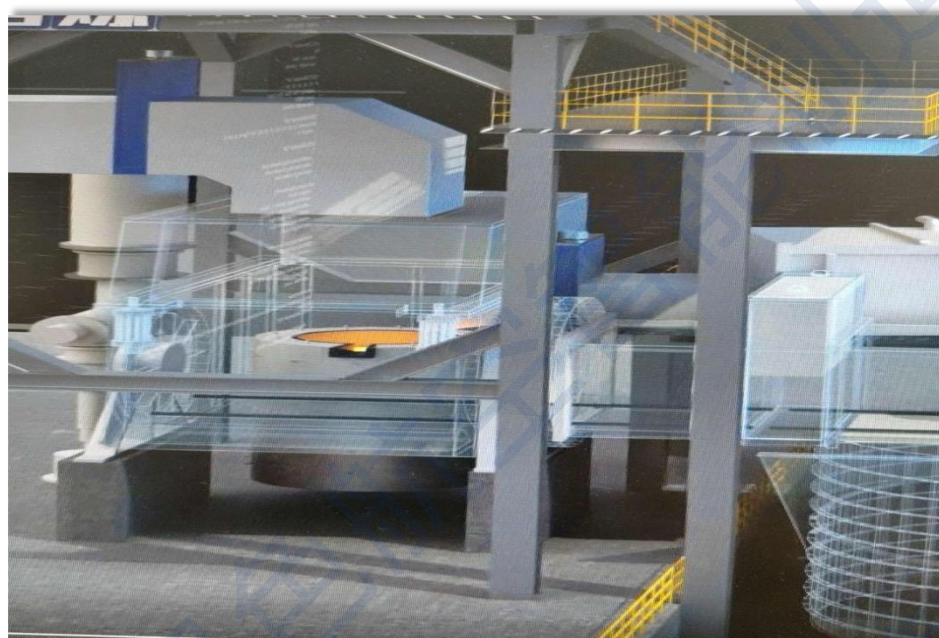


根据返回料来源进行采样分析，优化清洗过程参数，分析清洗后返回料的纯净度，根据表面清洁度及残余元素含量，进行分级判定、分类存放，分级使用，为不同品质的高温合金提供合格的原材料。建立了返回料分级管理技术，形成了《返回料战略供应商回收管理规范》、《返回料管理规范》等。

返回料生产高温合金高纯净低偏析熔炼技术



关键技术1 设计了屑状返回料自动连续加料设备



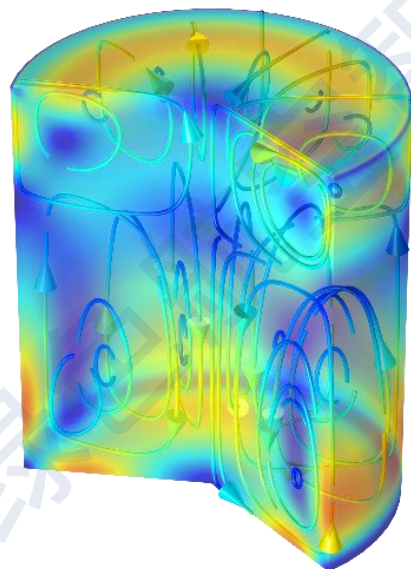
- 针对返回料料框装料方法，加料次数多、散落量大、不能连续加料、效率低的问题，自主设计了自动连续加料系统，实现了屑料连续加入，最大加入量可达到 $8\sim 10\text{kg/s}$ ，6吨真空感应炉采用70%车屑料返回比生产，生产效率可高达 $1000\text{kg}/60\text{min}$ ，相较于采用料框装料，每炉钢冶炼时间缩短2h。

含返回料高温合金高纯净、低偏析熔炼技术

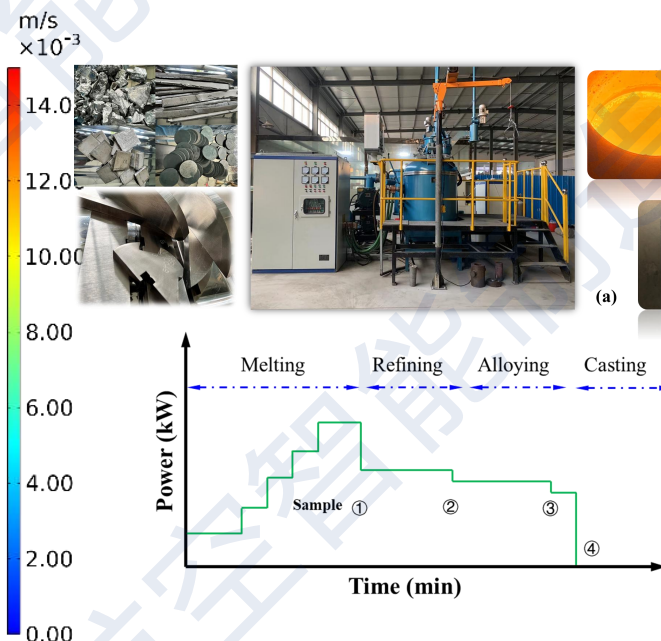


关键技术2 优化了高比例返回料真空感应熔炼超纯净精炼工艺

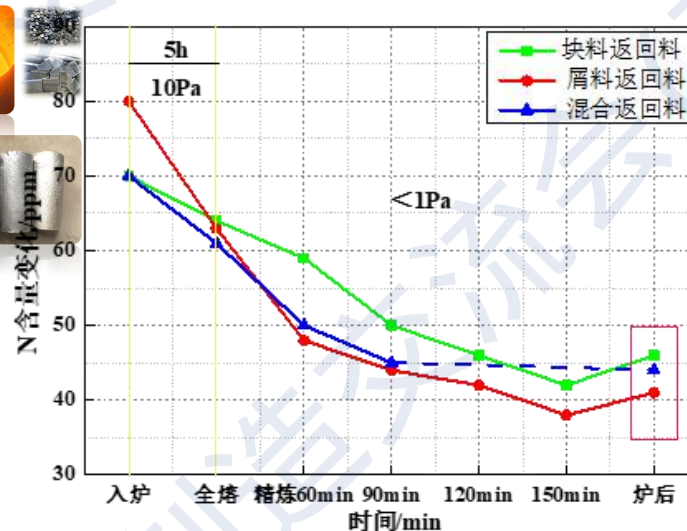
熔炼过程数值仿真



工艺参数优化



工业应用效果

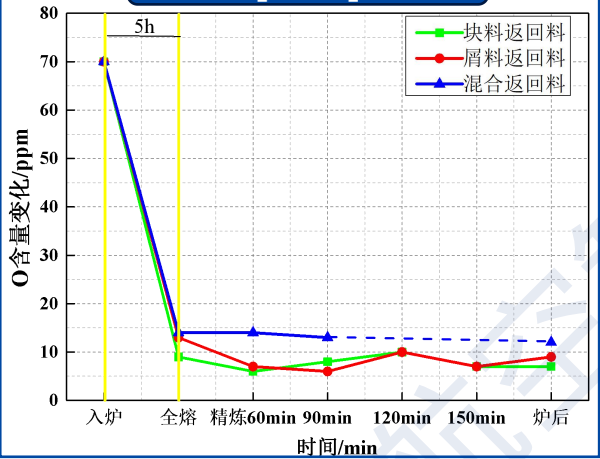


- 建立了真空感应熔炼下的脱气动力学数学模型，揭示了精炼时间、真空度、浇注温度对气体及夹杂物的影响规律，优化了高比例返回料真空感应熔炼工艺参数，实现了N、O、S、氧化物和氮化物的高效去除。

返回料纯净化熔炼——氧和硫的脱除



过程[O%]变化

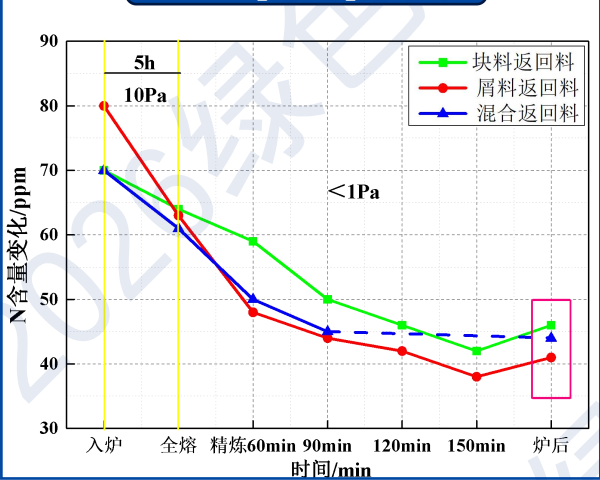


- 脱氧反应主要发生在熔化期，脱氧率可以达到80%；在整个精炼过程中，基本不发生脱氧反应；
- 返回料脱氧速度更快，全熔完成后 [O] 已降低至 10ppm 以下。

返回料与全新料全熔与出钢[O%]

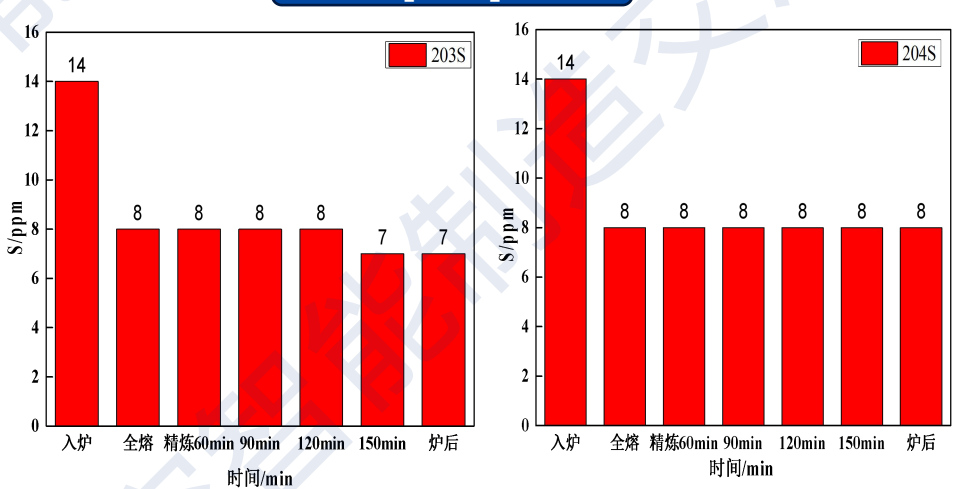
炉号	返回料比例	全熔O/ppm	出钢O/ppm
2K20298	0	15	10
2K20299		16	9
2K20301		20	8
2K20302		23	9
2K20303		19	11
2K20400	70%	14	10
2K20402		10	10
2K20403		10	9
2K20404		10	8
2K20405		7	11

过程[N%]变化



- 脱氮主要发生在精炼期，说明真空度越高，脱氮效果越好，氮含量越低；
- 随着时间延长，氮含量持续降低，有必要进一步研究脱氮模型；

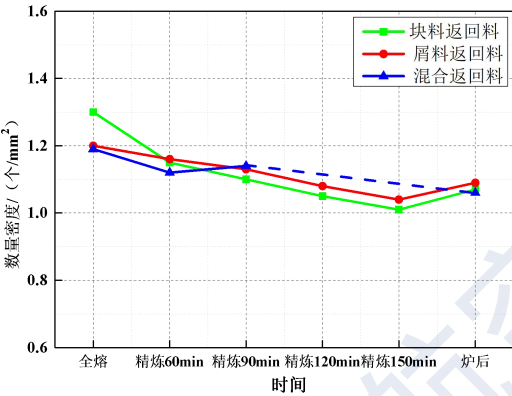
过程[S%]变化



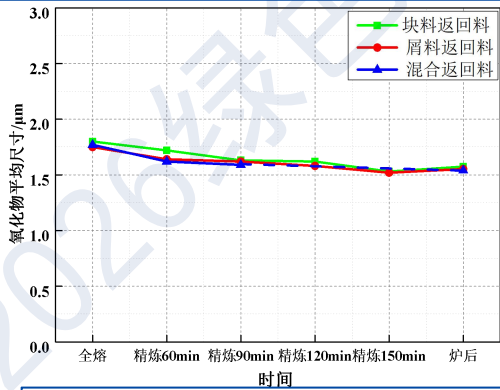
- 硫含量在全熔后就降低到 8ppm 以下，且不再继续脱除。

返回料纯净化熔炼——氧化物夹杂的控制

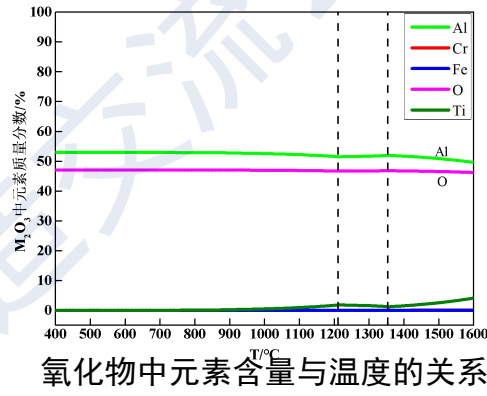
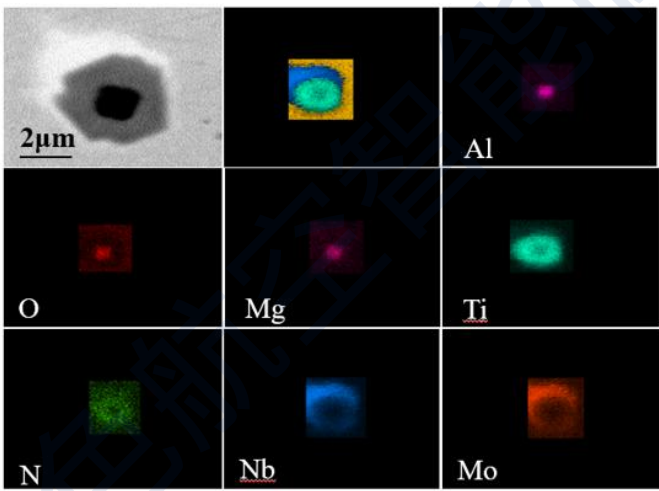
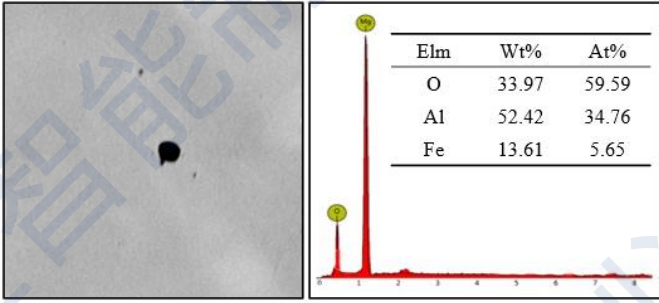
■ GH4169合金的固相线温度1214 °C，液相线温度1355 °C，M₂O₃析出温度1600 °C，精炼温度1500–1550°C其析出温度远远高于液相线温度，在熔炼温度下就会形成氧化物； O对M₂O₃的析出量有明显影响，成倍数增加。



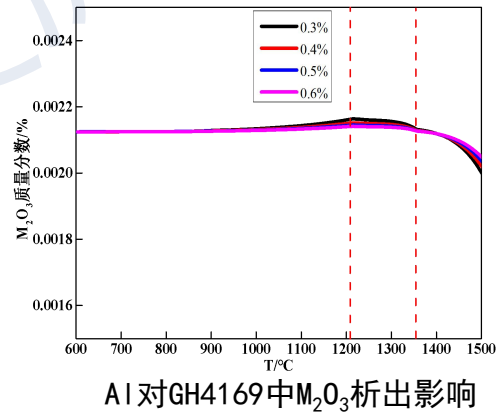
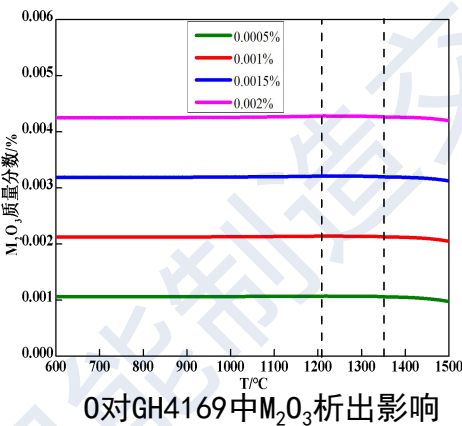
氧化物数量密度持续降低，出钢有所增长，精炼后1.0–1.1个/mm²



氧化物平均尺寸精炼比全熔减小，之后基本保持稳定在1.5–1.6μm



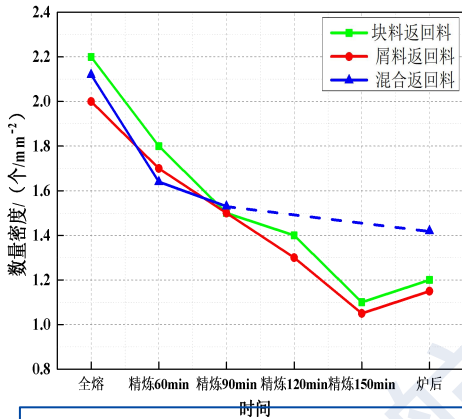
- 通过平衡相图软件JMatPro计算，如左图，GH4169合金中M₂O₃相中主要有Al、O、Ti三种元素；其中主要是Al与O结合生成的氧化物夹杂；
- 热力学计算结果与扫描电镜下观察的夹杂物基本吻合；
- 重点分析Al₂O₃夹杂的形成机理和影响因素。



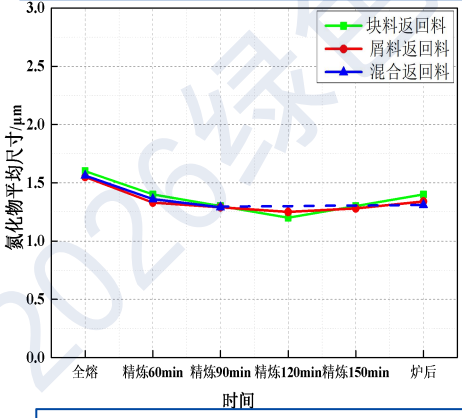
- O对M₂O₃的析出量有明显影响，成倍数增加；Al含量影响不大；
- 为减少氧化物夹杂，需要将氧脱除到尽量低。

返回料纯净化熔炼——氮的脱除

■ GH4169合金中单纯的氮化物有TiN、NbN，复合夹杂物主要是以(Mg、Al)O、Ti(C、N)为形核中心；MN开始析出温度1550℃，高于液相线温度，在熔炼温度下就会形成氮化物；N含量对M_N的析出量有明显影响，最大析出量主要与N有关。



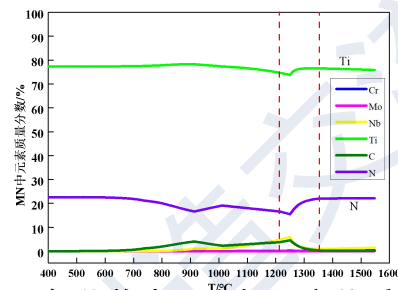
氮化物数量密度随氮降低持续降低，出钢1.1~1.4个/mm²



氮化物平均尺寸精炼比全熔减小，出钢稳定在≤1.5μm

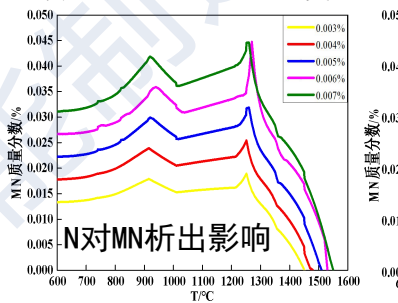
时期	类别	二维形貌	能谱
全熔结束	NbN		
精炼 60min (加 Al、Ti)	TiN		
精炼 90min	TiN		
精炼 120min	Ti(C,N)- (Nb,Mo)		
精炼 150min	(Mg,Al)O- Ti(C,N)- (Nb,Mo)		
炉后	(Mg,Al)O- Ti(C,N)- (Nb,Mo)		

一种是单纯的氮化物，一种是复合夹杂物。

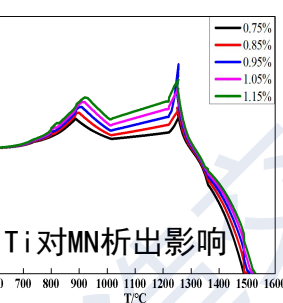


氮化物中元素与温度关系

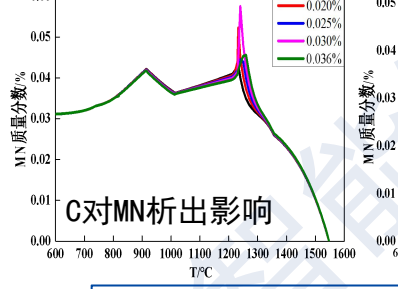
MN相中主要为Ti、N、Nb、C四元素；靠近固相线时，随温度下降氮化物中Ti、N元素有所下降而Nb、C元素含量有所提高。



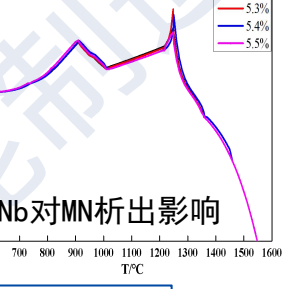
N对MN析出影响



Ti对MN析出影响

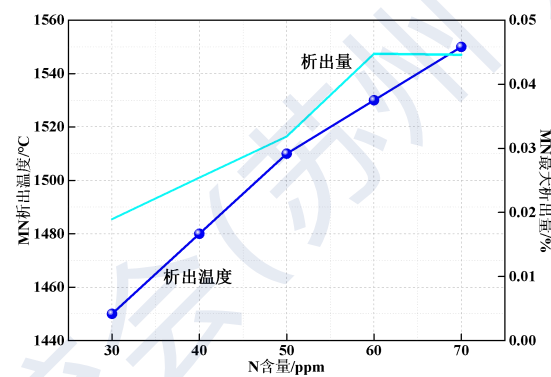


C对MN析出影响

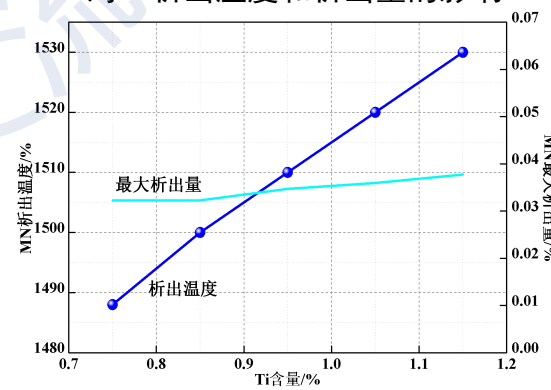


Nb对MN析出影响

对MN析出的影响，N>Ti>C>Nb。



N对MN析出温度和析出量的影响



Ti对MN析出温度和析出量的影响

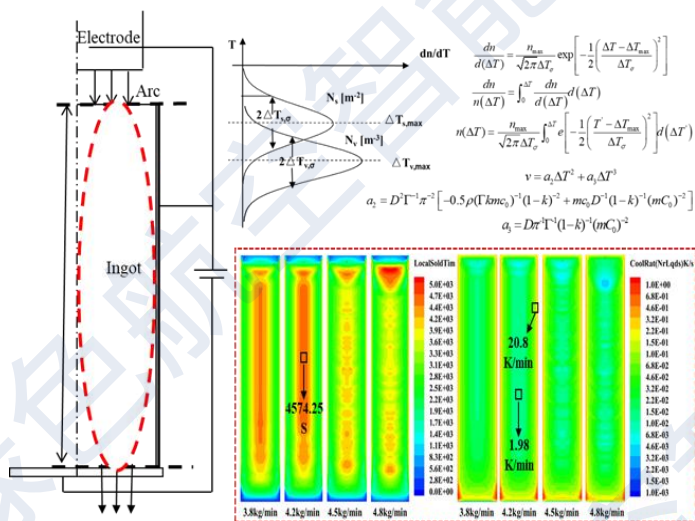
随N、Ti含量升高MN析出温度升高；N对最大析出量影响大，Ti对最大析出量几乎无影响；氮化物夹杂的控制主要取决于N含量。

含返回料高温合金高纯净、低偏析熔炼技术

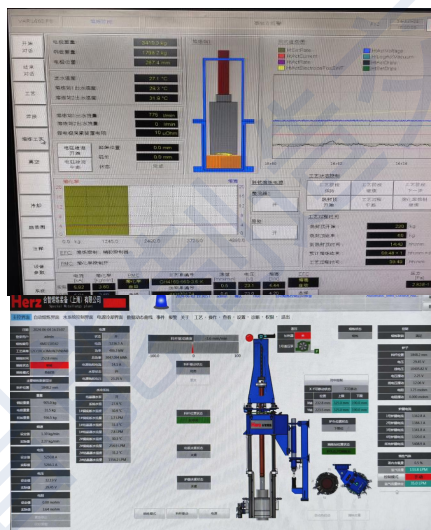
关键技术3 面向大尺寸高温合金重熔凝固的元素偏析控制



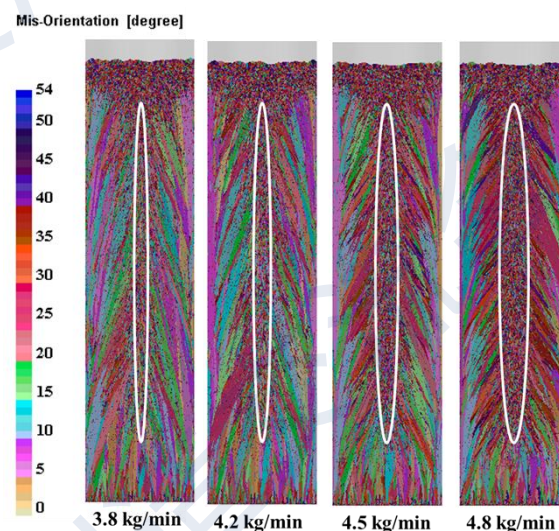
ESR/VAR熔凝模型



参数智能调控



高均质铸锭制备

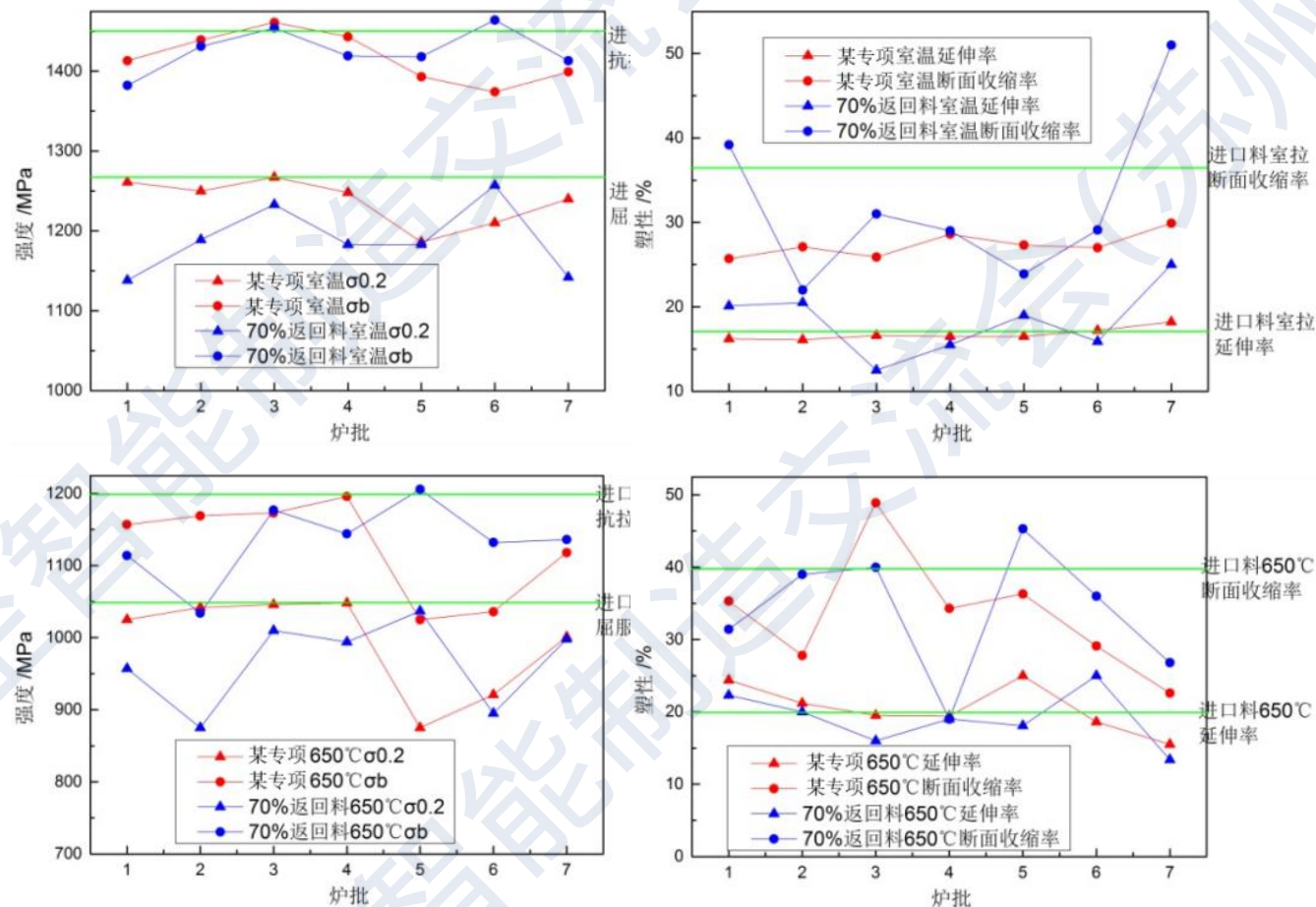
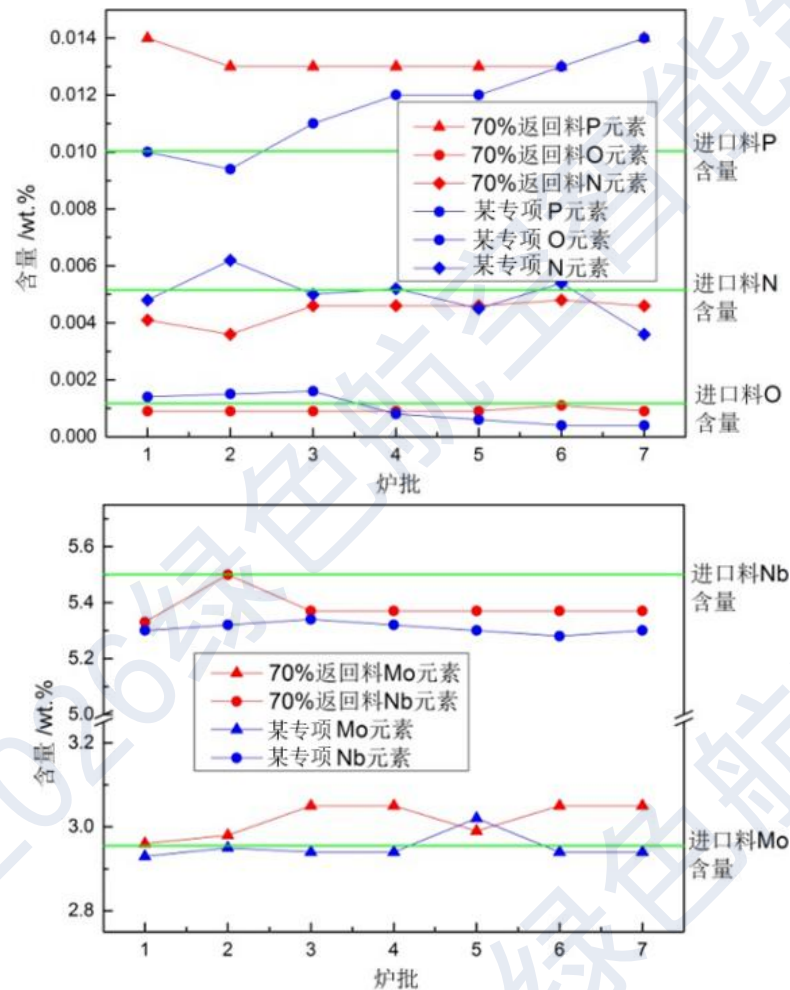


- 建立二维轴对称稳态工艺条件下的电渣重熔和真空自耗重熔计算模型，模拟不同工艺条件下熔池形状、温度分布、合金元素偏析规律，优化重熔工艺参数，钢锭偏析指数由原来0.3降低到<0.1，实现了电极恒熔速纯净化冶炼及钢锭偏析的精准控制。



高返回比GH4169成分性能与进口料、国产全新料工艺对比

- 累计70%返回料的GH4169大规格锻制棒材1200炉/批，全部满足XX发动机盘件用棒材标准XX10-0313；
- 选取7炉棒材的杂质含量控制水平、关键力学性能等与进口料、国内全新料工艺对标，基本相当。



高返回比GH4169棒材蠕变失效分析

不同温度下的断口形貌分析：

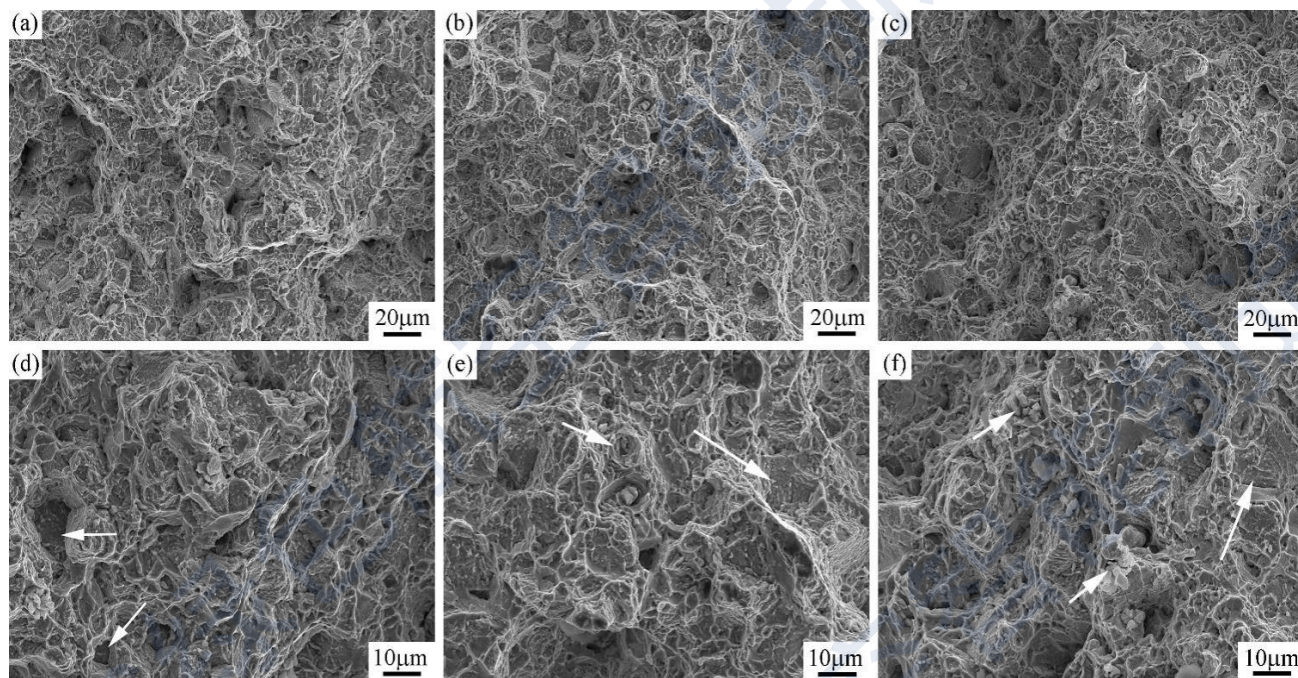


图6-9 GH4169合金不同蠕变温度下的蠕变断口形貌

(a) 650 °C ; (b) 670 °C ; (c) 690 °C ;

(d) (e) 和 (f) 分别为 (a) (b) 和 (c) 的放大图

- 图6-9为GH4169合金不同蠕变温度下的蠕变断口形貌，当蠕变温度650 °C时，断口表面凹凸不平，韧窝尺寸大小不一，亮白色撕裂棱数量较多，析出物 δ 相数量较少，尺寸较小；当蠕变温度670 °C时，韧窝以浅韧窝为主，撕裂棱数量减少， δ 相数量略微增加；当蠕变温度690 °C时，韧窝数量减少， δ 相数量增多。
- 蠕变裂纹均产生于 δ 相处， δ 相与 γ'' 相成分相同但晶格组织不同，尺寸变大、强度降低，虽然其塑韧性比 γ'' 相提高，但与基体 γ 相比仍偏脆，容易成为应力集中点成为裂纹源。因此，高温时 γ'' 相向 δ 相的转变、长大是蠕变失效的主要原因，从断口上未发现明显夹杂物或其他大颗粒析出物等，与采用返回料冶炼无关。

高返回比GH4169疲劳失效分析

疲劳断口分析

- 低周疲劳属于应变疲劳模式，残余压应力抵抗由外力在表层引起的拉应力，可使裂纹扩展速率减慢；随循环周次增加，残余压应力持续降低，抵抗裂纹萌生和扩展的能力降低，裂纹可能萌生并扩展；与疲劳断口分析中裂纹源于表面，且疲劳源数与残余应力演变规律一致；
- 裂纹不是在夹杂物处萌生，而是萌生于晶界和滑移带处。

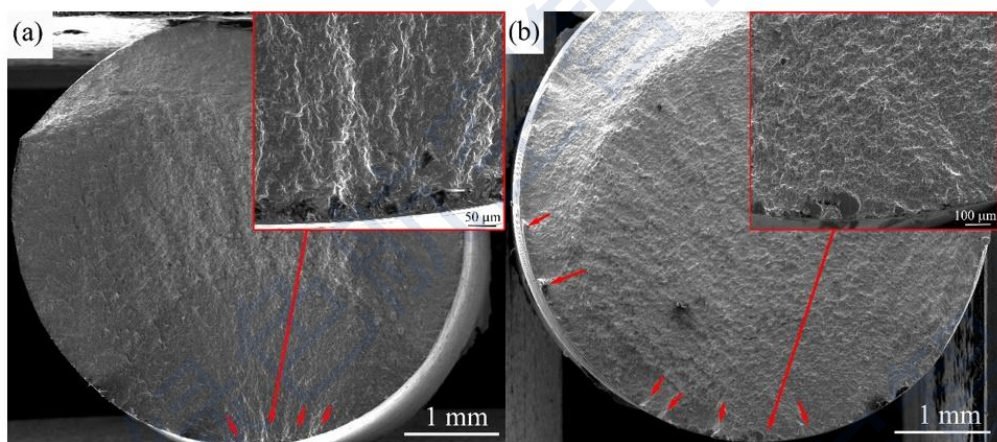
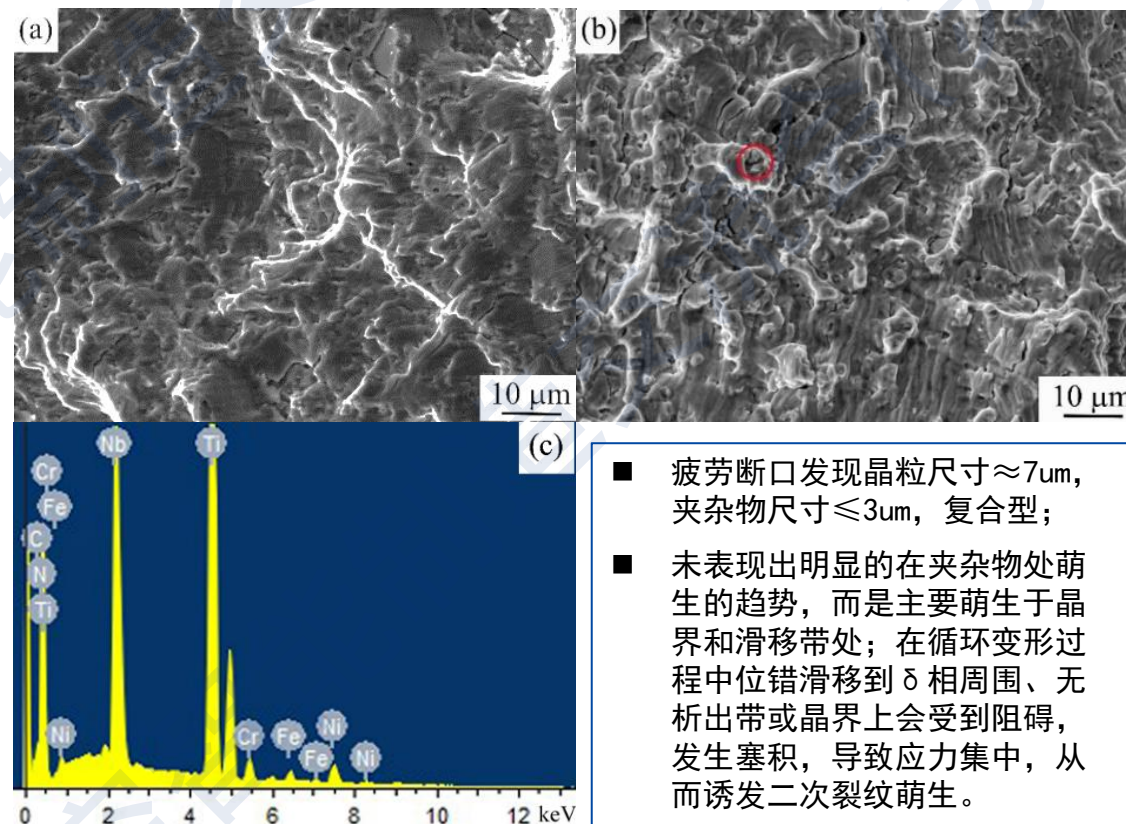


图 7-12 总应变幅 0.5 % (a) 和 1.0 % (b) 时 GH4169 合金的疲劳断口宏观形貌，图中红色箭头所指的为疲劳源，右上角为疲劳源区的放大形貌。

- 疲劳裂纹均起源于试样表面。表面晶粒没有受到其他晶粒的约束，容易产生塑性变形，易引起应力集中。随总应变幅增加，疲劳源数量明显增加，这与残余应力的演变规律是一致的。
- 在所有的总应变幅下，疲劳失效断裂后试样表面的残余压应力都发生了松弛，意味着合金表面抵抗裂纹萌生和扩展的能力也下降，表面易于产生裂纹，并引起断裂失效。



- 疲劳断口发现晶粒尺寸 $\approx 7\mu\text{m}$ ，夹杂物尺寸 $\leq 3\mu\text{m}$ ，复合型；
- 未表现出明显的在夹杂物处萌生的趋势，而是主要萌生于晶界和滑移带处；在循环变形过程中位错滑移到 δ 相周围、无析出带或晶界上会受到阻碍，发生塞积，导致应力集中，从而诱发二次裂纹萌生。

返回料再生应用

■ 通过公司研究工艺优化，70%返回比再生GH4169合金在国内首次通过航空发动机试车考核，并形成产业化；生产的盘锻件各项性能也完全满足相关标准要求，与进口材料相当，已于2024年底完成验证考核。

某型机采用中航上大再生利用 GH4169 合金棒材制备机匣前段

长试后评审意见

2022 年 3 月 3 日，中国航发西航组织召开了 X10 发动机采用中航上大再生利用 GH4169 合金棒材制备机匣前段长试后评审会（函审）。参加函审的有空装驻沈阳地区第二军事代表室、空装驻西安地区第二军事代表室、海装驻西安地区第五军事代表室、中国航发动力所、航空工业宏远、中航上大等单位，会议成立了评审组（名单附后），审查了中国航发西航作的《X10 机采用中航上大再生利用 GH4169 合金棒材制备机匣前段长试技术总结》，经质询与讨论，形成评审意见如下：

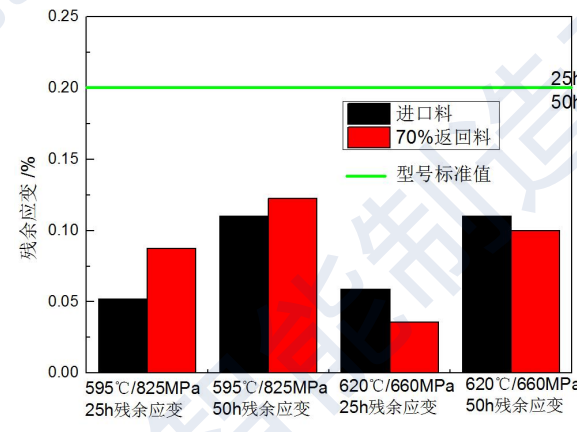
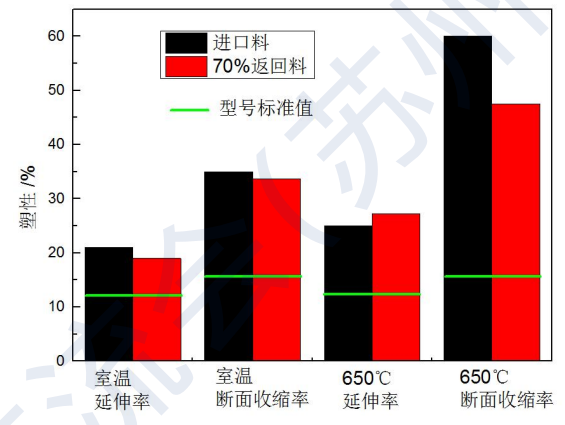
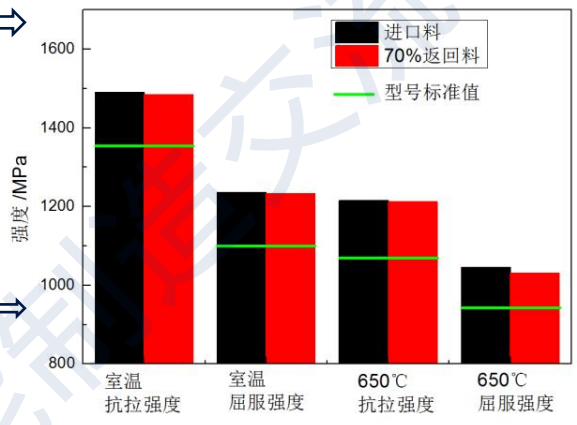
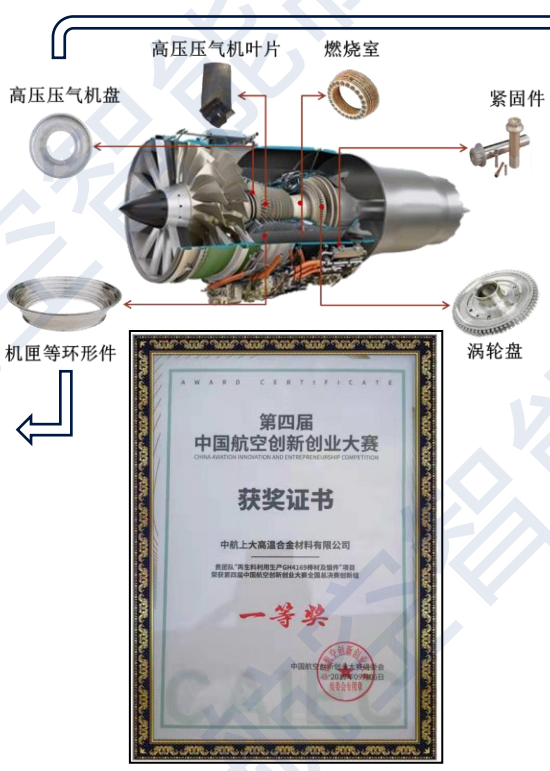
1、提供的资料齐全完整，符合评审要求；

2、航空工业宏远采用中航上大再生利用 GH4169 合金棒材制备的机匣前段锻件，经出、入厂检验，各项性能指标符合锻件标准及技术协议要求；中国航发西航按现行工艺完成了零件加工，加工过程未见冶金异常，零件经检验均符合设计图要求。

3、采用中航上大再生利用 GH4169 合金棒材制备的机匣前段搭栽第 30S10C21138 号发动机通过了长试考核，长试后分解检查未见异常。

评审组同意航空工业宏远采用中航上大再生利用 GH4169 合金棒材制备的机匣前段锻件（S10.44.2100D）通过长试考核后评审，可用于太行发动机生产。

评审组长：宋兴
2022 年 3 月 3 日



- 试制XX发动机低压涡轮一级盘、篦齿盘、高压压气机5级盘等零部件；
- 零部件经解剖分析，组织、力学性能、超声探伤水平完全满足国内型号标准要求，且与国外料锻制的锻件关键性能水平相当。
- 已于2024年底完成试车考核。

- 航空发动机低压涡轮一级机匣于2019年4月通过550小时长期试车考核；
- 航空发动机高压涡轮机匣前段于2021年11月通过550小时长期试车考核；
- 年产量500吨以上，累计装配发动机200余台，产品质量稳定、可靠。



自主研发形成多项科技成果

多项技术成果经鉴定处国际先进或国内领先水平



2019年5月

低成本高品质航空发动机
高温合金GH4169棒材制备
和应用技术
国内领先、国际先进



2019年5月

航空发动机紧固件用高性能
变形高温合金冷拉棒材
制备及应用技术
国内领先、国际先进,
GH4169、GH4141、GH6159
牌号产品实现替代进口



2022年5月

高低温冲击韧性双相不锈钢
锻棒件研制和应用
国际先进, S32205、
S32750牌号产品实现国产
替代进口



2022年5月

核级超纯净、超低铁素体
316系列奥氏体不锈钢锻棒
件的研制和应用技术
国际先进, 316H、316L牌
号产品质量水平超过国际
产品



2022年6月

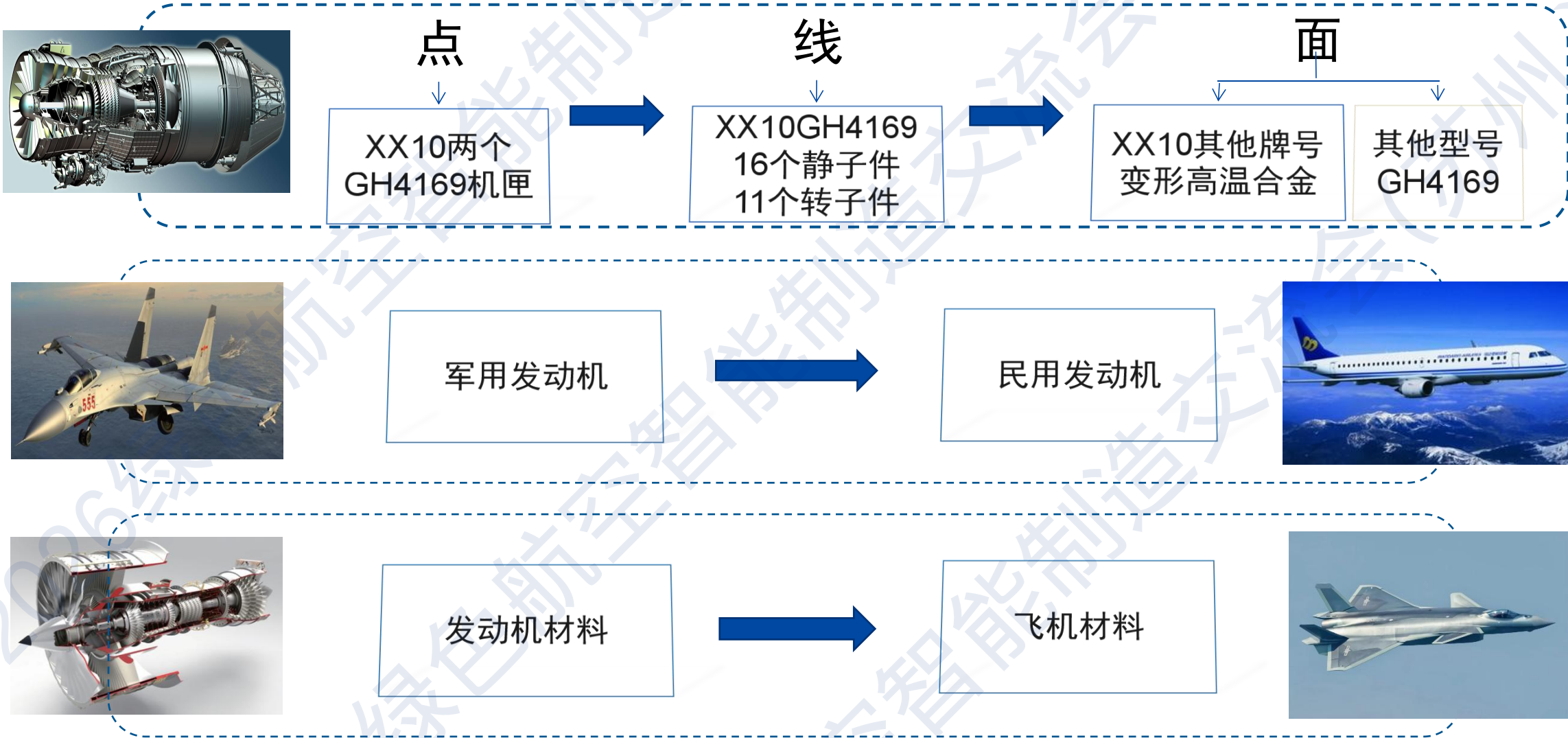
航空航天超高强度、高纯度、
高组织均匀性合金棒件的研
制及应用
国内领先18Ni系列、300M、
9310、16Cr3NiWMoVNB牌号
产品质量达到国际产品水平

承担6项国家级、6项省级、40多项军工集团科研项目

项目名称	项目来源/合作单位
高温合金净化与难变形薄壁异形锻件制 备技术	科技部 (2021年度重点研发计划)
高性能高质量***高温合金实施方案	工信部 (工业强基项目)
GH4169棒材及锻件***利用生产技术	装备发展部 (“***行动”创新成果转化应用项目)
铸造高温合金**技术研究	国防科工局
***用变形高温合金冷拉棒材工程化研制	国防科工局
***镍基合金材料研制	国防科工局



再生技术推广应用



C 目录

CONTENTS



材料兴国

强军富民

守正创新

精准严谨

01

中和上大简介

About us of ZHSD

02

核心技术及应用

Core Technologies and Applications

03

战略意义

Strategic Significance

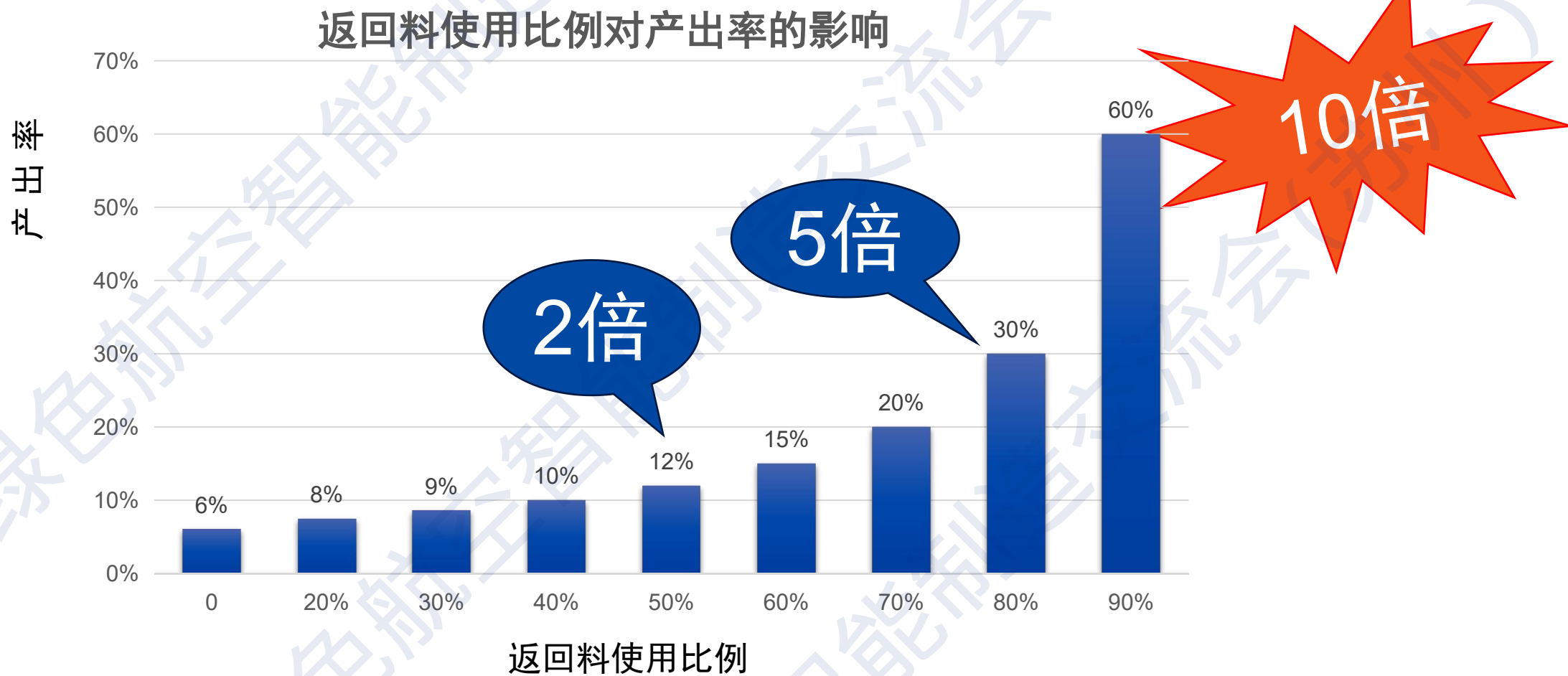


典型牌号的原材料成本及制造周期的对比

牌号	类别	原材料成本/万元	周期/天
GH4169	全新料	16.1	90
	本项目	11.2	45
GH738	全新料	20.4	90
	本项目	14.3	45
GH6159	全新料	24.4	120
	本项目	16.6	60

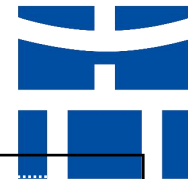
- 减少矿石开采、提炼等环节，实现短流程快速制造，有效提升我国军用飞机等武器装备用材料的快速制造能力，可全面应对和保障急时、战时循环生产速度。
- 资源循环利用，大幅降低航空高温合金材料制造成本，部分典型牌号材料可实现20-30%的成本降幅。

低成本--资源高效循环利用



同样的资源投入，国际先进企业产出率是我国的5~10倍。

高质量稳定性制造



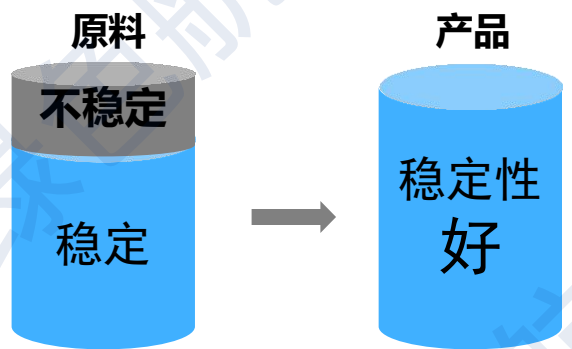
新料

矿冶产品，且为多种新料混合，残余元素、有害元素波动较大。

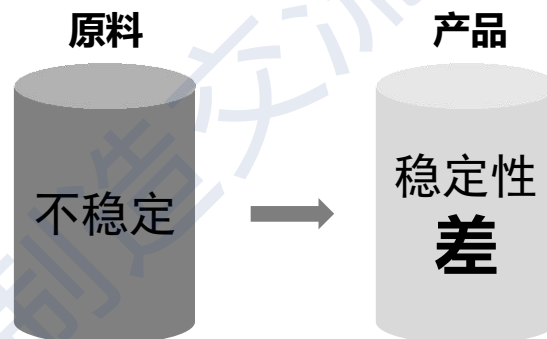
返回料

经多次真空提纯、精炼后的材料，材料中所有残余元素、有害元素、纯净度指标等稳定且可控。

如图所示：美国在批次生产时，用70%以上的成分稳定的返回料；而国内全是成分不稳定、不可控的新料。返回料比例越高，入炉原料带入的残余元素、有害元素等含量越稳定可控，对各批次产品的质量波动影响也会越小，因此，使用返回料冶炼会大大提升批次产品之间的质量稳定性。



美国：70%返回料+30%新料



中国：100%新料

■ 虽以“废料”生产，但产品质量不逊于全新料工艺，达进口同类材料水平，且有助质量稳定。

战略资源和国防信息安全保障



资源	中国储量 (万吨)	中国储量静态 保障年限	世界储量静态 保障年限	备注
镍	234.4	4	46	进口逐年加大
钴	4	2	99	极度短缺
铌	1.8	几乎全进口	—	难开采占95%
钼	149.8	25	—	按开采量15年
钨	64.3	21	53	按开采量13年

- 高温合金再生循环利用技术实现了对镍、钴、铌等资源的高效回收利用，对保障国家重要战略资源具有重大意义。
- 闭环再生体系的建立，实现了军工战略材料脱密和国防信息链闭环，保障了国防信息安全。



2020绿色智能制造交流会

感谢聆听！