



CEPC BST二极磁铁样机设计方案

汇报：朱光亮

合肥科烨电物理设备制造有限公司

2020年10月26日



- 一.BST二极磁铁项目介绍



- 二.屏蔽筒结构设计



- 三.屏蔽筒加工检测方案



- 四.线圈结构设计



- 五.线圈加工检测方案



- 六.装配及测量方案



- 七.科烨公司磁铁、磁体相关业绩



- 八、总结

一. BST二极磁铁项目介绍



■CEPC BST二极磁铁项目介绍

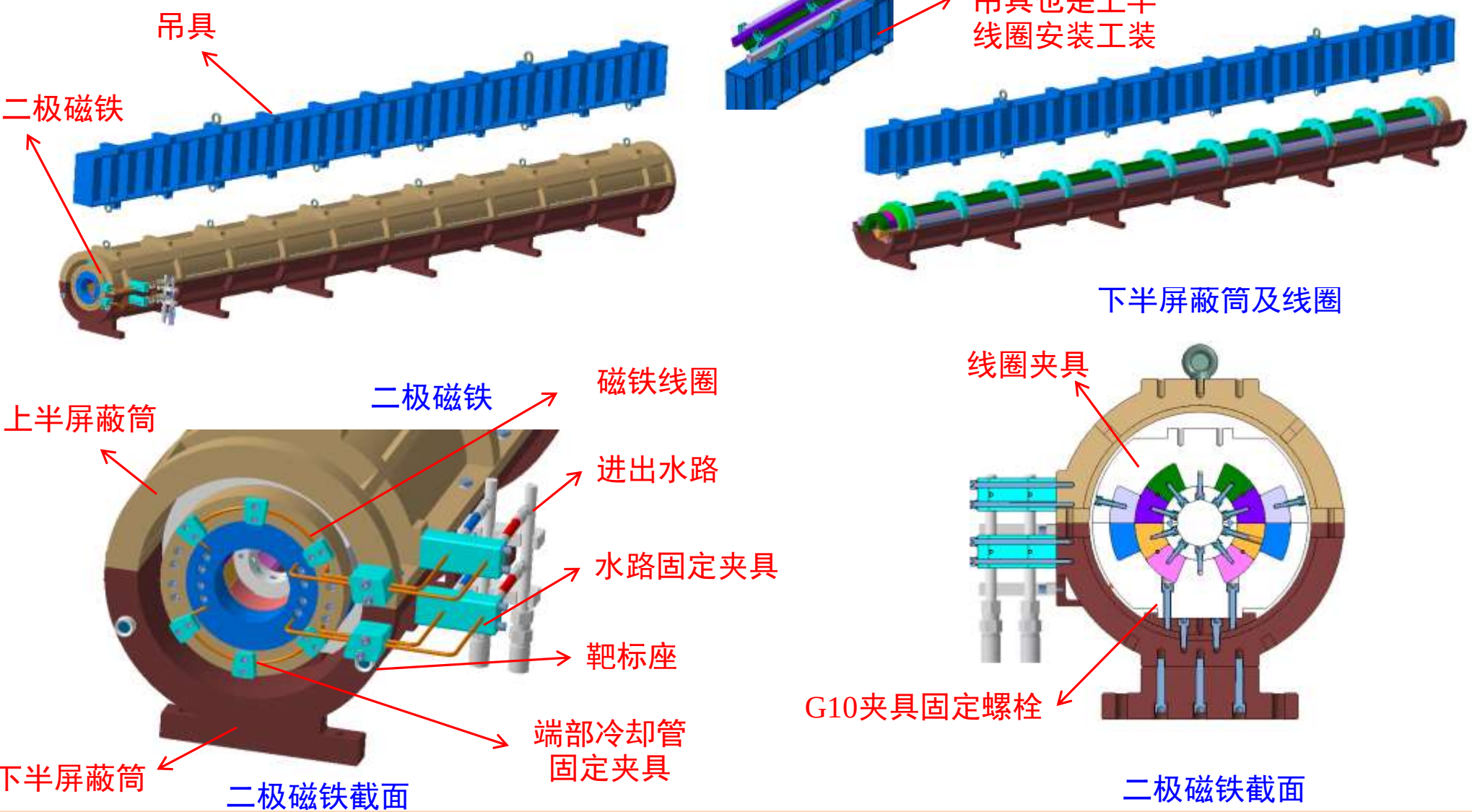
BST二极磁铁样件采用空心磁铁结构。二极磁铁主要包含内部线圈及外侧屏蔽筒，内部线圈为铝制导体，外侧屏蔽筒为20#材质。总装后线圈直线度、同轴度<0.1mm，屏蔽筒圆柱度<1mm

BST二极磁铁设计参数								
序号	BST-63B设计参数		序号	BST-63B设计参数		序号	BST-63B设计参数	
1	磁铁数量	1	18	电流[A]@10GeV	96	35	最大直流电压[V]@120GeV	1.1
2	磁铁气隙[mm]	63	19	平均电流[A]	733	36	感抗压降[mV]	79.7
3	磁场 [Gs]@175GeV	492	20	导线尺寸 [mm*mm]	I-A675R57-O-A248R13846	37	线圈R1[mm]	57
4	磁场 [Gs]@120GeV	338	21	导电截面[mm^2]	1973.2	38	线圈R2[mm]	100
5	磁场 [Gs]@10GeV	29	22	最大电流密度[A/mm^2]@120	0.59	39	线圈R3[mm]	138.46
6	磁有效长度 [mm]	4700	23	最大电流密度[A/mm^2]@175	0.87	40	线圈角度A1[°]	33.75
7	好场区宽度 [mm]	55	24	平均电流密度[A/mm^2]	0.37	41	线圈角度A2[°]	67.5
8	积分磁场均匀性	0.001	25	平均匝长[m]	11.00	42	线圈角度A3[°]	24.8
9	磁场上升时间[s]	4	26	单极导线长度[m]	33	43	线圈端部过桥长度[mm]	300
10	磁场平顶时间[s]	1	27	线圈导线总长[m]	66	44	线圈长度[mm]	4700
11	磁场下降时间[s]	4	28	直流电阻[mOhm]	0.94658	45	屏蔽筒内径[mm]	340
12	单极安匝数[At]@175GeV	5144	29	最大功耗[W]@175GeV	2783.0	46	屏蔽筒外径[mm]	360
13	单极安匝数[At]@120GeV	3477	30	最大功耗[W]@120GeV	1271.5	47	屏蔽筒重量[kg]	976
14	单极安匝数[At]@10GeV	288	31	平均功耗[W]@10-175GeV	1113.2	48	线圈重量[kg]	385
15	单极线圈匝数	3	32	平均功耗[W]@10-120GeV	508.6	49	磁铁总重[kg]	1400
16	电流[A]@175GeV	1715	33	电感[mH]	0.300	50	所有磁铁最大功耗[kW]	2.783
17	电流[A]@120GeV	1159	34	最大直流电压[V]@175GeV	1.6	51	所有磁铁最大功耗[kW]	0.5086



一. BST二极磁铁项目介绍

■CEPC BST二极磁铁整体方案介绍

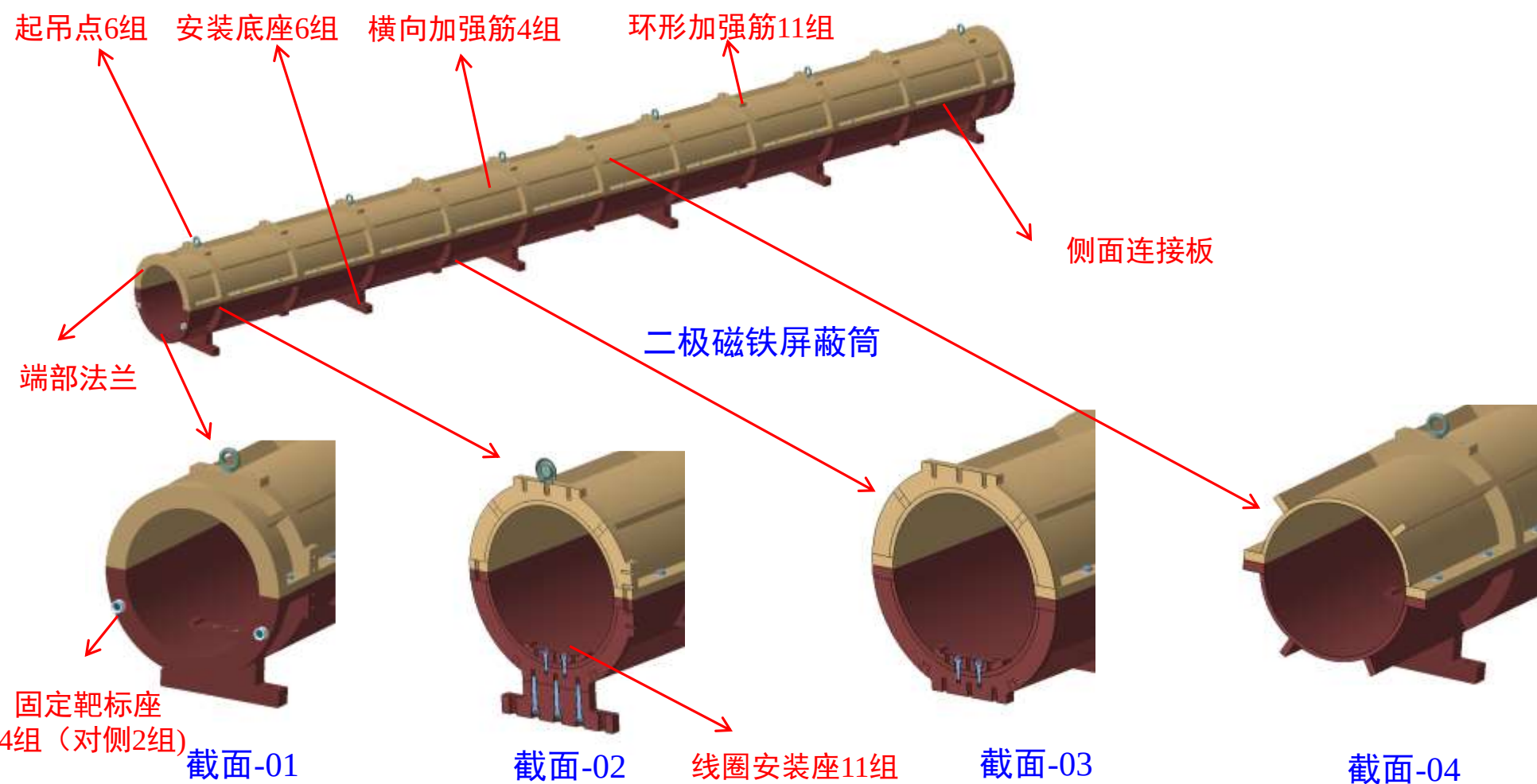




二. 屏蔽筒结构设计

1、屏蔽筒结构设计

屏蔽筒采用上下分瓣设计，装配方式为螺栓连接。屏蔽筒由筒体、安装底座、横向加强筋、环形加强筋、侧面连接板、端面法兰等通过焊接成整体，焊后去应力退火、机械加工保证尺寸精度



二. 屏蔽筒结构设计



2、屏蔽筒设计参数

序号	项目	屏蔽筒设计参数
1	结构形式	上下分体设计，采用螺栓连接
2	材质	筒体采用20#优质碳素结构钢，其余采用Q235普通碳素结构钢
3	结构尺寸	外径 $\Phi 360\times$ 内径 $\Phi 340\times$ 长度5020mm
4	总质量	920Kg
5	筒体尺寸精度	内径 $\Phi 340\pm 0.5\text{mm}$ ，长度 $520\pm 0.5\text{mm}$
6	线圈安装座尺寸精度	11组共面平面度0.02mm
7	精度获得方法	焊后去应力退火、然后机械加工获得尺寸精度
8	表面处理方式	内壁涂抹防锈油，外壁喷油漆防锈

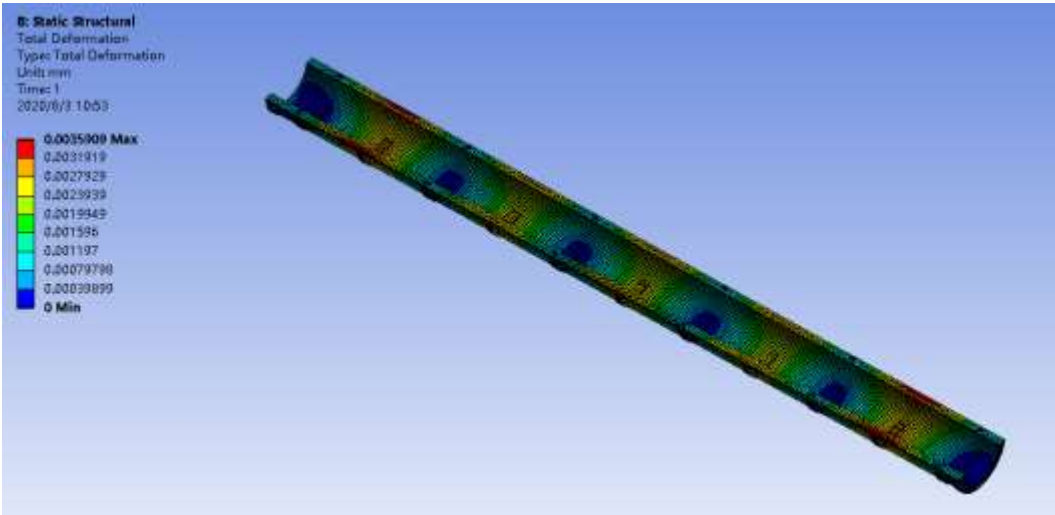
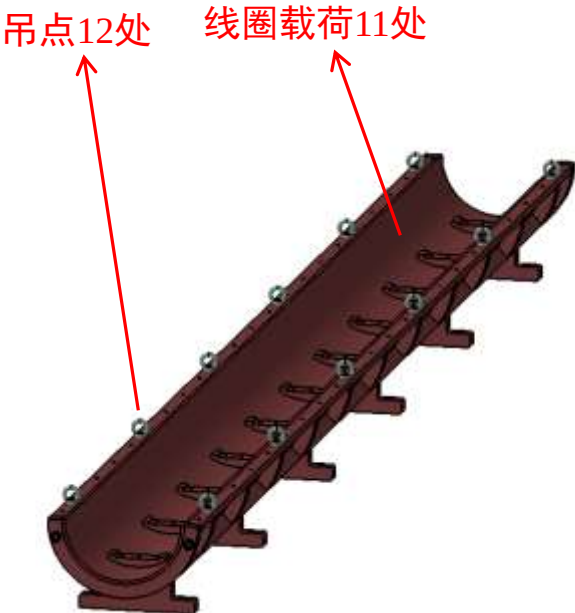
➤ 碳钢无缝钢管为20#材质，其化学成分及力学性能对比如下

20#和Q235化学成分及力学性能对比									
	化学成分%								力学性能
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	屈服强度
				≤					
20号钢	0. 17~0. 23	0. 17~0. 23	0. 35~0. 65	0. 035	0. 035	0. 25	0. 3	0. 25	245MPa
Q235	≤0. 22	≤0. 35	≤1. 4	≤0. 045	≤0. 045				235MPa

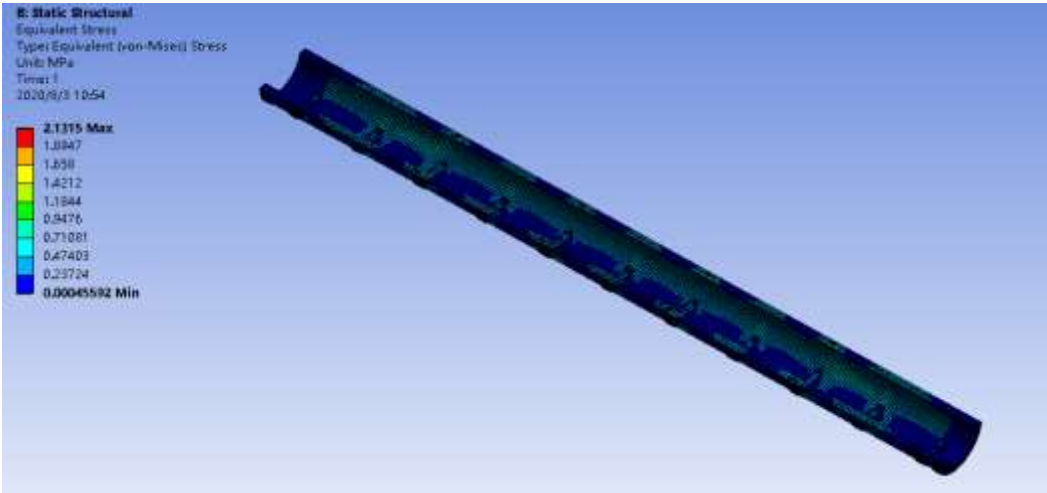


二. 屏蔽筒结构设计

3、下屏蔽筒应力及变形分析



下屏蔽筒最大变形0.0035mm



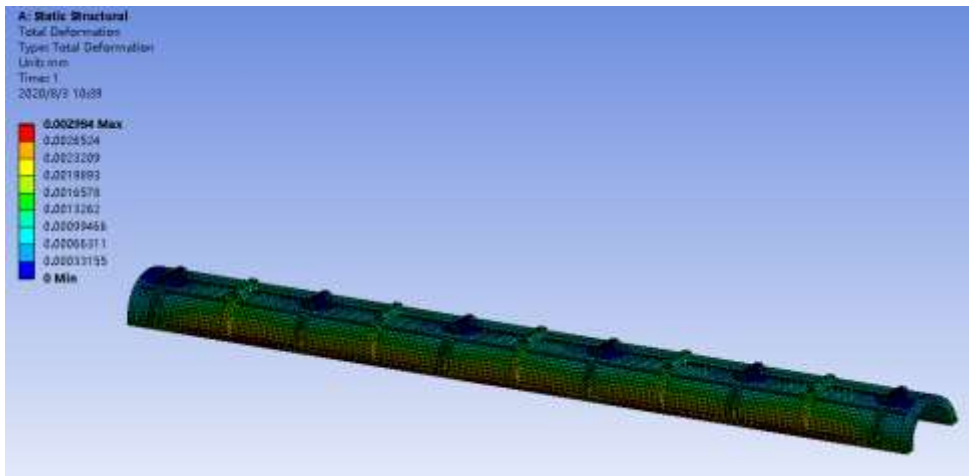
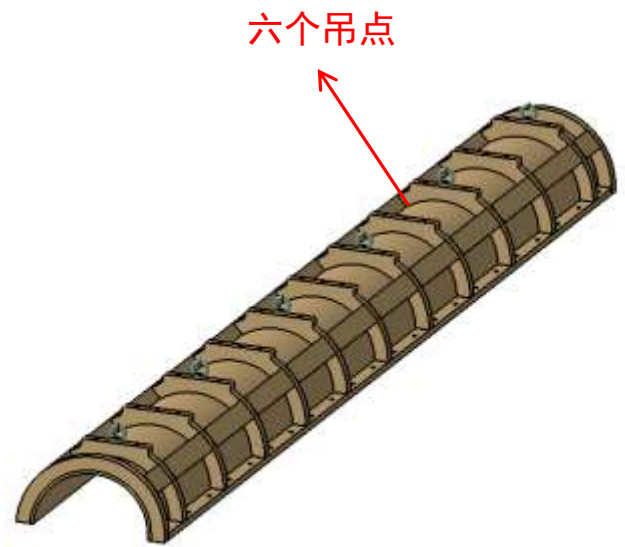
下屏蔽筒最大应力2.1315MPa

下屏蔽筒应力及形变分析			
载荷类型	下屏蔽筒	上屏蔽筒	线圈
载荷大小	自重	500Kg	500Kg
结论	变形为0.0035mm，安装后实际支撑为6个支撑，满足要求		

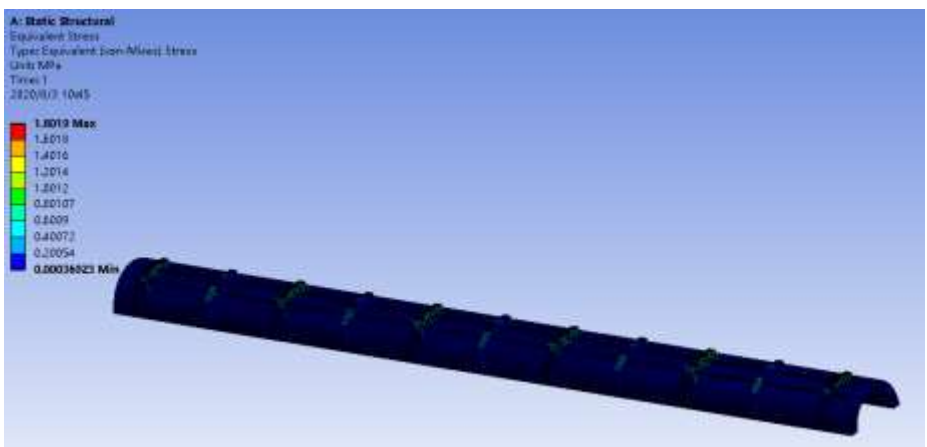


二. 屏蔽筒结构设计

4、上屏蔽筒应力及变形分析



上屏蔽筒最大变形0.003mm



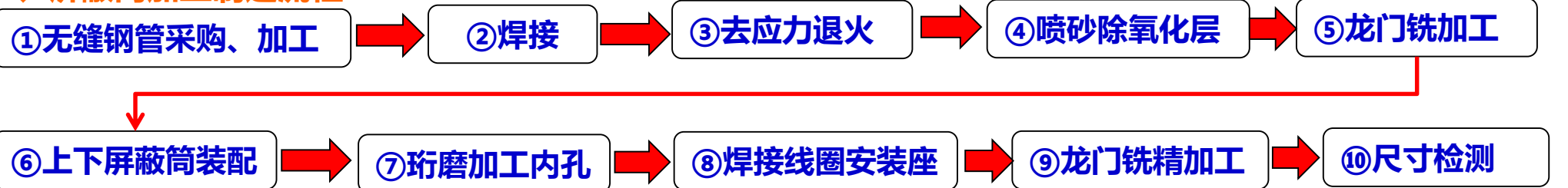
上屏蔽筒最大应力1.8MPa

上屏蔽筒应力及形变分析			
载荷类型	实际载荷	分析载荷	备注
屏蔽筒自重	自重	自重	
结论	满足要求		



三.屏蔽筒加工、检测方案

5、屏蔽筒加工制造流程

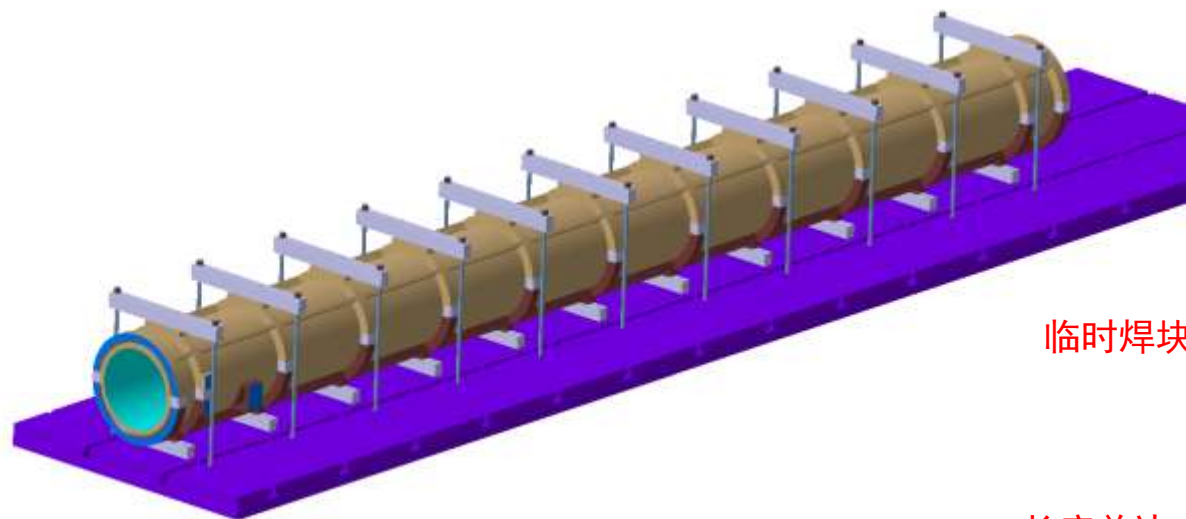


①无缝钢管采购、加工

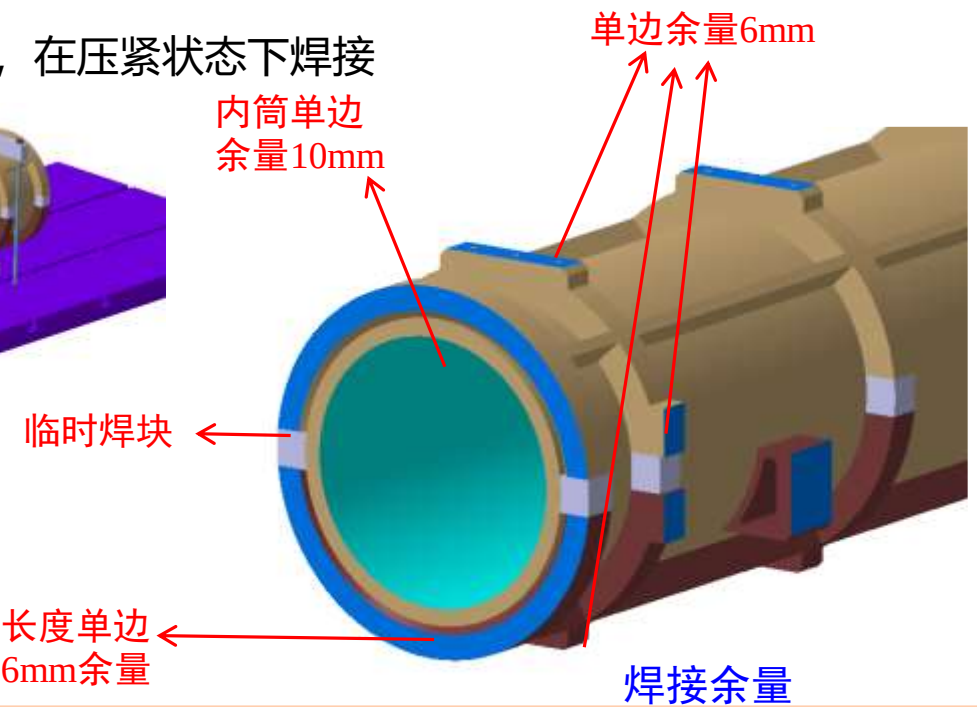
采购无缝钢管：外径 $\Phi 360 \times$ 内径 $\Phi 320 \times$ 长度6000mm，内径10mm加工余量。

②.焊接

1.整筒焊接：焊接在平台上进行，先采用整筒整体焊接，在压紧状态下焊接



整筒焊接

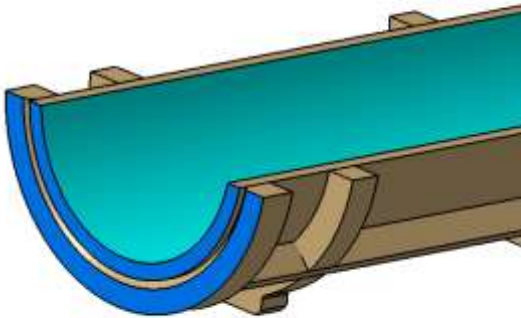




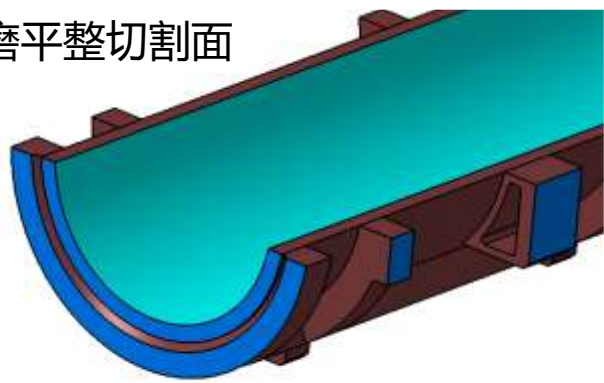
三.屏蔽筒加工、检测方案

②.焊接

2.分割：采用乙炔将上下整筒分割成两瓣，打磨平整切割面

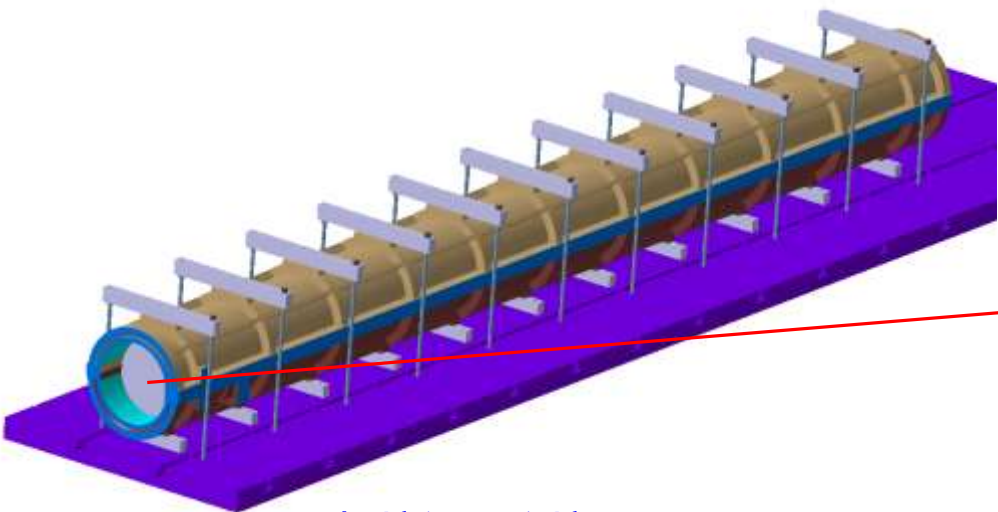


上半屏蔽筒-分割后

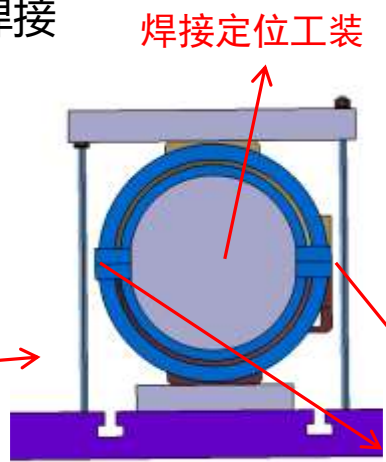


下半屏蔽筒-分割后

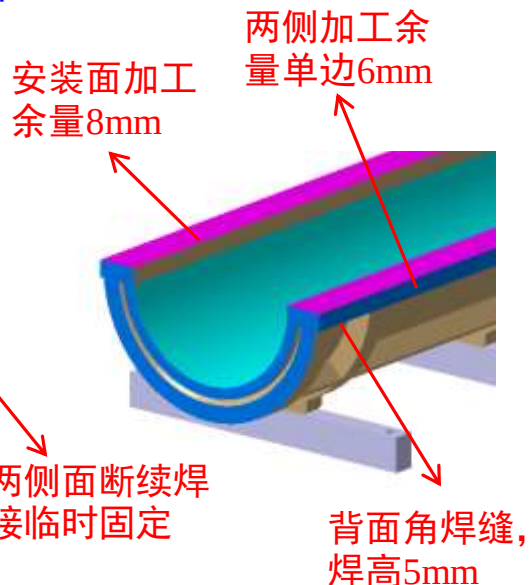
3.焊接侧面连接板：焊接在平台上进行，在压紧状态下焊接



焊接侧面连接板



11组定位模



侧连接板加工余量

焊接定位工装

安装面加工
余量8mm

两侧加工余
量单边6mm

两侧面断续焊
接临时固定

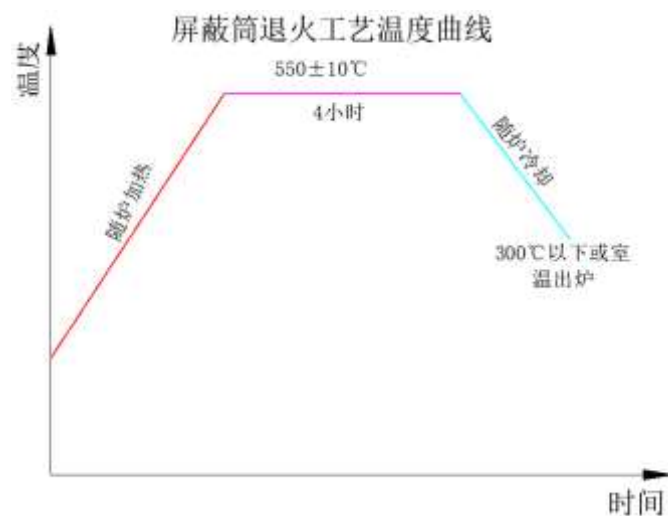
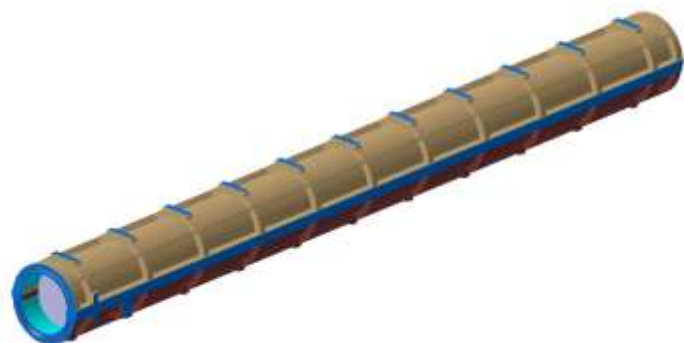
背面角焊缝，
焊高5mm



三.屏蔽筒加工、检测方案

③.去应力退火

上下屏蔽筒整体焊接应力退火处理



去应力退火



电阻式热处理炉

炉膛工作尺寸:

8000*3200*2000;

额定功率: 700kW;

控温区: 8区;

额定温度: 950℃;

均温区温差: ±5℃



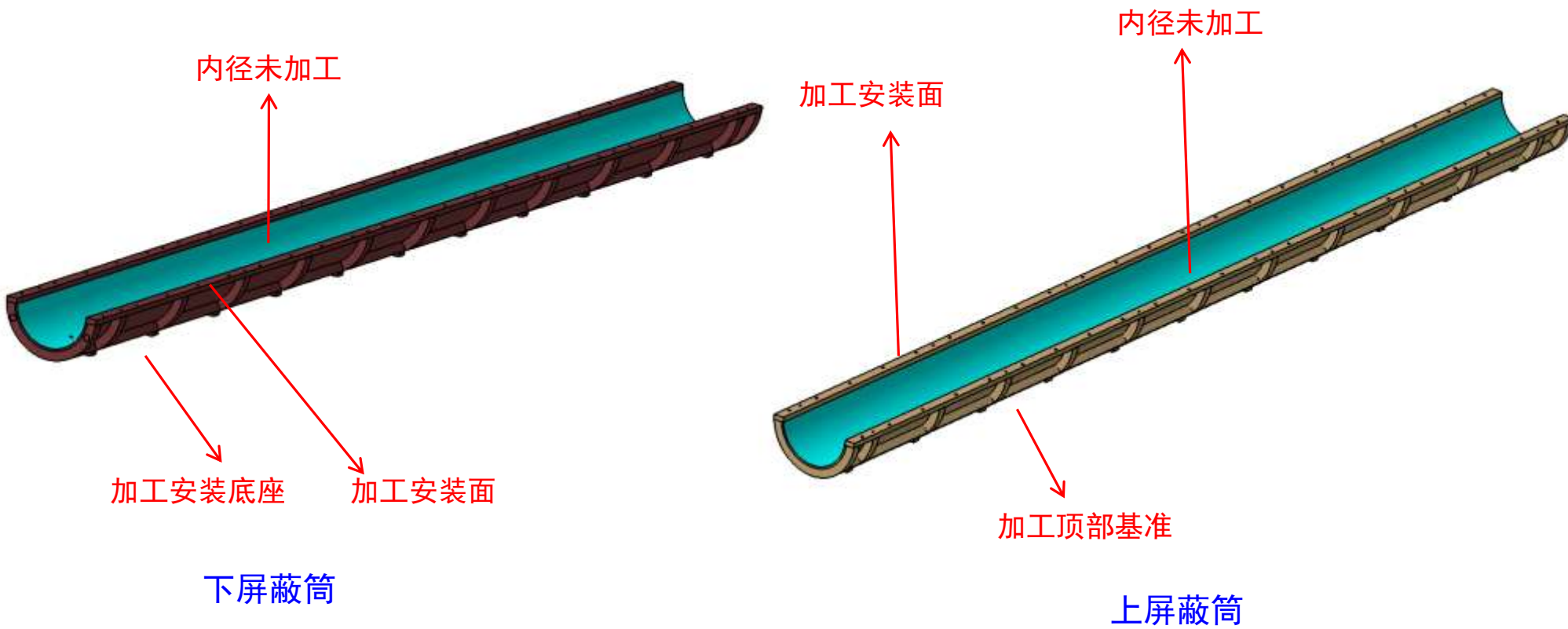
三.屏蔽筒加工、检测方案

④. 喷砂除氧化层

去应力退火屏蔽筒表面有高温氧化层，屏蔽筒外径及加强筋采用喷砂除去氧化层，为防止喷砂后生锈，喷完砂后喷一层防锈漆，

⑤. 龙门铣加工

龙门铣加工上、下屏蔽筒安装面、安装孔及下屏蔽筒安装底座

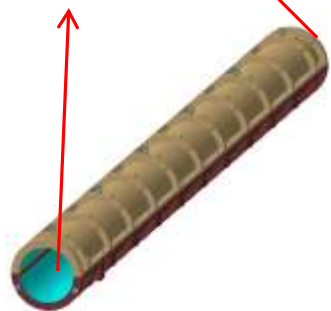




三.屏蔽筒加工、检测方案

⑥上下屏蔽筒装配

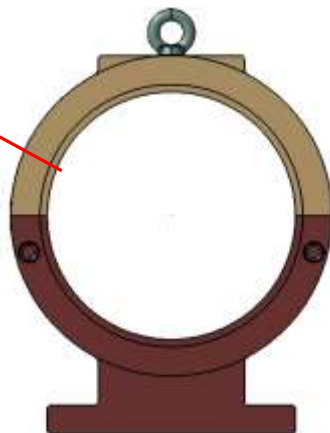
两端在数控龙门铣床加工基准孔，加工深度10mm



上下屏蔽筒装配

⑦珩磨加工内孔

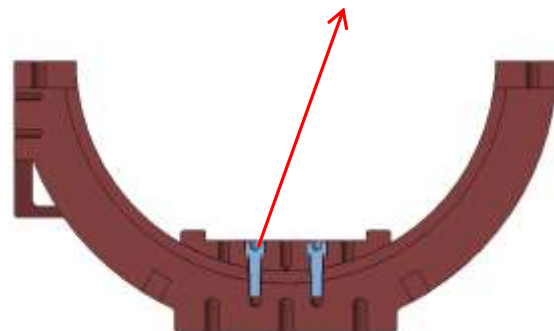
加工内孔至 $\Phi 340$



珩磨加工内孔

⑧焊接线圈安装座

线圈安装座通过2-M10螺栓连接，两侧断续焊接



焊接线圈安装座

⑨龙门铣精加工

精加工线圈安装座



龙门铣精加工

⑩尺寸检测

激光跟踪仪检测11组线圈安装座，高度共面平面度 $<0.02\text{mm}$ ，左右两侧共面平面度 $<0.02\text{mm}$



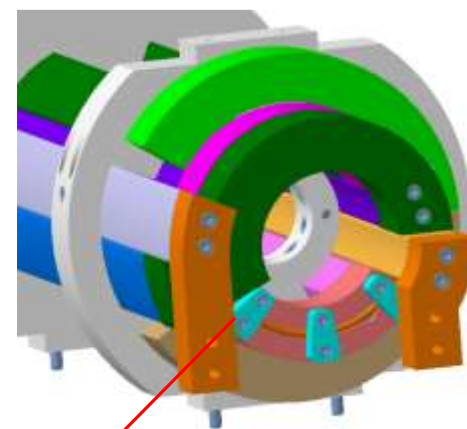
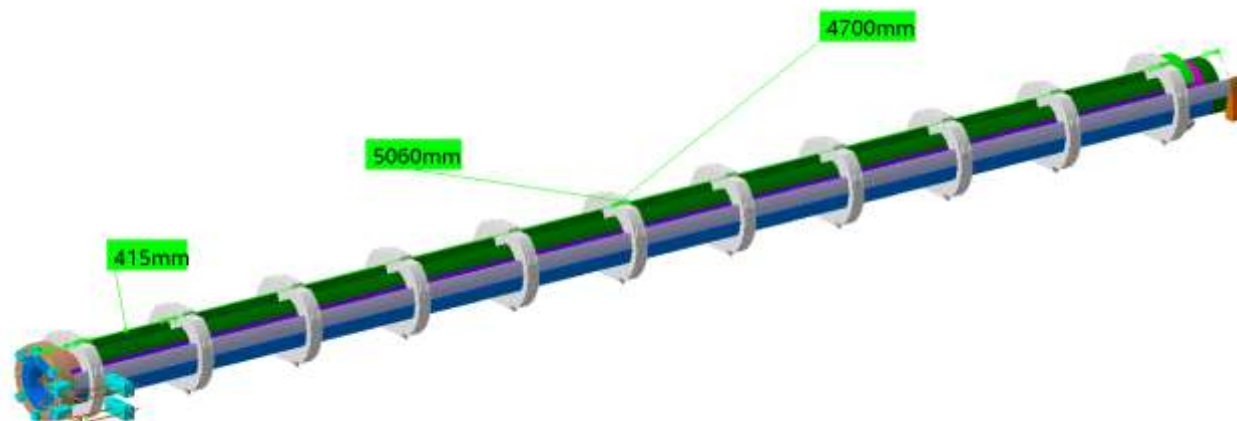
尺寸检测



四.线圈加工检测方案

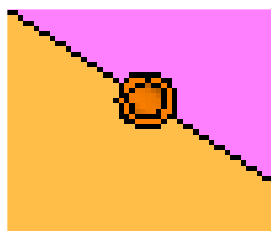
1、线圈结构设计方案

线圈直线长度4700mm，采用11组线圈夹具安装固定，每组间隔415mm，加上两端串联总长度5060mm

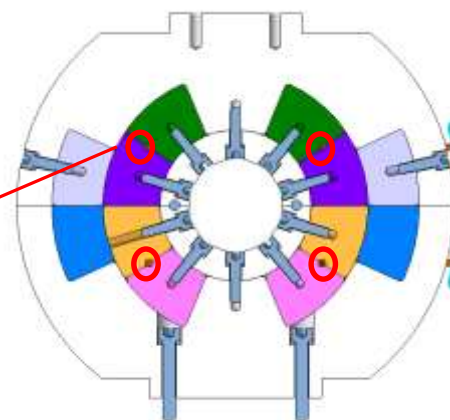


接电端

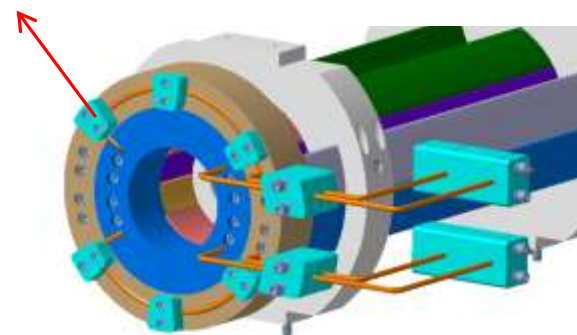
G10固定块



两路冷却管
(紫铜管 $\Phi 6 \times \Phi 4$)



线圈夹具



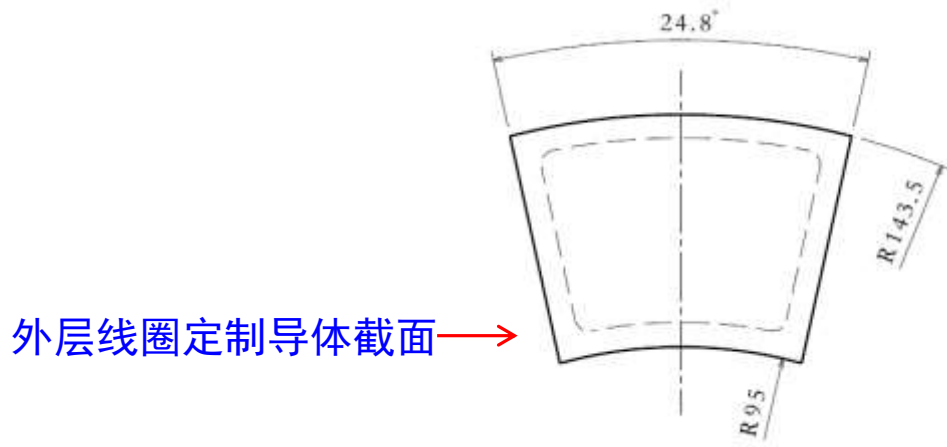
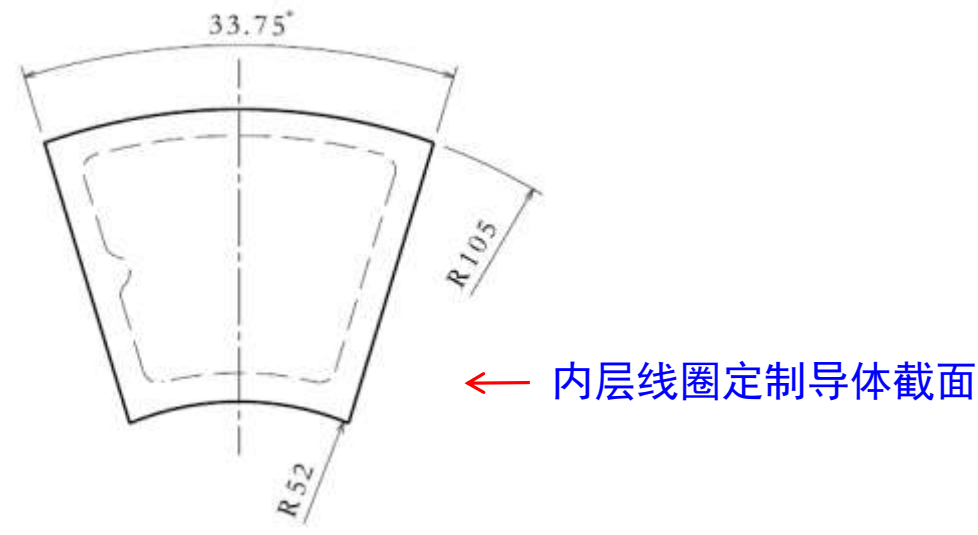
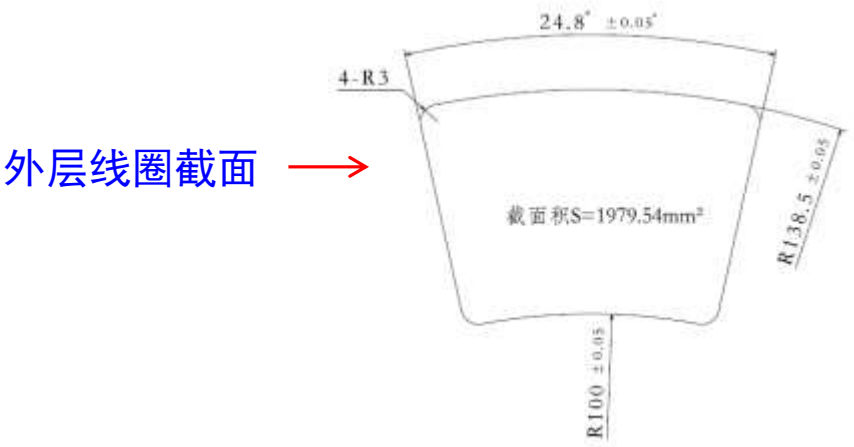
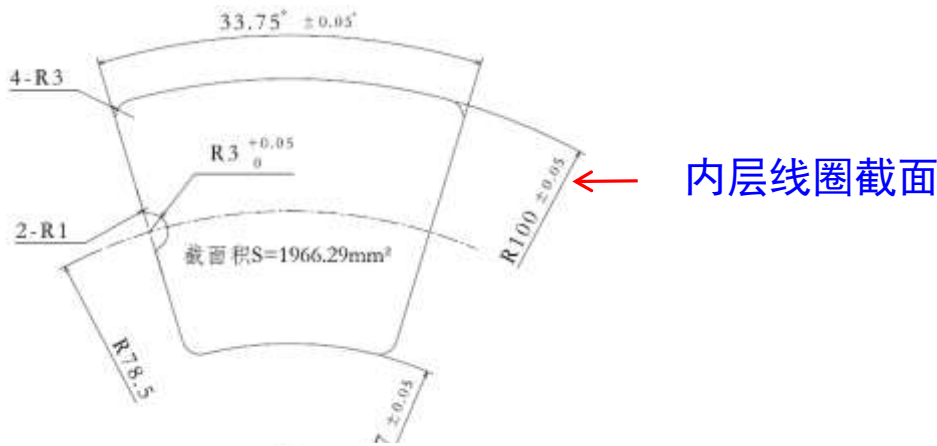
水冷端



四.线圈加工检测方案

2、线圈截面设计

线圈采用1070纯铝，纯铝具有电阻率小、材质塑形好，易与校形。内导体和外导体定制导体时，截面单边放5mm加工余量



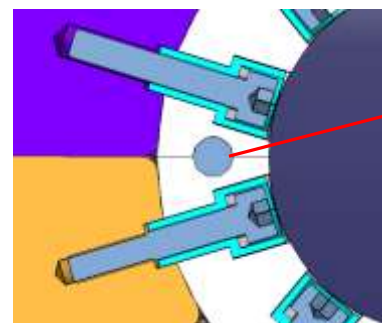
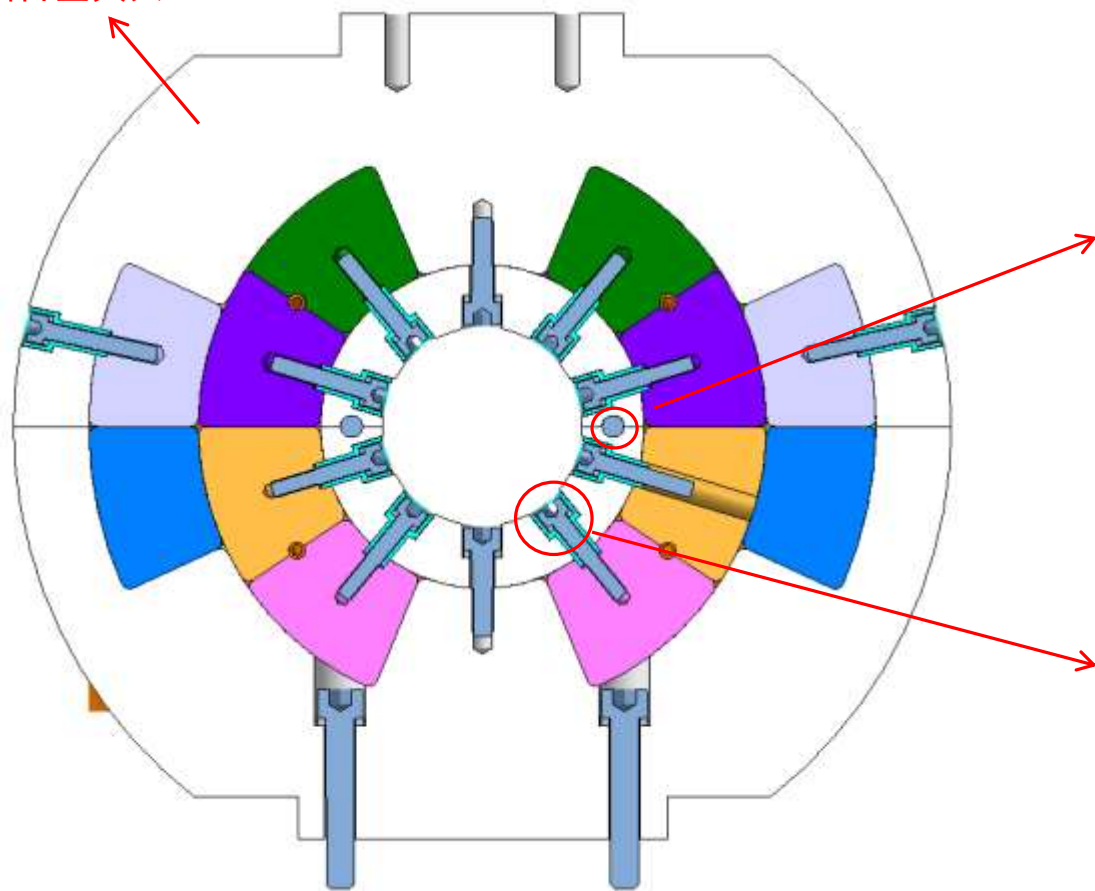


四.线圈加工检测方案

3、线圈夹具设计

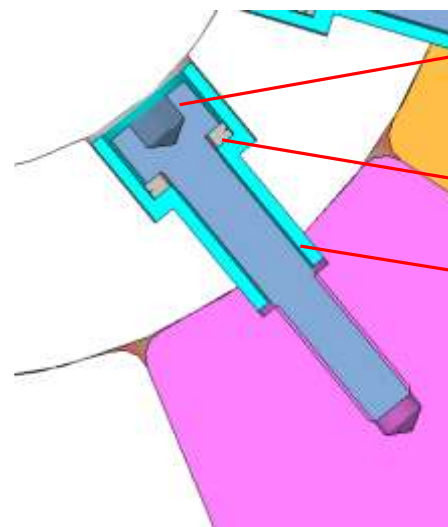
因线圈截面小、长度长、整体刚度差及易变形。线圈采用线圈夹具校正及固定，夹具采用铝合金材质。

铝合金夹具



中心环上下两瓣，
通过 $\Phi 8 \times 50$ 定位
销定位

定位销



M6×30不锈
钢螺栓

防松垫片

G10套管

螺栓绝缘处理



四.线圈加工检测方案

3、线圈夹具设计

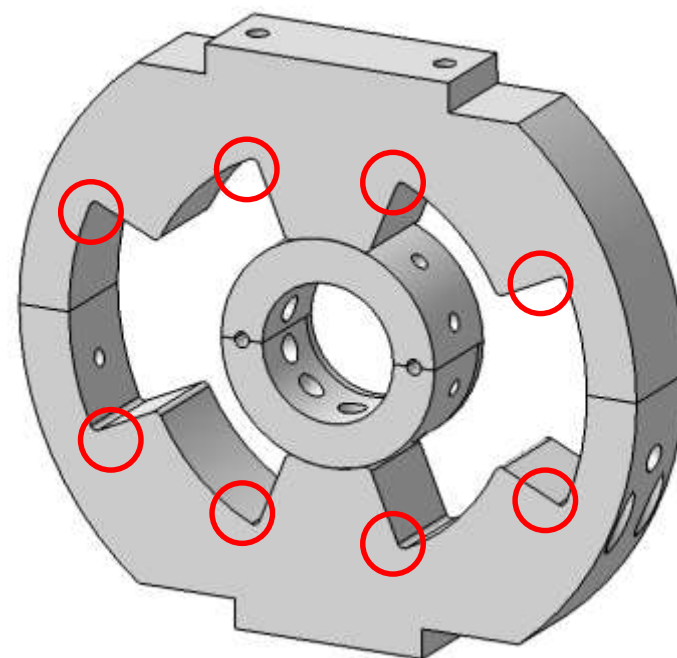
原始方案线圈夹具采用G10材料制作，有以下几个缺点

- 加工方案只能采用数控加工方法，G10材料尺寸稳定性不好，加工后不耐磨，多次拆装后精度会降低
- 线圈的结构决定了11组夹具尺寸一致性要高，G10材料无法同时堆叠加工

建议更换金属材料代替G10夹具，可以采用铝合金制造，其优缺点如下

- 优点：可以堆叠采用线切割一起加工，尺寸一致性好，加工效率高
- 缺点：不绝缘

铝合金的绝缘处理方式：硬质阳极氧化

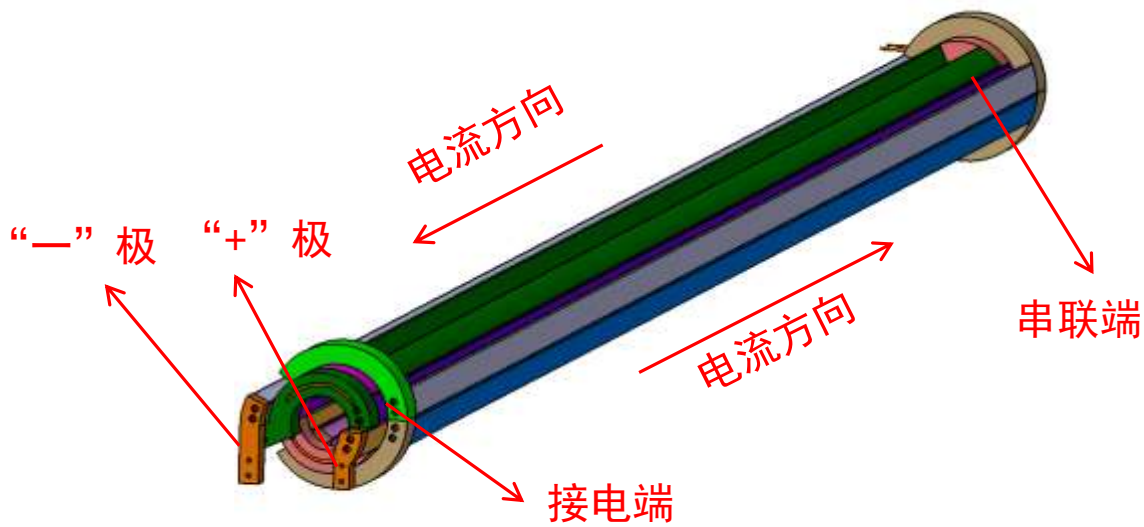
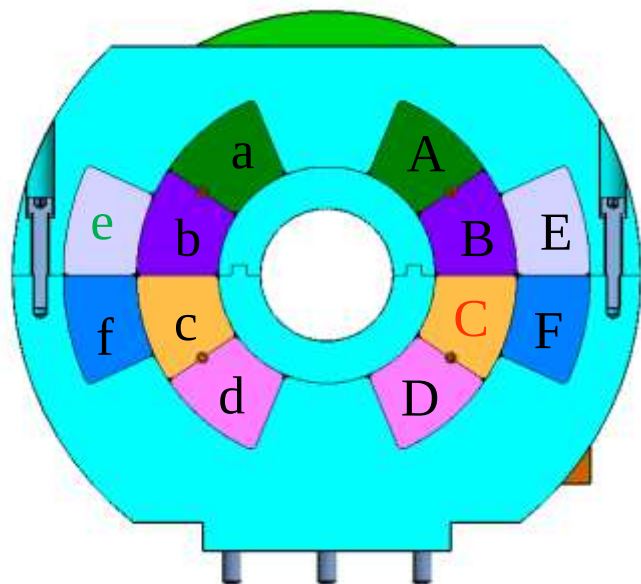


拐角处加工费时，厚度较厚，精度不容易保证

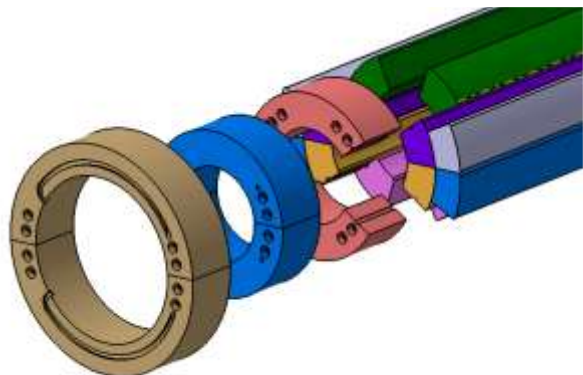


四.线圈加工检测方案

4.线圈串联关系及电流走向

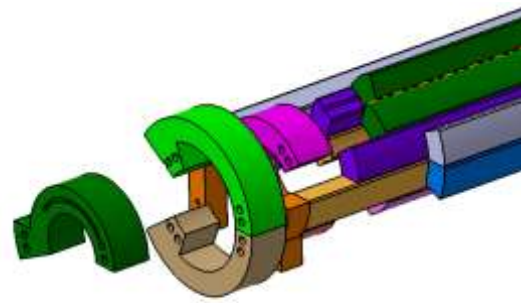


电流走向如上图所示：假设C端子为电源正极，e端子为电源负极电流走向为C→c →D →d →F →f →B →b →A →a →E →e



串联端串联关系

串联接电铝排厚度确定：根据线圈本体截面面为1966，外环宽度为38.5。按照等截面原则，串联铝排计算厚度为51.25，取整至55mm



接电端串联关系



五.线圈加工、检测方案

①铝排采购



②机械加工



③检测



④阳极氧化



⑤机械加工



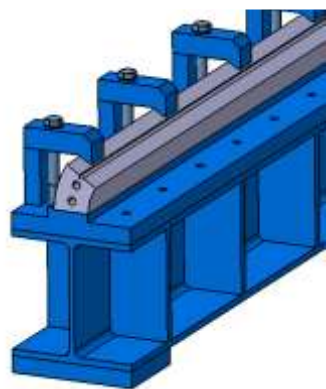
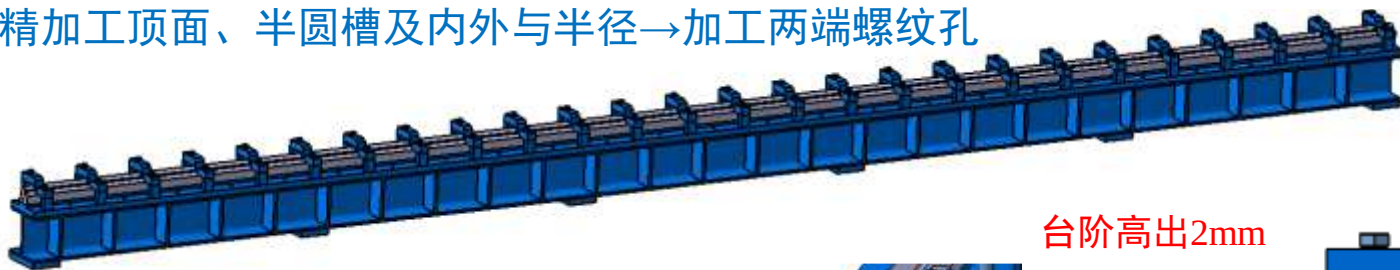
⑥绝缘测试

①铝排采购

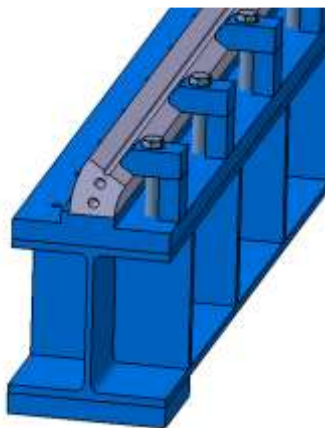
按照两种规格的截面定制铝排，外形单边放加工余量5mm

②机械加工

线圈截面为扇形，采用五轴龙门铣床加工，最后一次精加工单次装夹加工全部面，从而保证加工精度。加工需要设计、制造加工工装。加工流程如下：两个端面及内外径粗加工→底面精加工→激光跟踪仪检测→精加工顶面、半圆槽及内外与半径→加工两端螺纹孔

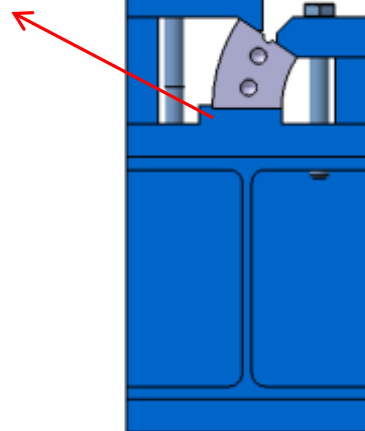


压上半部分加工下半部分



压下半部分加工上半部分

台阶高出2mm

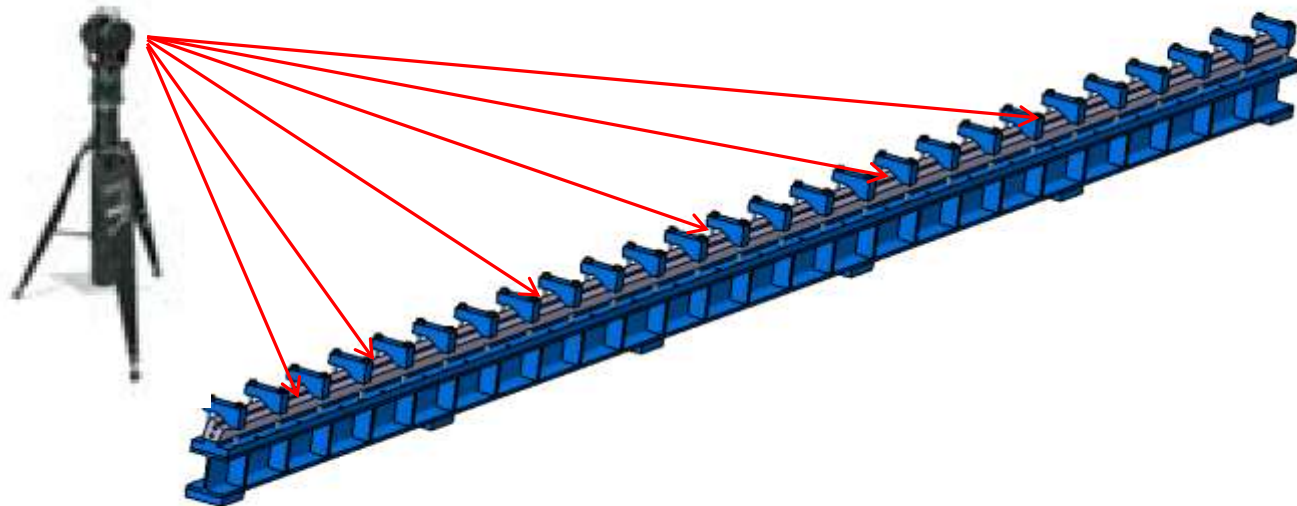




五.线圈加工、检测方案

③检测

因线圈截面小、长度长、易变形等特点，检测在加工完成后不拆除工装的情况下，采用激光跟踪仪测量尺寸精度



④阳极氧化

氧化层提供线圈的绝缘功能，线圈在生产、测磁、安装真空管等过程，需要多次拆卸线圈。为了提高氧化膜厚度及表面硬度，采用硬质阳极氧化。硬质阳极氧化膜厚可以达到 $40\mu\text{m}$ 。阳极氧化结束后，线圈端部导电区域去除氧化层并刷镀银。

目前调研的最大硬质阳极氧化尺寸为： $L7.5 \times H1.6 \times W0.8$ 米，满足该铝导体的硬质阳极氧化

⑤机械加工

去除所有导电面的氧化层

⑥绝缘测试

线圈表面包裹一层铝箔充当接地端，测试电压DC 500V



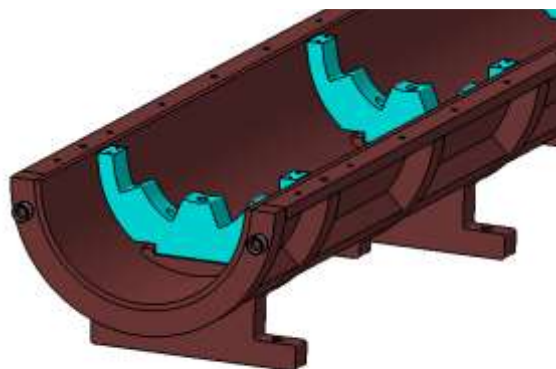
六.装配及测量方案

■下线圈安装及测量流程



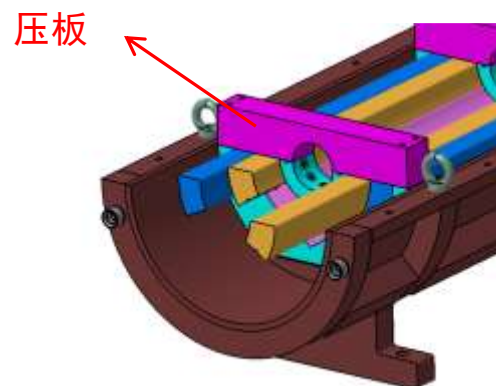
1、下屏蔽筒

安装在平台上进行，安装前复测11组线圈安装底座共面平面度



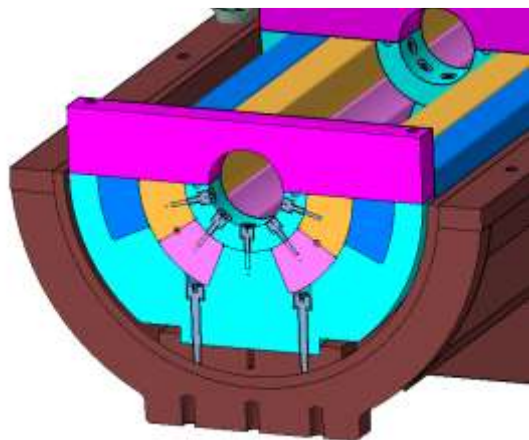
2、安装下绝缘件

11组下绝缘安装完成后，采用激光跟踪仪测量11组同心度，要求11组下绝缘件同心度 $<0.03\text{mm}$ ，安装完成后不再拆除



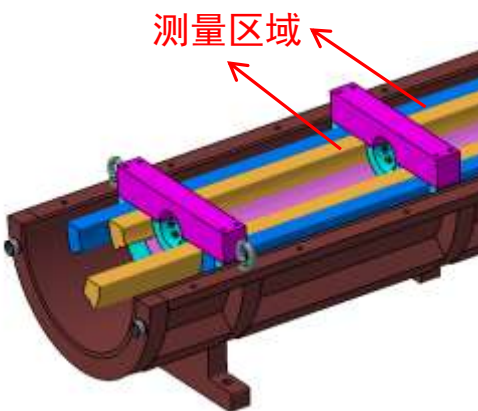
3、安装下线圈&下冷却管

安装调整下线圈，下冷却管与线圈接触的孔涂抹导热硅脂，安装完成后清理多余的导热硅脂



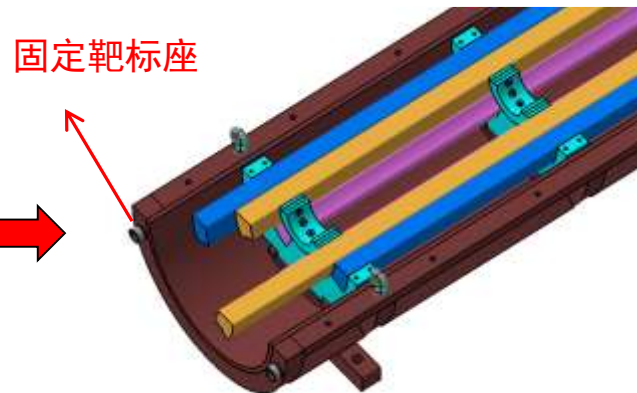
4、安装固定螺钉

调整完毕后安装内六角螺钉，安装后不再拆除



5、激光跟踪仪测量-01

测量夹具两侧50mm以内区域上面四根铝线圈，评估安装精度（平面度 $<0.05\text{mm}$ ）



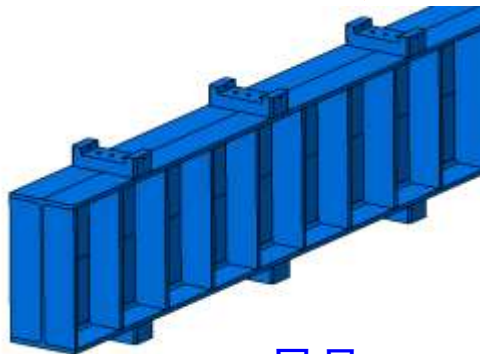
6、激光跟踪仪测量-02

拆除夹具后测量11组线圈夹具同心度（ $<0.05\text{mm}$ ），同时标定两端4个靶标座



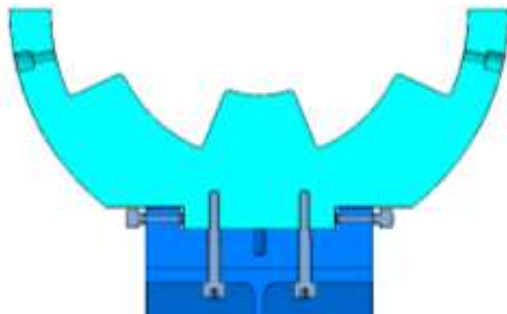
六.装配及测量方案

■上线圈安装及测量流程



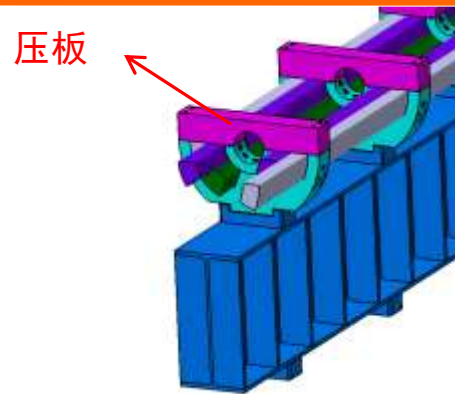
1、吊具

吊具同时也是上线圈安装工装，安装在平台上进行，安装前复测11组线圈安装座共面平面度



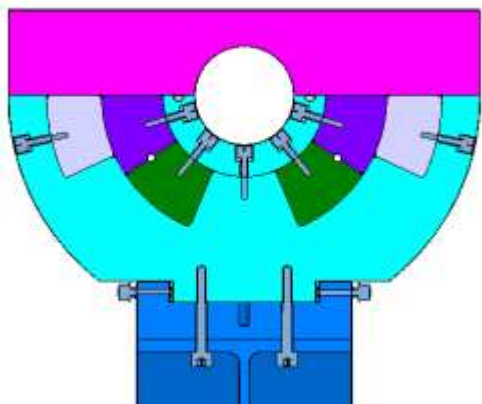
2、安装上绝缘件

11组下绝缘安装完成后，采用激光跟踪仪测量11组同心度，要求11组下绝缘件同心度 $<0.03\text{mm}$ ，



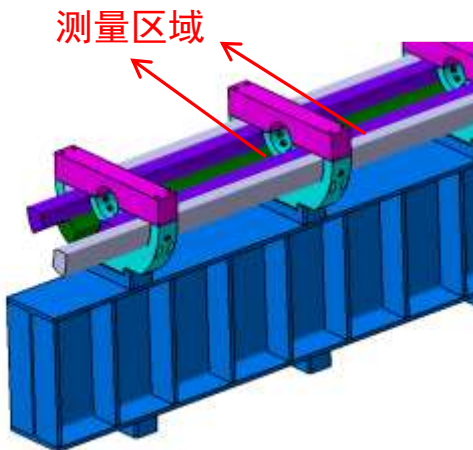
3、安装上线圈&上冷却管

安装调整上线圈，上冷却管与线圈接触的孔涂抹导热硅脂，安装完成后清理多余的导热硅脂



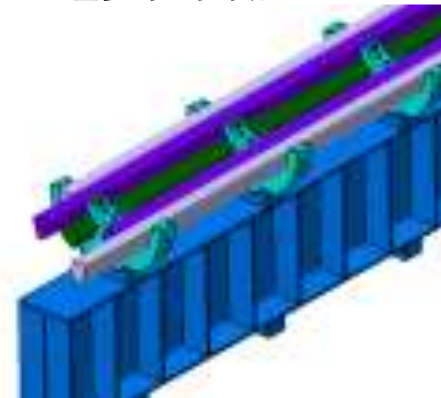
4、安装固定螺钉

调整完毕后安装内六角螺钉，安装后不再拆除



5、激光跟踪仪测量-01

测量夹具两侧50mm以内区域上面四根铝线圈，评估安装精度（平面度 $<0.05\text{mm}$ ）



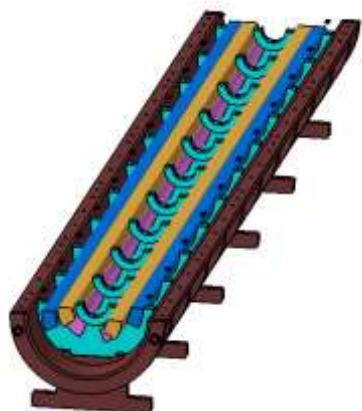
6、激光跟踪仪测量-02

拆除夹具后测量11组线圈夹具同心度（ $<0.05\text{mm}$ ）

六.装配及测量方案



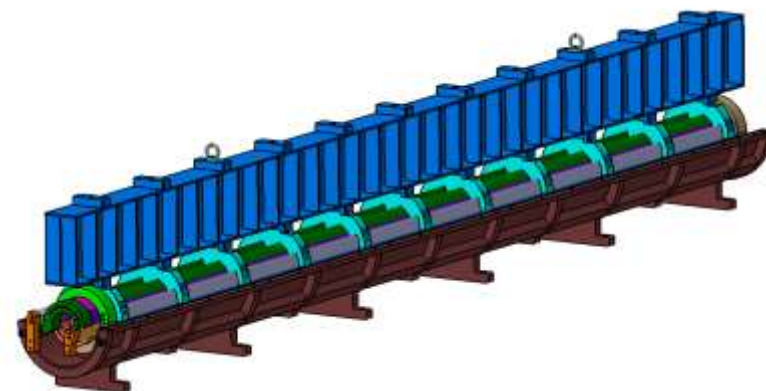
■上下线圈对合安装



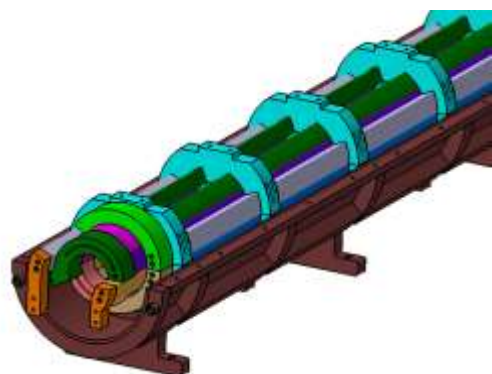
1、下屏蔽筒



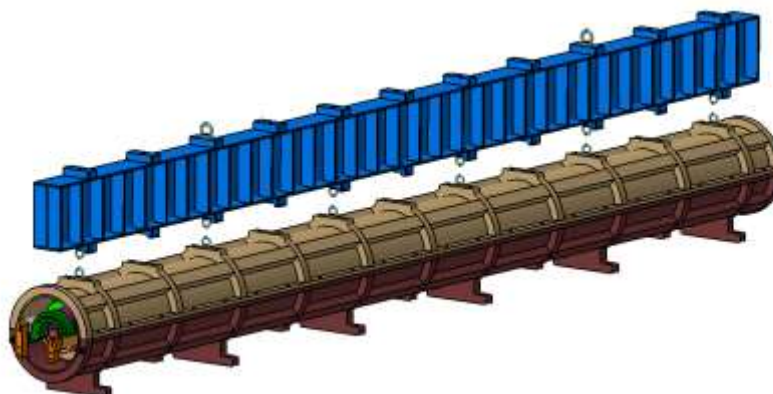
2、安装定位销



3、安装上线圈&两端串联铝排



4、激光跟踪仪复测安装精度



5、安装上屏蔽筒

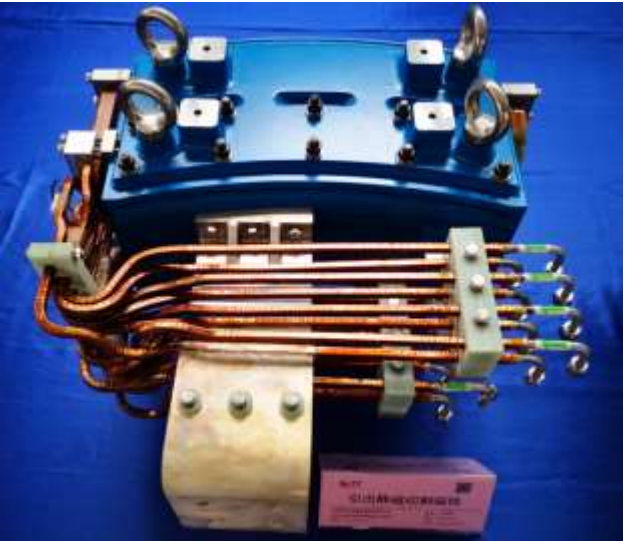


七. 科烨公司磁铁、磁体相关业绩

◆上海应用物理研究所-引出静磁切割磁铁



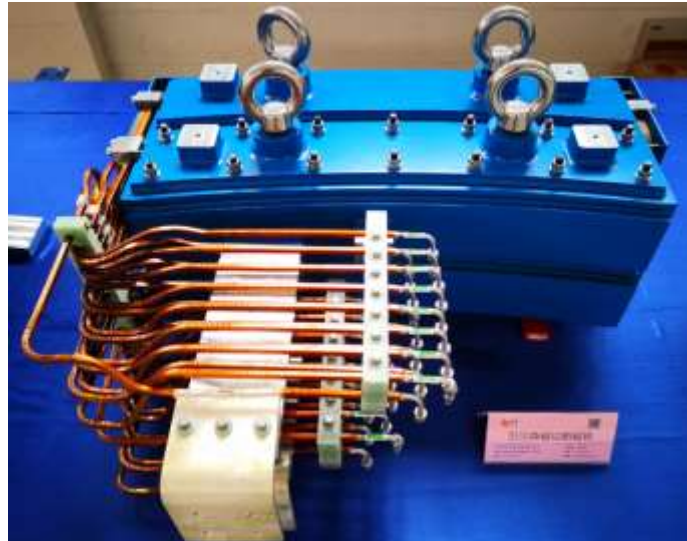
引出静磁切割磁铁技术参数				
序号	技术指标	MS-I	MS-II	MS-III
1	长度（mm）	400	400	800
2	偏转角（mrad）	593	130	334
3	气隙精度（mm）	40±0.05；□：0.05；//：0.05		
4	铁芯极面精度（mm）	20±0.025；□：0.012；//：0.025		
5	匝数	8	8	16
6	激磁电流（A）	2305.34	3209.2	2061.33
7	线圈导线规格（mm）	8×8-Φ4		
8	电流密度（A/mm2）	45.6	63.45	40.8



MS-I



MS-II



MS-III



七. 科烨公司磁铁、磁体相关业绩

◆北京高能物理研究所-超高梯度四极铁I型



超高梯度四极磁铁I型技术参数		
序号	技术指标	
1	有效长度 (mm)	694
2	磁极孔径 (mm)	25 ± 0.02
3	磁场梯度 (T/m)	80
4	极头曲面轮廓度 (mm)	0.015
5	励磁电流 (A)	161.3
6	导线尺寸 (mm)	8×8-Φ5
7	电流密度 (A/mm²)	3.7
8	水流速 (m/s)	1.6
9	水路温升 (° C)	5.5



七. 科烨公司磁铁、磁体相关业绩

◆HEPS增强器校正磁铁项目介绍

HEPS增强器校正磁铁总共有三种类型，BS-40CH 48台，BS-56CH 8台，BS-56CV 36台。校正铁为动态交流磁铁，铁芯采用冲片粘接结构，总装后极面气隙精度 $\leq 0.05\text{mm}$ ，铁芯长度误差 $\leq 0.3\text{mm}$ ，

HEPS增强器校正磁铁参数表				
参数名称	数值	数值	数值	单位
磁铁名称	BS-40CH	BS-56CH	BS-56CV	-
数量	48	8	36	-
磁有效长度	0.1500	0.1500	0.1500	m
最高工作磁场	0.06	0.06	0.06	T
磁极间隙	40	56	56	mm
好场区(H×V)	$[-15,15] \times [-15,15]$	$[-20,20] \times [-20,20]$	$[-20,20] \times [-20,20]$	mm
好场区范围内 场均匀度 (@50Gs, 600Gs)	$1 \times 10^{-2}, 1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-2}, 1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-2}, 1 \times 10^{-3}$	-



◆BS-40CH磁铁实物图



七. 科烨公司磁铁、磁体相关业绩

◆北京鑫智能技术股份有限公司-加速器磁铁



◆HB80 135° 磁铁



◆HB80回转磁铁



◆HB80平行束磁铁



◆磁铁线圈



七. 科烨公司磁铁、磁体相关业绩

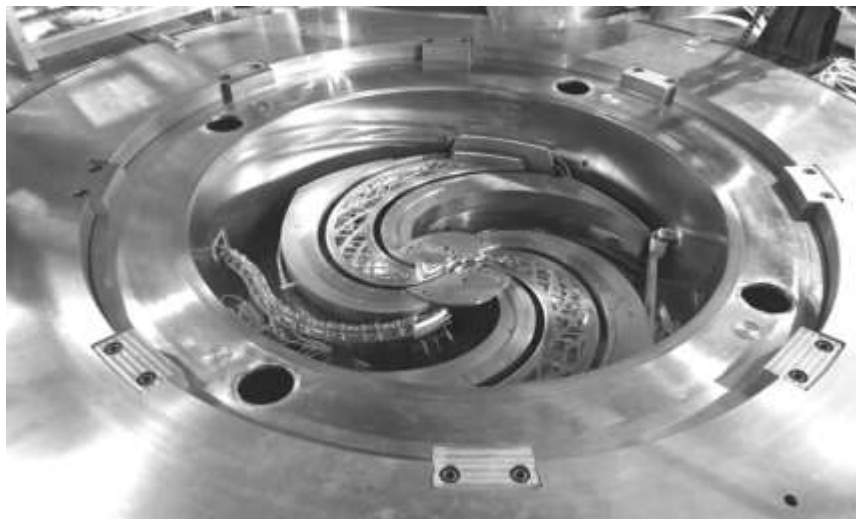
◆合肥中科离子医学技术装备有限公司-SC200回旋加速器

SC200超导质子治疗系统是一套非常复杂的软、硬件系统，涉及到核技术、辐射生物学、超导、低温、真空、机械、电磁以及控制等多项学科技术，是一个大科学工程项目。

RF谐振腔主要包含RF谐振腔腔体组件、Dee& Stem部件、冷却水管部件、调谐部件、耦合部件以及其他辅助部件组成，与功率源、传输系统及低电平系统共同组成回旋加速器高频系统。其主要功能为质子提供特定频率的高频加速电场，维持加速电压幅值稳定，保证质子在谐振腔加速间隙处获得加速，胃病离子源的束流引出提供所需的电压。2017年4月8日，RF谐振腔原型件实现了谐振频率**91.5MHz**，**无载Q值~2700**等一系列核心指标，标志着该超导回旋加速器射频腔的设计完成，腔体制造正式开始。



◆SC200回旋加速器



◆200MeV RF谐振腔

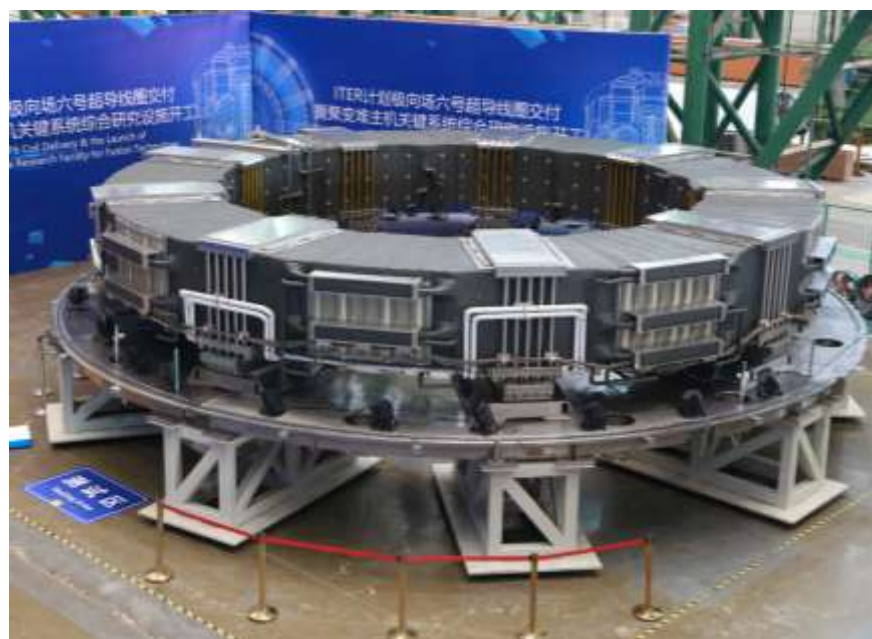


◆SC200加速器磁极



七. 科烨公司磁铁、磁体相关业绩

◆ITER 组织-极向场PF6超导线圈制造



- PF6线圈**直径约12米，高约2.8米；重约400吨**；由9个绕制成双饼结构的线圈本体（NbTi超导体）以及一系列支撑附件组成，线圈绕制所采用的NbTi超导体长约13.5公里。
- PF6线圈是目前国际上研制成功的重量最大、难度最高的超导磁体。

七. 科烨公司加速器磁铁及部件制造业绩

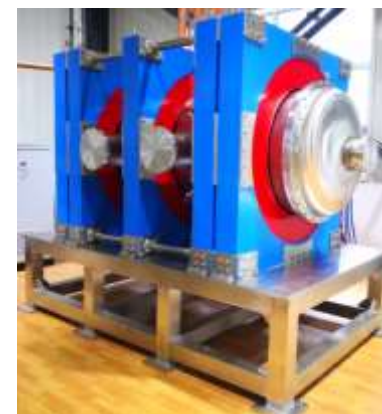


◆ITER极向场环流电抗器

◆超导磁体



◆科大空间空间模拟装置



◆天线测试腔体

◆反场箍缩磁约束聚变实验装置
(科大一环)



CEPC BST二极磁铁长度5020mm，总装后线圈直线度、同轴度 $<0.1\text{mm}$ ，对生产制造提出了很高的要求，为了能够达到最终的精度要求，需要严格控制下屏蔽筒、线圈及线圈夹具的加工精度和安装精度。请各位老师提出宝贵的建议！

谢谢！