



CEPC 5.7m双孔径二极磁铁研制

报告人：桂进

合肥科烨电物理设备制造有限公司

2023年10月23日

□ 目录

1. 项目介绍及要求

2. 双孔径二极铁介绍

3. 磁铁制造工艺及测试介绍

4. 磁体装配

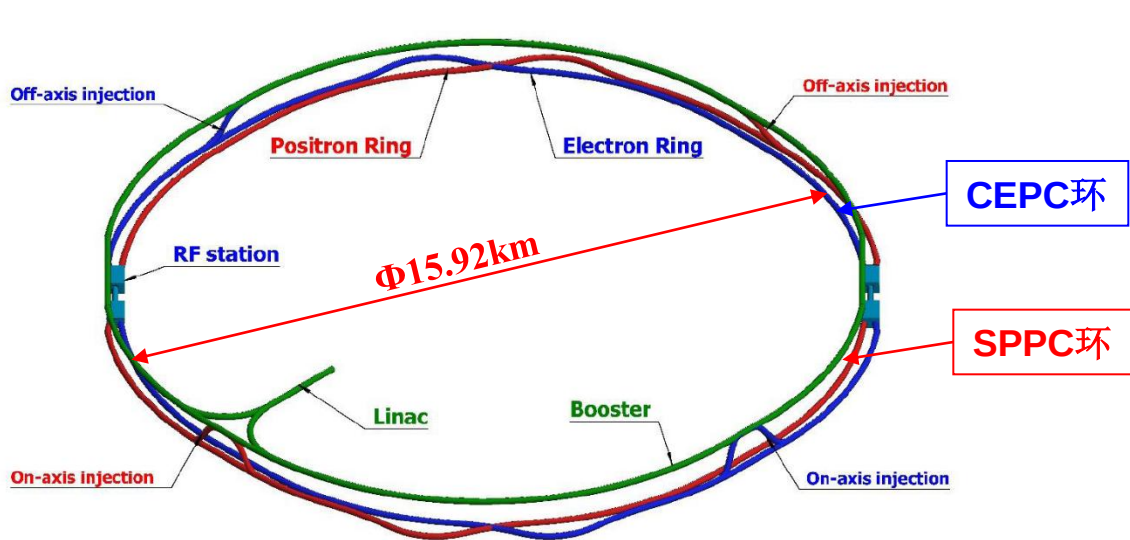
5. 小结

1. 项目介绍及要求

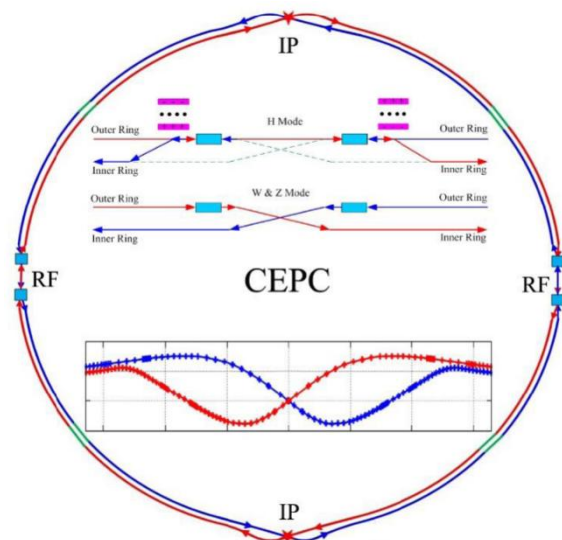
CEPC简介

CEPC包括直线加速器(Linac)、传输线、增强器(Booster)和对撞机。直线加速器在地面上，长度为1.2km。增强器在地下大约100米的深处。直线加速器和增强器分别由 e^+ 和 e^- 的两条传输线连接，传输线的斜率是1: 10。

在对撞机中有8个直线段：2个相互作用区(IP)，2个射频区(RF station)和4个注入区(injection)。其中，两个离轴注入区(off-axis injection)分别在希格斯模式、W模式和Z模式下进行操作，而两个同轴注入器(On-axis injection)仅在希格斯模式下进行操作。



CEPC布局示意图



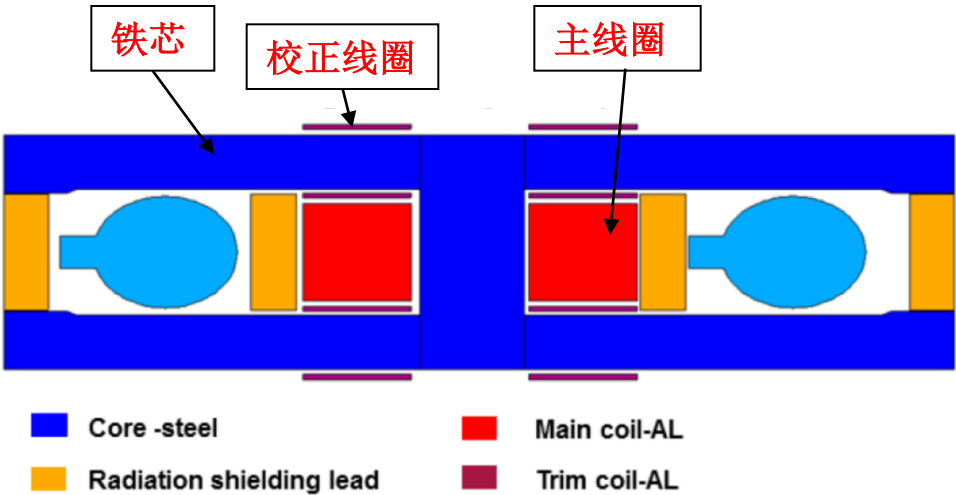
对撞机布局示意图

弧段区隧道截面

2.双孔径二极铁介绍

2.1 双孔径二极铁设计要求及参数

CEPC主环双孔径二极磁铁基本要求		
	主场	校正线圈
磁铁孔径(mm)	70	70
磁场强度(Gs)	140~575.72	2.1~8.6
好场区半宽度(mm)	13.5	13.5
磁场质量要求	<3e-4	
两个孔径内磁场强度差异	<0.5%	



CEPC主环双孔径二极磁铁基本设计参数		
	主场	校正线圈
磁铁孔径(mm)	70	70
磁场强度(Gs)	575.72	8.6
励磁安匝数(A)	3210	24
线圈个数	1	4
线圈匝数	2	6
电流(A)	1605	4
导线材料	铝棒	铝导线
导线规格(mm)	60*27	2*5
中心孔直径(mm)	8	0
面积(mm ²)	1580.7	10
电流密度(A/mm ²)	1.015	0.4
磁铁电阻(mΩ)	0.47	
校正线圈电阻(mΩ)/每孔径		444.6
励磁电压(V)	0.75	1.778
磁铁功耗(W)	1200	14.3
水压降(kg/cm ²)	6	
水流速(m/s)	3.6	
水流量(l/s)	0.14	
温升(℃)	3	
铁芯重量(t)	2.3	
导线重量(kg)	115	8.42
铁芯横向尺寸(mm)	530*160	
铁芯长度(mm)	5670	

2.双孔径二极铁介绍

2.2 双孔径二极铁样机制造技术要求

➤线圈主要性能指标:

- 1. 线圈需要进行匝间绝缘测试，匝间测试电压要求为500 V;
- 2. 线圈的高压测试为1000 V保压1分钟，要求漏电流不大于10uA;
- 3. 冷却水路需要进行水压测试，水压测试为1Mpa保压30分钟，无泄漏.
- 4. 线圈电阻不超过理论计算值的1.2倍；材料为纯铝。

➤磁铁主要机械精度和材料磁性能要求:

- 5. 磁体气息公差要求： 70±0.05mm;
- 6. DT4纯铁材料励磁性能不能低于右表所列数据的规定数值:

➤ 验收时磁铁需达到的技术指标:

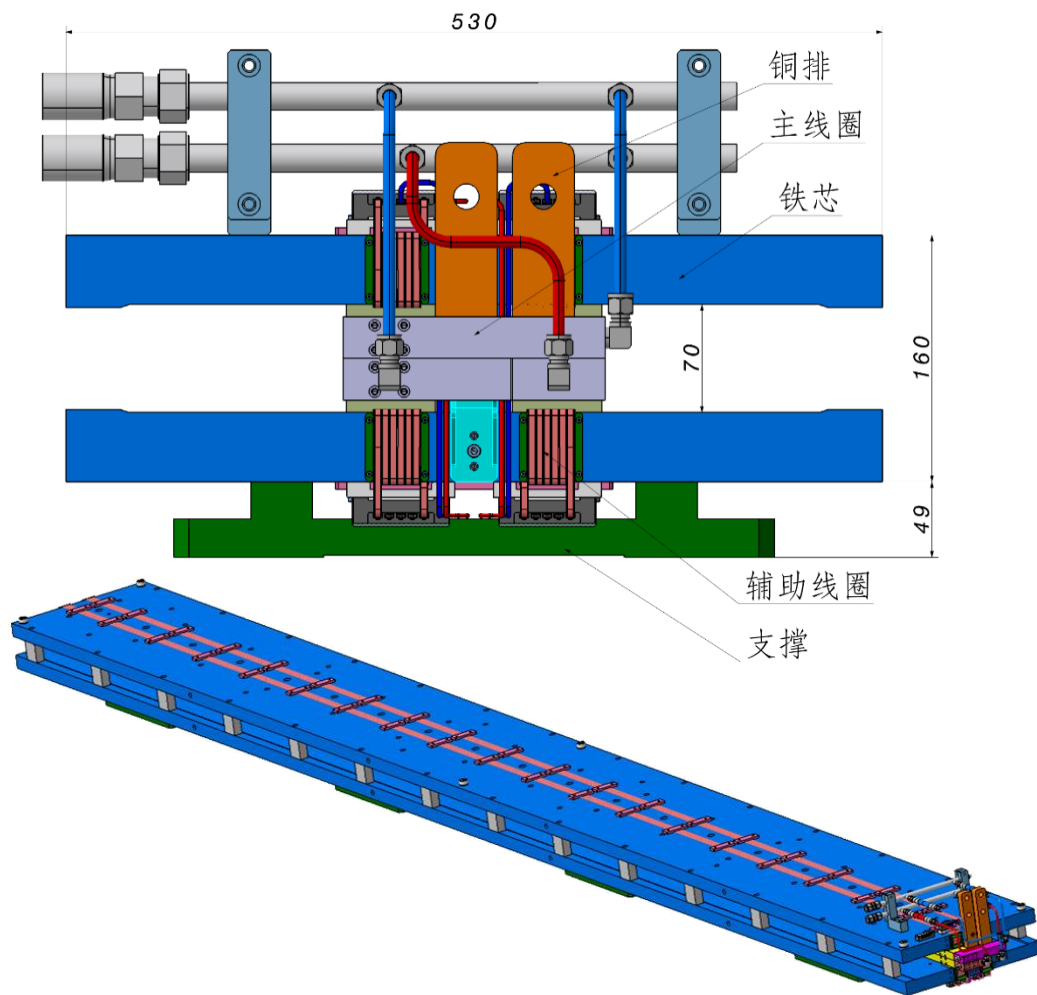
- 7. 磁铁电流约1055A时，两个孔径内中心磁场强度达到0.037T，且两个孔径内中心磁场值By差异不超过2Gs，在参考半径13.5mm下的积分磁场高阶分量好于 5×10^{-4} 。

表： DT4纯铁励磁曲线数据表

H (A/m)	B (T)	H (A/m)	B (T)
0	0	700.304	1.4875
50.1354	0.6073	799.779	1.5105
70.0304	0.7017	900.0498	1.5288
80.3758	0.783	1000.321	1.5445
100.2708	0.897	1200.066	1.566
120.1658	0.972	1399.812	1.584
140.0608	1.0303	1500.083	1.5933
149.6104	1.059	1600.354	1.5994
159.9558	1.08	1800.1	1.6112
170.3012	1.1	1999.845	1.624
179.8508	1.119	2500.404	1.645
199.7458	1.1545	3000.166	1.6635
229.9862	1.1984	3499.928	1.68
249.8812	1.2235	4000.487	1.6985
300.0166	1.2775	4500.249	1.712
350.152	1.325	5000.011	1.727
400.2874	1.3605	6000.332	1.7513
449.627	1.3895	6999.857	1.775
499.7624	1.4155	8000.177	1.798
600.0332	1.4518	9000.498	1.8173

2.双孔径二极铁介绍

2.3 双孔径二极铁结构介绍

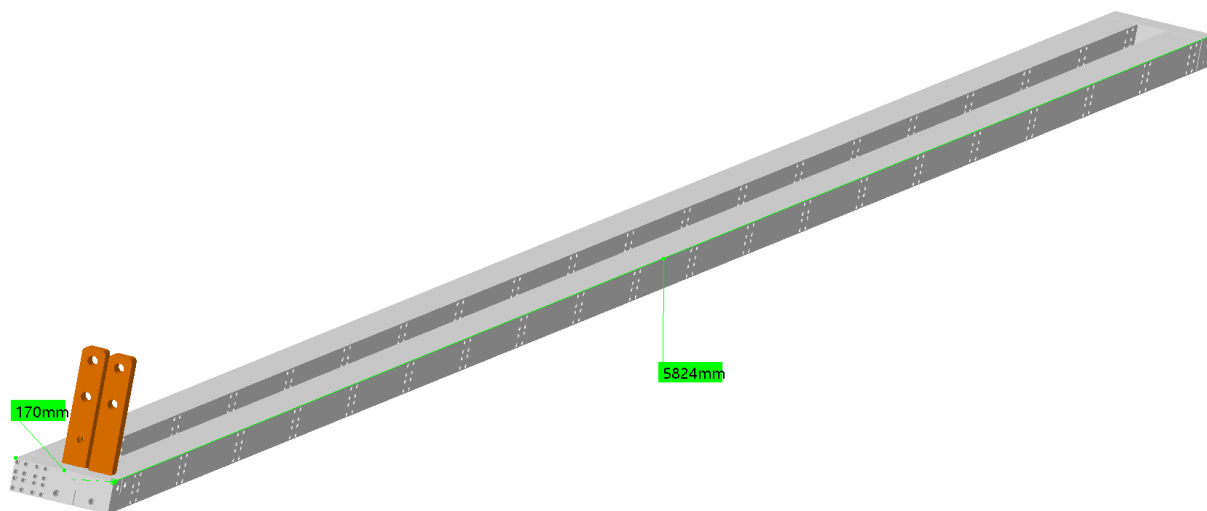


- 双孔径二极铁主要包括: 铁芯, 主线圈, 辅助线圈, 支撑, 铜排及引线等部件;
- 铁芯长度为5670mm;
- 磁铁的外形尺寸为: 5824*530*329mm (长*宽*高)。
- 磁铁总重约为: 2.6t

2.双孔径二极铁介绍

➤ 主线圈

主线圈设计参数	
主线圈材料	纯铝
线圈重量(kg)	105
导体截面尺寸(mm)	60*27
中心冷却孔直径(mm)	5
线圈长度(mm)	5814
电流密度(A/mm ²)	1.015
电流(A)	1605
线圈匝数	2
励磁电压(V)	0.75
线圈绝缘	陶瓷涂层

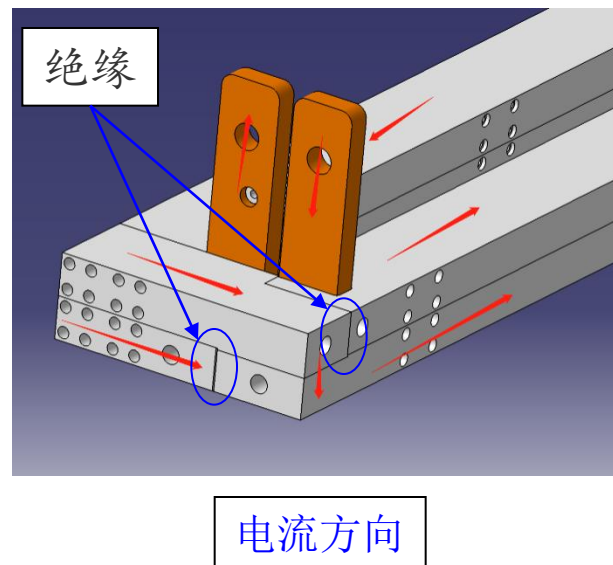
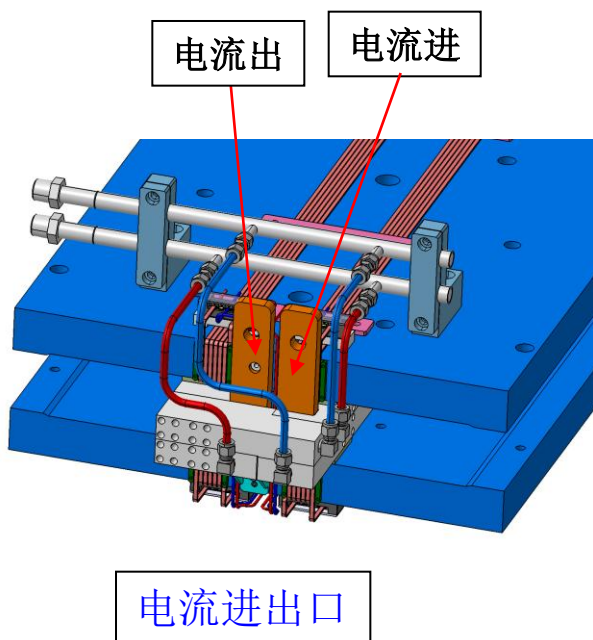


主线圈三维设计图

2.双孔径二极铁介绍

➤ 主线圈详细结构设计

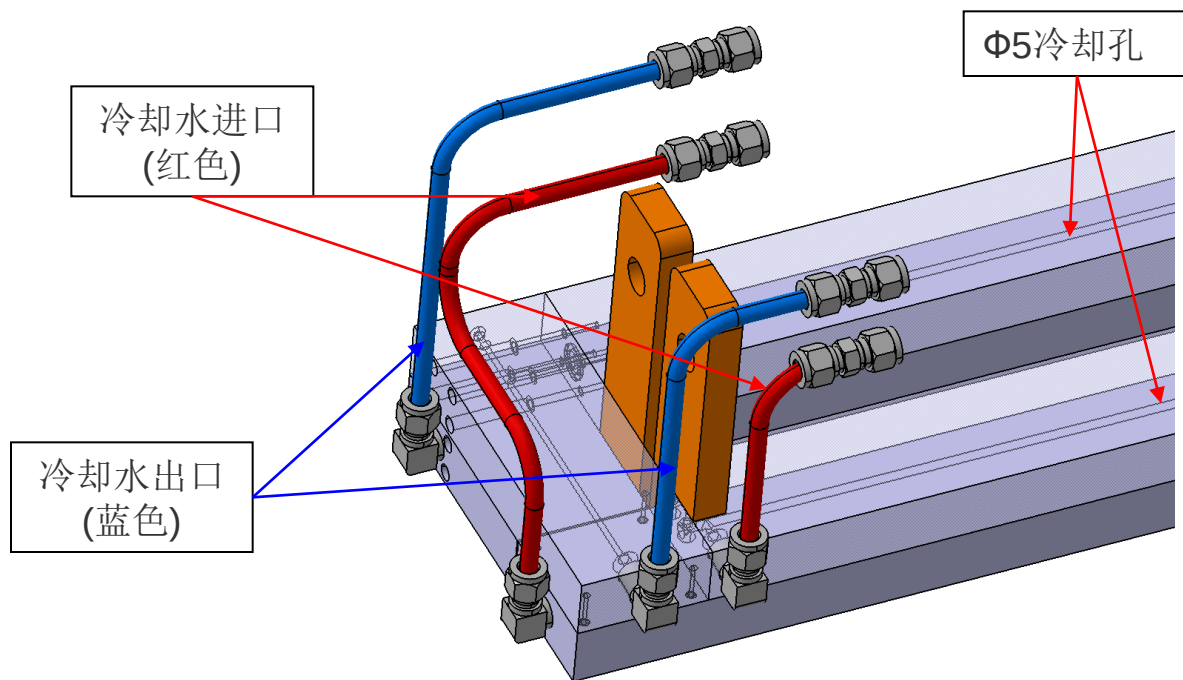
- 主线圈由2匝组成，采用分段设计，螺栓连接，接触面进行镀银处理；
- 电流进出口设计有铜排，截面尺寸为 40*25mm（宽度*厚度）
- 铜排通过螺栓与主线圈连接
- 线圈电流方向如下图所示，线圈及铜排之间以及需要导通的区域没有绝缘涂层。



2.双孔径二极铁介绍

➤ 线圈冷却设计

- 线圈导体中间设计有冷却水孔，冷却孔直径为 $\Phi 5\text{mm}$ ；
- 每匝线圈设计有一组冷却孔进出口，共计两进两出；



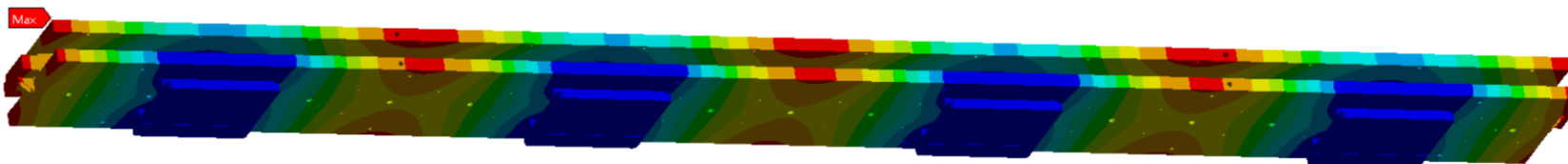
2.双孔径二极铁介绍

➤ 磁铁支撑点设计

- 共设计了4组支撑，磁铁在自重下的变形和应力分析如下，变形和应力均满足要求；

B: Copy of Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1
2020/7/27 15:47

0.01661 Max
0.014765
0.012919
0.011073
0.0092279
0.0073823
0.0055367
0.0036912
0.0018456
0 Min



磁铁的最大变形为0.017mm，分别位于铁芯两头和间隔中间区域（4个支撑点的设计）

B: Copy of Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
2020/7/27 15:48

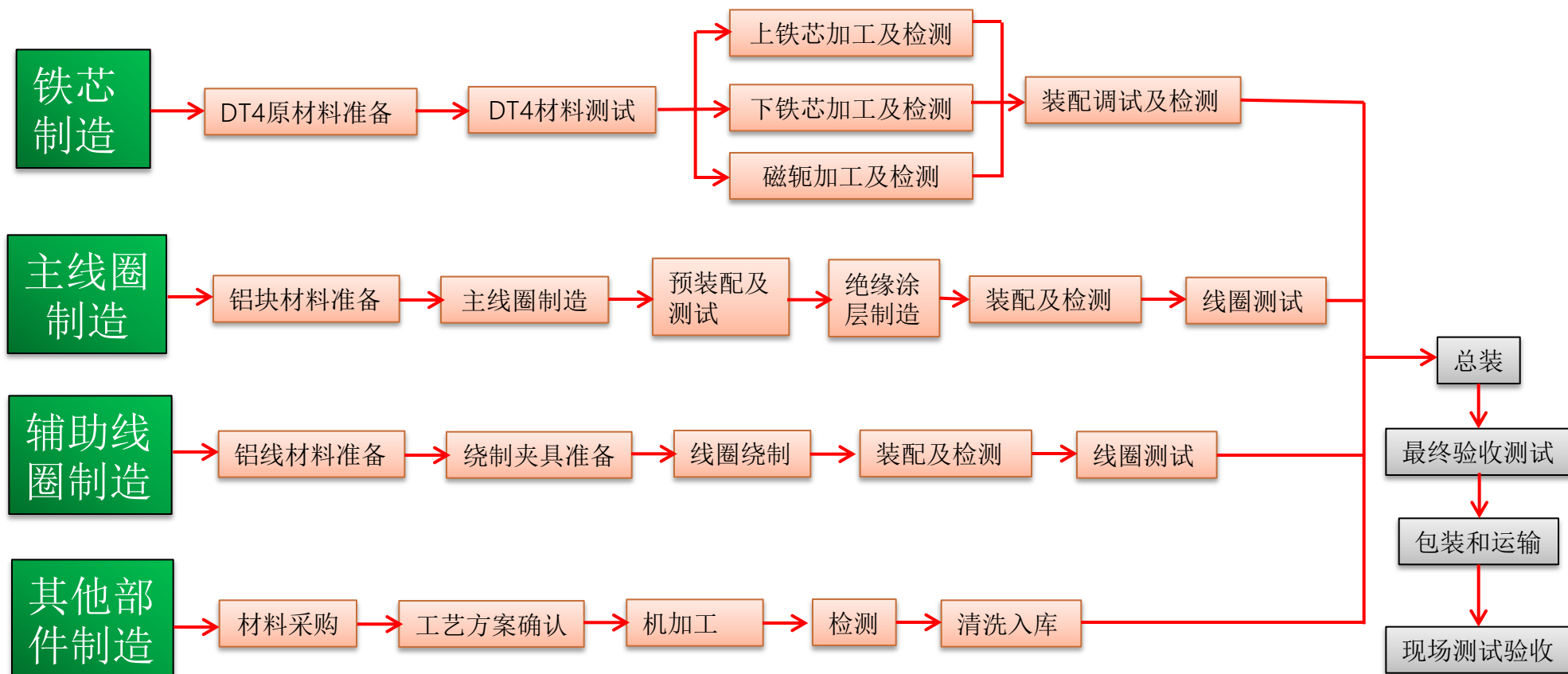
2.3774 Max
2.1132
1.8491
1.585
1.3208
1.0567
0.79258
0.52845
0.26431
0.00018112 Min



磁铁的最大应力为2.38Mpa，位于支撑底座与铁芯支撑接触区域（4个支撑点的设计）

3. 磁体制造工艺及测试介绍

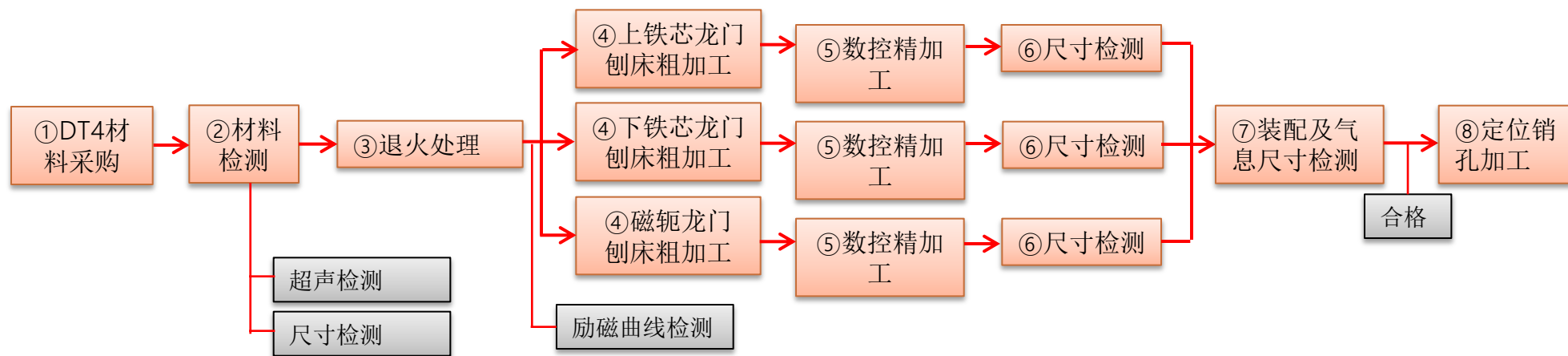
3.1 整体制造工艺路线



3. 磁体制造工艺及测试介绍

3.2 铁芯加工检测方案

➤ 铁芯制造工艺路线



①DT4板材采购

尺寸：5690*540*60mm；数量2件，宽度单边加工余量5mm，厚度单边余量5mm，长度单边5mm。

5690*60*60mm；数量2件（备品1件）；

3. 磁体制造工艺及测试介绍

3.2 铁芯加工检测方案



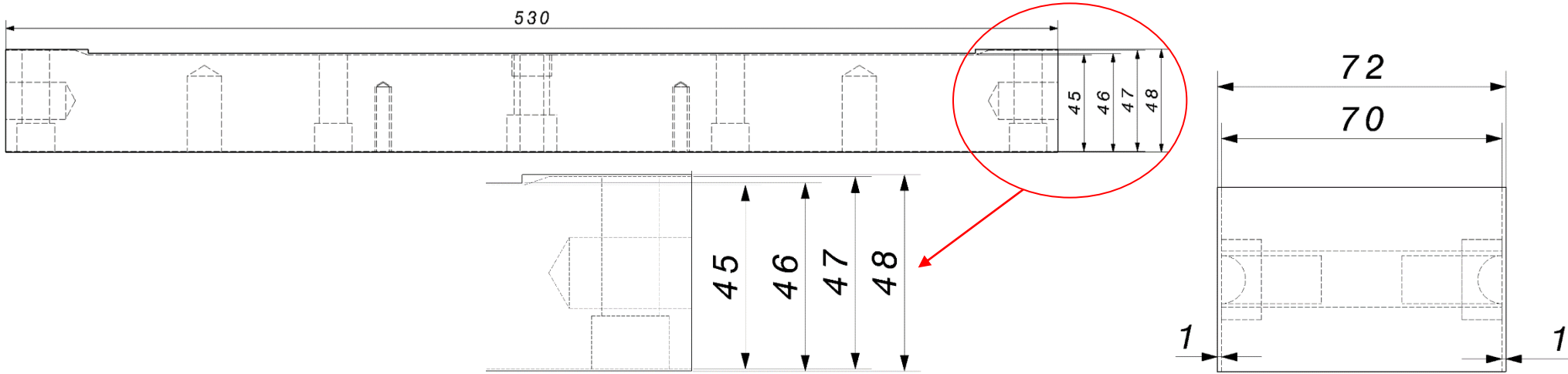
②退火处理

对DT4材料进行退火处理：900°C/4h，降温速度不大于50°C/h至室温。



③上、下铁芯及磁轭龙门刨床粗加工

龙门刨粗加工上下铁芯的厚度、宽度、台阶，加工完成后，厚度余量单边0.5mm;宽度余量单边1mm，长度余量10mm，龙门刨粗加工铁扼宽度、厚度，加工后，宽度余量单边1mm；厚度余量1mm，长度余量10mm



上下铁芯粗加工后截面尺寸图（虚线为最终净尺寸，实线为毛坯料尺寸）

铁扼粗加工后截面尺寸图

3. 磁体制造工艺及测试介绍

3.2 铁芯加工检测方案

④半精加工

数控加工铁芯宽度，安装孔，加工后，厚度余量0.5mm；加工铁扼厚度，安装孔，高度余量单边1mm；



⑤数控精加工

数控精加工铁芯厚度，台阶到尺寸；加工铁扼高度到尺寸；为了保证加工精度，在恒温车间采用精密的五轴五联动设备进行加工，同时采用层切法多次进刀加工到尺寸



⑥尺寸检测

对铁芯及铁扼的平面度等尺寸进行检测；



⑦装配及气息尺寸检测

采用装配平台对上下铁芯以及铁扼进行装配，装配完成后，对气息尺寸进行检测，端口处采用卡尺进行检测，长度方向整体采用特制的通止规进行检测；气息尺寸为70mm；

⑧定位销孔铰孔

尺寸检测合格后加工销孔并安装定位销，并且进行拆装实验，再次测量气息尺寸公差；

3. 磁体制造工艺及测试介绍

➤ 励磁曲线检测结果

- 对DT4进行了励磁性能检测，检测结果表明：DT4满足技术指标要求。

H (A/m)	B (T)	测试结果(T)	H (A/m)	B (T)	测试结果(T)
0	0		700.304	1.4875	
50.1354	0.6073		799.779	1.5105	
70.0304	0.7017		900.0498	1.5288	
80.3758	0.783		1000.321	1.5445	1.59
100.2708	0.897		1200.066	1.566	
120.1658	0.972		1399.812	1.584	
140.0608	1.0303		1500.083	1.5933	
149.6104	1.059		1600.354	1.5994	
159.9558	1.08		1800.1	1.6112	
170.3012	1.1		1999.845	1.624	
179.8508	1.119		2500.404	1.645	1.66
199.7458	1.1545	1.50	3000.166	1.6635	
229.9862	1.1984		3499.928	1.68	
249.8812	1.2235		4000.487	1.6985	
300.0166	1.2775	1.52	4500.249	1.712	
350.152	1.325		5000.011	1.727	1.74
400.2874	1.3605		6000.332	1.7513	
449.627	1.3895		6999.857	1.775	
499.7624	1.4155	1.55	8000.177	1.798	
600.0332	1.4518		9000.498	1.8173	

NCS/D BG01:2018

MA

170000340584

MA

170020340418

ILAC-MRA

CNAS

中国认可
国际互认
检测
TESTING
CNAS L0272

钢研纳克检测技术股份有限公司
国家钢铁材料测试中心/国家钢铁产品质量检验检测中心

检验报告
2022BJR17886
合同号：22BJC10924

委托单位	钢研纳克检测技术股份有限公司上海分公司								
通讯地址/联系人/电话	上海市徐汇区银都路218号关港工业区3期1栋B座 李振川 021-34632910*0								
样品名称(材质)	DT4	送样日期	2022-03-07						
样品规格	Ø40 mm×Ø 32 mm×5mm	实验日期	2022-04-14						
试样状态	固态	报告日期	2022-04-15						
批号(炉号)	\	样品数量	1						
检测内容	桥式力 Hc、不同磁场下的磁感应强度 B								
使用设备	MATS-2010SD 软磁直流测量装置、AB204-N 电子天平								
检测标准(方法)	GB/T13012-2008								
测试结果									
样品中心编号	试样原号	Hc (A/m)	B ₁₀₀₀₀ (T)	B ₅₀₀₀ (T)	B ₂₅₀₀ (T)	B ₁₀₀₀ (T)	B ₅₀₀ (T)	B ₃₀₀ (T)	B ₂₀₀ (T)
22BS031667-1	22SS007729	20.89	1.86	1.74	1.66	1.59	1.55	1.52	1.50

注：1、最大测试磁场为 10000 A/m；磁感应强度 B₁₀₀₀₀、B₅₀₀₀、B₂₅₀₀、B₁₀₀₀、B₅₀₀、B₃₀₀、B₂₀₀
测试磁场分别为 10000A/m、5000 A/m、2500 A/m、1000 A/m、500 A/m、300 A/m、200 A/m；
2、密度 ρ=7.85 g/cm³ 由用户提供；
3、天平最大称量：210 g，天平精度：0.1 mg；
4、测试环境温度为 24.0 ℃；
5、测量结果仅对来样负责。

以下空白

*****报告结束*****

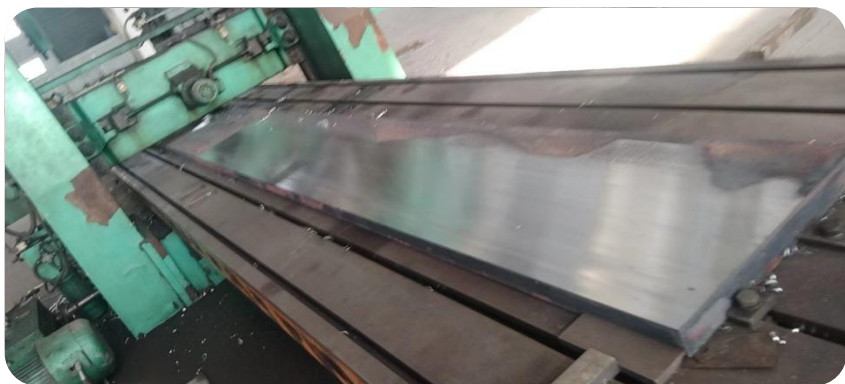
声明：除非钢研纳克人员亲赴抽样，此报告仅对来样结果的有效性负责，不作为法律依据。请在发出报告之日起15日内提出，报告无“分析检验专用章”、无签发人签字无效。检验报告不得随意复制、完整复制需经本公司同意，否则对客户提供的信息负责。

签发人 李振川 签发日期 2022.4.15

通讯地址：北京市海淀区高梁桥斜街13号 邮编：100081
联系电话：010-62182643 传真：010-62182266
电子邮箱：lab@ncschina.com 网址：www.ncschina.com

3. 磁体制造工艺及测试介绍

➤ 铁芯加工过程照片



铁芯粗加工



铁芯半精加工



铁芯精加工

3. 磁体制造工艺及测试介绍

➤ 铁芯加工精度检测

- 铁芯精加工完成后，首先在五轴数控机床上对整个铁芯和磁轭进行了平面度检测，检测铁芯及磁轭的平面度为： $\pm 0.02\text{mm}$;



铁芯平面度检测

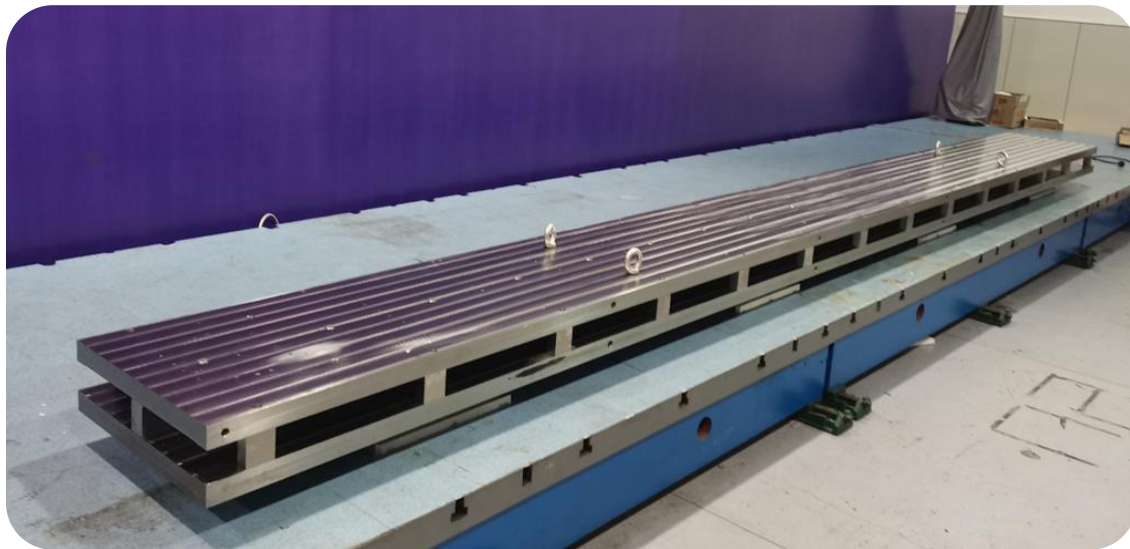


磁轭平面度检测

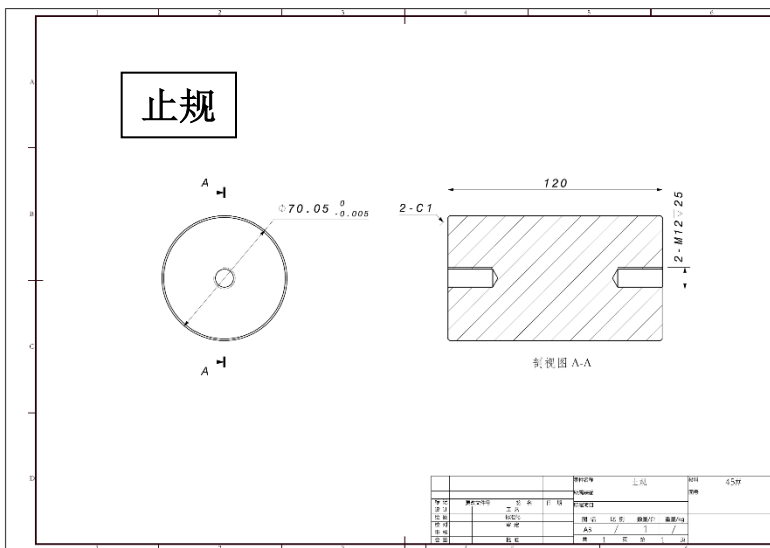
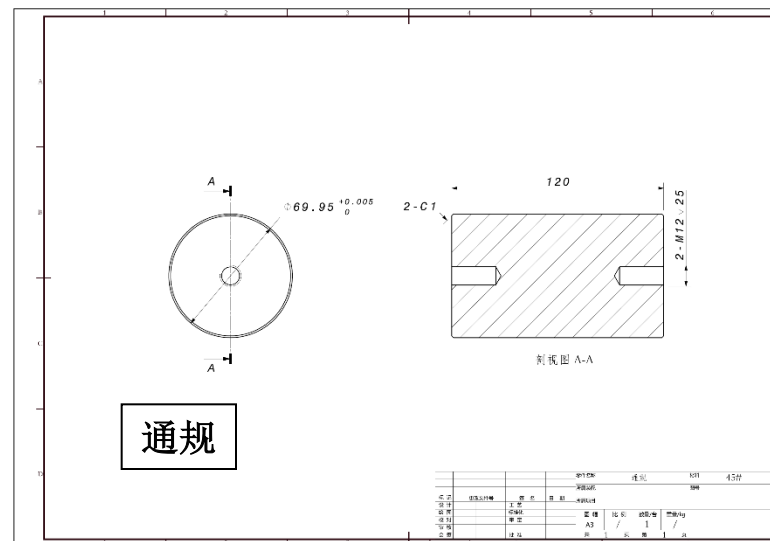
3. 磁体制造工艺及测试介绍

➤ 铁芯加工精度检测

- 然后进行了铁芯的组装，采用通止规对气息（ $70\pm0.05\text{mm}$ ）进行了检测；



铁芯组装



3. 磁体制造工艺及测试介绍

➤ 铁芯加工精度检测

- 通止规检测结果表明，气息满足 $70 \pm 0.05\text{mm}$ 的公差要求；
- 然后加工两端和上下面定位销孔



铁芯气息通规检测



铁芯气息止规检测

3. 磁体制造工艺及测试介绍

➤ 铁芯加工精度检测

- 待铰孔、喷漆以及线圈试装后，分别再次进行了气息检测，气息仍满足 $70\pm 0.05\text{mm}$ 的公差要求；



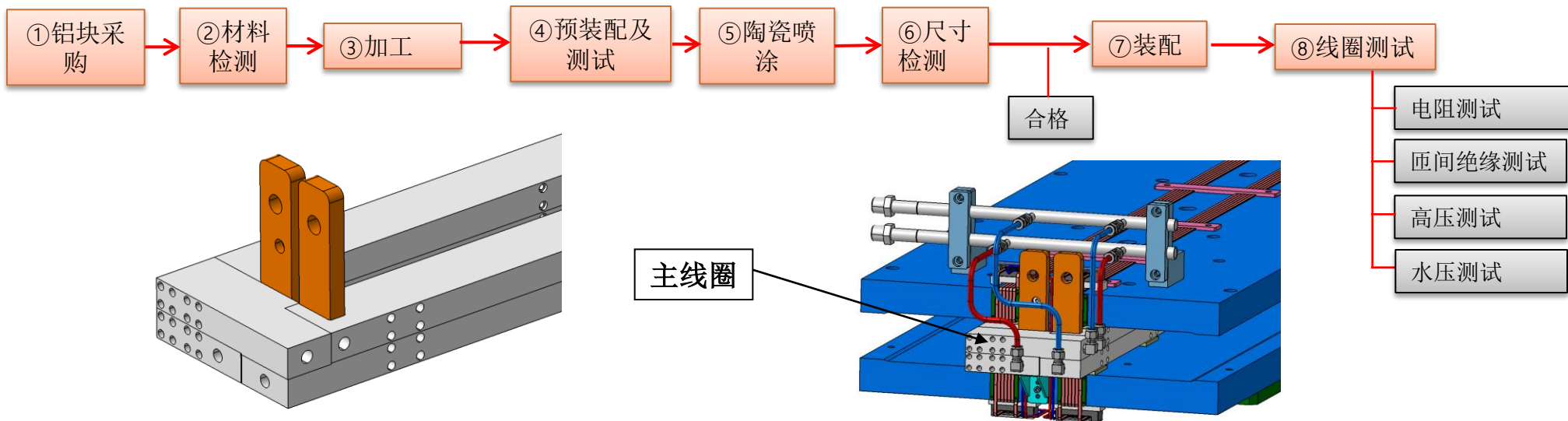
铁芯气息通规检测



铁芯气息止规检测

3. 磁体制造工艺及测试介绍

3.3 主线圈制造工艺方案



主线圈的材料分为两种：

- 长铝块：27*60*5780mm 中心水冷孔为 $\Phi 5\text{mm}$ ；8根（备品1套）；
- 短铝块：30mm厚度铝排（190*70*30mm）若干；

3. 磁体制造工艺及测试介绍

➤ 主线圈加工过程照片



主线圈原材成形



主线圈加工后



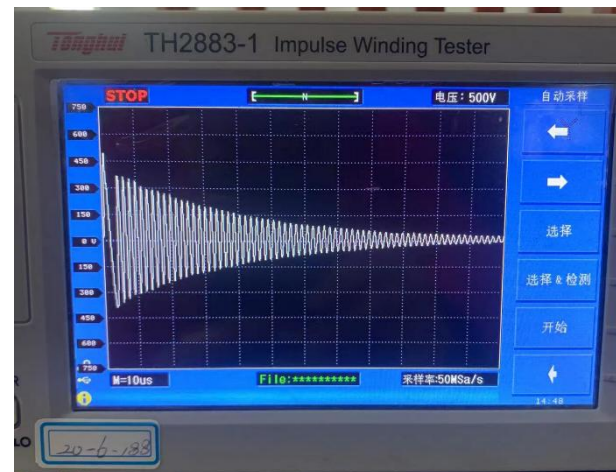
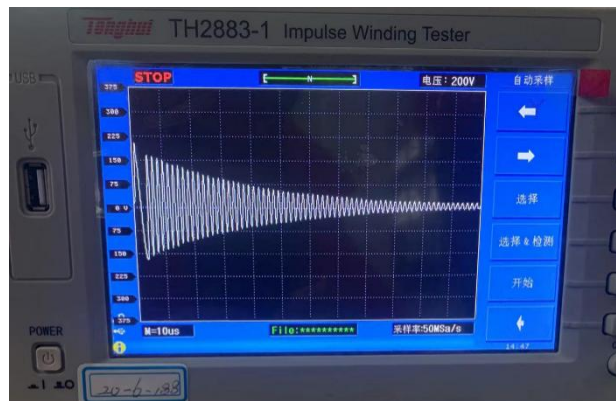
主线圈喷涂陶瓷涂层后

3. 磁体制造工艺及测试介绍

➤ 主线圈测试

匝间绝缘测试：

测试电压：500V



测试结果：合格（分别测试了：200V和500V）

3. 磁体制造工艺及测试介绍

➤ 主线圈测试



高压测试：

设计要求：1000V，漏电流
小于10 μ A

耐压测试结果：1000V，漏电流
小于1 μ A

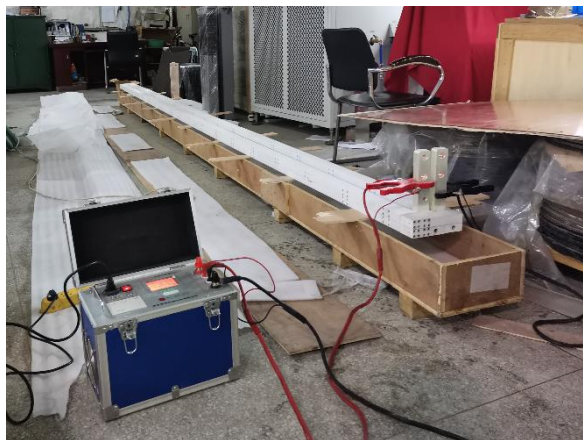
测试结果：合格



绝缘电阻测量结果：

500V：>1.06T Ω

1000V：>1.06T Ω



电阻测量结果：

0.436m Ω (10.5 $^{\circ}$ C)

计算值：

0.41m Ω (室温)



电感测量结果：

50Hz: 12.43 μ H

300Hz: 10.74 μ H

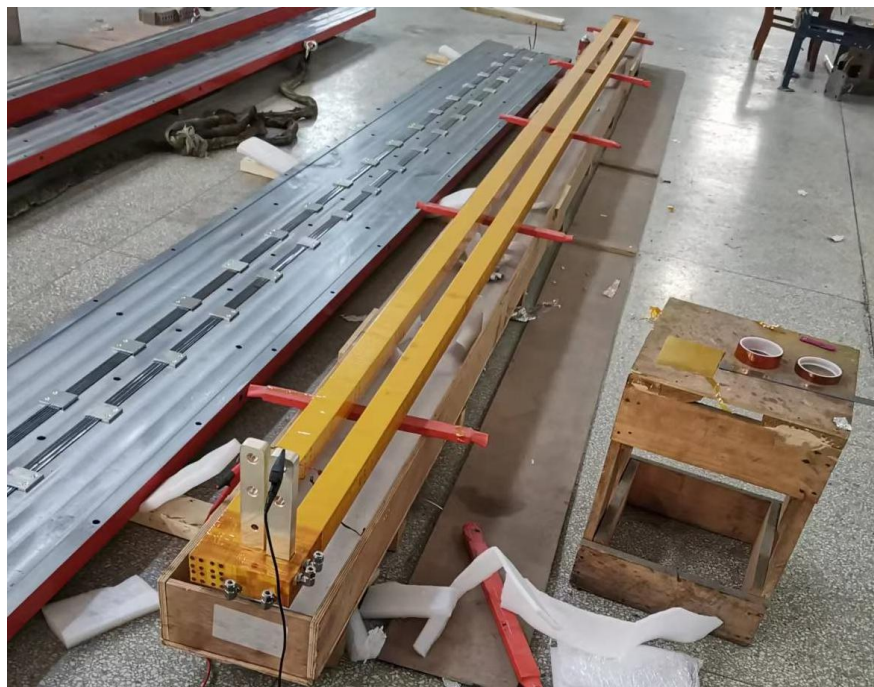
1000Hz: 10.33 μ H

3. 磁体制造工艺及测试介绍

➤ 主线圈测试

高压测试：

- 线圈喷涂陶瓷后，进行了高压测试，测试电压1000V，测试结果，漏电流为343 μA ；漏电流较大；
- 因此，对线圈表面整体包饶了一层聚酰亚胺带，采用半叠包的方式进行包饶，包饶后，再次进行了1000V的高压测试，漏电流小于1 μA ，满足小于10 μA 的要求；



3. 磁体制造工艺及测试介绍

➤ 主线圈测试



主线圈通水测试：

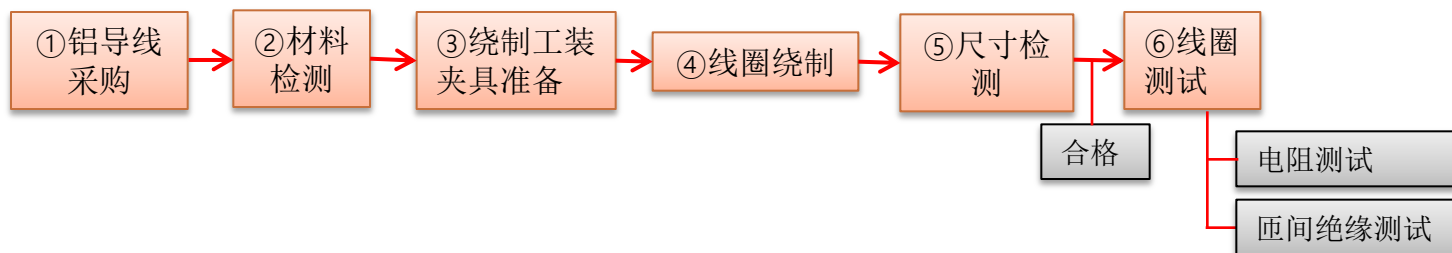
压力10公斤（1MPa）

测试结果：保压30分钟，无泄露

压降：约0.8MPa

3. 磁体制造工艺及测试介绍

3.4 辅助线圈制造检测方案



铝漆包导线采购：截面尺寸为2*5mm，长度为70m，数量为4；

3. 磁体制造工艺及测试介绍

➤ 辅助线圈绕制过程照片



3. 磁体制造工艺及测试介绍

➤ 辅助线圈测试



电阻测量结果:

199.53 mΩ(15.1°C)

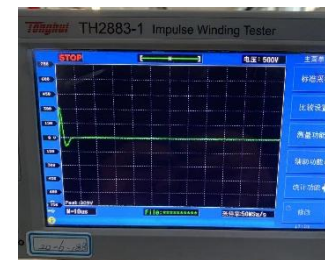
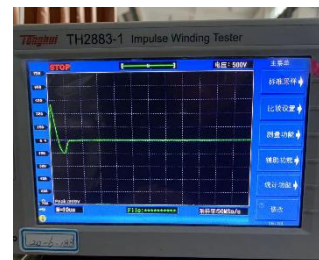
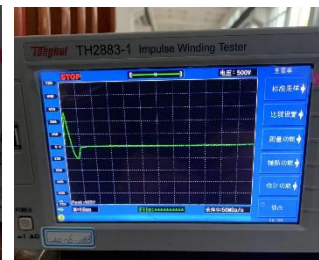
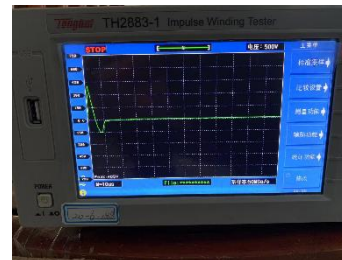
220.20mΩ (15.1°C)

200.20mΩ (15.1°C)

200.00 mΩ (15.1°C)

计算值:

193.8mΩ(室温)



匝间绝缘 :

500V

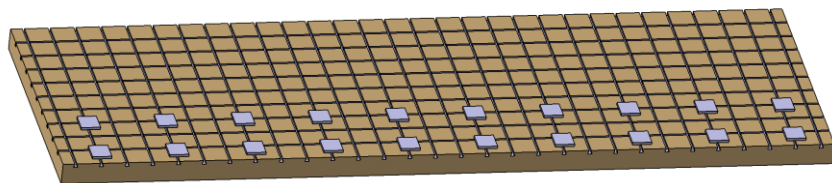
4个线圈的波形一致

匝间绝缘合格

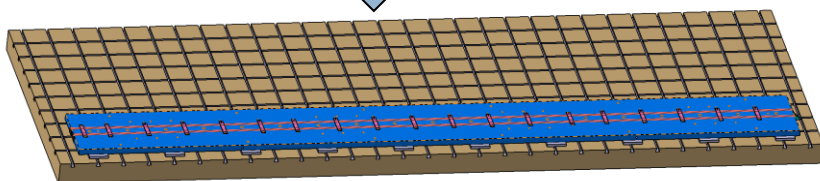


4. 磁铁装配

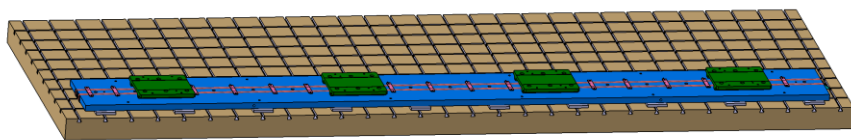
4.1 磁体装配方案



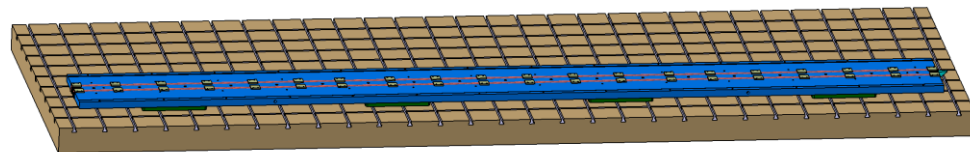
(1) 在装配平台上，放置等高垫块



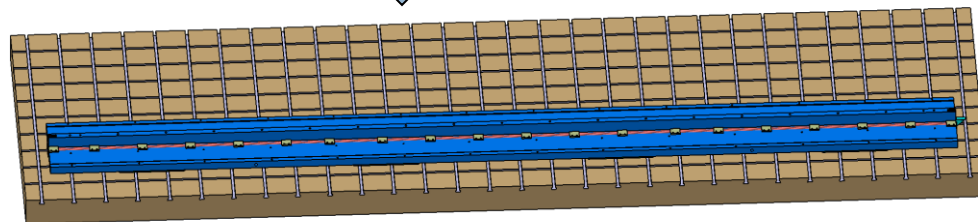
(2) 安装下铁芯



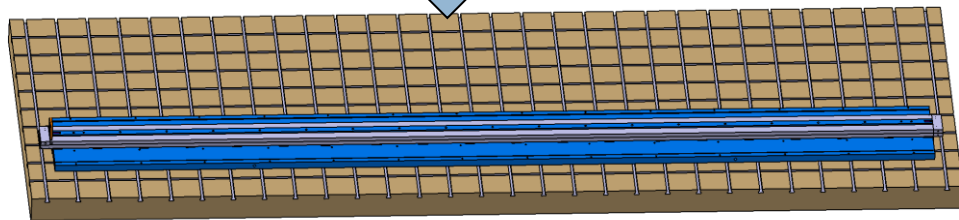
(3) 安装磁体支撑



(4) 利用侧边吊点将下铁芯翻身，并且移除等高块



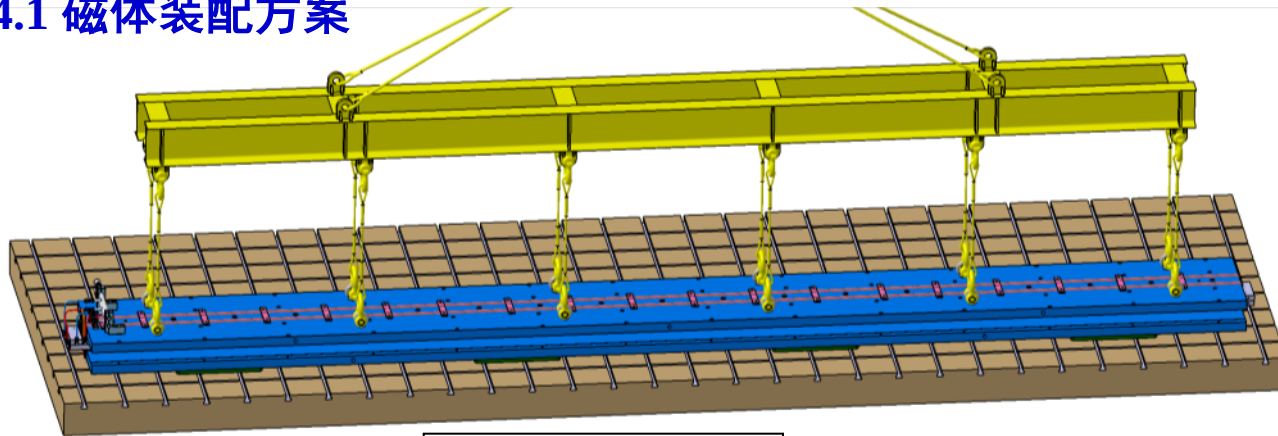
(5) 安装铁扼，调整好位置，并采用定位销定位



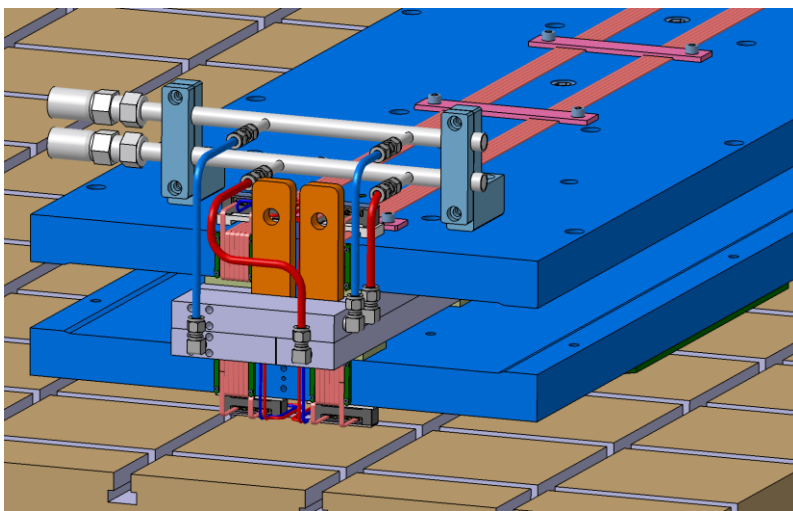
(6) 安装主线圈

4. 磁铁装配

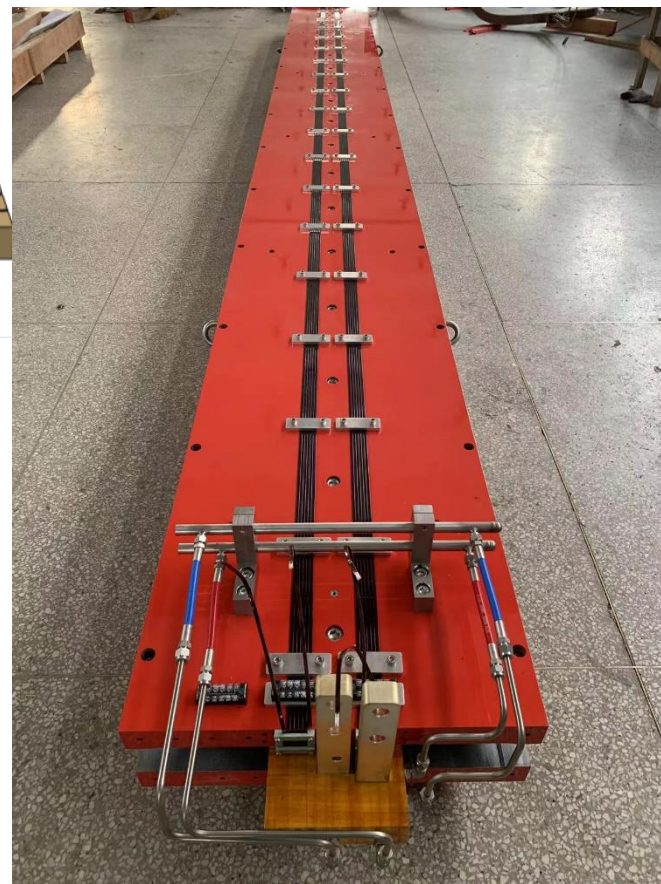
4.1 磁体装配方案



(7) 安装上半铁芯



(8) 线圈引线以及水路安装



5. 小结

➤ 根据技术要求，对磁体进行了相关测试，测试结果如下表所示，所有的测试结果均合格

技术要求	测试项目	测试参数	指标要求	测试结果	是否合格
线圈主要性能指标	主线圈进行匝间测试	500V		合格	✓
	主线圈高压测试	1000V	漏电流不大于10uA	<1uA	✓
	主线圈水压测试	1MPa	保压30分钟，无泄漏	无泄漏	✓
	线圈电阻测试		不超计算值的1.2倍	0.43mΩ	✓
磁铁主要机械精度和材料磁性能要求	磁体气息公差要求	/	70±0.05mm	合格	✓
	DT4纯铁材料励磁性能检测	/	符合表格数据要求	符合要求	✓

谢谢!

