



2016年版

中国工程物理研究院 科技年报

Annual Report of China Academy of Engineering Physics



• 中国原子能出版社 •

2016 年版

中国工程物理研究院

科技年报

Annual Report of

China Academy of Engineering Physics

编辑部通讯地址

四川省绵阳市 919 信箱 805 分箱

邮编: 621999

电话: (0816) 2485754, 2485793

传真: (0816) 2483701

E-mail: HPLPB @caep.ac.cn

URL: www.caep.cetin.net.cn

中国原子能出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

中国工程物理研究院科技年报 : 2016 年版 / 《中国工程物理研究院科技年报》编辑部编. — 北京:中国原子能出版社, 2016.12

ISBN 978-7-5022-7722-2

I. 中… II. 中… III. ①工程物理学—中国—2016—年报 IV. ①TB13-54

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 312371 号

内容简介

本书主要汇编 2015 年度中国工程物理研究院的部分科研进展和成果摘要, 内容涉及物理与数学、力学与工程、材料与化学、电子与信息、光学与电气工程等研究领域。

本书旨在加强与国内外同行之间的交流与合作, 并可供从事科学研究与管理的有关部门和科技人员、高等院校师生参考。

中国工程物理研究院科技年报/2016 年版

出版发行 中国原子能出版社 (地址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮编: 100048)

责任编辑 付 真

特约编辑 唐 勇 王玲琳

印 刷 四川绵阳科学城曙光印刷厂

经 销 全国新华书店

开 本 880 mm × 1230 mm 1/16

字 数 461 千字

印 张 16.375

版 次 2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-7722-2

印 数 1—1 000 定 价 100.00 元

版权所有 侵权必究 出版社网址: <http://www.aep.com.cn>

《中国工程物理研究院科技年报》

编审委员会

主 任 彭先觉

副主任 汪小琳 赵武文

委 员 (以姓氏笔画为序)

王 韬 帅茂兵 叶春福 田 忠 李正宏 李敬明

肖世富 何建国 何铁宁 何朝晖 应阳君 张 凯

张 健 张传飞 张保汉 范国滨 杨礼兵 罗文华

孟凡宝 赵 锋 赵成杰 胡海波 莫 军 席传裕

黄秀光 隋 展 曾 超 魏智勇

编辑部 唐 勇 王玲琳 刘 剑

综述

同时分幅/双扫描超高速光电摄影系统.....	温伟峰	1
温等静压成形成套设备研制.....	蒋道建	9
LLM-105 单质炸药研究.....	廖龙渝	14
高压高频光机电异构集成微系统技术研究进展.....	代 刚	19
太赫兹固态室温检测器技术研究.....	缪 丽	26
数 PW 级光参量超短脉冲激光技术平台.....	周凯南	32
扩散方程单元中心型有限体积格式.....	袁光伟	39
间接驱动惯性约束聚变靶物理研究.....	邹士阳	47
JASMIN 框架面向亿亿次计算的研究进展.....	刘 旭	54
高功率窄线宽光纤激光及其高效优质光谱合成技术.....	马 毅	60
紧凑型重复频率高功率微波驱动源技术.....	罗 敏	66

物理与数学学科

温稠密 Ne、Ar、Kr 状态方程、输运性质及等离子体相变.....	郑 君	75
新型柱面(准)等熵压缩物理实验方法.....	谷卓伟	78
32 点多路复用光学测速样机研制.....	李建中	80
冲击加载下位错运动行为对波剖面演化影响的数值模拟.....	姚松林	83
炸药爆轰的电磁法实验技术研究.....	张 旭	86
介质内低能区中子能谱测量技术.....	赖财锋	88
快中子反应堆样品反应性价值测量技术.....	周浩军	91
“神光 II”升级装置首次锥壳靶间接驱动快点火集成实验.....	张 锋	95

力学与工程学科

一种直接测量材料高压强度的磁压剪实验技术.....	罗斌强	101
激波与连续型流体界面相互作用的研究.....	邹立勇	104
冲击片组件高效换能技术.....	付秋菠	107
临氢阀门失效机理及可靠性评估方法.....	梁 浩	110
阵列式大口径反射镜背支撑结构.....	陈晓娟	114
高精度惯性仪表校准检测装置研制.....	张映梅	117
云杉各向异性力学行为实验测试与数值模拟.....	钟卫洲	121
大型 G50 钢壳体淬火过程模拟技术.....	李敬民	124
基于大塑性变形的钕合金晶粒细化机理研究.....	黄姝珂	127
KDP 晶体磁流变抛光过程中去除函数稳定性研究.....	王 超	129
高性能电主轴综合性能集成测试系统研制.....	舒 强	132

材料与化学学科

中子辐照后钎合金的拉伸力学性能研究.....	郑 健	139
新型电极材料的研究及应用.....	倪 伟	142
原位化学气相沉积核壳 PTFE-Al 的设计与制备.....	王 军	146
黏结剂原位聚合包覆硝胺炸药高效降感研究.....	杨志剑	150
大尺寸激光透明陶瓷制备技术获得关键突破.....	余盛全	153
聚多巴胺表面改性制备弹性导电复合材料及在导电通路中的应用.....	朱春华	157
放射性废机油固化技术.....	刘 艳	160
U 基非晶的形成规律与晶化机制.....	黄火根	163
杂质铁对 U-0.7%Ti 合金与氢反应的影响.....	张广丰	166

电子与信息学科

中小型无人机载光谱成像系统研究.....	王海峰	171
0.19 mJ 强脉冲太赫兹源研究.....	钟森城	175
大型高效率单脉冲毫米波波导缝隙阵设计.....	崔奉云	178
水下近程目标激光探测技术.....	彭 波	182
分频段数字预失真技术.....	张 祺	185
基于太赫兹量子级联激光器的相关研究.....	王雪敏	188
基于不可见剔除的大规模粒子绘制算法.....	王华维	192
0.22 THz 折叠波导返波振荡器研究.....	胡林林	195
未知通信协议安全漏洞自动化挖掘方法.....	刘 渊	198

光学与电气工程学科

磁化靶聚变中反场构形等离子体研究.....	贾月松	203
用于 Z 箍缩驱动器的 1 MA-LTD 原型模块设计和实验.....	刘 瑜	207
铝套筒 Z 箍缩 X 射线背光照相实验研究.....	刘冬兵	210
高重复频率固态脉冲功率技术研究.....	栾崇彪	213
基于“CPP+SSD+PS”的靶面光场精密控制技术.....	张 锐	217
侧泵 Nd:YAG 浸入式激光器原理样机研制.....	尚建力	222
“神光-II”升级三倍频精密诊断系统设计与三倍频焦斑初步分析.....	季来林	226

附录 A 2015 年承办的部分重点学术会议.....	231
附录 B 2015 年获得立项的国家自然科学基金.....	235
附录 C 2015 年度在全国性学会学术任职情况.....	239
附录 D 2015 年院研究生学位论文题录.....	244



温伟峰
副研究员
0816-2494155
E-mail: wenweifeng109@caep.cn

同时分幅/双扫描超高速光电摄影系统

高速摄影历来是精密物理实验研究的一个重要组成部分，目的是通过研究时间跨度在 $10^{-5}\sim10^{-12}$ s 范围，高时空分辨、能谱分辨、强度诊断等多参数精密时空诊断技术，测量高速过程和高能产物的特性，获得相关物理参数的时空分布状态，以获得运动物体或材料在高压、高应变率等极端条件下的物理性质和相关冲击动力学过程的认识。

根据成像原理不同，超高速光电分幅成像虽然可以获得高速过程在离散时间点上的二维空间信息，但其时间记录点离散，会丢失记录时间点之外的信息；超高速扫描成像系统虽然可获得高速过程在连续时间点上一维(狭缝)空间信息，但其无法实现二维空间信息获取。这里介绍的同时分幅双扫描超高速光电摄影系统在一次实验中获得瞬变现象同一时基、同一空基的分幅和扫描图像，实现了分幅摄影和扫描摄影的优势互补，从而完成对高速现象的多维时空信息获取及动态演化过程研究。

1 总体指标情况

自2011年底进行研制以来，已完成工程化同时分幅扫描超高速光电摄影系统的工程设计、元部件研制、软件开发和组装，掌握了高空间分辨(优于31.8 lp/mm)、皮秒时间分辨(优于5 ps)光电扫描成像核心技术和高空间分辨(优于43.9 lp/mm)、纳秒时间分辨(优于5 ns)光电分幅成像核心技术，并基于制定的指标验证方法对系统各项功能指标进行了检验、测试、标定和长距离的运输考核。实验表明，系统工作稳定、可靠，系统性能指标完全可以与美国分幅/扫描成像系统各项指标相媲美(见表1)。此外，单独分幅成像组件指标达到英国Specialized Imaging公司的SID系列多通道超高速光电分幅相机性能，单独扫描成

表 1 同时分幅扫描超高速光电摄影系统性能比较

型号	UHOEC-F6S2(中国)	IMACON-200(美国)	对比情况
分幅成像最短曝光时间	4.83 ns	5 ns	优于
最高摄影频率	2.07×10^8 fps	2×10^8 fps	优于
分幅图像像素数	1360×1024	1360×1024	相当
分幅成像 CCD 输出图像数据位数	14 bits	10 bits	优于
分幅成像曝光时间范围	5 ns~10 ms 以 5 ns 步进调节	5 ns~2 ms 以 5 ns 步进调节	相当
分幅成像画幅间隔	1 ns~10 ms 以 1 ns 步进调节	5 ns~1 ms 以 5 ns 步进调节	优于
分幅成像空间分辨率	43.9 lp/mm	?	
分幅画幅数	6 幅	7 幅	
扫描成像扫描方向	两个方向同时扫描	单个方向扫描	优于
扫描成像最好时间分辨力	4.7 ps(X 方向)、 4.9 ps(Y 方向)	30 ps	优于
扫描记录长度	465 ps~1 ms, 多档可调	10 ns~1 ms, 多档可调	优于
扫描非线性度	≤3%	?	
扫描成像静态空间分辨率	32.1 lp/mm(X 方向)、 31.8 lp/mm(Y 方向)	25 lp/mm	优于
扫描图像像素数	2048×2048	1360×1024	优于
扫描成像 CCD 输出图像数据位数	16 bits	10 bits	优于

像指标接近日本滨松公司C5680型扫描相机性能。

2 同一时间空间基准设计与标定

首次提出了同时分幅/双扫描(水平与垂直)超高速光电摄影的创新思想,实现对高速现象的多维时空信息获取及动态演化过程研究。要将分幅成像和扫描成像结合起来,同一时间和空间基准的设计是其核心技术。设计中,解决了棱锥分光造成的图像不均匀及复杂的光瞳匹配问题,使系统具有高的空间分辨能力(80 lp/mm)和像面一致性(放大倍率在0.992~1.021);通过优化系统调制传递函数的分配与设计,分析了分幅分光、扫描分光及反射等引起的能量分配不均问题,采取了相应镀膜方案,使系统在380~800 nm超宽光谱范围内获得了理想的分光比,从而保证分幅和扫描图像具有同一空间基准;在系统结构设计中,采用模块化设计思路,保证各支路可独立检测和装调的同时,结构更加紧凑、稳定,体积更加小巧,满足仪器内部小空间尺寸要求(见图1)。此外,为保证分幅和扫描时刻具有同一时间基准,设计中采用晃动测量技术得到外触发信号与本地时钟之间的晃动,再通过后端高精度模拟延时补偿电路对该晃动值进行实时补偿,从而抑制外触发晃动,在此基础上再基于皮秒脉冲激光对整机进行标定和检测,确保两种成像方式触发时基稳定,且具有同一时间基准。

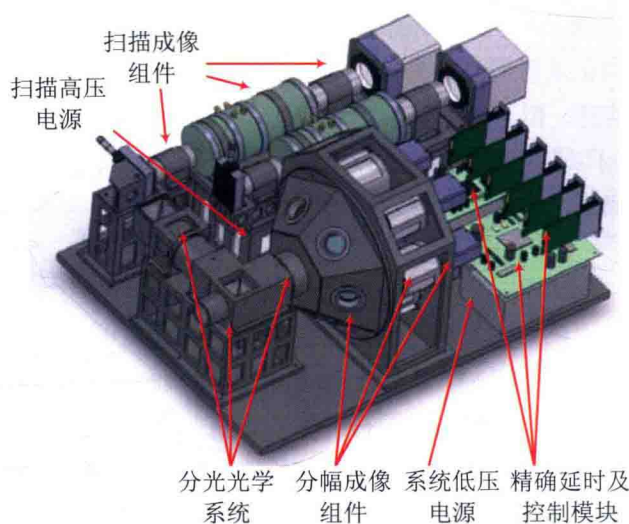


图1 系统同一空间基准结构布局设计

3 曝光时间从ns到ms可调、高空间分辨分幅成像

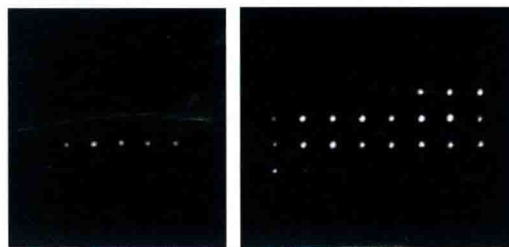
为提高分幅成像核心组件——像增强器的响应时间,光电阴极基底采用带电导膜MCVD制作技术生长纳米级薄膜,形成高速电子导电层,再进行光阴极面板的清洗和清洁,使光阴极在膜层不改变的情况下降低了电阻率,提高光电子的溢出速度,从而达到5 ns以内选通时间。空间分辨是分幅成像另一个重要考核指标,为满足快速成像的要求,像增强器必须采用短余辉P43荧光屏,其粒度大会导致荧光屏成像分辨力下降;经技术攻关,采用聚乙烯醇新材料替代传统的硝化棉悬浮法涂膜方式,改善了大颗粒荧光粉的附着力,同时采用超薄胶、减少铝层与荧光粉之间的间距等措施,减少镀铝的厚度,制作了粉层均匀且致密度高的荧光屏,提高了荧光屏鉴别率和屏效,使裸管的空间分辨可以达到50 lp/mm以上。

在像增强器驱动脉冲方面,采用数值模拟和实验相结合的研究方法,对基于雪崩管和MOSFET等产生高压脉冲的技术进行理论分析,对关键部件建立相应的数值模型,通过数字模拟分析,给出影响高速高压脉冲产生模块性能的关键指标和参数;提出了基于推挽MOSFET结构的高速开关电路实现电压幅度从+60~-180 V的高速脉冲。该驱动模块具有以下几个优点:(1)输出脉冲宽度受控于输入低压脉冲宽度,

选通门宽可以从3.7 ns~20 ns以5 ns步进大范围连续调节,而且结构紧凑、小巧,可直接套接在像增强器上;(2)采用过驱动方式,大大提高了脉冲开关的边沿速度,设计的高压脉冲边沿速度接近器件理论极限,输出的双极性脉冲在+60~-180 V电压变化范围下,下降沿达到1.3 ns,上升沿1.7 ns;(3)通过调节各个脉冲的过驱动能力,使各脉冲开关器件保持尽可能相同的开关特性,在电路布局上进一步减少分布电感和分布电容的不良影响,从而使脉冲输出具有很好的稳定性和一致性;(4)采用模块化设计思路使各驱动模块相互独立,从而有效避免了相互之间的串扰,同时采用套筒结构也大大提高了模块的抗干扰能力和可靠性。



图 2 单路分幅成像组件



(a) 5 ns曝光时间

(b) 20 ns曝光时间

图 3 曝光时间测试结果(两点之间时间间隔1ns)

4 ps到ms时间跨度高线性度扫描成像

皮秒时间分辨条纹管是实现皮秒时间分辨的核心部件之一,主要有两个难点:一是高分辨率、高像质电子光学系统;二是曲折线型行波偏转系统。该条纹管采用高分辨率加速网组件和多电极静电透镜系统实现高分辨成像,设计耐高压系统实现多电极超近贴安装,并利用专用定位模具确保多电极电子光学系统同轴装配,从而保证条纹管具有高分辨率和高像质(30 lp/mm以上空间分辨)。为提高条纹管时间分辨能力,采用曲折线型行波偏转结构替代普通偏转板的扫描偏转系统,使偏转电压信号与电子轴向速度同步,从而提高偏转速度,此外,采用50 Ω 标准同轴接口,使偏转系统带宽大于1.5 GHz,确保了高速偏转电压无失真施加到扫描偏转系统。

扫描成像部件的另一大难点就是扫描驱动电路的设计。扫描成像要达到高时间分辨率,除了要求条纹管的时间分辨和空间分辨能力满足要求外,还需要足够快的扫描驱动电路;为了实现不同扫速,扫描驱动电路必须能够产生不同斜率的扫描电压;为了保证扫描成像的线性度,扫描驱动电压需要有很好的线性度。归结起来,扫描驱动电路设计难点主要有三点:一是如何产生超快扫描电压,使得满屏扫描时间小于1 ns,以实现优于10 ps的时间分辨率;二是如何产生斜率在很宽的范围内可调的扫描电压,实现记录时间在1 ns~1 ms范围内可调;三是输出的扫描电压必须具有很好的线性度和驱动能力,以满足扫描成像对扫描线性度的要求。

设计中,通过以下方法解决上述问题:(1)如果采用多级雪崩管串联电路产生超高速扫描电压,在电压正向扫描之后很短的时间内又反向回扫,这时若仍有光进入到成像视场,这部分光将被叠加到条纹管的荧光屏上,干扰最终得到的实验图像。鉴于此问题,设计中结合雪崩管开关速度快、驱动能力强和MOSFET回扫时间易于控制的特点,采用了雪崩管驱动高压MOSFET的差分电路结构,实现了满屏扫描时间500 ps、时间分辨优于5 ps的超快扫描脉冲。(2)为满足从ns到ms量级的大范围扫描记录时间,设计中将扫速档位划分成快速、中速、慢速三个区间,针对每个扫速区间采用不同的脉冲产生方案设计一套模块化扫描组件,每套扫描组件的扫速多档可调,覆盖了对应的扫速区间,扫描组件和系统主体的连接采用机械插拔式结构,用户可根据实验过程长短或时间分辨需要更换不同的扫描组件。(3)如果使用单端输出驱动扫描管方式来保证所有扫描档位的扫描非线性度均优于5%,不仅电路设计和调试复杂,而且对电路布局和布线要求较高;本系统中,采用差分驱动方式,将两路时序严格同步的差分扫描信号加

载在条纹管的两个偏转电极，再通过RC电路对信号阻尼系数调节来改变其边沿线性度，既降低了扫描信号电压幅度的要求，也大大提高了扫描信号的线性度。图4是单路扫描成像组件实物，图5是在500 ps扫描记录时间上得到的最好时间分辨测试结果。表2为部分档位扫描非线性测试结果。



图 4 单路扫描成像组件

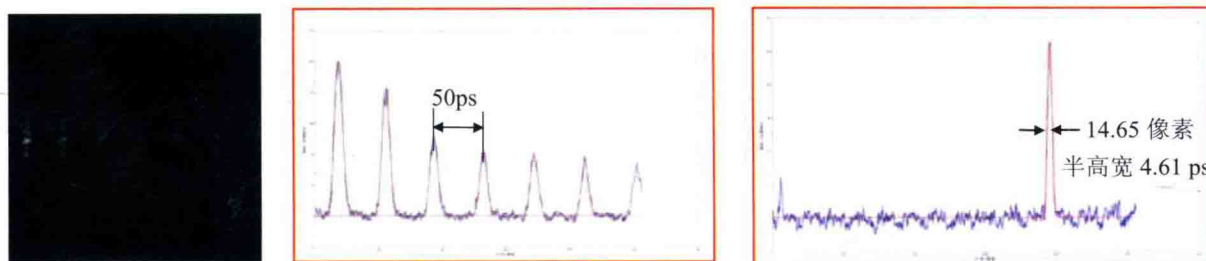


图 5 扫描成像时间分辨测试结果(最好时间分辨 4.61 ps)

表 2 扫描成像部分档位非线性度测试结果

档位	扫描方向	扫描非线性度/%	档位	扫描方向	扫描非线性度/%
500 ps	X	1.04	100 ns	X	1.97
	Y	1.65		Y	1.87
1 ns	X	1.45	500 ns	X	1.05
	Y	2.06		Y	0.92
2 ns	X	1.7	1 μs	X	0.78
	Y	1.99		Y	1.08
5 ns	X	2.23	10 μs	X	1.49
	Y	1.96		Y	2.02
10 ns	X	2.09	100 μs	X	1.54
	Y	2.47		Y	1.12
20 ns	X	2.24	1 ms	X	1.22
	Y	2.25		Y	1.38

5 高精度、低触发晃动的时序同步与控制技术

在高速摄影实验中，由于被测物体的运动过程可能会很短，需要使被测物体的运动过程与系统的照相过程精确同步，才能获得实验图像；另一方面，系统内部各模块之间如相机触发、像增强器光阴极选通脉冲、扫描管扫描斜坡电压、MCP 增益、CCD 接收系统以及触发延时输出之间必须满足一定时序要求，才能真正实现同一时间基准的同时分幅/扫描超高速光电成像。因此具有大范围延时(1 ns~20 ms)以及脉宽可调(5 ns~20 ms)、高精度(延时精度 200 ps)、低触发晃动(± 150 ps)、高稳定度的时序同步与控制技术是设计的一个难点。

系统设计中，采用模拟延时和数字延时结合的方式完成大范围高精度的同步时序调节，利用FPGA 数字延时方式完成10 ns~20 ms以10 ns为整数倍延时，采用模拟延时方式完成10 ns以内的短延时。该方

式如果只是简单的拼接,虽然能够解决大范围、高精度延时问题,但由于系统的触发脉冲上升沿需要经过FPGA的参考时钟鉴别,而FPGA的参考时钟为100 MHz,这样鉴别上升沿的最大晃动误差可以达到10 ns,无法保证系统在外触发工作状态下的低晃动(± 150 ps)要求,因此,针对FPGA的参考时钟与触发输入脉冲之间的晃动误差设计了专门补偿电路,通过专门的测量电路测量出两者之间的晃动值,并将其补偿到后面模拟延时部分,从而保证了系统在外触发状态下的低晃动。此外,设计的模拟延时电路理论步进精度可以达到20 ps,由于器件本身温度特性和电路最终布局,实测延时精度达到500 ps,为补偿温度特性引起的延时时间漂移,在FPGA内部建立了查找表,对输出脉冲进行实时补偿,从而保证脉冲输出的稳定性,使延时精度达到200 ps,外触发晃动达到 ± 150 ps以内、脉冲之间的晃动 ± 100 ps以内。由于时间同步电路除完成系统各部件的时序同步外,还要给分幅成像驱动模块提供脉冲宽度可调(5 ns~20 ms)的序列脉冲,设计中利用脉冲合成方法将两路高精度低晃动脉冲的上升沿分别作为该脉宽可调序列脉冲的上升沿和下降沿,从而解决了输出脉冲宽度从ns到ms量级大范围调节问题,实现了分幅成像曝光时间的大范围受控调节。

6 功能丰富的图像处理算法库

针对系统对图像高速获取和处理的需求,采用文档/视图的软件架构设计思想,对每一个数据采集通道建立对应的视图窗口,分别建立了不同类型的文档操作类,以实现针对不同种类相机的控制,并根据通道的数量和相机类型建立对应的类对象,再将类对象与创建的视图窗口对应,从而保证8个数据采集通道能够与8个视图窗形成一一对应关系,完成同时控制8个通道进行图像采集的功能。由于本系统采用像增强器对弱光照条件下的被拍摄对象进行增强摄影,像增强器会导致图像噪声增大,从而使得图像信噪比较低,因此,图像处理也是本系统的一个关键技术。设计中,针对不同的应用,提供了非常多的图像处理算法(见图6),用户还可以根据具体应用进行拓展。

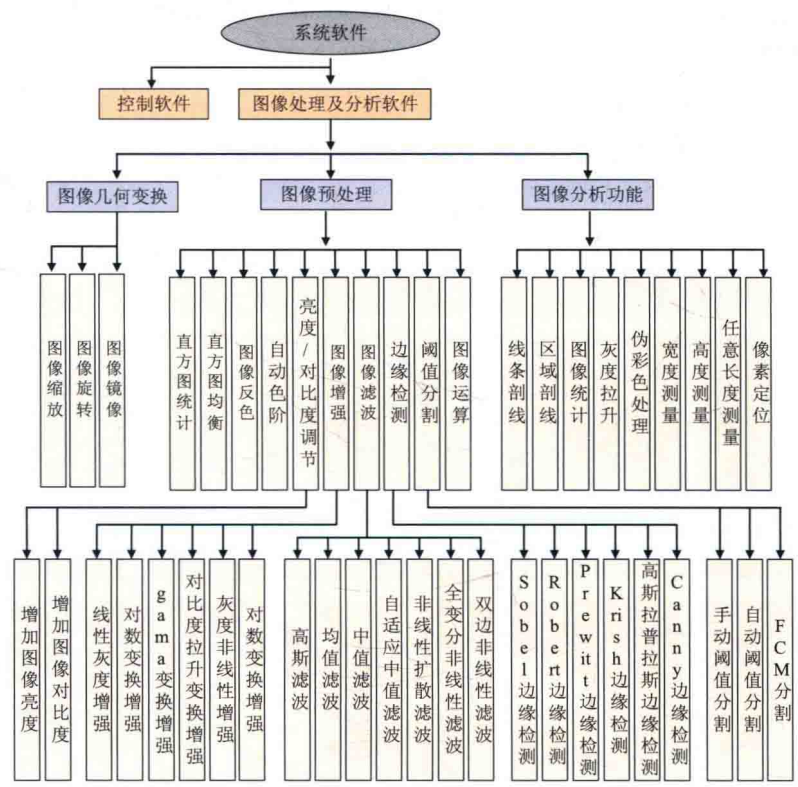


图 6 图像处理与分析算法库

7 柱面内爆磁通量压缩实验

柱面内爆磁通量压缩实验技术具有加载压力高、加载过程温升高及样品体积大等特点，在材料高压物性、新材料高压合成及超强磁场下的凝聚态物理等多个领域都具有广阔的应用前景。基于上述应用背景，利用该系统开展了“炸药柱面内爆磁通量压缩实验研究”。成功观察到柱面套筒内爆压缩整个过程及压缩过程中的界面不稳定性、压缩对称性以及套筒压缩到一定程度，因其内部磁场强度迅速增加，对应的磁压力将会反弹变大过程。测得该过程的直径随时间连续变化曲线，得到了柱面内爆强磁场压缩速度。该实验数据的获得，对炸药柱面内爆磁通量压缩实验技术的设计、数值模拟以及实验装置的改进有较大的指导作用。

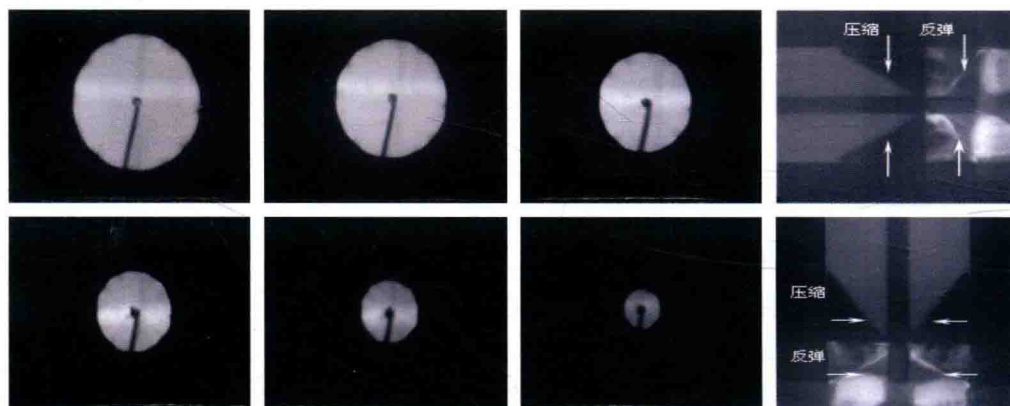


图 7 柱面内爆磁通量压缩同时分幅双扫描成像实验结果

8 多点火工品起爆特性实验

由于火工品作用过程是一个非稳态的过程，燃烧转爆轰过程中的高速碰撞、快速燃烧、起爆、传爆、冲击波的产生及传播等高速现象必须通过高速的观测试验手段才能获得。目前，国内通常使用的电测方法，只能对火工传爆序列中的某一个点或某一个时间进行测量和记录，无法获得起爆过程及起爆同步性的同时测量。基于该系统开展的实验在国内首次获得“火工品传爆序列发展过程”同一时基、同一空基的分幅和扫描图像。经测试，四点高精度同步起爆火工系统作用时间同步性为95 ns，冲击片雷管四点阵列作用时间同步性为65 ns，半导体桥两点输出作用时间同步性为1.98 μ s。同时获得火工序列中能量产生、成长、放大过程的一些物理现象(如超压形成过程)，对于火工品设计和保证火工品的可靠性意义重大。

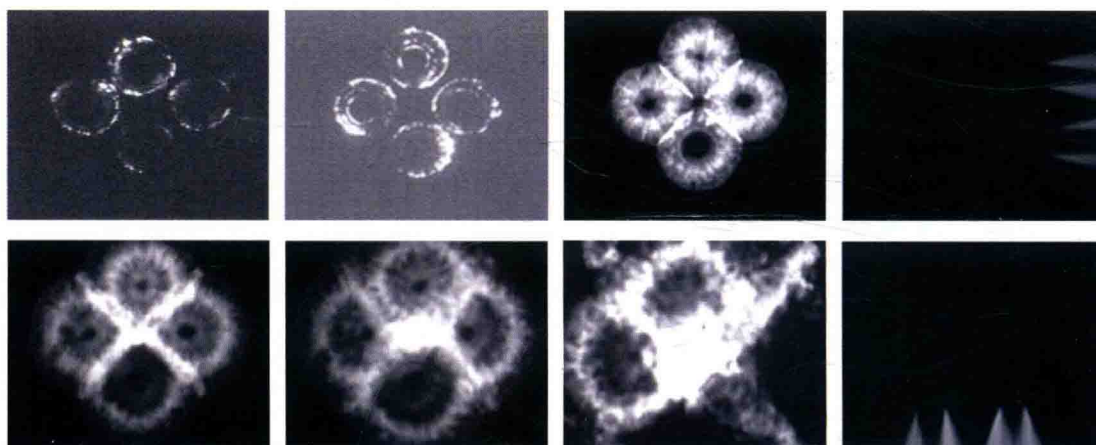


图 8 四点起爆火工品实验结果

9 超高速碰撞碎片云形成和膨胀过程研究

利用该系统在北京理工大学二级轻气炮装置上进行了“超高速碰撞碎片云形成和膨胀过程研究”实验。主要包括铝弹丸超高速碰撞薄板的实验、铝弹丸超高速碰撞厚板的实验及不同碰撞条件下(速度、角度)超高速碰撞实验。国内首次在一次实验中获得“超高速碰撞碎片云形成和膨胀过程”同一时基、空基的分幅和扫描图像。主要获得结果如下：(1) 分幅摄影拍摄到着靶前弹丸以及碰撞薄板后碎片云膨胀及发光过程清晰图像，扫描摄影拍摄到飞行弹丸及碰撞后反向飞溅碎片云闪光的清晰图像，得到弹丸、碎片云轴向和径向膨胀速度以及反向飞溅碎片云闪光的轴向移动速度及闪光持续时间；(2) 获得厚板碎片云膨胀和碰撞闪光过程清晰图像，在铝-铝碰撞速度为6.3 km/s时，强烈的闪光发生在碰撞侵彻过程中2~3 μ s，碰撞产生的碎片云也会发光，持续时间在十几 μ s；(3) 通过同一时间基准的分幅、扫描图像可以得出准确的碰撞着靶时刻，为实验中其他测量数据提供碰撞零时刻。该系统的研制对于分析超高速碰撞中碎片云和闪光的产生机理有重要的作用。

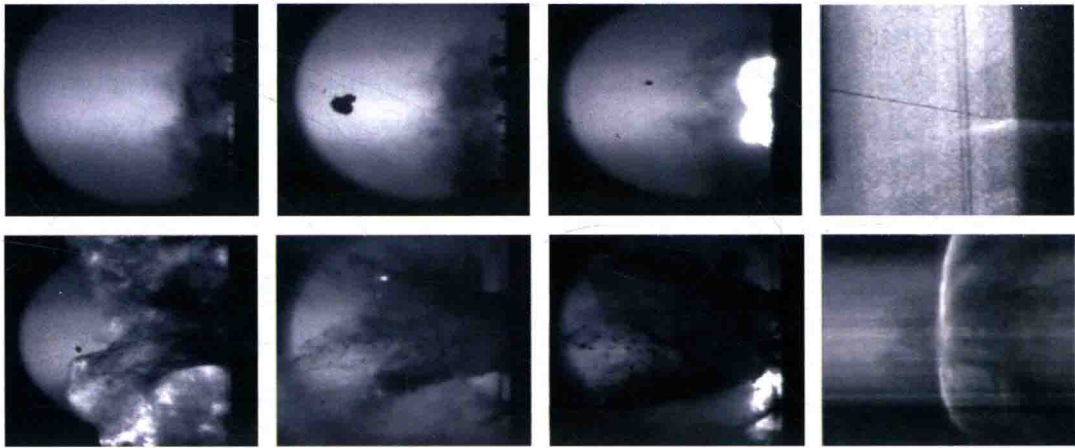


图 9 弹丸(速度 6.3 km/s)高速碰撞垂直靶后碎片云膨胀及发光过程

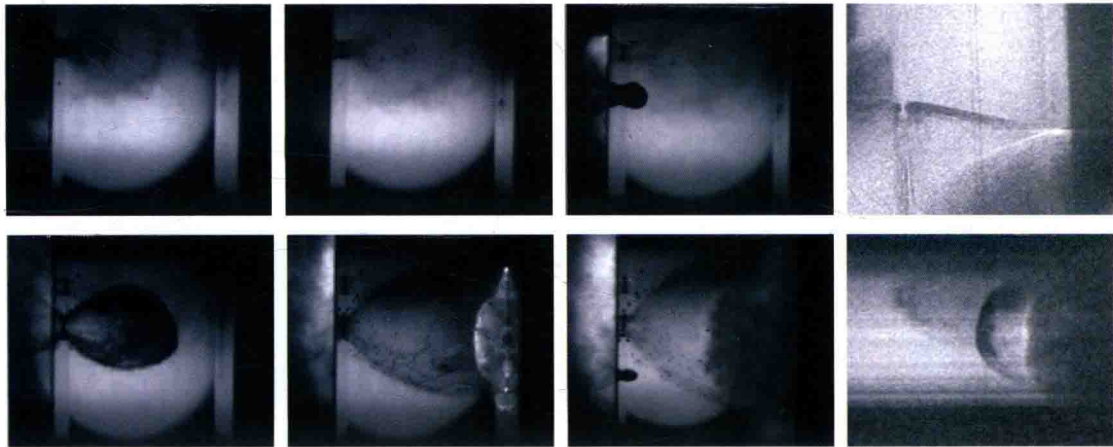


图 10 弹丸(速度 5.8 km/s)高速碰撞薄靶穿靶后的图像

科学意义

该系统在一次实验中可以获得瞬变现象同一时基、同一空基的分幅和扫描图像，实现了分幅摄影和扫描摄影的优势互补，目前已经成功应用于超快闪烁材料发光动力学研究、火工品性能改进、超高速碰撞和等离子体物理研究等方面，获得了丰富的实验数据，为相关领域关键科学问题研究与技术难题的解决提供了崭新的仪器和技术手段。该系统研制成功打破了国外在该技术领域对我国的禁运和封锁，对推

动材料科学、高能量密度物理、武器物理等研究工作具有非常重要的意义。

展望

该系统不仅为我院提供了一种新的高速摄影测试手段,而且完全可以替代国外同类系统,具有较大的推广价值。同时通过该系统研制,也为研制更高水平的光电分幅和扫描成像系统打下了坚实的技术基础,可以形成系列化的仪器设备,具有较好的经济、社会效益和广泛的应用前景。

扩展阅读:

- [1] 李 剑,汪 伟,肖正飞,等.大画幅等待式转镜分幅相机研制及应用[J].爆炸与冲击,2012,32(6): 641-646.
- [2] 李 剑,刘宁文,肖正飞,等.可用于多幅纹影照相的超高速光电分幅相机光学系统设计[J].光电工程,2014,41(10): 38-41.
- [3] 温伟峰,何 徽,赵新才,等.晃动补偿精密时序控制电路设计[J],核电子学与探测技术,2015,35(7): 650-653.
- [4] 刘宁文,畅里华,肖正飞,等.门控型像增强器开门时间测量[J],强激光与粒子束,2012,24(10): 2447-2450.
- [5] 温伟峰,王 伟,张登洪.像增强器高压倍压电路的设计与仿真研究[J],计算机仿真,2009,26(7): 343-346.
- [6] 赵新才,肖正飞,温伟峰,等.超高速分幅相机曝光时间测量的误差分析[J],高压物理学报,2015,29(6): 455-459.
- [7] 畅里华,刘宁文,彭其先,等.变像管扫描相机扫描速度及非线性的标定技术[J],激光技术,2012,36(3): 315-317.
- [8] 何 徽,温伟峰,张登洪,等.条纹相机扫描速度调节电路[J].西安交通大学学报,2013,47(12): 66-70.
- [9] 李 剑,但加坤,赵新才,等.超高速激光纹影技术测量脉冲功率驱动的磁重连现象[J].强激光与粒子束,2014,26: 092006.
- [10] 畅里华,汪 伟,谷卓伟,等.柱面内爆磁通量压缩超高速摄影技术研究[J].光学学报,2015,35:1032001.
- [11] 畅里华,何 徽,温伟峰,等.炸药柱面内爆磁通量压缩同时分幅/扫描摄影技术[J].强激光与粒子束,2015,27: 115002.
- [12] 赵新才,李 剑,肖正飞,等.爆轰加载下柱壳膨胀断裂的超高速光电摄影实验研究[J].高压物理学报,2016,30: 89-93.



蒋道建
研究员
0816-2485571
Email: jiangdj@caep.cn

温等静压成形成套设备研制

温等静压成形技术是粉末材料成形的良好途径,具有改善复合材料成形部件性能,缩短生产周期,增加材料利用率等特点。温等静压成形成套设备是温等静压成形技术的关键设备,该设备研制涉及到材料、机械、自动控制等多个学科领域,尤其在高温高压下的精确、可靠、安全设计一直是我国在该设备研制中的核心难题。

为解决大尺寸炸药件温等静压成形的难题,中国工程物理研究院化工材料研究所从 1990 年代开始温等静压技术研究。近几年,逐一突破了超高压主机系统关键部件工程研制和寿命评估、宽温域增压技术、近净成形模具工程研制、高精度超高压压力曲线控制等关键技术,申请专利 30 多项,实现了最高压力 200 MPa、最高温度 300℃ 下温等静压成形成套设备的国产化、系列化研制。

1 温等静压关键技术研究 and 温等静压成形成套设备设计技术

1.1 超高压主机系统关键部件的工程研制和寿命评估

超高压主机系统主要功能是可承载一定液体温度、压力的密闭容器。借鉴国内冷等静压机设计经验,其关键部件有超高压工作缸和机架。在确定压力、温度、尺寸等设计参数的基础上建立了超高压工作缸和机架的数字模型,研究了合适热力耦合的单元类型以及正确加载边界条件,对超高压工作缸及机架进行了预紧状态和工作状态的强度刚度有限元分析(见图 1)。确定了危险工况及危险区域,为工作缸及机架的结构优化及缠绕设计提供依据,得到了主机系统关键部件具有自主知识产权的设计成果,主要表现在超高压工作缸复合结构设计、新材料的应用、设计参数的优化、延长超高压工作缸缠绕区域等。图 2 所示为新材料与传统冷等静压机工作缸缠绕钢丝(^{65}Mn)在温度载荷作用下的拉伸试验结果,从图中可以看出,新材料在热/力耦合作用下的抗蠕变性能明显优于 ^{65}Mn 。

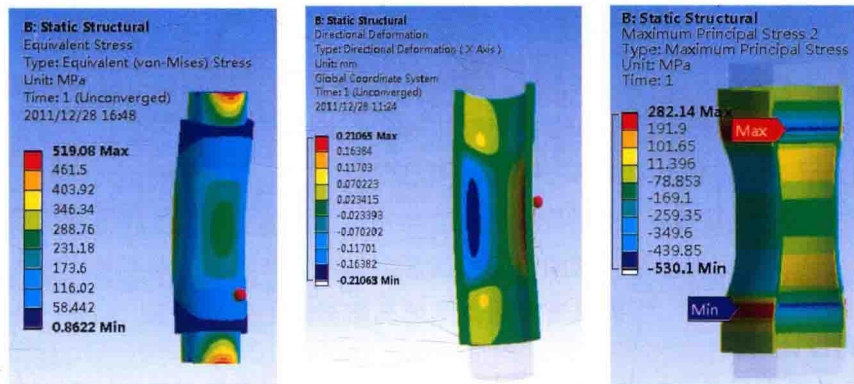


图 1 超高压工作缸有限元分析图

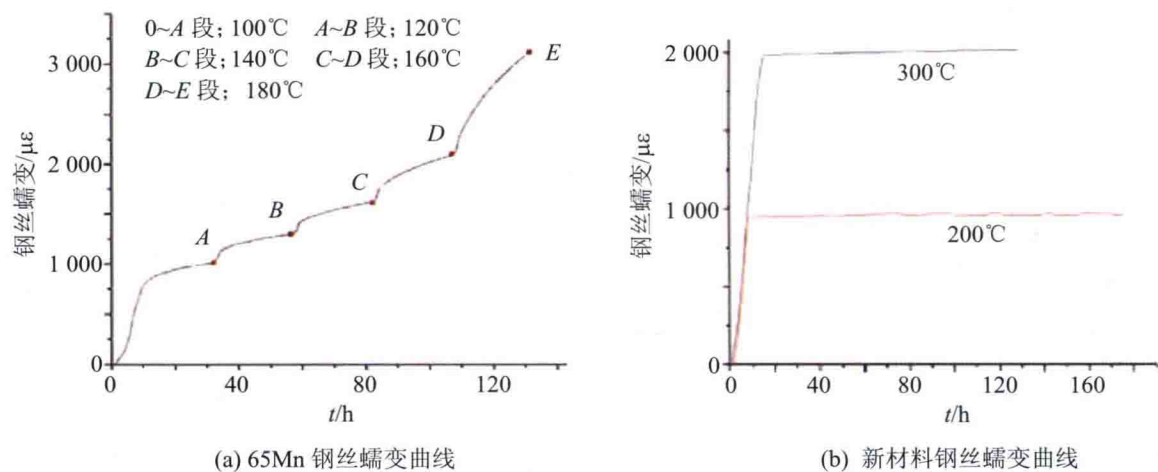


图 2 钢丝蠕变曲线图

缠绕超高压工作缸和机架的预应力钢丝在高压循环加载作用下,由于蠕变导致工作缸和机架的预应力损失,建立了预应力损失模型,并在工作缸和机架上采用电测法的检测元件对其上的残余预紧力、位移进行监测,最终实现了主机系统的超高压工作缸和机架的寿命预估。

1.2 高精度超高压压力曲线控制技术研究

高精度超高压压力曲线控制技术是实现温等静压形成成套设备压力精确控制的关键技术,通过详细分析研究温等静压形成成套设备的系统结构和组成环节,建立了控制模型。通过控制特性分析,综合应用模糊控制及自适应控制技术,优化了增压回路、卸压回路及压力检测点,从而进一步提高了压力控制的精度。同时,针对各种扰动因子,分析压力系统在 300℃、200 MPa 条件下的流体力学性能,研究压力曲线控制过程中设备容积、流体阻力等的变化规律,完成了流体流动状态有限元分析,进行了流体力学性能仿真和超高压状态下的控制轨迹仿真研究,优化了升压、保压、卸压各阶段的曲线控制算法,解决了高压卸压快、低压卸压慢的控制难题。图 3 和图 4 分别给出了超高压卸压阀流线图及超高压压力控制实际曲线截图。

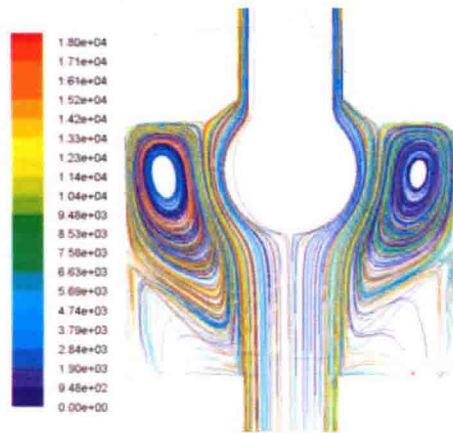


图 3 超高压卸压阀流线图

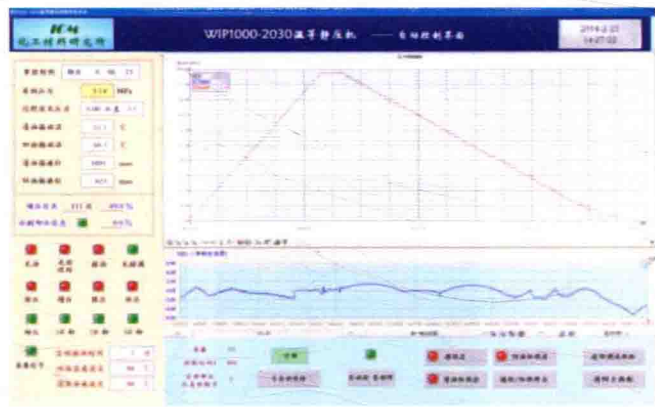


图 4 超高压压力控制实际曲线截图

1.3 近净成形模具设计研究

近净成形模具是粉末材料成形的关键,近净成形模具设计技术是温等静压形成成套设备的重要组成部分。针对粉末材料精密成形技术和温等静压近净成形技术开展研究,通过近净成形模具材料研究、结构设计、试件模拟材料研制、模具制造、试验及模具优化等研究思路,不断完善近净成形模具设计,形成设计规范。

开展了模具制造技术、试件模拟材料研制等研究,形成了新部件和新材料近净成形完整技术链条,最终掌握核心技术。图 5 为圆环形近净成形模具及压制产品照片。针对模具结构参数等设计问题,开发了近净成形模具设计软件包,提高模具设计的标准化和自动化水平。



图 5 温等静压近净成形产品及模具

通过温等静压近净成形模具研究,建立温等静压近净成形模具设计方法,使设计的近净成形模具压制的产品达到近净成形要求,减少压制成形后的加工余量。

1.4 抗高温氧化介质油制备

抗高温氧化介质油是温等静压成形成套设备压制产品的工作介质,同时也是提升温等静压成形成套设备工作效率、稳定性和工作寿命的关键因素。项目组设计并合成出新型结构的有机硅分子,该介质油结构根据 IUPAC 命名为 1,3-二辛基 1,1,3,3-四苯基二硅氧烷。一方面该分子的 Si—O—Si 结构保持了传统聚硅氧烷高闪点、高沸点的热力学性能;另一方面,分子链段中 Si—O—Si 结构较短,苯基芳香基团有效地将能量分散于芳香结构的大共轭中,提高分子的热稳定性,提高了该结构聚硅氧烷快速氧化温度,在高温下不易发生凝胶化。该介质油具有闪点高、耐热性能优越、无挥发性、无凝胶化等优点,满足 300℃的使用工况。

1.5 高温超高压密封

超高压工作缸内的密封对于温等静压成形成套设备的工作是重要的,主要包含了端盖处和测量信号导出处的密封。通过介质油与高弹性体密封材料的相容性试验确定密封材料。根据高弹性体密封材料的物理性能分析设计了端盖处的 Y 形密封组合结构,开展了 Y 形密封结构在密闭空间的压力传递和温度场的数值分析,通过分析完善了 Y 形密封结构设计,分析和试验均表明该结构密封是可靠的。超高压工作缸内介质油的温度测量是必须的,而解决导出处的密封是关键,设计了金属环和橡胶密封圈的组合结构,取得了具有自主知识产权的成果。

1.6 适应宽温度范围的增压器研制

增压器的功能是为超高压工作缸提供高温高压介质油。国内增压器使用温度不超过 80℃,项目组探索了高温超高压动密封机理,分析了增压器筒体用高强度、高韧性、耐高温蠕变金属材质特性,开展了增压器整体结构设计研究。通过自紧式超高压组合密封型式技术,设计了全氟橡胶密封圈作为密封弹性体,重点设计了增压器筒体、柱塞和密封结构之间的配合间隙。通过耐压、耐温、增压速率试验,研究评估了密封结构的寿命,最终解决了增压器高温超高压动密封难题,成功研制出常温约 300℃宽温度范围下超高压增压器。

1.7 系统集成及安全控制

温等静压成形成套设备按设备功能划分为超高压主机系统、超高压系统、加热及充排系统、辅机系统及控制系统。各系统设备功能相对独立,为了将设备各系统集成成为一个整体,详细设计了各子系统布局及机械、液压及控制信号接口,并依据工艺流程和各子系统特点进行安全联锁设计,实现了 5 级压力