

团 体 标 准

T/CMES XXXXX—202X
代替 T/CMES XXXX—201X

薄壁件高能电脉冲方法残余应力调控技术 规范

Technical Specification for Residual Stress Relief by High
Energy Electric Pulse Method for Thin-Walled Parts

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国机械工程学会 发布

中国机械工程学会标准征求意见稿

中国机械工程学会（英文简称 CMES）是具备开展国内、国际标准化活动资质的全国性社会团体。制定中国机械工程学会团体标准，以满足企业需要和市场需求，推动机械工业创新发展，是中国机械工程学会团体标准的工作内容之一。中国境内的团体和个人，均可提出制、修订中国机械工程学会团体标准的建议并参与有关工作。

中国机械工程学会团体标准按《中国机械工程学会标准化管理办法》进行制定和管理。

中国机械工程学会团体标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议的 3/4 以上的专家、成员的投票赞同，方可作为中国机械工程学会团体标准予以发布。

在本标准实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料寄给中国机械工程学会，以便修订时参考。

中国机械工程学会标准征求意见稿

本标准版权为中国机械工程学会所有。除了用于国家法律或事先得到中国机械工程学会正式许可外，不许以任何形式复制、传播该标准或用于其他商业目的。

中国机械工程学会地址：北京市海淀区首体南路 9 号主语国际 4 座 11 层

邮政编码：100048 电话：010-68799027 传真：010-68799050

网址：www.cmes.org 联系人：袁俊瑞 电子信箱：yuanjr@cmes.org

目 次

前 言	III
引 言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 设备要求	2
4.1 高能电脉冲储能放电系统	3
4.2 高能电脉冲电源充电系统	3
4.3 高能电脉冲触发控制系统	3
5 技术及安全要求	3
5.1 应力调控前的安全检查及安装准备	3
5.2 残余应力调控	4
6 残余应力处理效果评定	4
6.1 工件尺寸稳定性检测法	4
6.2 残余应力检测法	4
7 测试报告	5
8 附 录	6

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。中国机械工程学会不承担识别专利的责任。

本文件由中国机械工程学会提出并归口管理。

本文件起草单位：中国工程物理研究院机械制造工艺研究所，大连理工大学，郑州大学，四川神工科技有限公司，中国科学院金属研究所，华东理工大学。

本文件主要起草人：李加胜，魏兆成，黄明，夏志辉，郭明龙，孔金星，徐猛，李应举，李锦，王栋。

中国机械工程学会标准征求意见稿

引 言

在薄壁件的精密/超精密加工中，由于受到锻压、热处理、机加等多方面的影响，构件整体的应力大小和分布状态极为复杂，尤其在大尺寸复杂构件中局部的高应力状态，为薄壁件的成型精度带来了制造难度。此外，加工完成后出现的应力松弛现象，也会影响构件的长期服役精度。相较于传统的热处理和机械方法，电脉冲调控能够在短时间内精确调整材料内部的应力，不仅可以避免过度加热或机械接触所带来的负面影响，还可以一定程度提升材料力学性能。电脉冲应力调控具有快速响应、局部调控、节能高效、非接触式调控和广泛适用性等显著优势，尤其在高精度和复杂形状的零件局部调控方面具有巨大优势。因此，针对高加工精度及服役精度需求的弱钢性薄壁构件，制定薄壁件高能电脉冲方法残余应力调控技术规范，旨在提升薄壁件残余内应力调控效率，稳定残余应力调控效果，为薄壁构件高能电脉冲残余应力调控及评判提供有效的技术规范，为薄壁构件高性能制造提供技术支撑。

薄壁件高能电脉冲方法残余应力调控技术规范

1 范围

本文件规定了一种以通过高能电脉冲冲击金属材料或工件的应力消除方法，以及术语和定义、符号和说明、原理、方法及效果的评价。

本文件适用于薄壁构件及相近结构的金属零件的残余应力的消减及均化。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T7354 高电压试验技术 局部放电测量
- GB/T16927.1 高电压试验技术 第1部分：一般定义及试验要求
- GB/T11022-2011 高压开关设备和控制设备标准的共用技术
- GB/T 高压交流隔离开关和接地开关
- GB/T 28819 充气高压开关设备用铝合金外壳
- GB/T 12604.1-2020 无损检测 术语 超声检测
- GB/T 20737-2006 无损检测 通用术语和定义
- T/CSAA 2—2020 薄壁零件残余应力检测方法
- GB/T 10067.3-2015 电热装置基本技术条件 第3部分：感应电热装置
- GB/T 32073—2015 无损检测 残余应力超声临界折射纵波检测方法
- GBT 7704-2017 无损检测 X射线应力测定方法
- GB/T 31310-2014 金属材料 残余应力测定 钻孔应变法

3 术语和定义

GB/T 20737-2006、GB/T 12604.1-2020 及 GB/T 38811-2020 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1 高能电脉冲应力控制法 high energy electric pulse stress control method

在短时间内释放出高强度的电能，这种电能通过特定的脉冲形式作用于材料，可以引发材料的物理或化学变化，通过控制电脉冲的幅值、频率和持续时间，可以对材料局部区域内的残余应力进行消减和均化的方法。

3.2 储能电容 capacitor

电容器是电子元器件的一种，用于储存电能，广泛应用于电子电路中，用于滤波、耦合、时序等目的。

[来源：GB/T 50900.5]

3.3 气体绝缘金属封闭开关设备 gas-insulated metal-enclosed switchgear

至少部分采用高于大气压的气体作为绝缘介质的金属封闭开关设备和控制设备
[GB/T 2900.20-2016，定义 4.5]

3.4 高能电脉冲残余应力调控法 high-energy electric Pulse residual stress relief method

高能电脉冲残余应力调控法是电致塑性和 Joule 热效应等物理效应等共同作用的结果，在对材料或工件进行高能电脉冲冲击处理过程中诱发金属内部微观结构弛豫，达到加快、均化和强化残余应力的消减速度或效果。

4 设备要求

高能电脉冲残余应力调控系统由初级能源、功率调整单元、储能和脉冲形成单元、开关转换单元、负载等组成，如图 1 所示。初级能源由一般工频电源或电池提供，经过功率调整单元提升功率，通常是对电压进行放大，再向储能和脉冲形成单元注入能量，进行能量的储能、压缩、脉冲成形或转化等复杂过程，其中脉冲波形为正弦震荡衰减波形（如图 2 所示），电流峰值为 kA 级，最后由功率开关转换单元快速释放给负载，形成高能脉冲。

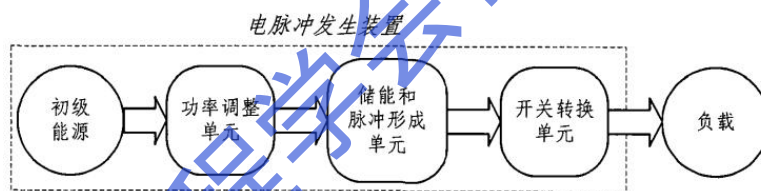


图 1 电脉冲处理系统的组成

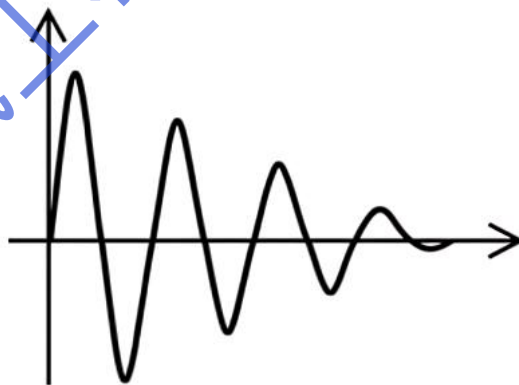


图 2 电脉冲直流正弦震荡衰减波形放电示意图

高能电脉冲残余应力调控系统应该具备以下功能：

- 关键部件在正常工作状态下均满足使用寿命大于 10000 次的要求，并要求在故障状态下不炸裂，同时对关键设备部件采取安全保护措施，使之在故障情况下不影响其它设备的安全；
- 设有停机自动放电电路，用来泄放电容器的储能，且设有储能电容器残余电压数字显示，以保证人身及系统安全；
- 本机设有故障情况下，紧急停机按键开关，以便在故障情况下及时关掉所有工作电源，闭

合泄放开关，泄放储能电容器的储能，保证人身及设备的安全；

d) 自动控制模块对电容器放电实施监控，通过监视放电电流判断系统运行状况。

4.1 高能电脉冲储能放电系统

高能电脉冲储能充放电系统包括高能充放电电容（200~1000 μ F）、放电气动开关（5kV50A）、工件夹持电极（根据待调控工件结构进行设计），其中 200~1000 μ F 超高能充放电电容用于储存电能，5kV50A 气动放电开关用于充放电过程的开断并保护电路，工件夹持工装确保高能脉冲电流通过工件，实现高密度电流向材料内的传递。

4.2 高能电脉冲电源充电系统

高能电脉冲电源充电系统主要由 EMI 输入、整流滤波模块、移相全桥逆变模块、高频升压变压器、全桥整流模块、控制模块等组成，其大致原理如下图所示。

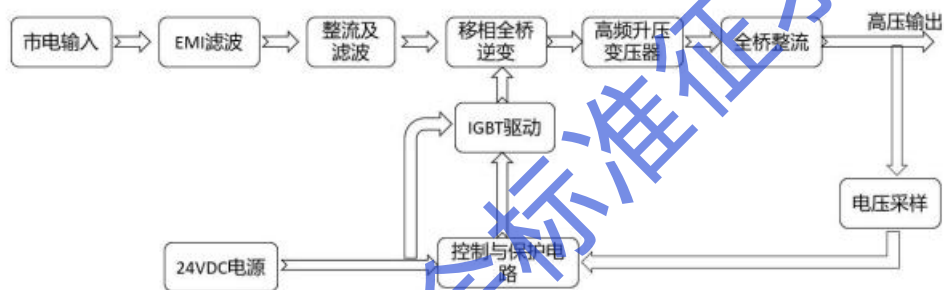


图 3 高压充电电源原理框图

高压充电电源软件部分分为上位机和下位机两部分。上位机作为人机界面（软件）实现远程控制及操作，下位机则由一片微控制器芯片及相应的外围线路构成，其程序功能包括各路电压电流信号的采集（A/D 转换），电压电流的设定（D/A 转换），各开关量的控制，状态检测、MODBUS 通讯协议接收与发送等。高压充电电源应具有过压过流自我保护隔离功能，具备抗电磁干扰、电源波动干扰及地电位干扰的能力。

4.3 高能电脉冲触发控制系统

高能电脉冲触发控制系统集成于高压脉冲组件，采用 VB 编程及单片机实现整个系统的流程控制、参数设定、操作。使用 MODBUS 通讯协议，通过光纤远程安全操作本系统。高能电脉冲触发控制系统应具备以下功能：

- a) 具有远程和强弱电隔离、启动、参数配置、配置校验（配置不正确时禁止发生进一步的操作）、充电、停止、触发等动作的功能；
- b) 可以独立工作，作为模块通过上位机编程嵌入其他系统之中。
- c) 脉冲触发手动（自动）操控上位机，数显调节由软件程序控制调节。
- d) 控制系统充电过程中具有充电状态指示并实时显示充电电压值，充电值达到后给出指示反应。

5 技术及安全要求

5.1 应力调控前的安全检查及安装准备

- (a) 检查工作系统电路连接完好，满足设备安全用电使用要求。
- (b) 在应力调控之前，待处理表面应保持一定程度的整洁，如果表面有油污、脏物和锈等应加以清理。
- (c) 如以应力或轮廓精度方式等进行调控效果表征，那在调控之前应先测量残余应力或轮廓数据。

5.2 残余应力调控

以小平板试样件为例，使用铜电极加持方案，一般情况下，电脉冲残余应力调控应按照以下步骤实施：

- (a) 将小平板试样件通过铜电极进行固定安装，以保证铜电极和小平板试样紧密贴合；
- (b) 开启脉冲电源，通过整流桥整流后为储能电容进行充电。
- (c) 通过控制软件设定脉冲电流峰值、脉冲宽度、脉冲重复次数等，通过手动或则远程操控闭合开关对小平板试样进行脉冲电流处理。
- (d) 通过脉冲信号采集装置观察脉冲电流参数信息是否与试验输入一致。
- (e) 残余应力控制过程结束后，关闭电源，待工件冷却取出；
- (f) 记录过程参数。

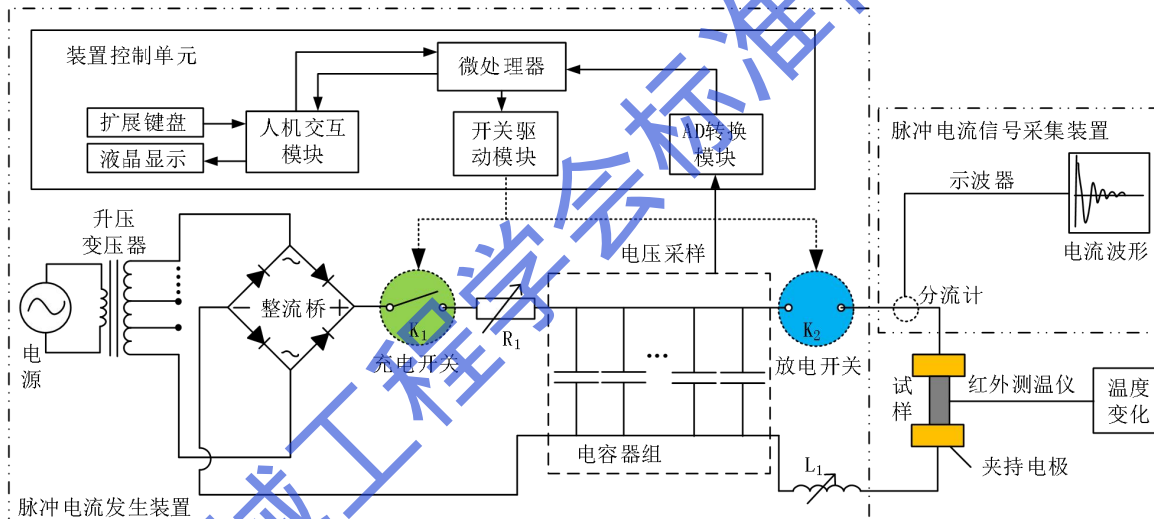


图 4 脉冲电流处理试样实验系统

6 残余应力处理效果评定

6.1 工件尺寸稳定性检测法

可将高能脉冲电流调控后工件与不调控或热时效工件进行下列项目之一的比较：精加工后精度、长期放置精度、加动载荷后精度、切割释放变形，结果应达到工艺要求。

[来源 GB/T 25712-2010, 5.3]

6.2 残余应力检测法

6.2.1 可根据工艺要求，取多个应力检测区，在处理前后利用盲孔法（参照 GB/T 31310）、超声法（参照 GB/T 32073）、X 射线法（参照 GBT 7704）等对工件进行残余应力测试对比。

6.2.2 每个应力检测区，工件被处理前后的残余应力检测点数均应大于 5 个。

6.2.3 在对工件处理前后的残余应力分布通过列表、绘图等方式进行分析、比较时，可采用残余应力等效值、残余应力水平、应力消除率、应力均化率等。但是，对某一个应力检测区，若处理前该区域残余应力水平小于工件材质的屈服极限的 1/5，则不计算该区域应力消除率；若处理前该区域残余应力离散度小于工件材质的屈服极限的 1/5 时，则不计算该区域应力均化率。

[来源 GB/T 25712-2010, 5.3]

6.2.4 处理后，薄壁件的应力检测区的平均应力消除率应大于 40%，或者，应力均化率应大于 30%。

7 测试报告

在残余应力控制过程中，记录相关工作参数，生成相应的检测报告，格式可参见附录 A，在编写中应至少包括如下内容：

- (a) 工作时间、地点、操作人员及本标准编号；
- (b) 构件名称、材料；
- (c) 调控过程中热辅助温度；
- (d) 控制时长，从储能电容开始放电工作计算直到调控结束；
- (e) 控制效果，可以记录残余应力或工件尺寸变化，建议首先记录调控前后残余应力变化；
- (f) 控制人员确认签字。

中国机械工程学会标准征求意见稿

8 附录

附录
(资料性)

表 1 高能电脉冲残余应力调控处理检测报告

产品名称				产品材料		
型号规格				生产编号		
生产单位						
委托单位						
样品接收日期				样品数量		
样品编号	处理时长	处理温度	初始应力	调控后应力	应力消减率	应力均化率
均值	应力消减率			应力均化率		
备注						

批准:

检验:

审核: