

团 体 标 准

T/CMES XXXXX—202X

薄壁球壳筒壳件超精密加工工艺技术规范

Technical Specification for Ultra-Precision Machining of
Thin-Walled Spherical and Cylindrical Shell Components

(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。

2025-2-20 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（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。

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 技术要求	2
4.1 环境条件	2
4.2 待处理基材	2
4.3 人员要求	3
4.4 加工设备	3
5 薄壁件加工处理	3
5.1 工件准备	3
5.2 夹具选择与安装	3
5.3 粗加工	4
5.4 精加工	4
5.5 轮廓度检测	5
5.6 粗糙度检测	5
5.7 表面清洁	6
6 评判指标	6
6.1 评判指标	6
附 录 A (资料性) 最小二乘法计算轮廓度的过程	7

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。

本文件由中国机械工程学会提出并归口。

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，黄明，夏志辉，阳红，魏巍，魏兆成，郭明龙，徐猛，李应举，李锦，丁祥洲。

考虑到本文件中的某些条款可能涉及专利，中国机械工程学会不负责对其任何该类专利的鉴别。本文件首次制定。

中国机械工程学会标准征求意见稿

引 言

薄壁球壳筒壳件的精度要求极为严格。以某些物理实验所需的高精度纯铁薄壁曲面构件为例，其轮廓精度、位置度和壁厚均匀性要求达到优于 $5\mu\text{m}$ 的水平，这对加工技术提出了巨大的挑战。目前，相关加工工艺技术和生产规范尚不完善，尤其在面对高塑性、高韧性材料（如 45 钢）时，切削加工性差、切削变形大、切屑易粘结、刀具磨损严重等问题依然突出。此外，现有行业规范中尚未明确规定加工精度、材料特性和表面质量的具体要求，且刀具选择、切削参数优化、加工环境控制和表面质量监控等技术指标缺乏准确的技术规范。因此，为确保高精度薄壁球壳筒壳件的加工质量，亟需制定薄壁球壳筒壳件超精密加工工艺技术规范，力求在保证加工效率的同时，最大限度地提高工件的精度和表面质量，解决传统加工工艺中的瓶颈问题，并为高精度薄壁球壳筒壳件的制造提供明确的技术标准。

中国机械工程学会标准

薄壁球壳筒壳件超精密加工工艺技术规范

1 范围

本文件规定了薄壁球壳筒壳件超精密加工的技术要求、加工处理、轮廓度检测、粗糙度检测及评价指标。

本文件适用于薄壁球壳筒壳件超精密加工。

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/T 1008 机械加工工艺装备基本术语

GB/T 12204 金属切削 基本术语

GB/T 10610 产品几何技术规范（GPS） 表面结构 轮廓法 评定表面结构的规则和方法

GB/T 24630 产品几何技术规范（GPS） 平面度 第1部分：词汇和参数

GB/T 16461 单刃车削刀具寿命试验

GB/T 12268 金属切削加工技术术语

ISO 1101 产品几何技术规范（GPS） 形状和位置公差

ISO 1832 金属切削加工工艺参数的推荐值

3 术语和定义

GB/T 1008、GB/T 12204、GB/T 10610、GB/T 24630、GB/T 16461、GB/T 12268、ISO 1101、ISO 1832 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1 超精密加工

通过高精度的机床和工具，使用高精度的控制系统，在极小的公差范围内（通常小于1微米）对工件进行加工，以获得极高的几何精度和表面质量。[来源：GB/T 14466-2008，3.2]

3.2 表面粗糙度

描述工件表面微观不规则性的一个重要指标，通常用Ra（算术平均粗糙度）、Rq（均方根粗糙度）、Rz（十点高度）等参数来表征。超精密车削加工要求表面粗糙度通常在纳米级别，Ra值通常小于0.1 μm，甚至可达到0.01 μm以下。[来源：ISO 4287:1997，3.2]

3.3 微米级精度

指工件加工的精度能够达到微米级别，通常意味着加工误差不超过 1 微米（0.001 mm）。在超精密车削中，精度要求通常远高于常规加工。[来源：ISO 230-2:2014, 3.2]

4 技术要求

4.1 环境条件

4.1.1 加工环境

(1) **温度与湿度控制**：加工环境的温度应保持在 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，湿度应控制在 40%~60% 之间，以避免热膨胀和材料的湿度变化影响加工精度。

(2) **洁净度**：加工环境应具备良好的洁净度，避免尘土、油污等对加工表面质量的影响。应安装有效的空气过滤系统，确保空气中尘埃含量低于国家标准。

(3) **震动控制**：机床需安装在高刚性混凝土基础上，减少环境震动对加工精度的影响。

(4) **噪声与电磁干扰控制**：加工环境的环境噪声要小于 60 dB，关键传感器、主轴驱动系统应有良好屏蔽，同时避免大功率变频设备与机床共用电源。

4.1.2 检测环境

(1) **温湿度控制**：检测环境的温度应保持在 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，湿度应保持在 45%~55% 之间。

(2) **光照与清洁度**：检测环境应提供足够的照明条件。检测区域应定期清洁，控制粉尘、油雾、静电吸附颗粒的密度。工件检测前需清洁、去油。

(3) **空气与气流环境**：检测环境的环境风速要求小于 0.2 m/s，优选缓慢层流和静压送风，避免涡流和温度分层。

4.2 待处理基材

待处理基材应满足下列要求：

(1) **形状基本符合要求**：薄壁球壳筒壳件毛坯的形状应尽量接近设计要求，避免过多的加工余量。尤其是复杂的薄壁结构和曲面，应保证毛坯的轮廓度、平面度和角度符合标准。

(2) **尺寸偏差控制**：薄壁球壳筒壳件毛坯的尺寸应控制在 2mm 以内，确保后续加工中的材料去除量适当，避免大尺寸偏差导致加工困难。

(3) **无明显缺陷且质地均匀**：薄壁球壳筒壳件毛坯材料应具有均匀的内部结构和性能，避免存在大的晶粒、气孔、夹杂物等缺陷。

(4) **残余应力控制**：薄壁球壳筒壳件毛坯应通过退火等工艺降低残余应力，避免在加工过程中发生过大的变形。

(5) **适合切削加工**：薄壁球壳筒壳件毛坯的力学性能应适合切削加工，具备良好的切削性。

(6) **形状稳定性**：薄壁球壳筒壳件毛坯应能够在加工过程中保持形状稳定，不应因温度、切削

力等因素导致较大变形。

4.3 人员要求

按本标准实施检测的人员应通过薄壁球壳筒壳件超精密加工技术的专门培训。

4.4 加工设备

超精密加工系统加工过程如图 1 所示，应满足下列要求：

- (1) 车削加工机床精度能达到 $2\ \mu\text{m}$ ，具备稳定的重复定位精度和良好的热稳定性；
- (2) 能加工大深径比薄壁件，45 钢球壳内径 SR104，壁厚 7mm，45 钢筒壳内径 $\phi 99$ ，壁厚 10mm；
- (3) 机床冷却系统应采用微量润滑（MQL）冷却方式，保证切削区润滑稳定、冷却可控。
- (4) 机床配备适用于薄壁球壳筒壳件的低变形夹持或柔性支撑装置，夹持力可调且重复性良好。
- (5) 加工过程中机床运行应平稳，无明显爬行和振动现象，满足薄壁球壳筒壳件连续稳定切削及表面质量控制要求。

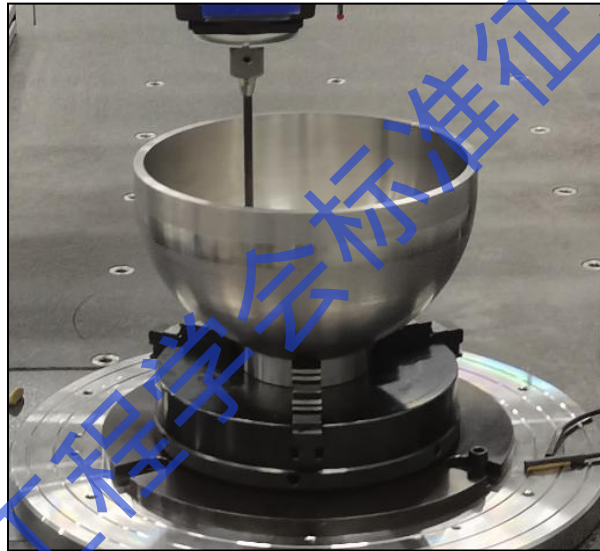


图 1 薄壁件超精密车削加工

5 薄壁件加工处理

5.1 工件准备

清洁待加工工件，去除表面油污、尘土等杂质，确保工件在加工过程中不受污染。

5.2 夹具选择与安装

薄壁球壳筒壳件超精密加工系统工装示意图见图 2，薄壁球壳筒壳件装夹与安装应满足以下要求：

- (1) **夹具设计：**夹具设计需采用可调节的内型面吸具工装，确保薄壁球壳筒壳件在加工过程中的均匀受力。
- (2) **夹具的吸气装置：**夹具设计中配有吸气口，可以利用负压或真空吸力来增强夹持效果。
- (3) **加工过程中夹具的稳固性：**吸气装置通过内置的吸气管路连接到夹具底部。底部设置分布

均匀的装夹沉头孔，保证较高的稳定性和刚性。

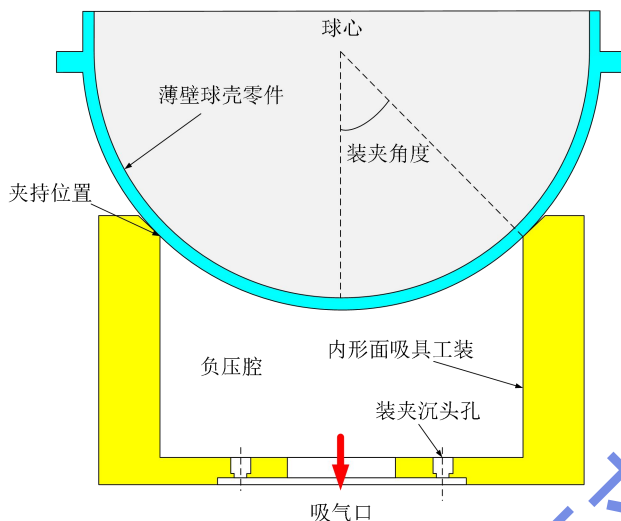


图2 薄壁球壳筒壳件真空吸装夹示意图

5.3 粗加工

薄壁球壳筒壳件粗加工应按下列步骤执行：

- (1) 对球壳/筒壳毛坯进行外观与尺寸初检，测量毛坯尺寸，保证加工余量均匀，满足后续粗加工及精加工需求。将检查好工件放置在超精密车床上，使用百分表对刀并将工件位置固定，调整真空吸气压力为负 50kPa；
- (2) 将车刀刀柄装夹在立车主轴上，装上肯纳刀片，调整车刀位置，确定好相对坐标系，根据加工要求，编写 G 代码，打开微量润滑喷头，开始加工；
- (3) 采用分层、分区、对称去除材料的方式，保持较小切削深度和稳定进给，必要时进行多次走刀完成粗加工；
- (4) 粗加工完成后，对关键尺寸、圆度或球面轮廓进行测量，初步评估加工变形情况；
- (5) 清理工件表面残屑和油污，标识基准面和关键尺寸状态，测量薄壁胚料内径、厚度、高度尺寸，并记录。

5.4 精加工

薄壁球壳筒壳件精加工应满足下列要求：

- (1) **切削参数优化**：按照表 1 所给切削参数进行薄壁件的精加工，确保切削过程稳定；
- (2) **刀具选择与维护**：选用适用于薄壁件精加工的高锋利度、耐磨刀具，刀具刃口应保持良好的状态；加工过程中需定期检查刀具磨损情况，必要时及时更换或修磨刀具。
- (3) **振动与热变形控制**：采用抗振刀具和合理的刀具运动路径，结合微量润滑或冷却方式控制切削区域温度。
- (4) **表面质量监控**：精加工过程中应实时关注工件表面质量变化，确保表面粗糙度满足设计要求；如发现表面划痕、振纹或局部损伤，应及时分析原因并调整加工参数或刀具状态。
- (5) **中间检测与反馈调整**：必要时在精加工过程中进行中间检测，对关键尺寸和形状误差进行评估，并根据检测结果对后续加工路径和切削余量进行适当修正。
- (6) **加工过程稳定性要求**：精加工应尽量连续完成，避免频繁停机或工序中断。

表 1 薄壁件切削工艺参数

切削参数	工艺参数值
进给量 $F=fn$ (mm/min)	10
切削深度 a_p (mm)	0.01, 0.015, 0.02
切削速度 v (m/min)	240
切削次数	2,4,6,8,10,12,14,16...

5.5 轮廓度检测

薄壁球壳筒壳件轮廓度检测步骤如下：

(1) 将工件、检测设备及夹具置于恒温检测环境中，待其充分达到热平衡状态；清洁工件表面，去除油污和残屑。

(2) 根据检测精度要求选择合适的轮廓度检测设备（如 Surfcom 5000 系列轮廓仪），并在检测前完成设备校准，确保测量系统精度满足检测要求。

(3) 建立与设计图样一致的检测基准，完成工件坐标系与检测设备坐标系的对准，按照预定测量路径对工件轮廓进行扫描，合理设置测量步距和扫描速度，连续采集轮廓点数据。对于薄壁球壳，如图 3 所示，选择球形外表的多个断面进行扫描或测量。

(4) 对采集的轮廓数据进行滤波与拟合处理，使用最小二乘法等技术将采集到的点数据与理想的球形轮廓进行拟合，计算实际轮廓与理想轮廓之间的偏差，包括最大偏差、均方根误差等。

(5) 对比测量结果与设计标准，检查轮廓误差是否在 $10\ \mu\text{m}$ 内。分析是否存在局部变形或结构不对称的情况。

(6) 完整记录检测条件、检测参数及检测结果，根据测量数据生成检测报告，注明工件是否符合轮廓度要求，以及相关的偏差数据和图表。如果检测结果不符合要求，调整加工工艺或进行后处理修正（如修磨、应力消除等）。

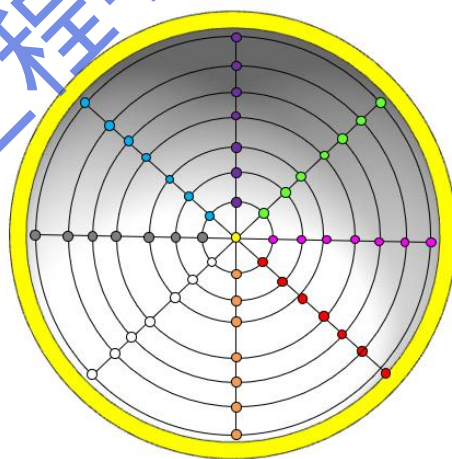


图 3 球壳断面示意图

5.6 粗糙度检测

薄壁球壳筒壳件粗糙度检测步骤如下：

(1) 将工件、粗糙度检测仪及相关夹具置于恒温检测环境中，待其充分达到热平衡状态；清洁

被测表面，去除油污、切屑及附着颗粒。

(2) 根据设计要求选择合适的粗糙度检测仪（Taylor Hobson 表面粗糙度仪），并在检测前使用标准样块对仪器进行校准。

(3) 将薄壁球壳准确放置于粗糙度仪的测量平台上，在被测表面选取具有代表性的测量区域，测量方向应与主要加工纹理方向垂直。

(4) 根据被测表面的粗糙度水平合理设置粗糙度仪参数，优先选用 Ra 作为评价指标，取样长度选用 0.08 mm 或 0.25 mm，评定长度设为取样长度的 5 倍；测量过程中采用高斯滤波分离粗糙度轮廓，测量速度控制在 0.1–0.3 mm/s，并选用小测量力和小测针。

(5) 对采集的数据进行滤波和分析，计算表面粗糙度参数（如 Ra、Rq 等），并剔除明显异常数据，观察测量结果是否小于 $0.5\mu\text{m}$ ，判断表面粗糙度是否达到要求。如果粗糙度不符合要求，可能需要对工件进行后处理或调整加工工艺。

(6) 完整记录检测条件、参数及测量结果，根据测量数据生成详细的检测报告，报告内容包括测量的粗糙度参数、测量位置、所用设备、误差分析及是否符合设计标准等。

5.7 表面清洁

薄壁球壳筒壳件在加工与检测前，其表面应保持有良好的清洁度，表面不得附着切屑、油污、冷却液残留及其他污染物；清洁过程中应避免对薄壁结构产生机械损伤或引入新的残余应力，宜采用无纤维脱落的擦拭材料配合酒精或专用清洗剂进行轻柔清洁，清洁完成后工件表面应干燥、无可见杂质，

6 评判指标

6.1 评判指标

薄壁球壳筒壳件经加工处理后应满足下列评判指标：

- (1) 薄壁球壳筒壳件表面轮廓度误差应小于 $1\mu\text{m}$ ；
- (2) 薄壁球壳筒壳件表面最大粗糙度应小于 $Ra0.5\mu\text{m}$ ；
- (3) 薄壁球壳筒壳件表面清洁度应小于 10RFU。

附录 A

(资料性)

最小二乘法计算轮廓度的过程

(1) 通过测量设备（如轮廓仪）获取工件表面的实际数据。一般是工件表面上多个点的坐标 (x, y, z) 。

(2) 根据设计要求或目标形状，定义理想的几何形状。以球形为例，假设工件的目标形状是一个理想的球体，中心为 (x_0, y_0, z_0) ，半径为 R 。目标函数为：

$$f(x, y, z) = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 - R^2$$

其中， $f(x, y, z)=0$ 表示所有点都在球面上。

(3) 为了评估测量点与目标形状的偏差，构造一个误差函数。

$$E(x_k, y_k, z_k) = [(x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2 + (z_k - z_0)^2 - R^2]$$

其中 x_k, y_k, z_k 是测量点的坐标。

(4) 通过最小化所有测量点的误差平方和，得到最佳的球面拟合参数。即，最小化以下目标函数：

$$S = \sum_{k=1}^n [(x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2 + (z_k - z_0)^2 - R^2]^2$$