

ICS 25.160.01

CCS J 33

# 团 体 标 准

T/CWAN 0136—2025

## 网状结构钛基复合材料构件热等静压推荐方法

Recommended hot isostatic pressing process for network structured

titanium matrix composites component

2025-01-20 发布

2025-02-01 实施

中国焊接协会 发布

# 目 次

前 言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 定义与术语 .....	1
4 一般要求 .....	1
5 工艺流程 .....	2
6 生产准备 .....	2
7 热等静压 .....	3
8 检验 .....	3
9 包装、运输、贮存、标志和归档 .....	4

## 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。

本文件的附录 A 为资料性附录

本标准由中国焊接协会提出并归口

本文件起草单位：哈尔滨工业大学、哈工大苏州研究院、昆山一兴泰鹏新材料科技有限公司、中国机械总院集团郑州机械研究所有限公司。

本文件主要起草人：黄陆军、耿林、孙徕博、陈润、孙枫泊、安琦、王帅、张芮、包阳、崔喜平、韩亚坤、王存玉、鲁伟航、张昕、陈昕、秦建。

# 网状结构钛基复合材料构件热等静压推荐方法

## 1 范围

本文件规定了网状结构钛基复合材料构件热等静压的一般要求、生产准备、技术要求、检验规则以及包装、运输、储存、标志和归档。

本文件适用于以球形钛粉和陶瓷粉为原材料,通过热等静压实现粉末致密并形成网状结构钛基复合材料复杂构件。

## 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。

GB/T 228.1 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法

GB/T 228.2 金属材料 拉伸试验 第2部分: 高温试验方法

GB/T 1804 一般公差 未注公差的线性和角度尺寸的公差

GB/T 3620.1 钛及钛合金牌号和化学成分

GB/T 4842 氩

GB/T 5168 钛及钛合金高低倍组织检验方法

GB/T 8170 数值修约规则与极限数值的表示和判定

GB/T 8180 钛及钛合金加工产品的包装、标志、运输和贮存

GB/T 22315 金属材料 弹性模量和泊松比试验方法

GB/T 32496 金属基复合材料增强体体积含量试验方法 图像分析法

GB/T 34558 金属基复合材料术语

GJB 1580 变形金属超声检验方法

YS/T 1685 航空航天热等静压用球形钛合金粉末

## 3 定义与术语

### 3.1

**钛基复合材料 titanium matrix composites**

在纯钛或钛合金基体中引入或(和)自生增强体的复合材料。

### 3.2

**网状结构钛基复合材料 network structured titanium matrix composites**

增强体呈三维网状分布的钛基复合材料,其中增强体多为非连续的陶瓷晶须或颗粒。

### 3.3

**热等静压 hot isostatic pressing**

一种以氦气或氩气等惰性气体为压力传递介质,将制件放置于密闭容器之中,在 900~2000°C 温度和 100~200MPa 压力的共同作用下,向制件施加各向同等压力,获得高性能致密构件的技术。

### 3.4

**包套 capsule**

在热等静压过程中,包裹粉末传递压力的密闭薄壁模具。

## 4 一般要求

### 4.1 人员要求

4.1.1 技术人员与检验人员在生产加工前均需进行技术培训。

4.1.2 热等静压操作工、仪表工和检验工应持有从事本岗位工作的合格证。

4.1.3 参与生产的人员对产品材料特征、结构特点、状态、工艺难点、图纸及质量要求有充分了解和认识。

## 4.2 设备要求

- 4.2.1 所有设备需要定期维护和保养。  
4.2.2 检具与量具需定期较准，并在计量有效期内。  
4.2.3 热等静压设备保温过程中温度正负偏差小于 20 °C。

## 4.3 原料要求

- 4.3.1 球形钛合金粉末，粒径为 50 $\mu\text{m}$ ~180 $\mu\text{m}$ ，钛合金粉末成分符合 GB/T 3620.1 的规定，钛合金粉末的松装密度、振实密度、流动性、球形率、空心粉率等应符合 YS/T 1685 的规定。  
4.3.2 推荐选用微米级 TiB<sub>2</sub> 粉末为陶瓷相原材料，粒径为 0.1  $\mu\text{m}$ ~10  $\mu\text{m}$  占比高于 90%，粒径为 0.1  $\mu\text{m}$ ~20  $\mu\text{m}$  占比高于 99.5%，纯度不低于 99%。

## 5 工艺流程

网状结构钛基复合材料构件热等静压工作流程为：整体过程包括三步，生产准备、热等静压和检验。具体流程应按照以下步骤执行：混合粉末制备→包套设计与加工→装粉→焊封除气→热等静压→后续处理→检验

## 6 生产准备

### 6.1 混合粉末准备

- 6.1.1 将陶瓷相颗粒与钛合金粉末在行星球磨机中混合，球磨罐推荐选择不锈钢球磨罐。  
6.1.2 球磨工艺为球料比 4:1~6:1，球磨转速为 180 rpm~220rpm，球磨时间 4 h~6 h。  
6.1.3 球磨前对球磨罐内充放氩气至少 3 次，氩气纯度应符合 GB/T 4842 规定。

### 6.2 包套设计与加工

- 6.2.1 为了保证热等静压温度能使陶瓷相与钛合金充分反应，复合材料致密，推荐热等静压温度大于 1150°C。同时为了避免在此温度区间铁钛发生的共晶反应，包套所用材料应为 TA2 牌号的纯钛，其化学成分符合 GB/T 3620.1 规定。  
6.2.2 采用线切割加工出钛板，钛板的加工尺寸由所需包套尺寸决定，加工尺寸误差在 $\pm 0.25$  mm 以内。  
6.2.3 拼接包套前，采用角磨机或砂轮打磨钛板边缘位置去除表面氧化层。  
6.2.4 利用 TIG 弧焊机点焊将拼接钛版固定，焊接电流 130 A $\pm$ 10 A。采用填丝焊接的方式将剩余拼接区域满焊，满焊时采用的电流为 90 A-100 A。。  
6.2.5 预留出上盖板的位置作为装粉入口，在盖板中心位置打 $\Phi 8$  mm 的孔，随后焊接 $\Phi 8$  mm 的除气钛管，并在钛管端部放入钛网，防止粉末被抽出。  
6.2.6 所有焊缝表面应无明显气孔和裂纹缺陷。采用高压气体清洗包套内部，确保包套内部无焊渣等杂质。

### 6.3 装粉

- 6.3.1 操作人员须佩戴防尘帽、口罩、一次性无尘手套，穿着洁净的工作服。  
6.3.2 装粉前应用酒精或丙酮擦拭粉末包装瓶，防止包装瓶表面杂质落入粉末中。  
6.3.3 从包套上盖板位置缓慢倒入粉末，同时开启震动机床将粉末震实。  
6.3.4 混合粉末应在开包后 48 h 内用完，未在 48 h 内使用完毕的混合粉应立即抽真空保存。开包后的粉末要防止锈、钛合金切割碎屑、油脂等杂质污染。

### 6.4 封焊除气

- 6.4.1 当粉末与上盖板平齐时，盖上垫片和上盖板，保证上盖板与外套水平，采用 TIG 焊接工艺点焊加

满焊的两步法焊接上盖板。

6.4.2 钛管端部应连接真空球阀，再用导气管连接真空球阀与分子泵真空机的抽气阀门，以确保导气管无堵塞情况并且连接紧密。

6.4.3 推荐除气温度为  $560 \pm 20$  °C，达到真空度不低于  $6.0 \times 10^{-4}$  Pa。

6.4.4 包套不应存在漏气的情况，关闭抽气阀两分钟后，真空度不应低于  $2.0 \times 10^{-3}$  Pa。

6.4.5 每根钛管焊封 3~4 个部位，每个部位间隔不超过 3 mm，确保焊封效果良好。

6.4.6 焊封完成后取下真空球阀，并且从最外侧的焊封位置处去掉多余的钛管。

6.4.7 运输过程中应避免震动。

## 7 热等静压

### 7.1 设备选择

7.1.1 根据构件尺寸和数量选择热等静压机。

7.1.2 为避免石墨加热体挥发出碳元素污染构件，推荐采用钼加热体的热等静压机。

7.1.3 为避免压力介质与构件发生化学反应，压力介质为氩气，氩气符合 GB/T 4842 的要求。

### 7.2 工艺参数

热等静压推荐工艺参数为，温度 1150~1350 °C，压力 100~140 MPa，保温时长 2-10 h。

### 7.3 后续处理

7.3.1 目视观察，热等静压后的表面不允许出现蓝色或灰黑色。

7.3.2 热等静压后依次进行初加工和深加工，去除包套，并达到表面精度。标出超标准的凹陷点。

7.3.3 热等静压后应对构件超出标准的凹陷进行清理和补焊，补焊后的构件应进行消除应力的真空退火。

## 8 检验

网状结构钛基复合材料热等静压构件的检验项目如表 1 所示，若有特殊的使用条件所需的试验由供需双方协商确定补充检验项目。同批原材料、在相同工艺条件下连续生产的构件为一批。注：连续生产界定为生产过程中时间间断不超过 30 天，人员设备状态一致。

表 1 检验与试验项目

状态	试验种类	每批构件试验比例或数量
粉末	混合粉末形貌检验	1 次
热等静压构件	外观检验	100%
	室温拉伸试验	3 个
	高温拉伸试验	3 个
	室温弹性模量试验	2 个
	低倍组织检验	1 个
	显微组织检验	1 个
	超声检验	100%

### 8.1 混合粉末形貌检验

8.1.1 混合粉末颜色均匀，流动性良好，不应出现结块、发黄等情况。

8.1.2 利用扫描电子显微镜观察混合粉末形貌，陶瓷相应均匀镶嵌在球形钛粉表面，无大量陶瓷相脱落的情况出现。

### 8.2 构件外观检验

8.2.1 机械加工后表面应整洁、无肉眼可见的夹杂、不致密区域、裂纹或腐蚀斑点。

8.2.2 每个构件关键尺寸应符合设计图纸与合同要求。

### 8.3 试样

试样经线切割切取、研磨后，表面粗糙度（Ra）的最大值为 6.3  $\mu\text{m}$ 。试样尺寸公差应符合相关办法标准或 GB/T 1804 中精密等级的规定。

### 8.4 力学性能检验

8.4.1 室温拉伸试样尺寸与试验方法应依据 GB/T 228.1 进行，合格指标由供需双方协商确定。

8.4.2 高温拉伸试样尺寸与试验方法应依据 GB/T 228.2 进行，测试温度及合格指标由供需双方协商确定。

8.4.3 室温弹性模量试样尺寸与试验方法应依据 GB/T 22315 进行，合格指标由供需双方协商确定。

### 8.5 组织检验

8.5.1 低倍组织按照 GB/T 5168 规定的方法测定。不应有裂纹、缩尾、气孔、金属夹杂或非金属夹杂、影响使用的偏析及其他目视可见的冶金缺陷。

8.5.2 显微组织中陶瓷相应呈三维网状分布，结果如图 1 所示，不应存在陶瓷相偏聚，组织中不应存在未反应的陶瓷相原料。增强体体积分数应依据 GB/T 32496 规定的方法测定。

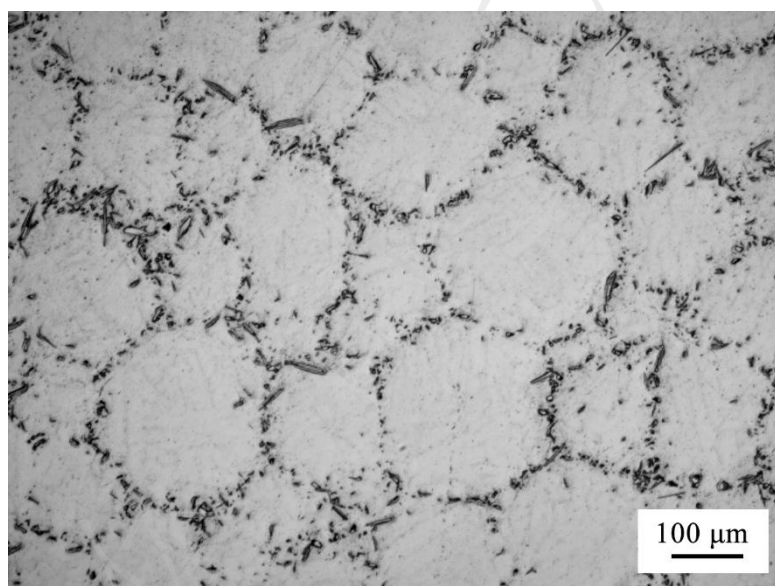


图 1 网状结构钛基复合材料热等静压构件组织

### 8.6 超声检验

构件热等静压后进行超声检验，测试应依据 GJB 1580，测试结果应达到 GJB 1580 规定的 AA 级。

## 9 包装、运输、贮存、标志和归档

### 9.1 包装、运输、贮存

网状结构钛基复合材料热等静压构件的包装、运输和贮存应符合 GB/T 8180 的规定。

### 9.2 标志

应在产品包装上标明以下印记：

- 本文件编号；
- 生产厂家的名称和地址；
- 产品名称和规格；
- 生产日期、产品批号；
- 检验人员姓名或代号及检验日期。

### 9.3 归档与检测报告

9.3.1 热等静压处理时，在控温仪表的记录纸上应注明热等静压处理的炉批号、合金牌号、数量、日期及操作者。

9.3.2 热等静压工艺原始记录（包括温度、时间、压力等）和温度记录纸应归档。

9.3.3 力学性能检测报告、无损探伤测试报告、尺寸过程记录表应归档，其复印件应随同加工后构件一起交给委托方。

9.3.4 归档保存保存期不应少于 5 年。