

团 体 标 准

T/CWAN 0155—2025

钛合金等离子弧单面焊双面成形推荐工艺规范

Recommendation procedure specification for plasma arc single-sided welding double-sided
forming of titanium alloy

2025-12-23 发布

2026-01-01 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 术语与定义	2
4 一般要求	2
5 工艺要求	4
6 焊接质量要求	7
7 焊接检验	7
附录 A（资料性）焊接工艺规程	11

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。

本文件由中国焊接协会提出并归口。

本文件起草单位：江西昌景航空制造有限公司、南昌航空大学、中焊科技发展（哈尔滨）有限公司、北部湾大学、河北创力机电科技有限公司、南昌职业技术大学、中国机械总院集团郑州机械研究所有限公司、广西机电职业技术学院。

本文件主要起草人：张体明、郑敏、陈玉华、申洋、徐宇欣、王善林、李旭、武鹏博、秦建、黎泉、方乃文、冯志强、牛董山钰、陈昊睿。

钛合金等离子弧单面焊双面成形推荐工艺规范

1 范围

本文件规定了钛合金等离子弧单面焊双面成形的一般要求、工艺要求、质量要求和焊接检验等内容。

本文件适用于板厚范围为 ≤ 12 mm 的钛合金板材和型材的等离子弧焊接，钛合金管的等离子弧焊接可参照此文件。

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。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 985.1 气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口

GB/T 2650 金属材料焊缝破坏性试验 冲击试验

GB/T 2651 焊接接头拉伸试验方法

GB/T 2653 焊接接头弯曲试验方法

GB/T 2654 焊接接头硬度试验方法

GB/T 3075 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法

GB/T 3323.1 焊缝无损检测 射线检测 第1部分：X和伽玛射线的胶片技术

GB/T 3375 焊接术语

GB/T 3621 钛及钛合金板材

GB/T 4842 氩

GB/T 5168 钛及钛合金高低倍组织检验方法

GB/T 8118 电弧焊机通用技术条件

GB/T 9445 无损检测 人员资格鉴定与认证

GB/T 11345 焊缝无损检测超声检测技术、检测等级和评定

GB/T 15579 弧焊设备

GB/T 18851.1 无损检测渗透探伤第1部分：总则

GB/T 19805 焊接操作工技能评定

GB/T 19866 焊接工艺规程及评定的一般原则

GB/T 26953 焊缝无损检测焊缝渗透检测验收等级

GB/T 26955 金属材料焊缝破坏性试验 焊缝宏观和微观检验

GB/T 30562 钛及钛合金焊丝

GB/T 31908 电弧焊和等离子焊接、切割用钨电极

GB/T 31910 潜水器用钛合金板材

GB/T 32259 焊缝无损检测 熔焊接头目视检测

GB/T 35365 潜水器用钛合金焊丝

GB/T 38916 航空航天用高温钛合金板材

GB/T 39255 焊接与切割用保护气体

T/CWAN 0009 焊接术语 熔化焊

3 术语与定义

GB/T 3375、GB/T 19866和T/CWAN 0009界定的术语及定义适用于本文件。

4 一般要求

4.1 人员

4.1.1 焊接操作人员应经过系统的理论学习和培训，具备足够的焊接专业知识和技能，通过考核并取得考试机构颁发的资格证书，且证书应在有效期内。

4.1.2 焊接人员应按GB/T 19805或用户认可的其他标准的有关规定进行技能评定，并取得相关资质证书。实际焊接操作前，焊接人员还应接受必要的培训，具备相应的知识、能力，并经考核合格后方可进行焊接操作。

4.1.3 焊接检验人员应经过相关检验知识理论学习和培训，并取得相应的资格证书，且证书应在有效期内。其中，无损检测人员应取得GB/T 9445中规定的2级以上资格证书。

4.2 设备及仪器仪表

4.2.1 弧焊电源、送丝机构、焊枪行走机构、气体压力表、气体流量表和温度测量表等相关仪器仪表应经过检定合格方可使用，并按照相关要求定期进行检修及检定。

4.2.2 弧焊电源应符合GB/T 8118、GB/T 15579等相关标准的规定。

4.2.3 设备应按要求定期保养、维护和校准。

4.2.4 相关设备在安装、搬迁、大修或停止使用1年以上时，应进行检定并进行工艺参数确认，合格后方可使用。

4.2.5 相关设备连入的电源网路电压波动范围不应超过额定值的 $\pm 10\%$ ，否则应配备稳压器。

4.2.6 焊接设备应安装惰性气体保护装置。应根据坡口形式及尺寸采用相应的保护罩形式进行气体保护，以保证焊缝高温区域得到防护，如需要宜增加焊缝背面防护措施。

4.3 材料

4.3.1 钛合金板及焊丝应具有生产厂家提供的质量保证书，如有必要应按照相关标准进行复验。

4.3.2 钛合金板应符合GB/T 3621、GB/T 31910和GB/T 38916等标准相关规定或符合设计技术条件中所提出的要求。

4.3.3 钛合金焊丝应符合GB/T 30562和GB/T 35365相关规定。

4.3.4 焊前应仔细清理母材及焊丝，清理可选以下方法进行：

4.3.4.1 用5%~10%氢氧化钠溶液或工业丙酮去除母材、焊丝表面残存的油脂等污物；

4.3.4.2 需要时，宜采用2%~5%氢氟酸（HF）+30%~40%硝酸（HNO₃）+水（H₂O）的溶液，在室温条件下酸洗2 min~20 min，酸洗后应立即用清水冲洗干净。

4.3.5 钛合金焊丝应存放在干燥、通风良好的库房中，不允许露天存放或放在有害气和腐蚀性介质的室内，室内温度应控制在10℃~15℃，相对湿度≤60%。室内应保持整洁。堆放时不宜直接放在地面上，宜放在离地面和墙壁≥300 mm的架子或垫板上，以保持空气流通，防止受潮。

4.3.6 钛合金焊丝应在开包后48 h内用完，对于已开包未用完的钛合金焊丝要从送丝装置中取出进行密封储存；开包后的焊丝要防止其表面被凝结露，或被锈、油脂及其他碳氢化合物所污染，保持焊丝表面干净和干燥。

4.3.7 焊接过程所使用的保护气体应符合GB/T 4842和GB/T 39255等相关标准要求，纯度不小于99.99%，露点在-50℃以下。

4.3.8 钨极应符合GB/T 31908相关规定。

4.3.8.1 钨极宜选用无放射性绿色环保的铈钨极。

4.3.8.2 根据焊接钛合金封头、管嘴壁厚及板厚选择钨极直径，宜为Φ1.0 mm~Φ4.0 mm，钨极端部宜磨成30°~45°锥形。

4.4 环境

4.4.1 焊接环境应保持通风良好，焊接环境清洁，无灰尘、烟雾等。

4.4.2 焊接作业环境风速宜≤1.5 m/s。

4.4.3 焊接作业环境湿度宜<80%。

4.4.4 禁止在下雨、下雪等室外环境作业。

4.4.5 焊件表面温度宜≥5℃。

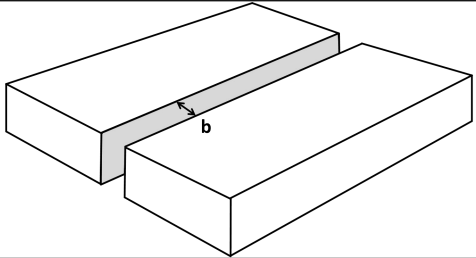
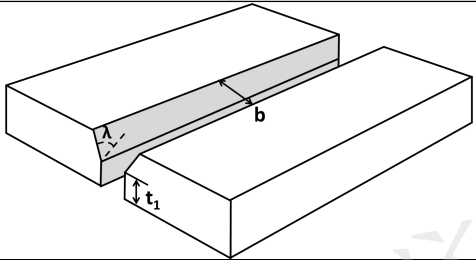
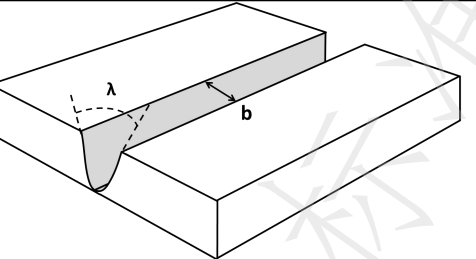
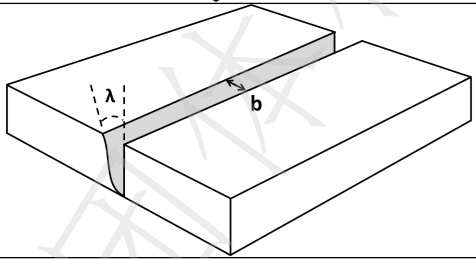
4.4.6 钛合金的焊接操作区域应与其他材料的作业区分开，建议设立独立的恒温恒湿的焊接车间。

4.5 坡口制备

钛合金等离子弧焊的坡口可按GB/T 985.1的规定进行设计，尺寸的选择上应兼顾等离子弧焊穿透能力强的工艺特点，推荐采用的坡口形式见表1，其他形式接头由供需双方协商确定。

表1 推荐采用坡口形式

单位为mm

母材厚度 t	坡口形式	坡口种类	规格尺寸		
			坡口角度 λ	坡口间隙 b	钝边 t_1
$t \leq 5$		I形坡口	-	$0 \leq b \leq 0.2$	—
$5 < t \leq 8$			-	$0 \leq b \leq 0.4$	
$8 < t \leq 12$			-	$0 \leq b \leq 0.5$	
$8 < t \leq 12$		Y形坡口	$10 \leq \lambda \leq 30$	$0 \leq b \leq 0.5$	$6 \leq t_1 \leq 10$
$8 < t \leq 12$		U形坡口	$10 \leq \lambda \leq 30$	$0 \leq b \leq 0.5$	—
$5 < t \leq 12$		J形坡口	$10 \leq \lambda \leq 20$	$0 \leq b \leq 0.5$	

5 工艺要求

5.1 试板加工

5.1.1 钛合金试板待焊坡口两侧10 mm范围内应平整、光洁、无毛刺、裂纹、氧化皮、油污及锈斑等，表面粗糙度 $Ra \leq 3.2 \mu\text{m}$ ，钝边的加工精度应控制在 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 。

5.1.2 坡口宜采用机械或硬质合金磨轮磨削的方法加工，加工面金属不应产生加工氧化色。

5.2 工装夹具

5.2.1 钛合金焊接工装在焊接过程中不允许与弧焊枪、钨极、保护拖罩、送丝装置和夹具等可移动部件发生干涉。

5.2.2 将待焊接工件放置在焊接夹具上，完成工件装夹。检查工件的装夹状态，测量工件装夹后的间隙、错变量等情况，保证组队及装夹条件满足焊接要求。

5.3 设备状态检查

5.3.1 检查弧焊设备、保护气体、送丝系统、水冷系统和焊接程序等是否满足焊接工艺要求，确认无误后方可准备焊接。

5.3.2 为了确保气路的通畅、洁净，可在焊接之前先送气排出气路内的空气、水分等。

5.4 焊接

5.4.1 为了减少气孔和裂纹等缺陷的产生，在焊接前8 h以内应采用机械打磨、酸洗清理钛合金板待焊坡口两侧 ≥ 30 mm区域内的表面氧化膜和油污，清理后应对坡口区域进行隔离保护。

5.4.2 为消除工件表面二次氧化、附着水分油污等问题并提升生产效率，可采用激光清洗集成于自动焊接设备，在焊接过程中同时在熔池前端完成工件的表面清洗。

5.4.3 必要时可采用定位焊固定工件，定位焊长度宜控制在2 mm~5 mm之间，间距宜控制在50 mm~150 mm之间。当采用定位焊方法固定工件时，若定位焊缝不构成焊接接头的一部分，则在焊前或焊接过程中应将其完全清除；若定位焊缝熔入焊接接头，则其表面上应无缩孔、弧伤、裂纹、气孔、咬边和可能影响焊接实施的其他缺陷；施焊定位焊应采用与主焊缝相同的焊接工艺进行焊接；若定位焊缝质量不合格，应将它全部清除，且不得在同一部位重新实施定位焊。

5.4.4 定位焊时可根据产品尺寸精度和性能要求，采用单激光焊接、激光填丝焊和电弧焊等方式。

5.4.5 双面坡口推荐采用双面打底焊，熔深需超过钝边厚度。单面坡口推荐采用单面打底焊，保证单道焊透双面成形；打底焊接时焊缝背面需要通入惰性气体进行保护。

5.4.6 打底焊接后应观察焊缝表面及熔深情况，如发现焊缝表面成形不良或熔深不足应进行焊缝修正或返修处理。

5.4.7 在每道次焊接之前应清理干净焊缝内待焊区域内及周围氧化物和飞溅。

5.4.8 焊接过程可采用拖罩、拖罩与喷嘴结合的方式对焊接熔池和高温区域进行保护，特殊情况下可在惰性气体保护舱或真空舱内焊接。

5.4.9 焊接过程中应至少提前15 s送气，焊后直到焊缝及热影响区金属冷却到300 °C以下时方可移开焊枪停气，若在惰性气体保护舱内焊接时，保护舱内氧气含量应不大于213 mg/m³。若在真空舱内焊接时，真空舱内环境压力应低于5 Pa。

5.4.10 储存惰性气体的气瓶压力小于0.5 MPa时应停止使用。

5.4.11 当环境空气相对湿度RH \geq 50%时，应预热钛合金板材至50 °C~80 °C。

5.4.12 钛合金激光-电弧复合焊接推荐工艺参数如表2所示。

表2 钛合金等离子弧单面焊双面成形推荐工艺参数

母材厚度 (mm)	焊接电流 I/A	焊接电压 U/V	焊接速度 V/m·min ⁻¹	等离子气体流量 Q/L·min ⁻¹	托罩气体流量 Q ₁ /L·min ⁻¹	背面保护气体流量 Q ₂ /L·min ⁻¹
2≤t≤4	120~150	23~25	17~20	5~8	5~10	5~10
4<t≤6	150~200	25~26	18~22	5~8	5~15	5~10
6<t≤8	180~240	25~28	19~22	5~9	8~15	6~12
8<t≤10	220~260	26~31	12~19	5~10	10~18	7~13
10<t≤12	250~300	27~31	12~18	5~11	12~20	8~15

5.4.13 检查自动焊程序中各焊接工艺参数是否设置正确。

5.4.14 为保证焊接路径的准确性，可通过程序空运行的方式校核焊接路径，若出现位置偏离以及设备与工件、工装干涉等情况，应重新修订校核程序，直至准确无误。

5.4.15 若连续焊过程中因异常导致中断，应立即关闭弧焊电源；排除异常后，将中断处焊缝进行焊前清理后完成后续焊接。

5.5 焊后处理

5.5.1 焊后一般待焊缝冷却至室温后再对焊缝正面、背面余高过高或向母材急剧过渡时，可采用机械或硬质合金磨轮磨削对余高进行修整至圆滑过渡。修整余高时应避免过热，防止发生氧化。

5.5.2 为提升生产效率，可在自动焊接设备集成激光清洗装置，在焊接完成后即可完成黑灰的自动化激光清理。

5.5.3 焊后工件尺寸精度应满足设计图纸要求。当工件因焊接变形需要调修时，可采用机械或加热方法对其进行矫正。

5.6 缺陷修复

5.6.1 修复前须确认缺陷或损伤产生的原因和范围。

5.6.2 焊接缺陷应优先通过机械或硬质合金磨轮磨削去除，去除后通过渗透探伤确认，经过打磨能够消除且符合设计图纸要求的不需要补焊。

5.6.3 修复工艺原则上应与原焊接工艺相同，两者不一致时，修复工艺应评定合格。

5.6.4 焊缝有缺陷时，原则上首先选用等离子弧焊进行修补。修补方法为先清理磨平问题焊缝区域，再采用经过评定合格的修复工艺重新焊接。

5.6.5 返修焊缝较短时，可采用手工电弧焊进行修复。手工电弧焊修复前，应通过机械或硬质合金磨轮磨削方法将焊接缺陷彻底清除，然后通过渗透检测和（或）射线检测确认焊缝无缺陷后再行补焊。

5.6.6 同一位置补焊的次数不宜超过两次。对补焊超过两次的焊缝若需再进行补焊时，应进行修复工艺评定。

5.6.7 补焊后必须通过无损检测确认缺陷完全消除，补焊焊缝质量要求满足设计要求。

6 焊接质量要求

6.1 焊缝表面成形应均匀、致密、平滑向母材过渡，不应有裂纹、未熔合、咬边及气孔等缺陷。

6.2 焊缝表面及热影响区表面的颜色满足表3的规定。

表3 焊缝及热影响区表面颜色规定表

焊缝与热影响区表面颜色	保护状况
银白色	良好
淡黄色	较好
深蓝色	较差
灰色或灰白色	很差

6.3 焊接接头渗透检验、射线检验、超声检验及合格指标由供需双方协商确定。

6.4 焊接接头拉伸性能及合格指标由供需双方协商确定。

6.5 焊接接头冲击性能试验温度及合格指标由供需双方协商确定。

6.6 焊接接头弯曲性能合格指标由供需双方协商确定。

6.7 焊接接头疲劳性能合格指标由供需双方协商确定。

6.8 焊接接头硬度合格指标由供需双方协商确定。

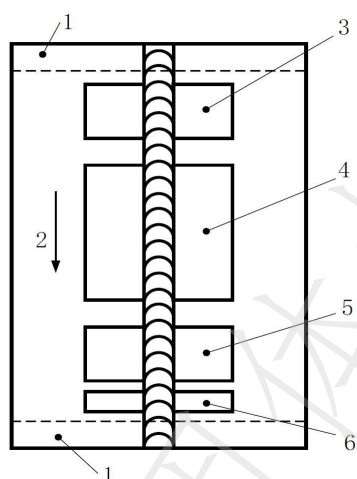
6.9 焊接接头宏观金相与微观金相试样均不得有裂纹、未熔合、夹渣和气孔等焊接缺陷。

7 焊接检验

焊接接头的检验项目与数量或范围见表4，试样截取位置示意图1。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和数量。

表4 焊接接头的检验项目与数量或范围

试件状态	检验项目	检验数量或范围
焊后检验	目视检验	100%
	射线或超声波检验	100%
	渗透检验	100%
	拉伸试验	2个试样
	冲击试样	3个试样
	弯曲试样	2个面弯试样和2个背弯试样
	疲劳试样	3个试样
	硬度检验	1个试样
	焊接变形	100%
	宏观金相检验	1个试样
	微观金相检验	1个试样



- 1、去除25mm;
- 2、焊接方向;
- 3、该部位: 1个拉伸试样, 1个正弯式样, 1个背弯式样;
- 4、该部位: 3个冲击试样, 3个疲劳试样;
- 5、该部位: 1个拉伸试样, 1个正弯式样, 1个背弯式样;
- 6、该部位: 1个金相试样, 1个硬度试样;

图1 试样截取位置示意图

7.1 无损检验

7.1.1 目视检测

外观目视检验应按照GB/T 32259的规定进行。检查焊缝表面是否存在裂纹、表面沟槽和未焊透等缺陷；检查接头的错边、表面下凹量等缺陷。

7.1.2 渗透检验

渗透检验应按照GB/T 18851.1的规定进行，验收等级应符合GB/T 26953的规定进行或由供需双方协商确定。

7.1.3 射线检验

射线检验应按照GB/T 3323.1的规定进行或由供需双方协商确定。

7.1.4 超声检验

超声检验应按照GB/T 11345的规定进行。

7.1.5 变形检验

焊接试板变形度检验可通过对接试件焊后表面夹角进行测定，为保证测量精度，测定仪器推荐采用faro三坐标形位公差测量仪。

7.2 拉伸性能检验

7.2.1 焊接接头拉伸试样尺寸及拉伸试验应按照GB/T 2651的规定进行。

7.2.2 焊接接头拉伸试样的焊缝余高应以机械方法去除，使之与母材齐平并应覆盖焊缝全厚度。

7.3 冲击性能检验

7.3.1 焊接接头冲击试样尺寸及冲击试验应按照GB/T 2650的规定进行。

7.3.2 焊接接头冲击试样应覆盖焊缝全厚度。

7.3.3 当焊接接头厚度 $\leq 5\text{mm}$ 时可以取消冲击性能检验。

7.4 弯曲性能检验

7.4.1 焊接接头弯曲试样尺寸及弯曲试验应按照GB/T 2653的规定进行。

7.4.2 焊接接头正弯和背弯试样应覆盖焊缝全厚度。

7.5 疲劳性能检验

疲劳试验应按照GB/T 3075的规定进行。

7.6 硬度检验

7.6.1 焊接接头硬度试验应按照GB/T 2654规定进行。

7.6.2 硬度试样制备完成后进行适当腐蚀，以便于确定焊接接头不同区域的硬度测量位置。

7.6.3 硬度试验应覆盖焊接接头横截面表层、中层、底层和纵向焊缝中心区硬度。横向测量时每隔 $0.5\text{mm}\sim 2\text{mm}$ 的距离测试一个点，纵向测量时每隔 $1\text{mm}\sim 2\text{mm}$ 测试一个点。

7.7 金相检验

7.7.1 焊接接头宏观金相与微观金相检验应按照GB/T 5168和GB/T 26955的规定进行。

7.7.2 应在已做过低倍组织检查的试样上，认为需要的部位切取高倍试样，或按供需双方协议从其他面上切取试样。

附录A
(资料性)

钛合金等离子弧单面焊双面成形焊接工艺规程 (WPS)

钛合金等离子弧单面焊双面成形焊接工艺规程如表A.1所示。

表A.1 钛合金等离子弧单面焊双面成形焊接工艺规程

工艺评定报告编号:				日期:			
焊接设备	焊机型号			焊接电源名称			
	焊接电源执行标准			焊接电源极性			
材料	母材型号			母材规格 (mm)			
	母材炉/批号			母材执行标准			
	焊材型号/牌号			焊材规格 (mm)			
	焊材批号			焊材执行标准			
	预热温度 (°C)			热处理制度			
焊接	焊接位置			拖罩保护气种类			
	等离子保护气种类			根部保护气种类			
焊接接头坡口型式简图							
焊接工艺参数	焊接电流/A	焊接电压/U	焊接速度 $V/m \cdot \min^{-1}$	等离子气体流量 Q (L/min)	托罩气体流量 $Q_1/L \cdot \min^{-1}$	背面保护气体流量 Q_2 (L/min)	
焊接操作人员签字	制定人员签字			校核人员签字		批准人员签字	