

# TC4 钛合金惯性摩擦焊焊缝微观组织形成的研究

A Study of the Formation of Weld Microstructure in Inertia

Friction Welding of Ti-6Al-4V Alloy

西安交通大学 宋西平 孟为如 邵潭华 王士元

北京航空材料研究所 刘效方

Song Xiping Meng Weiru Shao Tanhua Wang Shiyuan (Xi'an Jiaotong University)

Liu Xiaofang (Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

**[摘要]** 利用光学显微镜、扫描电镜、薄膜透射电镜研究了惯性摩擦焊焊缝组织的形成。结果表明,焊缝组织沿径向有较大的变化。心部为细小的等轴组织,焊口为片状组织,从心部到焊口形成了V字形焊缝。

**关键词:** TC4 钛合金 惯性摩擦焊 焊缝

**[Abstract]** The formation of weld microstructure in inertia friction welding by was studied mans of microscope, SEM and TEM. The results show that microstructure of weld zone greatly changes in the radial direction. The centre of joint is characterized by fine equiaxial grains. The flashing is by lamellar structure. A "V" shape weld zone is formed from the centre of joint to the flashing.

**Keywords:** Ti-6Al-4V alloy inertia friction welding weld

## 1 前言

惯性摩擦焊是一种利用飞轮提供焊接能量,通过焊接面受压摩擦释放能量使焊接面迅速加热并顶锻的大功率、短时间固相焊接工艺。这种工艺以其较高的经济效益正在受到人们的重视。日本、美国等国家先后对TC4钛合金惯性摩擦焊(IFW)进行了研究<sup>[1~3]</sup>,国内仅有少数单位,如北京航空材料研究所进行了研究。这些研究侧重于焊接工艺及其对性能的影响,对焊接过程中组织转变考虑得很少。本文着重在这方面进行研究,并获得了有益的实验结果。

## 2 试验条件及试验方法

试验是在北京航空材料研究所自行研制的MHK-5型摩擦焊试验机上进行。材料为直径20mm的TC4钛合金棒材,化学成分(wt%)为:Al6.38, V3.85, C<0.10,余量为Ti,热处理状态为轧制。焊接工艺参数为:主轴转速 $N=1457\text{r}/\text{min}$ ,惯量 $I=0.4498\text{N}\cdot\text{M}\cdot\text{s}^2$ ,主压力 $P=14\text{kgf}/\text{cm}^2$ ,滑块位移速度 $V=12.2\text{mm}/\text{s}$ 。用铂铑<sub>10</sub>-铂(分度号S)热电偶和SC16型光线示波仪测量了焊接面温度。热电偶是通过打孔装入到焊接面前沿。光学金相腐蚀液配比(体积比)为 $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}=1:2:10$ 。在焊缝处沿轴向和垂直轴向分别取薄膜透射

试样,双喷减薄, HITACHI H-800透射电镜上观察。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 焊缝温度的测定

热电偶探头在测温过程中所处的位置及测量结果如图1所示。

结果表明,惯性焊过程中焊缝最高温度可达 $1325\text{C}$ ,焊缝中心附近温度为 $780\text{C}$ 。由热电偶2在高温处的冷却速率为 $20\sim 40\text{C}/\text{s}$ 及其滞后热电偶1响应时间 $1\text{s}$ 可推知焊心处温度在 $800\text{C}$ 以上(焊缝可看作温度不等的热源)。从焊心到焊口温度逐渐升高。

### 3.2 焊缝组织观察及分析

#### 3.2.1 焊缝组织形貌观察

焊缝的光学金相照片及扫描电镜照片如图2、图3所示。

从金相照片可以看出,焊口为细片(针)状组织,且保留了高温 $\beta$ 相的晶界轮廓。沿焊缝向焊心,高温 $\beta$ 相的晶界轮廓逐渐变小,片状组织所占比例减少,且有细小等轴晶粒出现。焊心组织异常细小,在光学显微镜下难以分辨,焊心周围有明显的流线痕迹。扫描电镜下,焊心则为非常细小的点状组织。沿焊缝至焊口的片状组织都可以看到沿晶界及片间分布的点状组织。

扫描电镜照片

(b) 焊缝侧边

图 3 焊缝的扫描电镜照片

。对焊缝侧边的扫描电镜照片显示，焊缝侧边存在明显的缺陷，这些缺陷可能是由于焊接过程中产生的气孔、夹渣或裂纹等缺陷。这些缺陷的存在会降低焊缝的强度和耐久性，因此在焊接过程中应严格控制焊接参数，以减少缺陷的产生。

