

# 轨道交通车辆用 TC4 钛合金的电偶腐蚀性能研究

刘 晓<sup>1</sup> 张克木<sup>1</sup> 罗 金<sup>1</sup> 朱宗涛<sup>2</sup> 刘瑞琳<sup>2</sup>

(1. 中车长春轨道客车股份有限公司工程技术中心, 130062, 长春;

2. 西南交通大学材料科学与工程学院//第一作者, 正高级工程师)

**摘 要** 通过电偶腐蚀试验,测试了 TC4 钛合金同碳钢及铝合金所组成电偶对的电流密度,研究了钛合金与异种金属间的电偶腐蚀性能。试验结果表明:TC4 钛合金同碳钢及铝合金直接接触时,容易发生严重的电偶腐蚀;涂环氧底漆或涂覆装配膏的处理方法能有效降低异种金属间的电偶腐蚀。

**关键词** 轨道交通车辆; 钛合金; 电偶腐蚀性能

**中图分类号** U270.4<sup>+</sup>1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.04.003

## Galvanic Corrosion Properties of TC4 Titanium Alloy in Rail Transit Vehicle

LIU Xiao, ZHANG Kemu, LUO Jin, ZHU Zongtao, LIU Ruilin

**Abstract** Through galvanic corrosion tests, the current density of the galvanic pair formed by TC4 titanium alloy, carbon steel and aluminum alloy is measured, and the galvanic corrosion properties between TC4 titanium alloy and dissimilar metals are studied. Test results show that serious galvanic corrosion is prone to occur when TC4 titanium alloy is in direct contact with carbon steel and aluminum alloy. The galvanic corrosion between dissimilar metals can be effectively reduced by applying epoxy primer or assembly paste.

**Key words** rail transit vehicle; titanium alloy; galvanic corrosion properties

**First-author's address** Engineering Technology Center, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

钛合金具有密度低、比强度高、耐蚀性好、无磁性等特性,近几年被广泛应用在航空航天、船舶、原子能及石化等领域<sup>[1-2]</sup>。TC4 钛合金是开发最早的商业钛合金,具有良好的工艺特性,其产量占各种钛合金半成品总产量的一半以上。面对日益强烈的轨道交通轻量化需求,TC4 钛合金具有很大的发展潜力,在轨道交通车辆零部件及大型结构件上有非常广阔的应用前景。

虽然钛合金具有优异的耐腐蚀性,但因其电位较正,故当其在腐蚀环境中与碳钢或铝合金等电位较负的金属接触时,易使其他金属发生电偶腐蚀<sup>[3]</sup>。目前,大多对钛合金采用阳极氧化或电镀等处理方法<sup>[4-7]</sup>,来防止电偶腐蚀发生。不过这些处理方法并不适用于大型结构的工程化应用。

对此,本文针对常用的 SG 34 环氧底漆及克鲁勃 STABURAGSNBU 30 PTM 装配润滑脂(以下简称为“装配膏”),通过电偶腐蚀试验来研究无防护下及油漆或装配膏等防护下的钛合金电偶腐蚀性能。

## 1 电偶腐蚀试验

### 1.1 试验材料

电偶腐蚀试验所用阴极金属为 TC4 钛合金,阳极金属为 45<sup>#</sup> 钢及 7 系铝合金。试样尺寸均为 20 mm × 35 mm × 3 mm。

在试验前对试验材料进行以下处理:

1) 涂漆样板制备。将金属样块先使用 80<sup>#</sup> 砂纸打磨,再用乙醇擦拭干净并干燥,之后喷涂 SG 34 环氧底漆,其干膜厚度为  $(60 \pm 5) \mu\text{m}$ 。

2) 涂装配膏样板制备。将金属样块使用 80<sup>#</sup> 砂纸打磨,用乙醇擦拭干净并干燥后,均匀涂抹装配膏。

3) 封装。用导线连接试样,并用 704 密封胶进行封样。封样只留 1 个测试面不封闭,其余部位均封闭,以确保试样不发生水线腐蚀和缝隙腐蚀。

### 1.2 试验方法

参照 HB 5374—1987《不同金属电偶电流测定方法》,采用科思特电化学工作站 CS310 设备测定电偶电流。电解液是质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液, pH 值为 6.8 ~ 7.2,测试温度为 30 ℃,参比电极为饱和甘汞电极,测试时间为 20 h。电偶腐蚀试验装置如图 1 所示。

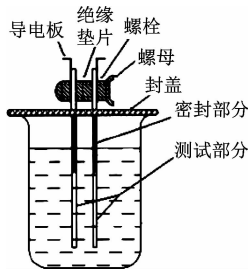


图 1 电偶腐蚀试验装置

Fig. 1 Galvanic corrosion test apparatus

按照电偶电流密度的大小将电偶腐蚀敏感性分为 5 个等级,如表 1 所示。

表 1 电偶电流密度与电偶腐蚀敏感性等级评定  
Tab. 1 Evaluation of galvanic current density and galvanic corrosion sensitivity grade

电偶腐蚀敏感性等级	电偶电流密度/ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	电偶腐蚀程度
A 级	0 ~ 0.3	无腐蚀
B 级	>0.3 ~ 1.0	轻微腐蚀
C 级	>1.0 ~ 3.0	显著腐蚀
D 级	>3.0 ~ 10.0	临界腐蚀
E 级	>10.0	严重腐蚀

2 电偶腐蚀性能及防护

2.1 无防护下的电偶腐蚀性能

无防护下,TC4 钛合金同 45<sup>#</sup>钢及 7 系铝合金(以下简称“7 系铝”)偶接后的电偶腐蚀试验结果见表 2。

表 2 无防护下电偶腐蚀试验结果

Tab. 2 Results of galvanic corrosion test without protection

电极 A	电极 B	电偶电流密度/ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	电偶腐蚀敏感性等级
TC4	45 <sup>#</sup> 钢	32.09	E 级
TC4	7 系铝	19.20	E 级

TC4 钛合金同 45<sup>#</sup>钢及 7 系铝试样的电偶电流密度-时间关系曲线如图 2 所示。由图 2 可以看到:TC4 钛合金-7 系铝合金(以下简称“TC4-7 系铝”)的电偶电流密度明显低于 TC4 钛合金-45<sup>#</sup>钢(以下简称“TC4-45<sup>#</sup>钢”);TC4-45<sup>#</sup>钢与 TC4-7 系铝的电偶电流密度随时间变化趋势一致,均为先急速上升,再趋于平稳。经分析,随着浸泡时间的延长,45<sup>#</sup>钢试样表面产生了腐蚀产物  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{XH}_2\text{O}$ ,7 系铝

试样表面也产生了腐蚀产物  $\text{Al}_3\text{O}_2$  或  $\text{Al}(\text{OH})_3$  等铝的氧化物,进而使试样表面开始变得粗糙,与溶液接触的有效面积增大,从而导致腐蚀的有效面积增大;此外,氧化产物较疏松多孔,而产物之间的相互挤压会产生较大的应力,故而导致腐蚀产物部分脱落,致使腐蚀基材裸露、加剧腐蚀,从而导致电位的负移和电流的正移。

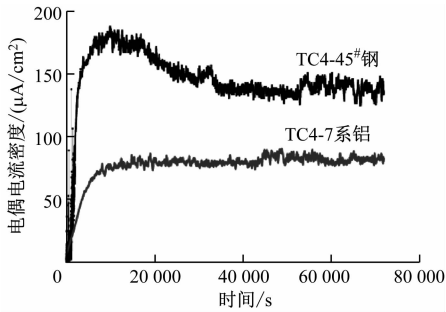


图 2 TC4 钛合金同 45<sup>#</sup>钢及 7 系铝的电偶电流密度-时间曲线

Fig. 2 Galvanic current density-time curve of TC4 titanium alloy with 45<sup>#</sup> steel or 7-series aluminum alloy

图 3 为电偶腐蚀后的试样宏观形貌。从图 3 中可以看出,45<sup>#</sup>钢和 7 系铝表面均有明显的电偶腐蚀发生。此时,45<sup>#</sup>钢和 7 系铝作为电极 B(即阳极)被腐蚀,而钛合金作为电极 A(即阴极)被保护。由表 2 的测试结果可知,45<sup>#</sup>钢和 7 系铝均不可与 TC4 钛合金直接接触使用。

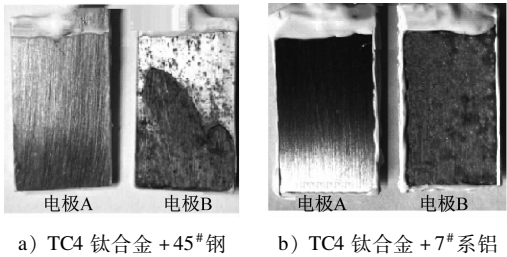


图 3 电偶腐蚀后的试件宏观形貌

Fig. 3 Macroscopic morphology of the specimen after galvanic corrosion

2.2 环氧底漆防护下的电偶腐蚀性能

将 45<sup>#</sup>钢及 7 系铝涂覆环氧底漆后,再与 TC4 钛合金偶接进行电偶腐蚀试验,试验结果见表 3,相应的电偶电流密度-时间关系曲线如图 4 所示。

由表 3 可以看出,涂覆环氧底漆后的 45<sup>#</sup>钢及 7 系铝同 TC4 钛合金间的电偶电流密度明显降低,均小于  $0.3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,电偶腐蚀性敏感等级达到 A 级。

由图 4 可见,TC4 钛合金与涂覆环氧底漆后的

表 3 环氧底漆防护下电偶腐蚀试验结果

Tab.3 Results of galvanic corrosion test with epoxy primer protection

电极 A	电极 B	电偶电流密度/ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	电偶腐蚀敏感性 等级
TC4	45 <sup>#</sup> 钢	0.12	A 级
TC4	7 系铝合金	0.03	A 级

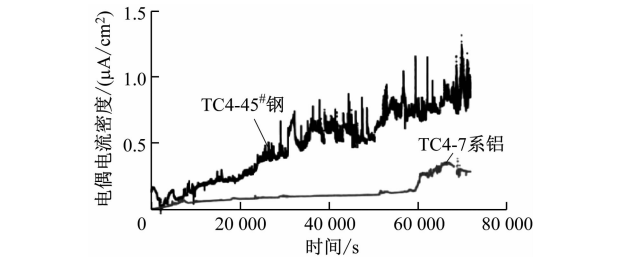


图 4 TC4 钛合金与涂覆环氧底漆的 45<sup>#</sup>钢、7 系铝电偶电流密度-时间曲线

Fig. 4 Galvanic current density-time curve of TC4 titanium alloy with 45<sup>#</sup> steel or 7-series aluminum alloy both coated with epoxy primer

45<sup>#</sup>钢间的电流密度变化分为 2 个阶段:第 1 阶段电流密度趋于平稳,说明漆层对碳钢表面形成了良好的保护;第 2 阶段,电流密度随时间延长出现了波动上升,因为随着浸泡时间的延长,漆膜局部出现了破损,故基材产生了腐蚀。由图 4 还可见,TC4 钛合金与涂覆环氧底漆后的 7 系铝间的电流密度变化趋势也分为 2 个类似阶段:第 1 阶段电流密度较为平稳;第 2 阶段波动上升,但整体电流密度波动幅度低于 TC4 钛合金与 45<sup>#</sup>钢电偶对。

由试验结果可见,与无防护金属基材相比,涂覆环氧底漆作为保护层后,电偶电流密度明显降低。这说明环氧底漆可以在钛合金与异种金属间起到良好的屏蔽和电绝缘性能。

### 2.3 装配膏对电偶腐蚀性能影响

45<sup>#</sup>钢及 7 系铝涂覆装配膏后,分别与 TC4 钛合金偶接进行电偶腐蚀试验,结果见表 4。相应的电偶电流密度与时间关系曲线如图 5 所示。

表 4 装配膏防护下的电偶腐蚀试验结果

Tab.4 Results of galvanic corrosion test with assembly paste protection

电极 A	电极 B	电偶电流密度/ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	电偶腐蚀敏感性 等级
TC4 钛合金	45 <sup>#</sup> 钢	0.01	A 级
TC4 钛合金	7 系铝	0.02	A 级

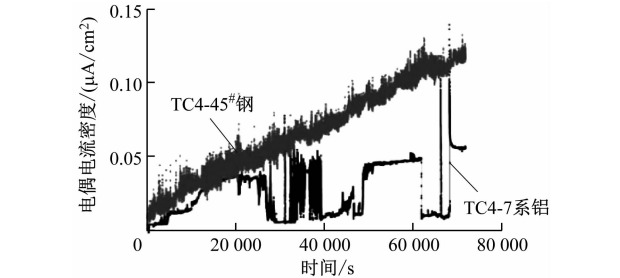


图 5 TC4 钛合金与涂覆装配膏的 45<sup>#</sup>钢、7 系铝电偶电流密度-时间曲线

Fig. 5 Galvanic current density-time curve of TC4 titanium alloy with 45<sup>#</sup> steel or 7-series aluminum alloy both coated with assembly paste

由表 4 可见,45<sup>#</sup>钢及 7 系铝涂覆装配膏后,其与 TC4 钛合金间的电偶电流密度明显降低,均小于  $0.30\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,电偶腐蚀敏感性等级达到 A 级。

由图 5 分析可知,随着浸泡时间的延长,装配膏产生了溶解现象,电解液渗入至基材表面,发生腐蚀反应,故 2 条曲线均出现了剧烈波动,且电偶电流密度虽随着时间延长而增加,却整体仍维持在较低水平。这说明装配膏可以在钛合金与异种金属间起到良好的屏蔽和电绝缘作用,且在使用过程中需将装配膏涂覆均匀,否则容易发生局部腐蚀。

### 3 结论

- 1) TC4 钛合金与 45<sup>#</sup>钢及 7 系铝直接接触组成电偶对时,45<sup>#</sup>钢及 7 系铝表面会产生严重腐蚀,TC4 钛合金不可与其直接接触使用。
- 2) 环氧底漆的漆膜致密,具有良好的绝缘性,能有效降低异种金属间的电偶腐蚀敏感性等级。
- 3) 装配膏具有防水性和良好的绝缘性,对钢及铝合金可以起到封闭作用,能有效降低异种金属间的电偶腐蚀敏感性等级。

在实际应用过程中,可根据结构特点及使用工况等条件,选择适当的防护方法,降低异种金属间电偶腐蚀敏感度,防止电偶腐蚀的发生,延长使用寿命。

### 参考文献

[1] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册(第 4 卷)[M]. 2 版. 北京:中国标准出版社,2002:1.  
China Aeronautical Materials Handbook Editorial Committee. China aeronautical materials handbook (vol.4) [M]. 2nd ed. Beijing: Standards Press of China, 2002:1.