

板料成形

## 含 NiAl 涂层的 TC4 钛合金板材的拉伸失效机理

郑 晖<sup>1</sup>, 孙凌崴<sup>1</sup>, 韩颖杰<sup>2</sup>, 付和国<sup>2</sup>, 谢洪志<sup>2</sup>, 张 帅<sup>2</sup>, 赵天章<sup>1</sup>

(1. 沈阳航空航天大学 航空宇航学院, 辽宁 沈阳 110136; 2. 沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁 沈阳 110034)

**摘要:** 利用等离子喷涂技术在 TC4 钛合金零件表面制备涂层是常见的增强钛合金性能的方法, 但变形时涂层的失效机理尚不明确。通过室温拉伸试验测试了含 NiAl 涂层的 TC4 钛合金板材的力学性能, 深入分析了各阶段力学行为的特点。通过金相显微镜观察了涂层中的裂纹, 明确了涂层的失效原因, 并建立了单向拉伸涂层的失效模型。结果表明: 涂层的失效是由开裂和脱粘引起的, 开裂是在涂层的厚度方向贯穿涂层的裂纹, 脱粘是基体与涂层的机械结合失效导致的分离。开裂和脱粘是涂层失效过程的两个阶段: 开裂发生在拉伸前期的弹性阶段, 在应力的作用下在涂层中的缺陷处或涂层表面开裂; 而脱粘主要发生在拉伸后期的塑性阶段, 涂层与基体的结合失效导致涂层脱落。涂层的周期性开裂导致弹性阶段的应力-应变曲线呈现周期性的台阶形状, 塑性阶段涂层的脱粘与开裂相遇导致部分涂层残留在基体上。

**关键词:** NiAl 涂层; TC4 钛合金; 失效模型; 开裂; 脱粘

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.10.007

**中图分类号:** TG174.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 10-0046-07

## Tensile failure mechanism on TC4 titanium alloy sheet containing NiAl coating

Zheng Hui<sup>1</sup>, Sun Lingwei<sup>1</sup>, Han Yingjie<sup>2</sup>, Fu Heguo<sup>2</sup>, Xie Hongzhi<sup>2</sup>, Zhang Shuai<sup>2</sup>, Zhao Tianzhang<sup>1</sup>

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110034, China)

**Abstract:** Using plasma spraying technology to prepare coatings on the surface of TC4 titanium alloy parts is a common method to enhance the properties of titanium alloy, but the mechanism of coating failure during deformation is not clear. Therefore, the mechanical properties of NiAl-coated TC4 plate were tested through tensile tests at room temperature, and the characteristics of the mechanical behavior at each stage were analyzed in depth. Then, the cracks in the coating were observed by metallography microscope, the cause of coating failure was clarified, and a uniaxial tensile coating failure model was established. The results show that the failure of coating is caused by cracking and debonding. The cracking is the crack that runs through the thickness of coating, and the debonding is the separation caused by the mechanical bonding failure between matrix and coating. Cracking and debonding are two stages of the coating failure process. Cracking occurs in the elastic stage during the early stage of stretching, which occurs at defects in the coating or on the surface of coating under the action of stress, while debonding mainly occurs in the plastic stage during the later stage of stretching, the bonding failure between coating and substrate leads to the coating to fall off. The periodic cracking of coating causes the stress-strain curve in the elastic stage to show a periodic step shape, while the debonding and cracking of the coating in the plastic stage lead to part of the coating remaining on matrix.

**Key words:** NiAl coating; TC4 titanium alloy; failure model; cracking; debonding

钛合金作为航空航天中常用的材料, 具有优异的抗腐蚀性能和高强度<sup>[1-3]</sup>, 在船舶、石油、化工、

兵器和航空等领域被广泛应用于一些受力构件中, 如棒材、板材、型材、锻件和管材等<sup>[4-7]</sup>。

TC4 钛合金是典型的  $\alpha+\beta$  型钛合金, 在高温条件 (低于 400 °C) 下表现出良好的稳定性<sup>[8-10]</sup>。为开发等离子喷涂在 TC4 钛合金上的应用, 国内外学者进行了大量尝试。何博<sup>[11]</sup>研究了钛合金表面传统双层热障涂层的高温行为及失效机理, 研究发现, 高温下基体与涂层之间的元素扩散是导致涂层失效的主要原因。冀晓鹏等<sup>[12]</sup>采用等离子喷涂技术在 TC17 钛合金表面喷涂了氧化铝钛涂层, 对喷涂前后

收稿日期: 2023-01-28; 修订日期: 2023-04-16

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51605310); 辽宁省教育厅项目 (LJKZ0180); 沈阳市中青年科技创新人才支持计划 (RC210422)

作者简介: 郑 晖 (1976-), 女, 博士, 副教授

E-mail: 912108730@qq.com

通信作者: 赵天章 (1987-), 男, 博士, 讲师

E-mail: tzzhao@alum.imr.ac.cn

的基体材料和涂层做了显微组织分析, 认为 TC17 钛合金基体的力学性能未受到等离子喷涂的影响。王贺权等<sup>[13]</sup>利用盲孔法研究了钛合金表面喷涂 Ni-CrAl 涂层的残余应力分布情况, 发现涂层残余应力为压应力, 其随着厚度的增加而增大, 边缘位置存在应力集中。Niu Z Q 等<sup>[14]</sup>研究了 TC4 钛合金表面等离子喷涂 CuNiIn 涂层的微动磨损机理, 发现在微动磨损过程中, 涂层的层状结构有效地阻碍了疲劳裂纹扩展, 引导裂纹沿层状界面偏转, 诱发裂纹分叉, 气孔会使裂纹尖端钝化。Lek J Y 等<sup>[15]</sup>研究评估了 Ti64 钛合金在高应变率变形过程中从原料粉末到涂层的微观组织演变, 结果显示, 涂层在颗粒/基体界面处的显微组织与原料粉末的显微组织不同, 讨论了颗粒内部区域、颗粒/基体附近和颗粒/颗粒界面处微观结构的形成机理。王会东等<sup>[16]</sup>针对大型 TC4 壁板的成形提出了预变形、化铣、扩散连接和超塑成形的新工艺思路。党鹏等<sup>[17]</sup>对不同拉伸速率和温度下的 TC4 钛合金进行了拉伸有限元模拟, 分析了温度和拉伸速率对其性能的影响。

可见, 目前的研究大多围绕着涂层的微观组织

以及高温下的涂层行为, 缺少对室温变形条件下涂层失效机理的研究, 本文利用单向拉伸试验探究了室温条件下含 NiAl 涂层的 TC4 钛合金的力学行为, 发现了弹性阶段曲线的台阶特性, 并结合微观组织观测明确了涂层的失效机理, 建立了室温单向拉伸 NiAl 涂层的失效模型, 为扩展涂层在钛合金上的应用提供了理论依据。

## 1 试验材料与方法

试验采用厚度为 2.0 mm 的 TC4 钛合金板材作为基体, 利用等离子喷涂方法在基体上制备厚度为 0.6 mm 的 NiAl 涂层, 涂层宽度为 60 mm。采用线切割方法将含涂层与无涂层板材加工成拉伸试样, 如图 1a 所示, 其中阴影部分为涂层, 拉伸至试样断裂。另取试样在涂层上开长度为 5 mm、宽度为 1 mm、厚度为 0.6 mm 的槽, 开槽位置如图 1b 中圆圈处所示, 金相取样位置如图 1b 中线框所示, 拉伸至试样屈服后卸载。拉伸试验在 MTS 电子万能材料试验机上进行。

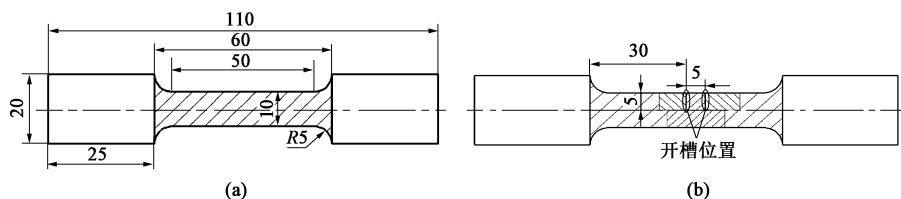


图 1 拉伸试样 (a) 和涂层开槽位置及金相取样 (b) 示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of tensile specimen (a) and coating grooving position and metallographic sampling (b)

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 工程应力-工程应变曲线弹性阶段的台阶特性

图 2a 为无涂层 TC4 钛合金板材的室温拉伸的工程应力-工程应变曲线, 屈服强度为 962 MPa, 伸长率为 10.4%。含有 NiAl 涂层的 TC4 钛合金板材的工程应力-工程应变曲线略有差别, 如图 2b 所示, 屈服强度为 837 MPa, 降低了 13.0%, 伸长率为 5.18%, 降低了 50.2%。从图 2b 中局部放大图可见, NiAl 涂层的存在使得工程应力-工程应变曲线在弹性阶段出现了周期性的台阶。图 2c 为涂层开槽后的工程应力-工程应变曲线, 在涂层上开槽后的 TC4 钛合金板材的弹性阶段不再出现周期性的台阶。

### 2.2 周期性涂层残留

图 3 为室温拉伸试样表面涂层残留照片。可见,

NiAl 涂层并没有完全脱落, 仍有一部分留在基体上, 且呈现条带状, 与拉伸方向垂直, 涂层残留带之间的距离相近, 周期性地分布在基体上, 与其他试样进行对比发现, 基体上的涂层残留带与涂层的开裂位置对应。

图 4 为试样在室温拉伸不同阶段的金相图, 左侧较为均匀且杂质少的为基体组织, 右侧杂质多且有裂纹的为涂层组织, 涂层中的长条黑色部分为涂层的裂纹, 圆形黑色部分为涂层中的孔隙。图 4a 中可以看到涂层的轻微分层, 并且涂层出现的裂纹沿着横向扩展, 形状呈现右宽左窄且阶段性地扩大, 说明在弹性阶段裂纹是在涂层中首先产生的, 并向上、向下扩展, 导致涂层开裂。同时, 涂层内部的裂纹存在横向延伸的趋势, 说明涂层的分层会对裂纹的扩展造成影响。图 4b 中线框处为涂层残留, 通过观察裂纹发现, 由于涂层存在分层现象, 裂纹扩

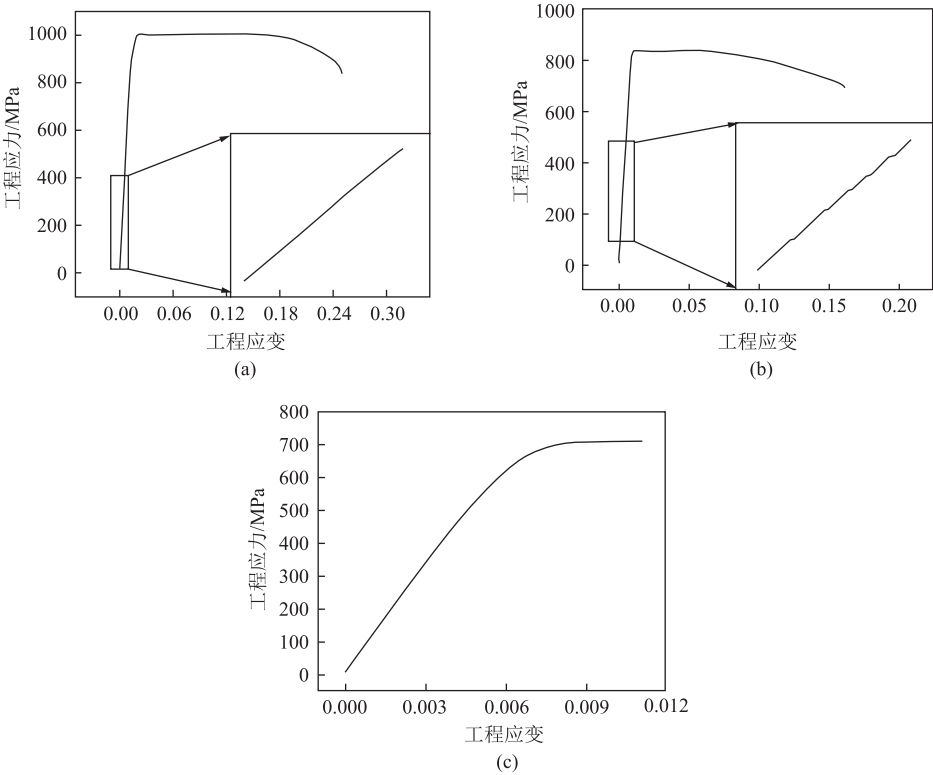


图 2 室温拉伸的工程应力-工程应变曲线

(a) 无涂层 (b) 含 NiAl 涂层 (c) 涂层开槽后

Fig. 2 Engineering stress-engineering strain curves of tensile at room temperature  
(a) Without coating (b) With NiAl coating (c) After coating grooving

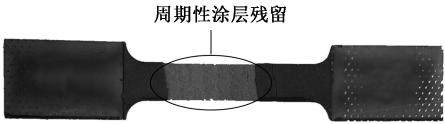
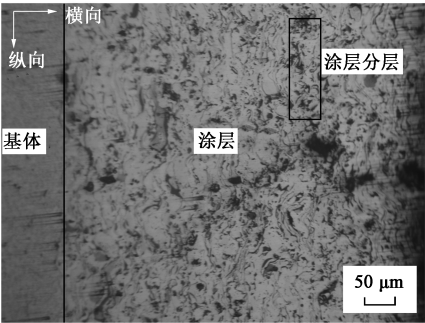


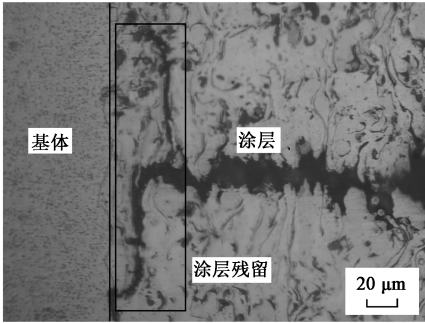
图 3 室温拉伸试样表面的涂层残留

Fig. 3 Residual coating on surface of tensile specimen at room temperature

展到基体时方向突然由横向变为沿着涂层分层方向的纵向扩展，将靠近基体部分的涂层与其他部分分隔开，导致部分涂层残留在基体上。经过测量，图 4a 中的涂层残留宽度约为 0.20 mm，图 4b 中的涂层残留部分宽度约为 0.17 mm，两者宽度相近，所以，



(a)



(b)

图 4 室温拉伸试样的金相图

(a) 弹性阶段 (b) 塑性阶段

Fig. 4 Metallographs of tensile specimens at room temperature  
(a) Elastic stage (b) Plastic stage

纵向裂纹是导致涂层周期性残留的原因。其次，涂层中裂纹不是垂直的，而是与基体成一定角度，两

道相对扩展的裂纹相遇，也会导致部分涂层残留在基体上。

图 5 为涂层裂纹的金相图。通过对拉断试样的金相结果进行观察，将涂层横向裂纹按照形成原因的不同分为两类：I 类为右宽左窄裂纹（图 5a），

其形成原因为裂纹从右侧的涂层表面起裂，并向左扩展；II 类为中部宽端部窄裂纹（图 5b），其形成原因为裂纹从涂层内部的缺陷处起裂并扩展。

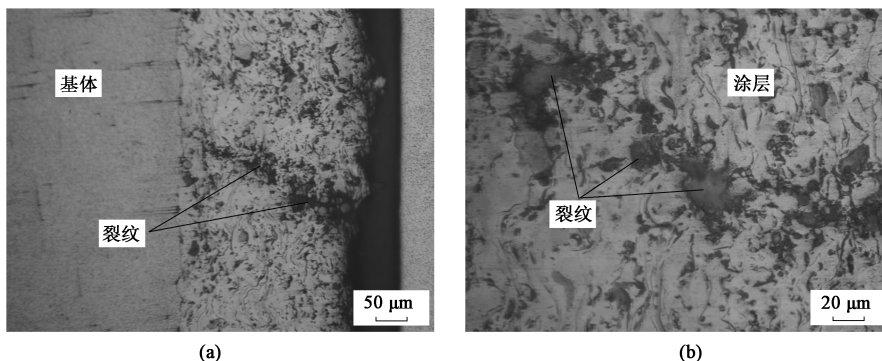


图 5 涂层裂纹的金相图

(a) I 类 (b) II 类

Fig. 5 Metallographs of coating cracks

(a) Class I (b) Class II

### 2.3 涂层失效机理

图 6 为含 NiAl 涂层的 TC4 板材的结构示意图。涂层与基体的结合为机械结合，涂层中存在孔隙和夹杂物，其中黑色为夹杂物，小圆圈代表孔隙，流线表示涂层分层现象。

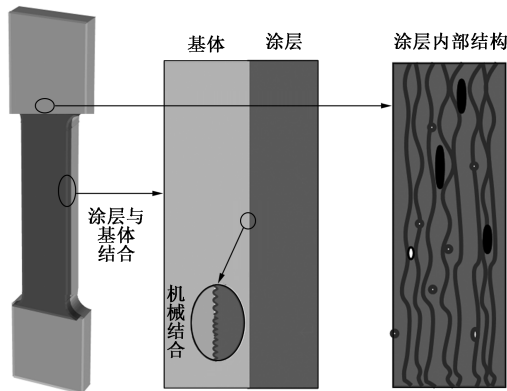


图 6 含 NiAl 涂层的 TC4 钛合金板材的结构示意图

Fig. 6 Structure schematic diagram of TC4 titanium alloy sheet with NiAl coating

图 7 为拉伸试验弹性阶段的涂层裂纹的金相图，可见裂纹的中部宽，并有向涂层表面和基体方向扩展的趋势。图 8 为在工程应力-工程应变曲线中弹性阶段呈现的周期性台阶的形成机理示意图。其中黑色夹杂物相连的小圆圈代表裂纹首先产生的位置。如图 8a 所示，随着拉伸的进行，裂纹会首先在涂层内部孔隙尺寸最大处产生；图 8b 中裂纹同时向涂层表面和基体两个方向扩展，导致试样受力的有效截面积下降；如图 8c 所示，当形成贯穿裂纹时，此时

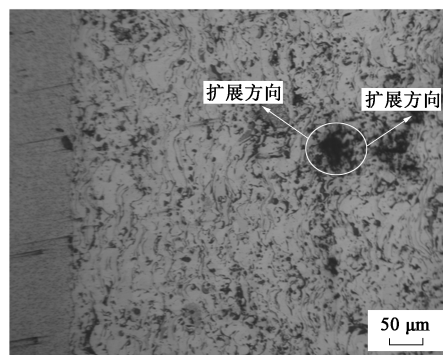


图 7 弹性阶段涂层中的裂纹金相图

Fig. 7 Metallograph of cracks in coating during elastic stage

基体上的力变大，而基体的横截面积未变，使得应力不变、应变增加，形成一级台阶。涂层开裂后变得不连续，释放了涂层中的应力。如图 8d 和图 8e 所示，再经过一定变形后，涂层内部的应力再次上升，裂纹再次出现，重复涂层开裂、释放应力的过程，直至屈服。涂层开槽后，工程应力-工程应变曲线中弹性阶段的台阶消失，这是因为：涂层开槽之后大部分应变集中在开槽位置，其他部分的变形减小，从而使得周期性台阶消失。可见，在弹性阶段产生周期性台阶是由于涂层的开裂，此处开裂是指贯穿涂层的裂纹。

图 9 为涂层微裂痕的动态产生过程示意图。其中三角形与梯形为涂层残留。如图 9a 所示，在拉伸过程中，涂层在弹性阶段产生开裂，因为弹性阶段的应变小，不足以使涂层脱粘。如图 9b 所示，在塑性阶段，涂层在此时已经碎裂，随着应变增大，涂



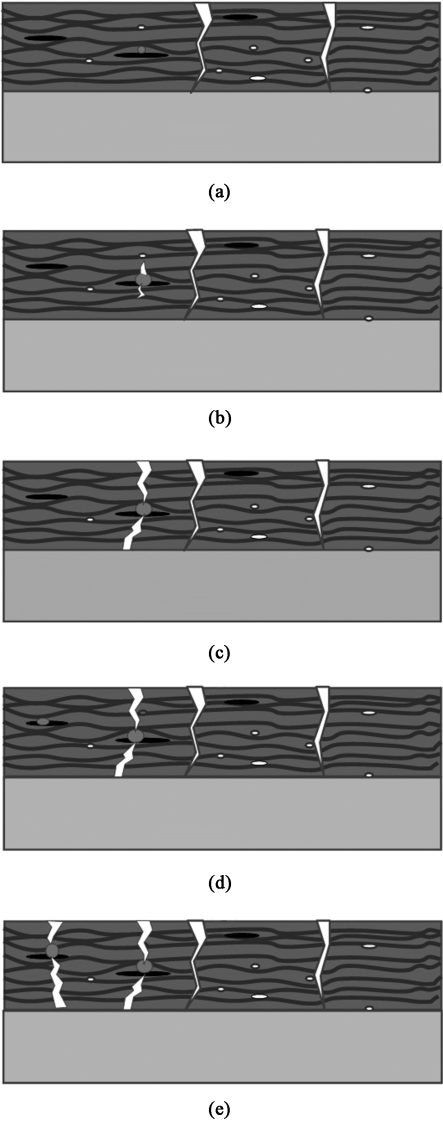


图 8 弹性阶段中周期性台阶的形成机理示意图  
(a) 萌芽 (b) 扩展 (c) 开裂 (d) 新的萌芽  
(e) 新的开裂  
Fig. 8 Schematic diagrams of formation mechanism for periodic steps during elastic stage  
(a) Germination (b) Expansion (c) Cracking  
(d) New germination (e) New cracking

层与基体的机械结合逐渐失效，导致涂层脱离基体。涂层失效的两个阶段为开裂和脱粘。开裂是在拉伸初期，随着拉伸进行涂层上的应力不断增大，超过涂层的强度后，在涂层中间以及表面产生裂纹，并扩展为厚度方向上贯穿涂层的裂纹，最终导致涂层开裂。图 10 为拉伸塑性阶段涂层与基体结合界面脱粘的金相图，可以看到，在结合界面上出现了大片的连续孔隙。图 11 为涂层脱粘示意图，脱粘是指基体与涂层的机械结合失效而导致的涂层与基体分离。涂层开裂后，裂纹将涂层划分为几部分，断开

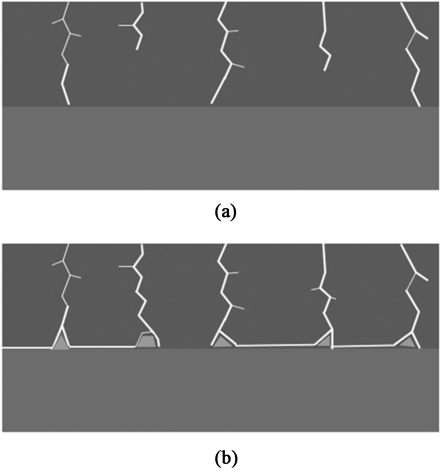


图 9 涂层微裂纹的产生过程示意图  
(a) 弹性阶段 (b) 塑性阶段  
Fig. 9 Schematic diagrams of generation process for coating microcracks  
(a) Elastic stage (b) Plastic stage

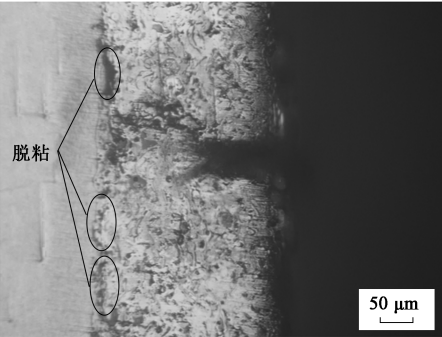


图 10 涂层与基体结合界面脱粘的金相图  
Fig. 10 Metallograph of debonding at bonding interface between coating and matrix

的涂层之间没有力的作用，之后更难以发生开裂，失效进入到脱粘阶段。涂层与基体为机械结合，由于基体与涂层的弹性模量不同，在拉伸过程中的变形量不同，随着变形量差异的增大，超过结合强度后，涂层从结合界面处与基体分离，失效脱落。

### 3 结论

(1) 含 NiAl 涂层的 TC4 钛合金的工程应力-工程应变曲线的弹性阶段呈现台阶状，主要原因是拉伸过程中涂层的周期性开裂。随着应力的提高，裂纹首先在涂层中的缺陷处起裂并沿着横向扩展，导致试样的承载面积下降；当形成贯穿裂纹时，应力不变但应变增加，形成一级台阶，并在涂层开裂位置留下 1 道涂层残留；随后在其他位置重复发生上述的横向开裂过程，最终形成具有台阶特性的曲线

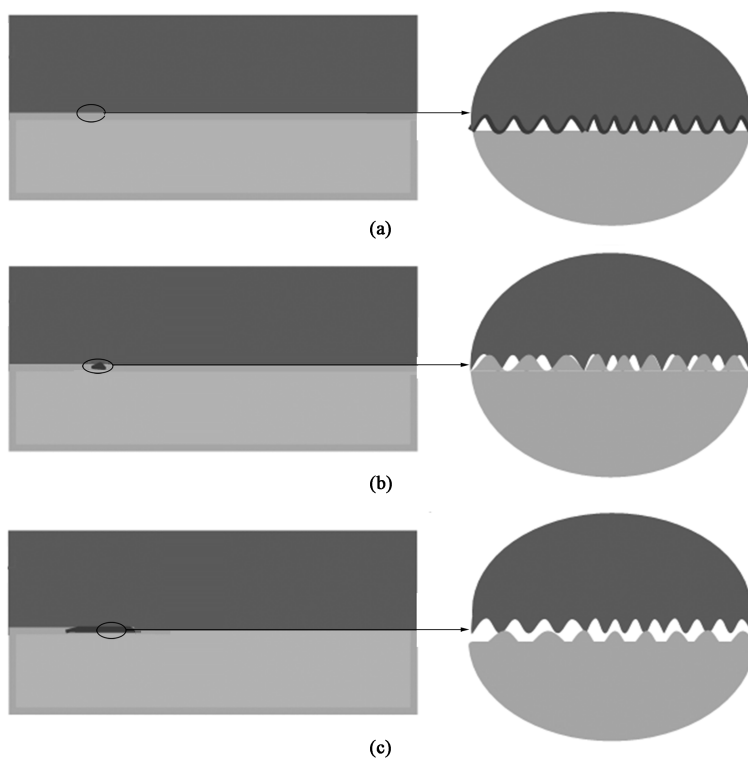


图 11 涂层脱粘示意图

(a) 脱粘前 (b) 拉伸时 (c) 脱粘后

Fig. 11 Schematic diagram of coating debonding

(a) Before delamination (b) During stretching (c) After delamination

和周期性的涂层残留。

(2) 涂层失效分为两个阶段：开裂和脱粘，开裂是在涂层的厚度方向形成贯穿涂层的裂纹，脱粘是指基体与涂层的机械结合失效导致的涂层与基体分离。涂层在单向拉伸的弹性阶段产生裂纹并开裂；脱粘发生在塑性阶段，进入到均匀变形阶段后，应变增大，变形能力的差异使得涂层与基体的机械结合在应力的作用下失效，使涂层脱粘。

#### 参考文献：

- [1] 刘道新, 汤金钢, 张晓化, 等. 离子渗 ZrN 与喷丸复合对 TC4 合金疲劳行为的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47 (7): 2137-2143.  
Liu D X, Tang J G, Zhang X H, et al. Effect of ionizing ZrN and shot peening on fatigue behavior of TC4 alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47 (7): 2137-2143.
- [2] Li R, Gu Y, Zeng F H. High temperature diffusion behavior between Ta-10W coating and CP-Ti and TC4 alloy [J]. Surface & Coatings Technology, 2021, 406: 1-10.
- [3] 姜沐池, 任德春, 蔡雨升, 等. 硼含量对激光熔覆沉积 TC4 钛合金显微组织与力学性能影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51 (10): 3777-3784.  
Jiang M C, Ren D C, Cai Y S, et al. Effect of boron content on microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy deposited by laser cladding [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51 (10): 3777-3784.
- [4] 侯红苗, 秦成, 潘浩, 等. 超低间隙 TC4-DT 钛合金厚板显微组织与力学性能研究 [J]. 钛工业进展, 2022, 39 (5): 1-5.  
Hou H M, Qin C, Pan H, et al. Study on microstructure and mechanical properties of ultra-low clearance TC4-DT titanium alloy thick plate [J]. Titanium Industry Progress, 2022, 39 (5): 1-5.
- [5] 孙中豪, 邢淑清, 程桥, 等. 脉冲磁场对 TC4 钛合金析出行为及力学性能的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51 (9): 3335-3344.  
Sun Z H, Xing S Q, Cheng Q, et al. Effect of pulsed magnetic field on precipitation behavior and Mechanical properties of TC4 titanium alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51 (9): 3335-3344.
- [6] 董宇, 刘梅君, 徐彤, 等. 航空发动机压气机防钛火可磨耗密封涂层的研究进展 [J]. 材料保护, 2021, 54 (11): 129-138.  
Dong Y, Liu M J, Xu T, et al. Research progress of anti-titanium fire wear sealing coating for aero-engine compressor [J]. Materials Protection, 2021, 54 (11): 129-138.
- [7] 王楠楠, 任柯旭, 邱然锋. 钛及钛合金表面自纳米化技术研究现状 [J]. 热加工工艺, 2023, 52 (14): 19-23.  
Wang N N, Ren K X, Qiu R F. Research status of surface self-nano technology of titanium and titanium alloys [J]. Hot Working Technology, 2023, 52 (14): 19-23.
- [8] Yan H J, Tai Z F, Wu L K. Improved high-temperature oxidation resistance of TC4 alloy by electrodeposited SiO<sub>2</sub> coating [J]. Corrosion Communications, 2021, 3: 34-44.
- [9] 周璇, 肖华强, 赵欣鑫, 等. TC4 合金表面激光熔覆 TiAl 涂层

- 的高温循环氧化行为 [J]. 中国有色金属学报, 2023, 33 (2): 400-412.
- Zhou X, Xiao H Q, Zhao X X, et al. High-temperature cyclic oxidation behavior of TiAl coating on TC4 alloy surface by laser cladding [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33 (2): 400-412.
- [10] 李玉海, 左柏强, 蔡雨升, 等. 低高温双重热处理对激光选区熔化 TC4 钛合金断裂韧性影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51 (5): 1864-1872.
- Li Y H, Zuo B Q, Cai Y S, et al. Effect of low and high temperature dual heat treatment on fracture toughness of TC4 titanium alloy by laser selective melting [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51 (5): 1864-1872.
- [11] 何博. 钛合金表面热障涂层的制备与研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- He B. Preparation and Study of Thermal Barrier Coating on Titanium Alloy Surface [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [12] 冀晓鹏, 彭浩然, 侯伟骞. 氧化铝钛涂层的制备对 TC17 钛合金性能的影响研究 [J]. 热喷涂技术, 2017, 9 (3): 46-50.
- Ji X J, Peng H R, Hou W A. Effect of preparation of alumina titanium coating on properties of TC17 titanium alloy [J]. Thermal Spraying Technology, 2017, 9 (3): 46-50.
- [13] 王贺权, 张博, 袁福河. 钛合金表面等离子喷涂 NiCrAl 涂层残余应力检测及模拟研究 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (22): 147-151.
- Wang H Q, Zhang B, Yuan F H. Detection and simulation of residual stress of NiCrAl coating by plasma spraying on titanium alloy surface [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (22): 147-151.
- [14] Niu Z Q, Zhou W L, Wang C L, et al. Fretting wear mechanism of plasma-sprayed CuNiIn coating on Ti-6Al-4V substrate under plane/plane contact [J]. Surface & Coatings Technology, 2021, 408: 1-11.
- [15] Lek J Y, Bhowmika A, Tan A W. Understanding the microstructural evolution of cold sprayed Ti-6Al-4V coatings on Ti-6Al-4V substrates [J]. Applied Surface Science, 2018, 459: 492-50.
- [16] 王会东, 付和国, 韩颖杰, 等. 大型双曲率非等厚 TC4 钛合金壁板整体 SPF/DB 成形工艺及优化 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (1): 75-80.
- Wang H D, Fu H G, Han Y J, et al. Integral SPF/DB forming process and its optimization for TC4 titanium alloy panel with large size, dual curvature and non-uniform thickness [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (1): 75-80.
- [17] 党鹏, 顾锐, 王永军, 等. TC4 钛合金电热拉伸变形行为为有限元模拟 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (1): 185-195.
- Dang P, Gu R, Wang Y J, et al. Finite element simulation on deformation behavior in electro-thermal tensile for TC4 titanium alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (1): 185-195.
- +++++
- (上接第 37 页)
- [4] 丛兵兵, 孔明, 张弘斌, 等. 马车螺栓冷镦成形有限元模拟及模具设计 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (2): 76-81.
- Cong B B, Kong M, Zhang H B, et al. Finite element simulation and die design of cold heading forming for carriage bolt [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (2): 76-81.
- [5] 郑鹏辉, 关悦, 许吉星, 等. A286 高温合金十二角法兰面螺栓多工位冷镦成形工艺 [J]. 制造技术与机床, 2022 (7): 45-50.
- Zheng P H, Guan Y, Xu J X, et al. Multi station cold heading process of A286 superalloy twelve point flange bolt [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2022 (7): 45-50.
- [6] 罗鹰, 冒兴峰. 基于 COLDFORM 的汽车万向节接头多级冷镦成形数值仿真 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (15): 123-126.
- Luo Y, Mao X F. Numerical simulation of multi-stage cold forging forming of automobile universal joint based on COLDFORM [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (15): 123-126.
- [7] 丛兵兵, 杜以常, 张弘斌, 等. 马车螺栓冷镦成形微观组织有限元模拟 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (3): 175-182.
- Cong B B, Du Y C, Zhang H B, et al. Finite element simulation of microstructure in upsetting of carriage bolt [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (3): 175-182.
- [8] 于玲, 刘清文. 基于有限元的法兰轴结构件塑性成形工艺分析 [J]. 精密成形工程, 2023, 15 (2): 218-223.
- Yu L, Liu Q W. Plastic forming process of flange shaft structure based on finite element [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2023, 15 (2): 218-223.
- [9] 刘帮平, 谌曲平, 严国荣, 等. 航空螺栓冷镦的 Deform 3D 模拟与生产实践 [J]. 精密成形工程, 2012, 4 (3): 22-26, 46.
- Liu B P, Chen Q P, Yan G R, et al. Simulation using Deform 3D and production practice on cold heading process of aviation bolts [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2012, 4 (3): 22-26, 46.
- [10] 张东民, 盛育东, 张金玉, 等. 六角开槽螺母的冷镦工艺优化及数值模拟 [J]. 机械设计与制造, 2018, 325 (3): 191-194.
- Zhang D M, Sheng Y D, Zhang J Y, et al. Numerical simulation and optimization for cold heading of hexagonal slot nut [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018, 325 (3): 191-194.
- [11] 赵庆雨, 杨嵩. 基于数值分析的汽车六角锁紧螺母冷镦工艺改进 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (10): 29-35.
- Zhao Q Y, Yang S. Improvement on cold heading process for automobile hexagon lock nut based on numerical analysis [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (10): 29-35.
- [12] 梁强. 活塞销冷镦挤成形微折叠缺陷分析及改进措施 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25 (6): 99-104.
- Liang Q. Micro-folding defect analysis and improvement of cold upsetting-extruding process for piston-pin [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25 (6): 99-104.
- [13] 柏世兵. 基于计算机数值分析的一种汽车非标件自动化冷镦工艺 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (9): 30-38.
- Bai S B. An automatic cold upsetting process for automobile non-standard parts based on computer numerical analysis [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (9): 30-38.