

# 再制造件涂覆层内部裂纹扩展行为研究

温飞娟<sup>1,2</sup>, 董丽虹<sup>2</sup>, 王海斗<sup>2</sup>, 吕振林<sup>1</sup>

(1.西安理工大学, 西安 710048; 2.装甲兵工程学院, 北京 100072)

**摘要:** **目的** 研究再制造件涂层内部不同形状、尺寸的裂纹扩展行为。**方法** 利用扩展有限元和内聚力单元结合的方法, 通过设定断裂能  $G$  值作为控制裂纹扩展的参数, 对三点弯曲试验以及拉伸试验下涂覆层内部的裂纹进行模拟, 并通过实验进行验证。**结果** 随着载荷的增加, 涂层中的垂直裂纹和  $45^\circ$  倾斜裂纹均沿着涂层厚度方向扩展, 到达界面时裂纹发生偏转, 沿着界面继续扩展而并没有越过涂层-基体界面向基体扩展。模拟得到三点弯曲试验下初始长度为 0.2 mm 的垂直裂纹和  $45^\circ$  倾斜裂纹开裂的临界载荷分别为 3.47 kN 和 4.49 kN, 裂纹长度增加至 0.3 mm 时, 临界载荷降低为 3.29 kN 和 4.31 kN。裂纹越靠近试件中心, 临界载荷越小, 越易发生裂纹扩展现象。另一方面, 在拉伸试验下, 0.2 mm 的垂直裂纹的临界开裂载荷 (3.47 kN) 小于投影长度相同的倾斜裂纹的临界载荷 (5.21 kN), 而与拉应力平行的裂纹并未扩展。实验得到 0.2 mm 的垂直裂纹在弯曲试验下的平均临界载荷为 3.49 kN, 而倾斜裂纹为 4.46 kN。**结论** 三点弯曲试验下, 垂直裂纹比倾斜裂纹更危险, 初始长度越长、越靠近试件中心的裂纹越易发生裂纹扩展现象。在拉伸试验下, 与拉应力平行的裂纹并未扩展, 最安全。模拟结果与实验相近, 验证了模拟的正确性。

**关键词:** 再制造; 涂层; 裂纹扩展; 有限元

**中图分类号:** TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)03-0179-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.09.028

## Crack Propagation Behavior in the Remanufactured Coating

WEN Fei-juan<sup>1,2</sup>, DONG Li-hong<sup>2</sup>, WANG Hai-dou<sup>2</sup>, LYU Zhen-lin<sup>1</sup>

(1.Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2.Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study crack propagation behavior in different shape and size in the remanufactured coating. Cracks in the coating layers subject to three-point bending test and tensile test were simulated and validated by experiment by setting fracture energy  $G$  value as parameter for controlling cracks by combining extended finite element method and cohesive element method. As the load increased, vertical crack and  $45^\circ$  inclined crack in the coating extended along coating thickness. The cracks deflected at the interface and further extended along the interface without extending toward the substrate over the coating-substrate. Simulation showed that critical load at which vertical crack and  $45^\circ$  inclined crack with initial crack length of 0.2 mm under the three-point bending test were acquired were 3.47 kN and 4.49 kN, respectively. When the crack length increased to 0.3 mm, the critical load was reduced to 3.29 kN and 4.31 kN. The closer the crack was to the center line of the test

收稿日期: 2017-07-07; 修订日期: 2017-08-21

Received: 2017-07-07; Revised: 2017-08-21

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (51535011); 国家自然科学基金面上项目 (51675532)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Fund Key Projects (51535011), the National Natural Science Foundation Key Projects (51675532)

作者简介: 温飞娟 (1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为再制造件裂纹扩展。

**Biography:** WEN Fei-juan (1993—), Female, Master, Research focus: crack propagation of remanufactured.

通讯作者: 王海斗 (1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为再制造表面工程。

**Corresponding author:** WANG Hai-dou (1969—), Male, Professor, Doctoral supervisor, Research focus: remanufacturing engineering.

piece, the lower the critical load was, the more prone to crack propagation would be. On the other hand, under the tensile test, critical crack load of the 0.2 mm vertical crack (3.47 kN) was less than that of the same inclination crack of the same projection length (5.21 kN), and the crack parallel to tensile stress did not expand. The experiment showed that average critical load of 0.2 mm vertical crack under bending test was 3.49 kN, and for inclined crack, 4.46 kN. Under the three-point bending test, vertical crack is more dangerous than inclined crack. Cracks of longer initial length closer to testpiece center are more likely to be subject to crack propagation. The crack parallel to the tensile stress does not expand under tensile experiment, which is the safest. The simulation results are close to the experiment results, and simulation correctness is verified.

**KEY WORDS:** remanufacture; coating; crack propagation; finite element

再制造是废旧产品高技术修复、改造的产业化<sup>[1]</sup>。随着现代制造业对节约资源、保护环境要求的不断提高,再制造技术正在成为绿色制造业未来发展的新方向。再制造过程中,为了提高零件的表面性能和进行尺寸修复,热喷涂技术得到了广泛应用。但是热喷涂过程中,涂层易形成微观裂纹、气孔及夹杂物等缺陷,并且制备过程骤冷骤热的特点使得涂层产生不均匀弹塑性变形引发内部应力,在内应力、微缺陷等综合作用下易产生裂纹<sup>[2-3]</sup>。

现有实验利用高倍电子显微镜、高速摄影等对裂纹形貌进行观测,但是由于再制造产品的特殊性,对涂层内部裂纹进行观察存在一定难度,因此利用数值模拟方法计算裂纹扩展被广泛地应用在涂层裂纹方面<sup>[4-6]</sup>。虽然有限元法被广泛地运用于研究涂层,但大都采用单一预制裂纹方式,并且没有考虑预制裂纹的形状对裂纹扩展以及涂层失效的影响<sup>[7-8]</sup>。聂璞林等<sup>[9-11]</sup>的研究表明,裂纹总是寻求消耗能量最少的方式进行扩展,界面处切应力为主应力时,裂纹沿着界面扩展,当整体结合强度很高时,裂纹穿过界面向基体内部扩展。初始裂纹的形状不同,导致裂纹扩展的方向不同,所消耗的能量也不同,因此在预制裂纹时,必须考虑不同的裂纹形状所带来的临界开裂载荷的变化。在热喷涂涂层的应用中,涂层不仅会受到压缩应力和拉伸应力的作用,还受到界面剪切应力的作用,因此本文通过三点弯曲试验,详细分析并观察涂层在弯曲载荷下的断裂行为。同时,由于材料参数不匹配产生的拉伸应力经常导致涂层拉伸断裂,这也是涂层较常见的破坏方式<sup>[12-14]</sup>。对此,使用大型有限元分析软件 ABAQUS,利用扩展有限元和内聚力单元结合的方法,对三点弯曲试验以及拉伸试验进行数值模拟研究,并且考虑裂纹长度、距试件中心位置以及裂纹方向等对涂层内部裂纹扩展的影响。

## 1 有限元模型建立

### 1.1 扩展有限元

与传统有限元法相比,扩展有限元在断裂问题的

分析中,将裂纹尖端应力的奇异性现象考虑在内。传统有限元只在有限元建模过程中对裂纹尖端位置进行网格细分,确定试样边界条件后即进行有限元计算求解。通过数值分析计算得到每个单元的位移场、应变场和应力场,再利用位移场渐近的关系,由裂纹尖端附近一个节点的位移来推导出裂尖的位移。因而利用传统有限元法分析断裂问题,为了得到比较合理、准确的计算结果,必须对模型进行精细的网格划分,这样无疑大大增加了计算时间。扩展有限元允许裂纹在单元内部扩展和穿过单元,因而可以在规则网格上计算复杂形状的裂纹,同时缩短了计算时间<sup>[15]</sup>。

### 1.2 三点弯曲试验下涂层裂纹的数值模型

涂层中不同的裂纹形状,导致裂纹扩展所需的能量不同,因此本节分别在试样上预制垂直裂纹和 45° 倾斜裂纹,并以临界能量释放率来表征其扩展的大小。其中,试样基体尺寸为 180 mm×10 mm×10 mm,涂层厚度为 1.5 mm。在该有限元模型中,以解析刚体代替加载压头与支撑压头,并假定其与试样表面接触过程中不发生变形,同时表 1 给出了涂层和基体的材料力学参数。有限元建模中,使用 Cohesive 单元将涂层与基体连接起来,并设置 Cohesive 单元的网格类型为 COH2D4<sup>[16-18]</sup>,将涂层和基体区域的网格类型设置为 CPE4I,并设置涂层和基体间 Cohesive 单元的临界断裂能量为  $G_{NC}=G_{SC}=193.5 \text{ J/m}^2$ ,其中  $G_{NC}$  和  $G_{SC}$  分别代表法向和切向的临界断裂能量。

为了研究不同长度的裂纹  $a_0$  在涂层内部的扩展行为,分别设置垂直裂纹的初始长度为 0.2、0.3、

表 1 材料力学参数  
Tab.1 Material mechanical parameter

参数	基体(45 号钢)	涂层(3Cr13)
抗拉强度 $\sigma_b/\text{MPa}$	600	930
屈服强度 $\sigma_s/\text{MPa}$	355	685
弹性模量/GPa	210	230
泊松比	0.3	0.3
断裂韧度 $K_{IC}/(\text{kg}\cdot\text{mm}^{3/2})$	203	360

0.4、0.5、0.6 mm，45°倾斜裂纹的初始长度为  $0.2\sqrt{2}$ 、 $0.3\sqrt{2}$ 、 $0.4\sqrt{2}$ 、 $0.5\sqrt{2}$ 、 $0.6\sqrt{2}$  mm。同时为了观察初始裂纹位置对裂纹扩展的影响，在涂层内部距中心线 10、20 mm 处分别设置一条初始裂纹。

1.3 拉伸试验下涂层裂纹的数值模型

对于拉伸试验下涂层裂纹的模拟，采用基体厚 5 mm、涂层厚 1 mm、长 80 mm、宽 20 mm 的试样。基体与涂层的属性如表 1 所示。为了研究初始裂纹形貌对拉应力作用下涂覆层裂纹扩展行为的影响，在涂覆层内部设置了如图 1 所示的初始预制裂纹。其中图 1a 和图 1c 所示的初始预制裂纹为垂直裂纹，裂纹沿涂层厚度方向的长度为 0.2 mm；图 1b 所示的初始预制裂纹为 45°倾斜裂纹，其沿厚度方向的长度为  $0.2\sqrt{2}$  mm。

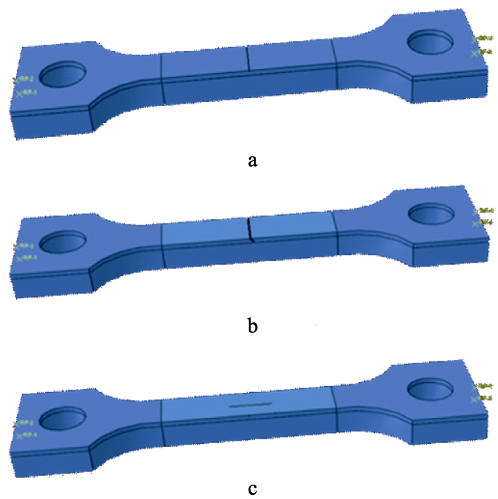


图 1 涂覆层内部初始预制裂纹示意图  
Fig.1 The internal crack in the coating

2 结果与分析

2.1 三点弯曲试验下涂层内部裂纹扩展行为

2.1.1 初始裂纹形状以及长度的影响

图 2 分别是通过有限元模拟得到的垂直裂纹以及 45°倾斜裂纹开裂的轮廓图。由图 2 可知，随着载荷的增加，涂层中的预制裂纹开始均沿着涂层厚度方向扩展，当裂纹最终穿透涂层到达涂层-基体界面时，裂纹发生偏转，开始沿着涂层-基体界面继续扩展而并没有越过涂层-基体界面向基体扩展。其中含有 45°倾斜预制裂纹的试样并没有沿着 45°倾斜角扩展，而是沿着涂层厚度方向起裂并扩展，最终达到涂层-基体界面。通过有限元分析得到三点弯曲试验下裂纹初始长度  $a_0$  不同时，各试样涂覆层内部裂纹开始扩展时所施加的临界载荷如表 2 所示。

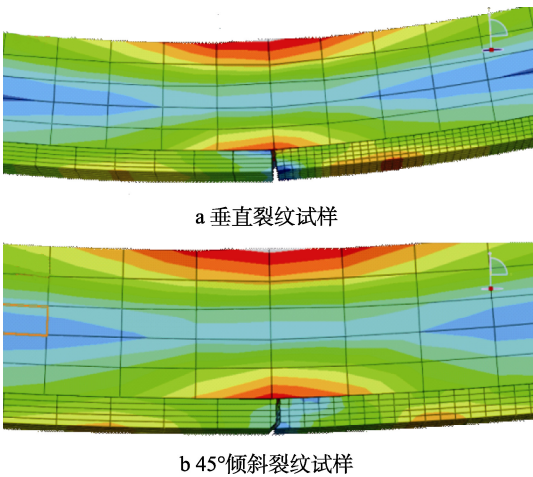


图 2 三点弯曲试验下裂纹扩展的轮廓图  
Fig.2 The outline of the crack extension under the three-point bending test: (a) the specimen with vertical crack, (b) the specimen with 45° inclined crack

表 2 裂纹初始长度与临界开裂载荷的关系  
Tab.2 The relationship between the initial length of the crack and the critical cracking load

裂纹初始长度 $a_0$ 在涂层厚度方向的投影长度/mm	临界开裂载荷/kN	
	垂直裂纹	45°倾斜裂纹
0.2	3.47	4.49
0.3	3.29	4.31
0.4	3.14	3.98
0.5	2.86	3.41
0.6	2.23	2.75

由表 2 可知，在涂层厚度方向投影长度相同的裂纹，其垂直裂纹开始扩展所需的临界载荷小于 45°倾斜裂纹扩展的临界载荷，因此说明在三点弯曲试验下，垂直裂纹比投影长度相同的倾斜裂纹更危险。进一步分析初始裂纹长度对裂纹扩展的影响，发现随着裂纹长度的增加，垂直裂纹以及 45°倾斜裂纹的临界载荷均下降，裂纹扩展越容易。

2.1.2 初始裂纹位置的影响

由有限元模拟结果可知，位于试样中心和偏置一定距离的裂纹均沿涂层厚度方向进行扩展，最终穿透涂层到达涂层-基体界面，裂纹发生偏转，又开始沿着涂层-基体界面继续扩展而并没有越过涂层-基体界面向基体扩展。将有限元模拟得到的偏置裂纹开裂时所对应的临界载荷与表 2 中的中心垂直裂纹临界开裂载荷相对比，绘制成图 3 所示的曲线。

分析图 3 可知，当裂纹初始长度  $a_0$  在涂层厚度方向的投影长度相同时，距离中心线 20 mm 处含有初始预制裂纹的试样，其裂纹开始扩展时所需的临界载荷最大。当裂纹距离中心线 10 mm 时，三点弯曲试验下裂纹开始扩展时所需的临界载荷减小。而当初始预制裂纹位于试样的中心线时，裂纹开始扩展时所

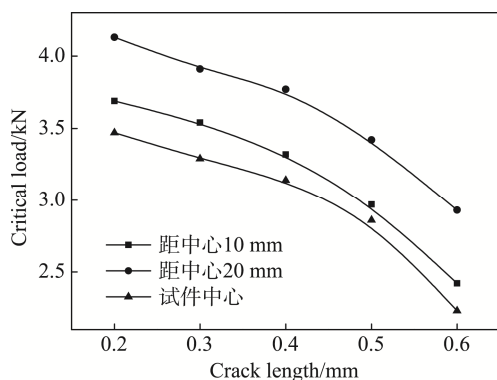


图3 偏置裂纹长度-临界开裂载荷曲线

Fig.3 The crack length of the deviation center and the critical cracking load curve

需的临界载荷达到最小。因此在三点弯曲试验下,越靠近试样中心线,涂覆层内部裂纹越危险,越容易发生裂纹扩展行为。

## 2.2 拉伸试验下涂层内部裂纹扩展行为

图4为拉伸试验下涂覆层内部裂纹的扩展形貌,从中可以观察到,在拉应力作用下,图1c所示的与拉应力方向平行的初始预制裂纹没有扩展。图1a所示的垂直裂纹在拉应力作用下沿着涂层厚度方向扩展,最终穿透涂层到达涂层-基体界面时,裂纹发生偏转,开始沿着涂层-基体界面继续扩展。图1b所示的45°倾斜裂纹并不是沿着45°倾斜角起裂,而同样是沿着涂层厚度方向起裂并扩展,最终穿透涂层到达涂层-基体界面,在界面处裂纹发生偏转,开始沿着界面扩展。通过有限元分析,得到拉应力作用下,各试样涂覆层内部裂纹开始扩展时所施加的临界载荷如表3所示。

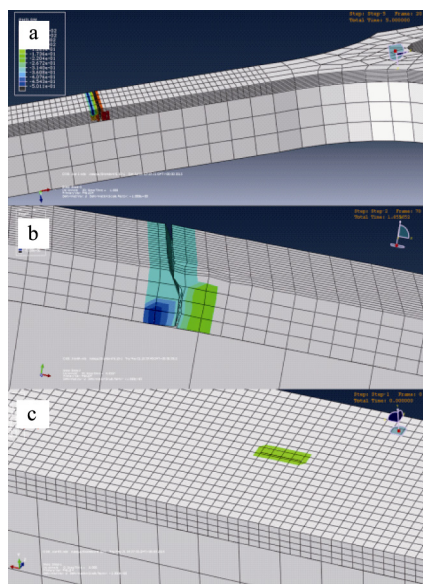


图4 拉伸试验下涂覆层内部裂纹的扩展形貌

Fig.4 Extending the cracks in the coating under tensile test

表3 拉应力下涂覆层内部裂纹扩展的临界载荷  
Tab.3 The critical load of the internal crack propagation under tensile stress

试样	临界开裂载荷/kN
图 1a	3.47
图 1b	5.21
图 1c	未扩展

根据表3可知,在拉应力作用下,当初始裂纹长度在涂层厚度方向上的投影长度相同时,垂直裂纹的临界开裂载荷小于倾斜裂纹的临界开裂载荷,即此时垂直初始裂纹比倾斜初始裂纹更危险。而图1c所示的与拉应力方向平行的初始预制裂纹,在拉应力下未扩展,即此时该类裂纹较安全。

## 3 实验验证

对三点弯曲试验下垂直裂纹和倾斜裂纹的扩展行为进行了实验研究,以此来验证模拟的正确性。首先对基体进行喷砂处理,材料为24目棕刚玉砂,喷砂压力为0.55 MPa,喷砂距离为200 mm。其次采用STR-400型电弧设备,按照表4所示的工艺参数进行热喷涂。使用万能试验机进行三点弯曲实验,利用试验机记录加载压头上所施加的载荷以及位移数据,绘制载荷-位移曲线。其中裂纹扩展形貌如图5所示。

表4 电弧喷涂工艺参数  
Tab.4 Technical parameters of arc spraying

压缩空气 压力/MPa	喷涂电压/V	工作电流/A	喷涂距离/mm
>0.5	30~32	180~200	180~250



a 垂直裂纹试样



b 45°倾斜裂纹试样

图5 三点弯曲试验裂纹扩展形貌

Fig.5 The appearance of the crack extension under the three-point bending test: (a) the specimen with vertical crack, (b) the specimen with 45° inclined crack



根据加载压头上施加的载荷以及压头的位移数据,得到两种形状的裂纹在三点弯曲实验中的施力点位移-载荷曲线,如图 6 所示,其中曲线拐点处的载荷大小即为裂纹开始扩展的临界载荷,最终得到弯曲试验中两种裂纹形式的试样发生裂纹扩展时的临界载荷如表 5 所示。45°倾斜裂纹试样用 A 表示,垂直裂纹用 B 表示。

对于垂直裂纹试样,其平均临界开裂载荷为 3.49 kN,而 45°倾斜裂纹试样的平均临界载荷为 4.46 kN。与模拟结果进行对比可知,当涂覆层内部初始裂纹在竖直方向投影长度相同时,垂直裂纹试样发生裂纹扩展时的临界载荷小于 45°倾斜裂纹。此结果与模拟结果相近,表明了模拟的有效性。

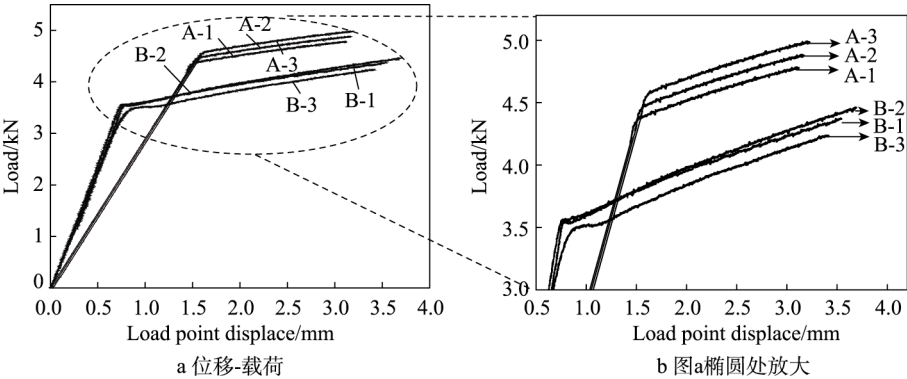


图 6 弯曲试验中的施力点位移-载荷曲线  
Fig.6 The displacement and load curve of the force point in the three-point bending experiment

表 5 三点弯曲试验中两种试样发生裂纹扩展时的临界载荷  
Tab.5 The critical load during the crack propagation of two samples in the three-point bending experiment

试样	Specimen No.	Crack length/mm	Critical load/kN
垂直裂纹	B-1	0.2	3.41
	B-2	0.2	3.52
	B-3	0.2	3.54
45°倾斜裂纹	A-1	$0.2\sqrt{2}$	4.53
	A-2	$0.2\sqrt{2}$	4.46
	A-3	$0.2\sqrt{2}$	4.38

4 结论

- 1) 通过数值模拟与三点弯曲试验相结合的分析方法,分析了初始裂纹长度、倾斜角度及初始裂纹位置对裂纹扩展行为的影响。在三点弯曲试验下,垂直裂纹的临界开裂载荷比投影长度相同的倾斜裂纹的小,且更易扩展,初始长度越长、越靠近试件中心的裂纹,越易发生裂纹扩展现象,且越危险。
- 2) 通过对拉伸试验进行有限元模拟,当初始裂纹长度在涂层厚度方向上的投影长度相同时,垂直裂纹的临界开裂载荷小于倾斜裂纹的临界开裂载荷;与拉应力方向平行的初始预制裂纹,在拉应力下裂纹未扩展,此类裂纹较安全。
- 3) 对三点弯曲试验下垂直裂纹和倾斜裂纹的扩展行为进行实验研究,与模拟结果具有较好的一致性,模型合理。

参考文献:

[1] 徐滨士. 装备再制造工程的理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.  
XU Bin-shi. The Theory and Technology of Remanufacturing Engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.

[2] 张显程. 面向再制造的等离子喷涂层结构完整性及寿命预测基础研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.  
ZHANG Xian-cheng. Basic Researches on the Structural Integrity and Life Prediction of Plasma-sprayed Coating Based Systems Aiming for Remanufacturing[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.

[3] 王卫泽, 李长久. 热喷涂涂层的结构及其表征[J]. 材料保护, 2006, 39(11): 43-47.  
WANG Wei-ze, LI Chang-jiu. Structure and Characterization of Thermal Spray Coating[J]. Materials Protection, 2006, 39(11): 43-47.

[4] OKAJIMA Y, SAKAGUCHI M, INOUE H. A Finite Element Assessment of Influential Factors in Evaluating Interfacial Fracture Toughness of Thermal Barrier Coating[J]. Surface & Coatings Technology, 2017, 313: 184-190.

[5] NAYEBPASHAEI N, SEYEDEIN S H, ABOUTALEBI M R, et al. Finite Element Simulation of Residual Stress and Failure Mechanism in Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings Using Actual Microstructure as the Representative Volume[J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 291: 103-114.

[6] RENZELI M, MUGHAL M Z, SEBASTIANI M, et al. Design, Fabrication and Characterization of Multilayer Cr-CrN Thin Coatings with Tailored Residual Stress Pro-

- files[J]. Materials & Design, 2016, 112: 162-171.
- [7] BAKER M. Finite Element Simulation of Interface Cracks in Thermal Barrier Coatings[J]. Computational Materials Science, 2012, 64(3): 79-83.
- [8] ZHANG W X, FAN X L, WANG T J. The Surface Cracking Behavior in Air Plasma Sprayed Thermal Barrier Coating System Incorporating Interface Roughness Effect[J]. Applied Surface Science, 2011, 258(2): 811-817.
- [9] 聂璞林. 界面断裂韧性与膜基结合性能关系的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- NIE Pu-lin. Fractural Study of Interfacial Adhesion Measurement with Interfacial Toughness for Coating/Substrate System[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [10] FAN X L, XU R, ZHANG W X, et al. Effect of Periodic Surface Cracks on the Interfacial Fracture of Thermal Barrier Coating System[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(24): 9816-9823.
- [11] LV J N, FAN X L, LI Q. The Impact of the Growth of Thermally Grown Oxide Layer on the Propagation of Surface Cracks within Thermal Barrier Coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 309: 1033-1044.
- [12] WANG L, FAN Q, LIU Y, et al. Simulation of Damage and Failure Processes of Thermal Barrier Coatings Subjected to a Uniaxial Tensile Load[J]. Materials & Design, 2015, 86: 89-97.
- [13] WANG L, FAN Q, LI G, et al. Experimental Observation and Numerical Simulation of SiC 3D/Al Interpenetrating Phase Composite Material Subjected to a Three-point Bending Load[J]. Computational Materials Science, 2014, 95: 408-413.
- [14] VAUNOIS J R, POULAIN M, KANOUTE P, et al. Development of Bending Tests for Near Shear Mode Interfacial Toughness Measurement of EB-PVD Thermal Barrier Coatings[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 171: 110-134.
- [15] 底月兰, 王海斗, 董丽虹, 等. 扩展有限元法在裂纹扩展问题中的应用[J]. 材料导报, 2017, 31(2): 70-74.
- DI Yue-lan, WANG Hai-dou, DONG Li-hong, et al. Application of the Extended Finite Element Method in Crack Propagation[J]. Materials Review, 2017, 31(2): 70-74.
- [16] TED D. On Using a Penalty-based Cohesive-zone Finite Element Approach, Part I: Elastic Solution Benchmarks [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007, 28(4): 237-255.
- [17] SORENSEN B F, TORBAN K, JACOBSEN. Characterizing Delamination of Fibre Composites by Mixed Mode Cohesive Laws[J]. Composites Science and Technology, 2008, 69 (3): 445-456.
- [18] ZHAO H F, CHEN M, JIN Y. Determination of Interfacial Properties between Metal Film and Ceramic Substrate with an Adhesive Layer[J]. Materials and Design, 2008, 30(1): 154-159.