

摘要

目前，在航天、航空等许多工业领域，各种热涂层技术已经广泛用于提高机械构件的性能，延长其使用寿命。而涂层与母材基体的完整性是构件安全的关键，涂层的结合强度成为评价涂层适用性的重要标准之一。本文从探讨涂层/基体系统界面结构完整性评定的方法出发，对传统断裂参量 J 积分在界面断裂问题中应用，以及基于局部法评定 FeCrAl /Q345 涂层系统的界面断裂行为等问题进行了研究。

本文介绍了脆性材料断裂的统计学原理，而后阐述介绍了局部法分析界面脆性断裂裂纹扩展问题的理论。

分别采用三点弯曲法和四点弯曲法，测量带预制疲劳裂纹试样和带缺口试样的 FeCrAl/Q345 涂层系统的界面结合强度（界面临界断裂载荷 P_c ），为断裂力学实验分析提供实验数据。

利用 ABAQUS 有限元分析软件，计算了八个带预制疲劳裂纹的试样发生界面断裂时的 J 积分值，发现八个弯曲试样发生界面断裂时的 J 积分值分散很大。表明使用传统单一断裂参量 J 积分来评价界面断裂是不适合的。

利用两种形式弯曲试样的界面结合强度的实验数据，将局部法用于分析 FeCrAl /Q345 涂层系统的界面断裂行为对试样几何形式和加载方式的依赖性。并且基于局部法预测了界面的断裂行为。研究发现不同几何形式的试样在发生界面断裂时，在相同断裂概率下其威布尔应力基本上相同，并且基于预制裂纹试样的试验结果成功的预测了一种缺口试样断裂数据的分布。总之，基于局部法可以显著地减小断裂数据对几何形式和加载方式的依赖性，说明局部法可以用来描述双材料界面的断裂行为，并应用于对界面的完整性评定中。

在基体 Q345 钢成分相同情况下，对比 FeCrAl/Q345 涂层系统的断裂失效概率与 LX88A/Q345 涂层系统断裂失效概率，发现 FeCrAl/Q345 涂层系统的断裂失效概率要比 LX88A/Q345 涂层系统断裂失效概率高。

关键词：涂层；界面断裂；完整性评定；局部法；威布尔参数；威布尔应力

ABSTRACT

At present, in aeronautics, aviation and so many industry domains, each kind of thermal spraying coating technology has already been widely used in enhancing the performance of the mechanical components and lengthened their service life. The integrity of coating/substrate system is critical for the components' security, and the union intensity of coatings has become one of many important standards in the applicability of coatings. For the purpose of seeking a method to evaluate the integrity of coating/substrate system interface, the applicability of traditional fracture parameter J integral in interface fracture problem and evaluation of interface fracture behavior of FeCrAl coating/Q345 steel substrate based on the local approach have been studied in this paper.

In this paper, the statistics theory of brittle material fracture is presented. And the local approach of interface crack is shown.

The 3-point bend test has been used to measure interface bond intensity(critical fracture load P_c) of FeCrAl coating/Q345 steel substrate system with prefabricated fatigue crack, and the 4-point bend test had been used to measure interface bond intensity(critical fracture load P_c) of FeCrAl coating/Q345 steel substrate system with prefabricated notch. These experiments provide experiment data for fracture mechanics analysis.

ABAQUS software is used in finite element analysis. The J_C values of the eight C3PB specimens when the interface fracture occurs are Calculation, and it's seen that the J_C values of the eight specimens with prefabricated fatigue crack are very dispersive. It's shown that J_C can not be used as the single fracture parameter to evaluate the interface fracture behavior.

With experiment data of interface bond intensity of two bend form specimens, the local approach is used to analyze geometry and load dependence of FeCrAl coating/Q345 steel substrate system for interface fracture behavior. In addition, the local approach is used to predict the interface fracture behavior. It is found that the Weibull stress(σ_W) for all specimen geometries almost are identical under the same fracture probability when the interface fracture initiation occurs for different specimen geometries. Moreover, the interface fracture behavior of one type of specimens with notch has been predicted from the test results of pre-crack specimens based on the

local approach for interface brittle fracture, and the predicted distribution of the critical load for the notched specimens gives a good agreement with the test results. In a word, the geometry dependence of the interface brittle fracture toughness data can be reduced through the local approach's application. It showed that the local approach not only can be used to describe the interface fracture behavior, but also can be used in the integrity evaluation for interface between different materials.

In the case of the same constitution of Q345 steel substrate, the fracture failure probability of FeCrAl/Q345 coating system is compared with that of LX88A/Q345 coating system. It's found that the fracture failure probability of FeCrAl/Q345 coating system is higher than that of LX88A/Q345 coating system.

KEY WORDS: Coating; Interface fracture; Integrity evaluation; Local approach; Weibull parameter; Weibull stress

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 天津大学 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名: 林祥序 签字日期: 2008 年 6 月 6 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。
特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，
并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校
向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名: 林祥序

导师签名: 荆兆民

签字日期: 2008 年 6 月 6 日

签字日期: 2008 年 6 月 6 日

第一章 绪论

1.1 研究背景

随着高新技术的飞速发展，对提高金属材料的性能，拓宽它的功能，延长仪器设备中零部件的使用寿命提出了越来越高的要求。而当前又面临高性能结构材料成本逐年上升的问题，为同时解决这两个方面的问题，近年来表面工程发展很快。表面工程的概念是1983年由英国教授T. Bell首先提出的，经过二十多年的迅猛发展，表面工程已成为先进制造技术的重要组成部分，是21世纪工业发展的关键技术之一^[1]，而作为表面工程中的一项重要技术热喷涂技术，是一种表面强化和表面改性技术，可使基本表面具有耐磨、耐蚀、耐高温氧化、电绝缘、隔热、防辐射、减磨和密封等性能，另外热喷涂技术还用于缺损部件的修复、高温耐磨等部件的预保护、功能涂层的制备等，可使工件获得所需要的尺寸和性能^[2]。

因此，在航空航天、交通运输、电力能源、石油化工、冶金矿山、机械制造、轻工纺织、生物功能等国民经济建设的各个领域，热喷涂技术都得到了广泛的应用，并取得了良好的经济效益。热喷涂成为金属表面科学领域中一个十分活跃的学科。

所谓热喷涂技术，是通过火焰、电弧或等离子体等热源，将某种线材或粉末状的材料加热至熔化或半熔化状态，并加速形成高速熔滴，喷向基体，在其上形成覆盖层，这种覆盖层称为喷涂涂层，见图1-1。

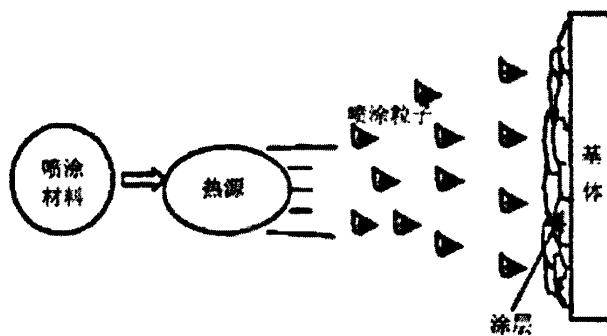


图1-1 热喷涂过程示意图

喷涂涂层是由燃烧火焰或等离子热源将某种材料加热至熔化或热塑性状态，形成一簇高速的熔态粒子流(熔滴流)，熔滴依次撞击基体或已形成的涂层表面，

经过粒子的横向流动扁平化、急速凝固冷却、不断堆积起来而形成的。熔融粒子在与沉积表面接触撞击直至凝固时的冷却速度较高，陶瓷粒子为 $1 \times (10^4 \sim 10^6)$ °C / s，金属粒子为 $1 \times (10^6 \sim 10^8)$ °C / s，甚至更高^[3]。而前一颗熔滴撞击到沉积表面形成涂层与后一颗熔滴撞击它的表面区域相隔大约 0.1s，因此在后一颗熔滴到来前，前一颗熔滴有足够的变形凝固并得到充分冷却。所以可以认为每个喷涂粒子的行为都是独立的^[4]。涂层由一个个熔滴经过撞击--扁平变形--冷却凝固堆积而成。涂层的形成过程决定了涂层具有层状结构。在喷涂过程中由于熔融的粒子与喷涂工作气体及周围空气进行化反应，喷涂材料会发生氧化。由于颗粒的陆续堆叠和部分颗粒的反弹散失，在颗粒之间不可避免地存在孔隙。因此，热喷涂涂层是由变形颗粒、气孔和氧化物夹杂等组成的，其呈复杂结构^[5]。因此，涂层各处的性质也不都相同。

航天、航空等领域的涂层一般主要用来提高构件的耐磨性，涂层硬度较高，并且涂层内部含有气孔等缺陷，涂层为多孔材料，导致涂层的断裂一般为脆性断裂，所以一般将涂层作为弹性体。由于涂层内部含有气孔、未熔颗粒、微裂纹等缺陷，从严格意义上讲涂层为各向异性材料，但由于各种缺陷的分布较为均匀，所以可以将涂层看作均质材料处理。

涂层与母材基体的完整性是构件安全的关键，涂层的结合强度成为评价涂层适用性的重要标准之一。涂层的结合强度包括两个方面：一是涂层内部的结合强度；二是涂层与母材（基体）之间的结合强度。其中涂层与基体间的结合强度更是被关注的热点。

由于考虑涂层及涂层与母材界面上的各种缺陷的存在，所以断裂力学方法更适合用来测量涂层/基体界面的结合强度。

1.2 涂层/基体界面断裂力学参量的研究

断裂力学是近几十年才发展起来的一支新兴学科，它从宏观的连续介质力学角度出发，研究含缺陷或裂纹的物体在外界条件(荷载、温度、介质腐蚀、中子辐射等)作用下宏观裂纹的扩展、失稳开裂、传播和止裂规律^[6]。断裂力学应用力学成就研究含缺陷材料和结构的破坏问题，由于它与材料或结构的安全问题直接相关，因此它虽然起步晚，但实验与理论均发展迅速，并在工程上得到了广泛应用。例如断裂力学技术已被应用于估算各种条件下的疲劳裂纹增长率、环境问题和应力腐蚀问题、动态断裂以及确定试验中高温和低温的影响，并且由于有了这些进展，在设计有断裂危险性的结构时，利用断裂力学对设计结果有较大把握。断裂力学研究的方法是：从弹性力学方程或弹塑性力学方程出发，把裂纹作为一

种边界条件，考察裂纹顶端的应力场、应变场和位移场，设法建立这些场与控制断裂的物理参量的关系和裂纹尖端附近的局部断裂条件。

目前，采用断裂力学方法研究涂层/基体界面结合强度是这一领域的热点，研究的重点是涂层/基体界面的断裂参量。

评价涂层/基体界面断裂力学的参量主要包括界面裂纹的应力强度因子K、界面断裂的能量释放率G和界面裂纹的J积分等几个参量。其中，应力强度因子K和能量释放率G适用于线弹性断裂力学分析，而界面裂纹的J积分不仅适用于线弹性，还适合于非线性材料^[7]。对于线弹性材料，J积分与能量释放率G等价。大部分断裂参量数值是通过实验或实验与有限元分析相结合获得的。

(1) 界面应力强度因子

自从 Williams 提出界面裂纹问题后，研究者基于线弹性断裂力学对界面裂纹的应力强度因子进行了大量研究。

Fazil Erdogan^[8]、 Rice 和 Sih^[9]、 Comninou^[10,11]、 Schnueser^[12]等人都基于线弹性断裂力学对界面裂纹的应力强度因子给出过定义，有的还给出了界面裂纹应力强度因子的表达式和求解方法。Rice^[13]在总结前人成果的基础上提出界面裂纹复合应力强度因子K的定义：

$$K=|K|e^{i\psi} \quad (1-5)$$

$$\psi=\tan^{-1}(\text{Im}(K)/\text{Re}(K)) \quad (1-6)$$

这里，|K|是复合应力强度因子K的模，ψ是复合应力强度因子K的相角，表征裂纹尖端附近剪切载荷型式与拉伸载荷型式的复合程度。

界面裂纹发生扩展时的应力强度因子K就是临界复合应力强度因子 K_C 。

求解界面裂纹应力强度因子最常用的方法是利用有限元分析的结果。

(2) 界面断裂的能量释放率

界面能量释放率G和界面应力强度因子K一样，是基于线弹性断裂力学的，发生断裂时的能量释放率成为临界界面能量释放率 G_C 。目前，大部分研究者都是通过试验直接测量界面的能量释放率，或者是应用有限元方法和试验相结合来计算界面能量释放率。

Thun等人^[14]采用三点弯曲试样型式，将涂层制备在基体的一个端面上，而后在涂层表面上再粘上一个相同尺寸的基体试样，沿界面开一条预制裂纹，这样在三点弯曲试验中，界面裂纹主要受拉应力。Thun采用这种试样测量了等离子喷涂ZrO₂热障涂层界面的临界能量释放率。

Chung 和 Swain^[15]等人采用四点弯曲试验测量了钛/陶瓷界面断裂的临界能量

释放率。他们认为能量释放率的绝对值可以用来比较不同异种材料系统的结合强度。该试验方法同样是基于线弹性断裂力学的，要求施加的载荷不会导致钛基体发生塑性变形。

(3) 界面裂纹的 J 积分

前面介绍的界面断裂韧性 K_c 和 G_c 是基于线弹性断裂力学基础上的，对于硬弹性涂层/硬弹性基体系统来说，可以保证界面裂纹尖端附近存在一定的 K 主导区域。但对于硬弹性涂层/软弹塑性基体系统来说，裂纹尖端承受的载荷增长到一定程度时，基体部分将不可避免地发生塑性变形，所以有必要对界面裂纹的进行弹塑性分析。

对于很大一部分断裂力学问题，可以用裂纹尖端的围线积分作为描述裂纹尖端场的参数（该参数的临界值可能成为断裂准则的基础）。在一定条件下，这些围线积分的值与路径无关。一个求取裂纹尖端积分的特别有用的方法是域积分法，即裂纹积分被定义为在围绕裂纹尖端的一个有限区域上的积分。裂纹尖端积分和域积分首先由 Moran 和 Shih^[16,17] 提出。Li^[18] 和 Shih^[19] 等人将域积分法用于计算沿三维裂纹前沿的能量释放率。针对平面双材料裂纹问题，Shih 和 Asaro^[20] 使用交互能量积分的域积分表达式提取了界面裂纹的复合应力强度因子。

综上所述，界面裂纹尖端的 J 积分成为一种重要的界面断裂参量，在界面裂纹的弹塑性分析中得到广泛应用。

1.3 局部法介绍

目前传统的断裂参量（如应力强度因子、 J 积分、COD 等），已经广泛地应用在大部分工程结构的力学完整性评定中，但这些方法本身存在一些不足。这些方法是基于传统的连续力学分析的假设基础之上的，从而能够获得线性和非线性材料中裂纹尖端区域的特性。在一定程度上，可以用单参数来描述裂纹尖端区域，并且期望这些单参数方法能够很好地描述大范围屈服条件下含缺陷构件的开裂行为。

在裂纹断裂分析中，材料中局部非均匀性的影响，如缺陷的固有尺寸和力学非均匀性（由小裂纹或奇异性引起）等，会使得对断裂行为的预测更加复杂。由于这些材料特性与能够得到的断裂抗力数据的分布直接相关，所以断裂具有随机性，可以用统计方法对断裂进行分析。更进一步，在任意的载荷条件下和对任意的构件几何形状而言，不同形式的裂纹体可能呈现出明显不同的裂尖拘束。特别是在大范围屈服条件下，通常不同几何形状的试样会出现不相似的裂纹尖端区

域。所以，使用单参数描述失稳断裂在很大程度上取决于控制裂纹尖端状态的几何因素和载荷因素，并且这些因素最终将导致对断裂韧性数据的可预测性失效。所以采用双参量法描述裂纹尖端区域的状态引起很多研究者的兴趣。本文主要介绍基于概率断裂力学的威布尔双参数局部法。

考虑到断裂韧性与裂纹体的几何形状、尺寸和材料的随机特性的相关性，对断裂韧性而言，可以基于局部准则建立了一个模型。McClintock^[21]在疲劳和断裂方面的首创性研究已经提出根据局部断裂准则来模拟宏观的断裂行为。这些方法将局部的应力-应变场与一个基于微观力学描述局部破坏机理的模型结合起来，通常被称为局部法（Local approaches）。在该方法中，使用了断裂发生时的加载历史，这对于复杂载荷条件断裂行为的模拟非常重要。这里，假设断裂能被一个基于微观力学的断裂参量驱动，那这个与失效机理有关系的断裂参量就可以控制断裂强度，从而，该断裂参量也可以用来评价宏观断裂行为。进一步说，可以方便地建立一个能够描述失效机理等内在特性（如断裂的统计特性）的模型，并与局部法相结合。由于局部法对局部裂纹尖端区域的特性具有很强的依赖性，所以使用有限元方法对裂纹进行数值模拟对局部法的发展起到很大的贡献。

Beremin^[22]首先根据最薄弱环节理论提出用于脆性断裂的局部法。认为断裂的临界条件是和断裂控制区（如裂尖或应力集中区）中的应力、应变或局部损伤有关。对于应力控制的断裂，局部法认为失效可以由一个有效应力来控制，称为威布尔应力 σ_w 。更进一步，研究表明威布尔应力 σ_w 服从双参数威布尔分布，而与控制裂纹尖端区域的几何参数无关。1992，Minami等人^[23]的研究表明，对缺口试样断裂韧性的预测与弹塑性断裂韧性（如 J_C ）的试验结果吻合良好，并提出了求解威布尔分布参数的程序。

此后，局部法成为国际断裂力学研究领域的热点。Ruggieri 和 Minami 等人^[24]提出了一个链-束统计学模型（Chain-of-Bundles Model）来描述脆性材料的微观断裂机制，并基于该模型进一步发展了局部法。Ruggieri^[25-29]还将局部法发展到用于考虑拘束和延性撕裂行为的脆性断裂分析。

前面已经论述，在线弹性断裂力学的范围内，通常采用能量释放率和复合应力强度因子作为评价界面韧性的断裂参量，在弹塑性断裂力学的范围内，界面裂纹尖端的 J 积分作为评价界面韧性的断裂参量得到广泛应用，这些都是单参量方法。

同均质金属材料比较，采用单参量法评价界面的完整性的缺点更大。涂层与基体之间的界面上随机分布着许多缺陷，如裂纹、气孔、氧化物、未熔颗粒等等，在界面裂纹断裂分析中，材料中局部非均匀性的影响，如缺陷的固有尺寸和力学非均匀性（由裂纹、气孔、氧化物、未熔颗粒等缺陷或奇异性导致）等，会使得

对断裂行为的预测更加复杂，断裂同样具有随机性。所以，同均质金属材料相似，使用单参数描述界面失稳断裂可能导致对断裂韧性数据的可预测性失效。

在界面断裂韧性的评定中，Minami^[30,31]已经基于威布尔应力准则利用局部法对界面的完整性评定进行了初步研究。虽然有研究者应用J-T双参量理论对界面断裂进行了研究^[32-34]，但是基于线弹性断裂力学的，不适用与弹塑性分析。而对于硬涂层/软基体系统，当界面断裂为脆性断裂时，裂纹尖端附近的基体往往发生较大范围的屈服现象。另外，对涂层和界面内的微观缺陷更适合采用统计处理，所以基于概率断裂力学的局部法更适合用于界面的完整性评定中。

1.4 研究内容

本论文主要研究传统断裂参量 J 积分在界面断裂问题中的应用，以及基于局部法评定 FeCrAl /Q345 涂层系统的界面断裂行为等问题。

对 FeCrAl /Q345 涂层系统进行断裂力学实验，分别采用三点弯曲法和四点弯曲法，测量带预制疲劳裂纹试样和带缺口试样的 FeCrAl 涂层与 Q345 钢基体的界面结合强度（界面临界断裂载荷 P_c ），为界面结合强度实验分析提供实验数据。

简要介绍了 ABAQUS 有限元软件的建模过程，并利用 ABAQUS 有限元软件，对带预制裂纹三点弯曲（C3PB）与带预制缺口四点弯曲（N4PB）两类试样进行有限元分析；而后介绍 J 积分的求解方法及证明了 J 积分的守恒性，并对传统单一断裂参量 J 积分评定 FeCrAl/Q345 涂层系统的有效性进行讨论。

采用威布尔双参数局部法来评定 FeCrAl/Q345 涂层系统，这部分内容包括：对界面威布尔参数的估计方法和步骤进行介绍，并利用威布尔参数估计程序求出界面裂纹试样的界面局部断裂参量；基于局部法由一种预制有界面裂纹的三点弯曲试样（C3PB）对另一种带缺口的四点弯曲试样（N4PB）的界面断裂行为进行预测。

最后，在基体 Q345 钢成分相同的情况下，对 FeCrAl/Q345 涂层系统的断裂失效概率预测结果与 LX88A/Q345 涂层系统进行对比。

第二章 局部法分析界面脆性断裂的理论基础

本章首先介绍脆性材料断裂的统计学原理，而后阐述介绍了局部法分析界面脆性断裂裂纹扩展问题的理论。

2.1 脆性材料断裂的统计学原理

一般认为材料中微观裂纹的出现是断裂开始的前兆，这也是材料脆性断裂的特征。进一步说，这个特点对于将宏观断裂行为与局部法建立联系具有非常重要的意义。Griffith^[35]将所有可能的微观结构缺陷（如夹杂物、晶粒边界分离等）简化为简单几何形状的裂纹。由于材料内部的局部非均匀性，如固有尺寸的裂纹和力学非均匀性（其行为表现为小裂纹或奇异性），所以断裂具有随机性。对微观裂纹进行统计学分析的微观力学模型可以恰当地解释一些已经观察到的与脆性断裂有关的现象，特别是可以用来处理断裂韧性的分散问题。在这些模型中，先假设材料中的裂纹是随机分布的，并且其尺寸和密度是材料的固有特征，从而可以建立相应的物理过程与连续、易处理的精确数学公式之间的关系。

大多数统计学失效模型的普遍特征是裂纹体的断裂抵抗力与极值的统计学分布相关。令 X_1, X_2, X_3 为一个概率密度函数 $f(x)$ 的随机变量。如果将这些观测值按递增顺序排列，则有 $X_{(1)} \leq X_{(2)} \leq \dots \leq X_{(n)}$ ，则 $X_{(1)}$ 是最小分布或第一阶统计量。通常， $X_{(i)}$ 被称为第 i 阶统计量，与随机变量 X_i 有关。Gumbel^[36]曾对极阶统计学的渐近理论进行了相当完整的讨论，后来 Epstein^[37]总结出极值仅有 3 个可能的渐近分布。考虑一个尺寸为 n 的样本，它独立地和随机地组成一个概率密度函数 $f(x)$ 的总体。定义统计量：

$$\Gamma_n = \min\{X_1, X_2, \dots, X_n\} \quad (2-1)$$

由此，这个问题变为找到 n 的大值 Γ_n 有限分布的问题。按照 Gumbel 的工作，最小值的渐近分布为：

类型 I

$$\Gamma_n = 1 - \exp \left[-\exp \left(\frac{x - \tilde{\alpha}}{\tilde{\beta}} \right) \right], \quad -\infty < x < \infty, \tilde{\beta} > 0 \quad (2-2)$$

类型 II

$$\Gamma_n = 1 - \exp \left[- \left(-\frac{x - \tilde{\gamma}}{\tilde{\beta}} \right)^{-\tilde{\alpha}} \right] , \quad -\infty < x \leq \tilde{\gamma}, \tilde{\alpha} > 0, \tilde{\beta} > 0 \quad (2-3)$$

类型 III

$$\Gamma_n = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x - \tilde{\gamma}}{\tilde{\beta}} \right)^{\tilde{\alpha}} \right] , \quad \tilde{\gamma} < x \leq \infty, \tilde{\alpha} > 0, \tilde{\beta} > 0 \quad (2-4)$$

类型 I 的极限渐近分布就是众所周知的 Gumbel 分布，并经常被作为串并联系统的失效模型。通常，当引起失效的现象的根本分布具有正常型特点时，式 (2-2) 的函数被使用。III 型分布就是众所周知的威布尔分布，因为它能够提供一个合适的方法来处理试验数据与断裂机理和断裂现象之间的联系，所以成为最常用的失效分布的参量化族。

在发展描述失稳裂纹扩展的理论模型中，统计学分析的目的分为两部分。首先，对含有不同尺寸和不同方位裂纹、并承受复杂载荷历史的结构，我们寻求一个施加载荷和几何形状的函数，该函数能够描述裂纹尖端附近材料中的局部破坏机理。假设断裂依赖于这个微观破坏机理，则与统计学函数有关的参数被用来描述不同载荷历史和裂纹型式的宏观断裂行为。第二个目的是基于统计学模型来预测更大的含缺陷结构的失稳裂纹扩展。如果两种不同结构中的统计学函数具有相似性，那么用一种结构型式的试验数据可以预测另一种结构的失稳裂纹扩展。

尽管一些基本假设是建立在对裂纹的纯弹性处理上的，但也对脆性材料的塑性应力分析给予了关注。由于通常脆性断裂的塑性流动应力很小，已经证明了可以非常充分地模拟这种局部破坏机理。

2.2 界面裂纹的局部法理论基础

由于热喷涂层为颗粒的机械嵌合，涂层和界面中含有许多气孔、夹杂物等缺陷，所以相对于基体而言，涂层和界面的韧性较差，所以涂层系统的失效一般从界面上的缺陷（裂纹）开始，随后沿着界面发展，这种情况称为“强基体、弱界面”。由于本研究采用的 FeCrAl 涂层为多孔脆性材料，所以可以认为是脆性断裂。

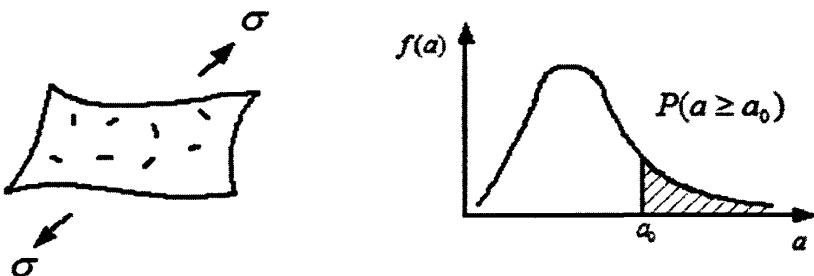
本节首先讨论界面裂纹的失稳扩展模型；随后讨论界面裂纹的断裂准则；最后根据最薄弱环节理论将局部法应用到对界面裂纹的分析中。

2.2.1 界面裂纹失稳扩展模型

涂层和涂层与基体的界面内含有大量随机分布的气孔、夹杂物等微观缺陷，我们将这些微观缺陷作为微裂纹。

相对于脆性多孔的热喷涂涂层系统而言，基体钢是柔性的，在界面裂纹失稳扩展前，基体会发生相当大程度的非均匀塑性变形，而涂层虽然塑性变形极小，但由于受到很大的应力，所以会产生较大的弹性应变。在涂层承受这样的应力应变或界面受到非均匀塑性变形的条件下，界面内的微裂纹会成核长大，当一些临界条件被满足后，微裂纹在均匀拉应力下就会沿着涂层颗粒与基体钢晶粒之间的界面发生断裂。

由于涂层和界面内的微裂纹是随机分布的，所以断裂也具有随机性。本节将建立对微裂纹进行统计学分析的微观力学模型。在此模型中，先假设界面内的微裂纹是随机分布的，并且微裂纹的尺寸和密度是界面材料的固有特征，从而可以建立断裂的微观物理过程和精确的数学公式之间的关系。这种模型是将界面看作为断裂控制区，并且将界面近似为一个平面来处理。在断裂控制区中，就可以假设存在一个面积很小但具有一定面积的单元（如图 2-3），其内部含有一定数量、均匀分布的微裂纹。所以统计学分析将界面裂纹脆性断裂问题简化为找到一个临界裂纹的问题，换而言之，简化为决定裂纹尺寸的极值分布问题，如图 5-9b 所示。



(a) 界面内包含均匀分布的微裂纹的小面积 (b)用微裂纹尺寸的极值分布描述的界面断裂

图 2-3 界面脆性断裂的统计学表达

2.2.2 界面裂纹的断裂准则

界面裂纹尖端附近区域一般为复合型载荷条件，对复合载荷下的裂纹扩展问题，裂纹前方的应力状态非常复杂，所有的应力强度因子都可能存在。假设裂纹

扩展的发生不会引起扩展前裂纹尖端前方附近区域应力场的显著变化，我们可以基于断裂开始前就存在的应力场来假设一个断裂准则。对于界面上的微裂纹，可以看作成圆形平面裂纹（即硬币状裂纹）。该平面裂纹受垂直于裂纹面的均匀拉应力和平行于裂纹面的剪切力，如图 2-4。

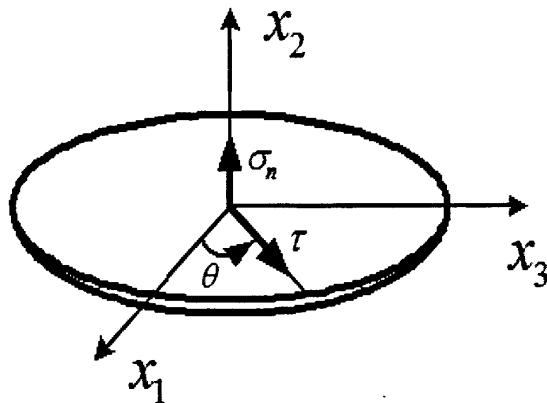


图 2-4 承受拉伸载荷和剪切载荷的硬币状裂纹

这里，应力强度因子 K_j , $j=I, II, III$, 是参数 θ 的函数：

$$\begin{aligned} K_I &= \frac{2\sigma_n \sqrt{a}}{\pi} \\ K_{II} &= \frac{4\tau \sqrt{a}}{\pi(2-\nu)} \cos \theta \\ K_{III} &= \frac{4(1-\nu)\tau \sqrt{a}}{\pi(2-\nu)} \sin \theta \end{aligned} \quad (2-5)$$

为了预测裂纹失稳时的临界应力和裂纹扩展的初始方向，我们使用平面能量释放率准则。假设裂纹在它自己的平面内扩展，裂纹扩展以自相似的方式发生，使得 I 型、II 型和 III 型裂纹的扩展方向是相同的，因此，总的共平面能量释放率为：

$$G = \frac{1-\nu^2}{E} \left[K_I^2 + K_{II}^2 + \frac{1}{1-\nu} K_{III}^2 \right] \quad (2-6)$$

这里，用一个相当于 I 型裂纹的等效能量释放率 G_{IQ} 来替代复合型裂纹的能量释放率 G ，有：

$$G = G_{IQ} \quad (2-7)$$

由式(2-5)、(2-6)和(2-7), 得到:

$$G_{IQ} = \frac{1-\nu^2}{E} \frac{4a}{\pi^2} \left[\sigma_n^2 + \frac{4\tau^2}{(2-\nu)^2} \cos^2 \theta + \frac{4\tau^2}{(2-\nu)^2} \sin^2 \theta \right] \quad (2-8)$$

现在, 对于本研究中的 FeCrAl 涂层与 Q345 钢间的界面断裂问题, 使用 2.2.1 节中提出的界面裂纹失稳扩展模型进行处理(将涂层和基体的界面近似看作为一个平面):

如果将界面内微裂纹看作硬币状裂纹, 则有 $\sigma = \sigma_y$, $\tau \cos \theta = \tau_{xy}$, $\tau \sin \theta = \tau_{yz}$, 所以等效能量释放率 G_{IQ} 可以由式(2-8)得到:

$$G_{IQ} = \frac{1-\nu^2}{E} \frac{4a}{\pi^2} \left[\sigma_n^2 + \frac{4(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2)}{(2-\nu)^2} \right] \quad (2-9)$$

根据式(2-5)中 I 型裂纹应力强度因子的表达式, 可以得到裂纹在自平面内扩展的等效拉应力 σ_Q :

$$\sigma_Q = \left[\sigma_n^2 + \frac{4(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2)}{(2-\nu)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-10)$$

2.2.3 局部法理论在界面裂纹分析中的应用

由于界面断裂问题适合用最薄弱环节理论进行分析, 故下面基于最薄弱环节理论就局部法理论的应用进行理论推导。

假设在裂纹尖端前方一个面积的应力区域中的一个小面积 S 受 $(\sigma_y, \tau_{xy}, \tau_{yz})$ 作用, 如图 2-5。令 S_0 ($i=1, \dots, p$), 为一系列应力均匀分布的小区域, 再令 δS_i ($i=1, \dots, q$) 是 S_0 内的一个小面积单元, 其面积足够大而包含有数量为 r 的均匀分布、统计上独立的微裂纹。

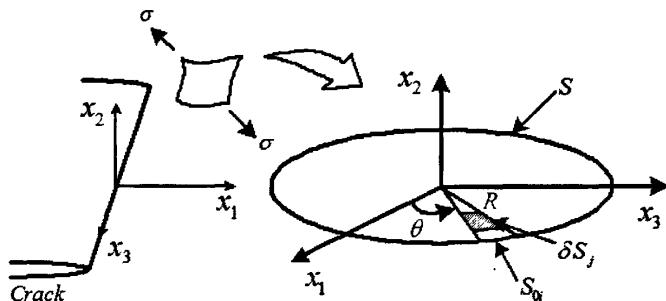


图 2-5 界面裂纹尖端前方一个应力均匀的小面积 S

假设面积 S 中微裂纹的发生率服从泊松过程，如果假设当微裂纹尺寸 a 超过一个临界值 $a_c = a_c(R, \theta)$ ，那么一个面积单元的失效概率为：

$$\partial p = \partial S \int_{a_c}^{\infty} g(a) da \quad (2-11)$$

式中， $g(a)$ 是每个单位面积内，尺寸在 a 到 $g(a)da$ 之间的微裂纹数目。

从而，一个小面积单元内不发生失效的概率为：

$$1 - \partial p = 1 - \partial S \int_{a_c}^{\infty} g(a) da \quad (2-12)$$

由指数方程 $f(x) = e^x$ 的 (Courant 和 John^[38]) 泰勒展开式，并忽略高阶项，由式 (2-12) 得到：

$$\partial p = 1 - \exp \left[-\partial S \int_{a_c}^{\infty} g(a) da \right] \quad (2-13)$$

假设不重叠单元的失效在统计上相互独立，并且具有相同的失效概率 ∂p 。

根据最薄弱环节理论，小面积 S 的失效概率为：

$$G_f = 1 - \prod_i (1 - \partial p_i) \quad (2-14)$$

S 中包括大量面积相同的小面积单元，所以有：

$$G_f = 1 - \exp \left[- \int_S \partial S \int_{a_c}^{\infty} g(a) da \right] \quad (2-15)$$

从而，局部强度的分布可以由所考虑的小面积 S 内最大裂纹的分布来描述，这种分布可以由裂纹尺寸的极值分布来表征。如果将 $g(a)$ 看作为一个 Cauchy (柯西) 型渐近分布，这里 $g(a)$ 表现为 a^{-4} 形式 (a 取极大值) (Freudcuthal^[39])；式 (2-15) 中的内层积分可以表达成：

$$g(a) = \frac{1}{S_0} \left(\frac{A_0}{a} \right)^4 \quad (2-16)$$

式中， A 和 A_0 是分布函数；临界裂纹尺寸 a_c 取决于裂纹尺寸和所受应力，可以从弹性应力强度因子 K 获得。

对纯 I 型载荷条件下的裂纹：

$$a_c = \frac{K_{Ic}^2}{Y_I \sigma^2} \quad (2-17)$$

式中， K_{Ic} 是平面应变状态下裂纹起裂时的应力强度因子； Y_I 是一个校正系数； σ 是作用在微裂纹面上的拉应力。

将式 (2-16) 和 (2-17) 代入 (2-15)，可以得到一个描述面积 S 断裂强度的极限分布的表达式：

$$G_f = 1 - \exp \left[-\frac{1}{S_0} \int \left(\frac{\sigma}{\sigma_u} \right)^m dS \right] \quad (2-18)$$

这里, $m = 2A - 2$; σ_u 是与微裂纹密度 $g(a)$ 和 K_{IC} 有关的参量。

通过下面的映射关系, 将卡笛尔坐标系 (X_1, X_2, X_3) 转换到圆柱坐标系 (R, θ, X_2) , 如图 2-5 所示:

$$\begin{aligned} X_1 &= R \cos \theta \\ X_2 &= X_2 \\ X_3 &= R \sin \theta \end{aligned} \quad (2-19)$$

令 S 是一个单位面积, 式 (2-18) 变为:

$$G_f = 1 - \exp \left[-\frac{2}{\pi S_0} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{\sigma}{\sigma_u} \right)^m d\theta \right] \quad (2-20)$$

对于多轴应力状态下的带缺口 (或裂纹) 构件, 可以考虑断裂控制区失效的概率。所以带缺口 (或裂纹) 构件的断裂强度分布表达式为:

$$H_f = 1 - \exp \left[-\frac{2}{\pi S_0} \int_{\Omega} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{\sigma}{\sigma_u} \right)^m d\theta d\Omega \right] \quad (2-21)$$

式中, 只要采用合适的微裂纹形状, 并假设一个断裂准则, 那么作用在断裂控制区 Ω 内任意区域的应力张量可以简化为一个作用在裂纹面上的等效拉应力 σ_q , 从而断裂强度的概率分布可以简单地用等效拉应力 σ_q 来替代式 (2-21) 中的 σ 。

将涂层和基体的界面看作为一个平面, 那么界面内的微裂纹全部在一个平面 (界面) 内, 故作用在微裂纹面上的等效拉应力 σ_q 为:

$$\sigma_q = \left[\sigma_y^2 + \frac{4(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2)}{(2-\nu)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-22)$$

由于通过式 (2-22) 计算得到的等效拉应力 σ_q 与 θ 无关, 故式 (2-21) 变为:

$$H_f = 1 - \exp \left[-\frac{1}{S_0} \int_{\Omega} \left(\frac{\left[\sigma_y^2 + \frac{4(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2)}{(2-\nu)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \right)^m}{\sigma_u} d\Omega \right] \quad (2-23)$$

定义威布尔应力 σ_w 为:

$$\sigma_w = \left[\frac{1}{S_0} \int_{\Omega} \left[\sigma_y^2 + \frac{4(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2)}{(2-\nu)^2} \right]^{\frac{m}{2}} d\Omega \right]^{\frac{1}{m}} \quad (2-24)$$

式中，断裂控制区 Ω ，实际为涂层和基体之间的界面。

那么，式 (2-23) 可以写成：

$$H_f(\sigma_w) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_u} \right)^m \right] \quad (2-25)$$

式中， m 是界面的威布尔分布的形状参数， σ_u 是界面的威布尔分布的尺度参数，威布尔应力 σ_w 是脆性断裂的驱动力。

第三章 测量 FeCrAl/Q345 涂层界面结合强度的断裂力学实验

本章对 FeCrAl /Q345 涂层系统进行断裂力学实验，分别采用三点弯曲法和四点弯曲法，测量带预制疲劳裂纹试样和带缺口试样的 FeCrAl 涂层与 Q345 钢基体的界面结合强度（界面临界断裂载荷 P_c ），为后面的界面结合强度实验分析提供断裂力学实验数据。

3.1 实验材料

采用 DZ-ARC-400 高速电弧喷涂系统制备高速电弧喷涂 FeCrAl 涂层，基体为 Q345 钢。Q345 钢的成分见表 3-1，图 3-1 为 FeCrAl 涂层横截面能谱分析结果，FeCrAl 涂层化学成分见表 3-2。

表 3-1 Q345 钢的化学成分 (%)

基体	C	Mn	Si	P	V	Nb	Ti
Q345 钢	≤0.18	1.0-1.6	≤0.55	≤0.03	0.02-0.15	0.015-0.06	0.02-0.20

表 3-2 FeCrAl 涂层的化学成分 %

涂层	O	Al	Cr	Fe
FeCrAl	22.71	8.06	15.41	33.64

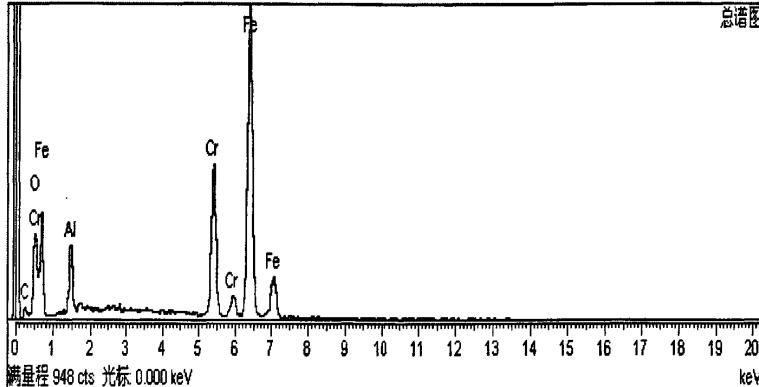


图 3-1 FeCrAl 涂层横截面成分的 EDS 谱

图 3-2 为 FeCrAl 涂层横截面的显微组织形貌，显示出典型的层状结构特征，涂层组织致密，无粗大孔隙。在涂层中可以清楚地看到层状颗粒的形态，扁平条状颗粒为 Fe，在这些颗粒之间镶嵌着许多圆状小颗粒，为合金粉末颗粒，另外 Fe 条层颗粒之间有很薄的氧化物膜和少量孔隙，涂层熔融物面积大，形成的沉积层连续、规则。

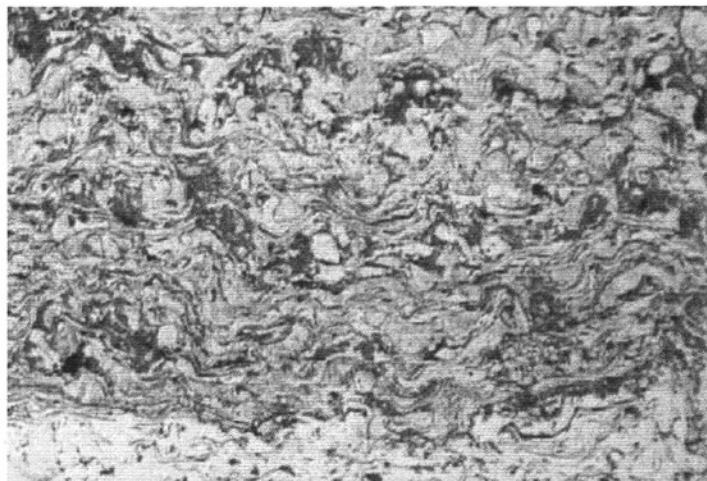


图 3-2 FeCrAl 涂层横截面显微组织形貌

3.2 试样形式及制备

在本实验中，试样分两种形式，一种为带有预制疲劳界面裂纹的三点弯曲试样(Pre-cracked 3P bend, 简称 C3PB 试样)，试样形式如图 3-3(a)，加载跨距为 50mm；一种为带缺口的四点弯曲试样(Notched 4P bend, 简称 N4PB 试样)，试样形式如图 3-3(b)，外支点距离为 50mm，内支点距离为 10mm。

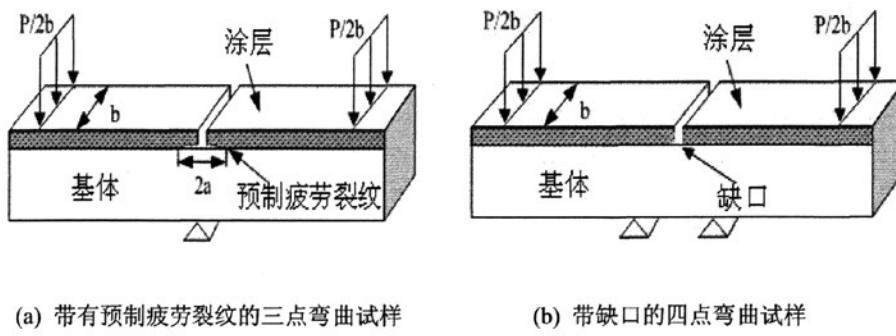


图 3-3 两种断裂力学试样型式

C3PB 试样基体的长度、宽度和厚度分别为 60mm、19.7mm 和 8.6mm，涂层厚度约为 0.60mm，并且涂层表面未经任何处理。使用线切割技术在试样涂层的中心位置切出一个贯穿涂层厚度，宽度为 0.2mm 的缺口，然后在 PLG-20C 高频疲劳试验机（图 3-4）上制作疲劳裂纹。疲劳裂纹在界面上，平行于基体/涂层界面，裂纹长度为 4mm，如图 3-5 所示。C3PB 试样共 8 个。

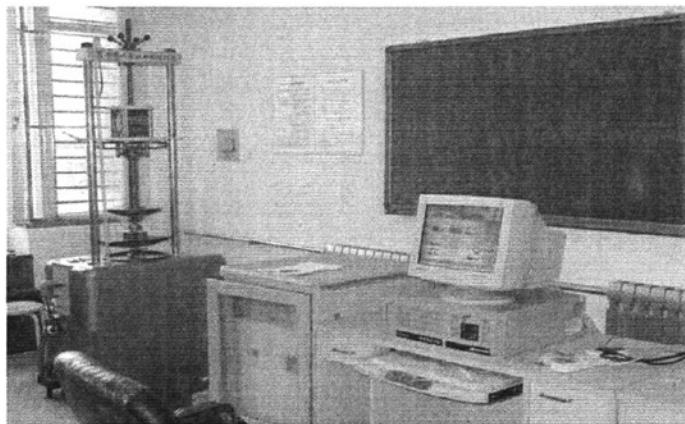


图 3-4 PLG-20C 高频疲劳试验机

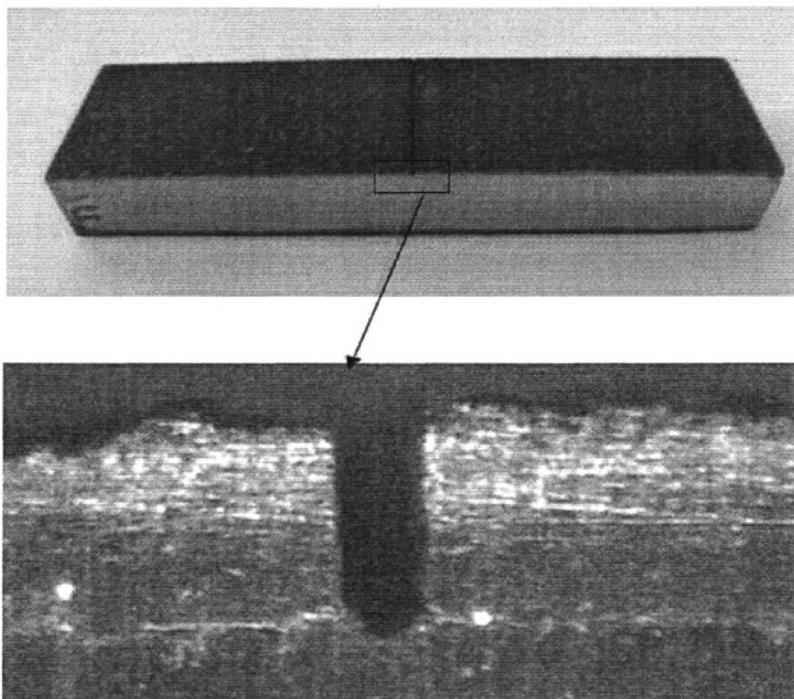


图 3-5 预制有疲劳界面裂纹的三点弯曲试样(C3PB)

N4PB 试样基体的长度、宽度和厚度分别为 60mm、19.7mm 和 8.6mm，涂层厚度约为 0.60mm，并且涂层表面未经任何处理。同样使用线切割技术在试样涂层的中心位置切出一个贯穿涂层厚度，宽度为 0.2mm 的缺口，如图 3-6 所示。

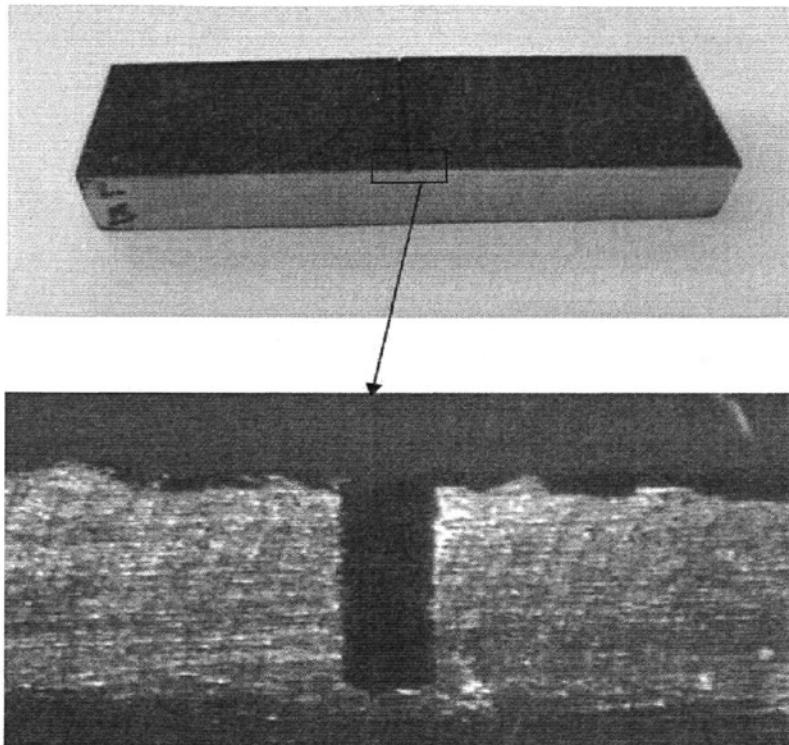


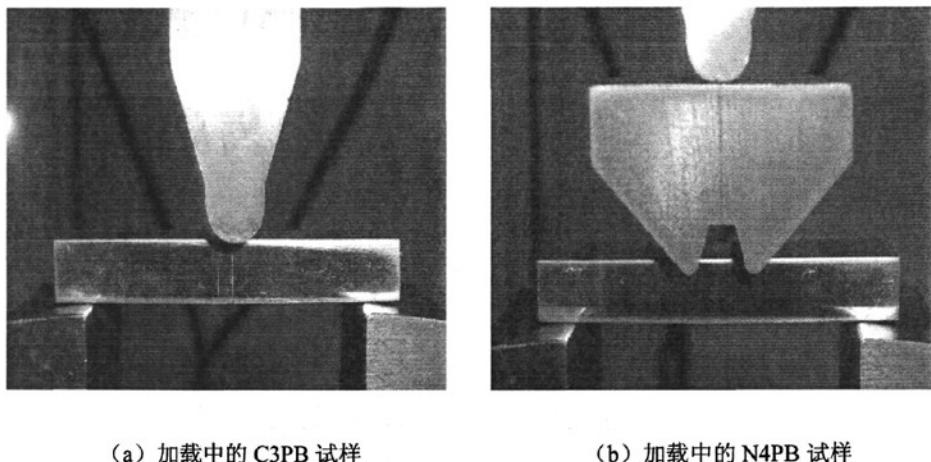
图 3-6 带缺口的四点弯曲试样 (N4PB)

对于两种形式的试样，都使用一个 50 倍的工具显微镜，分别测量每个试样的 12 个位置上的涂层厚度，然后取平均值作为该试样的涂层厚度。

3.3 实验方法

静载下的三点弯曲试验和四点弯曲试验在 CSS-44100 万能材料试验机上进行，试验全部在室温下进行，试验过程中记录下施力点位移-载荷关系。两种试样都是涂层朝下放置，如图 3-7。加载过程中，为了获得界面裂纹起裂（或缺口处裂纹的萌生）时的载荷值，用一个远程显微镜来观察界面裂纹尖端（或缺口）附近区域（如图 3-8），该显微镜可以在三维方向上移动，可以追踪载荷增大导致的界面裂纹尖端位置变化（或缺口处裂纹的萌生）。裂纹尖端（或缺口）处图像通过一个 CCD 和一个图像采集器在计算机屏幕上显示出来。当有明显的界面裂

纹扩展发生（或缺口处裂纹的萌生）时，停止加载，这个最终载荷作为引起界面裂纹扩展（或缺口处裂纹的萌生）的临界载荷被记录下来。



(a) 加载中的 C3PB 试样

(b) 加载中的 N4PB 试样

图 3-7 放置在试验机上的弯曲试样

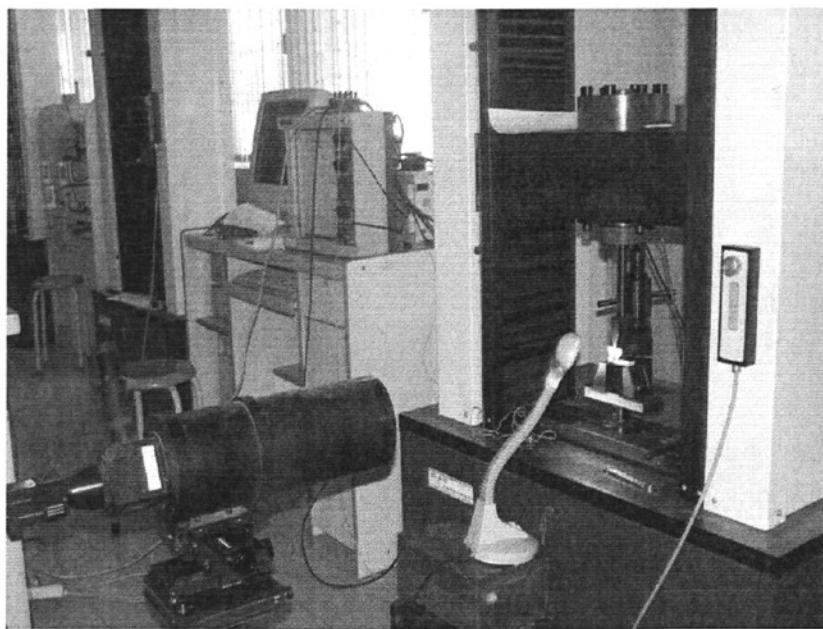
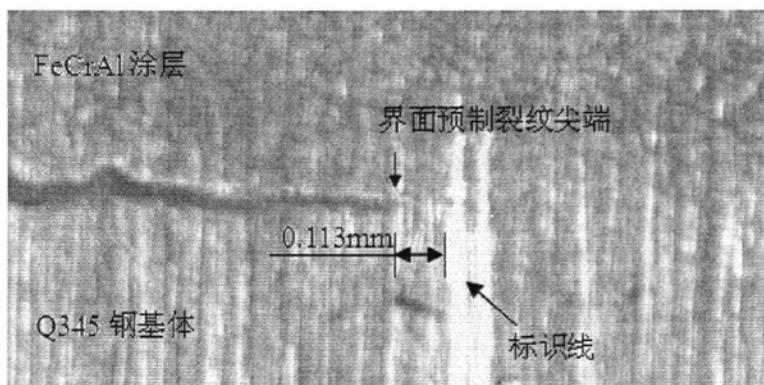


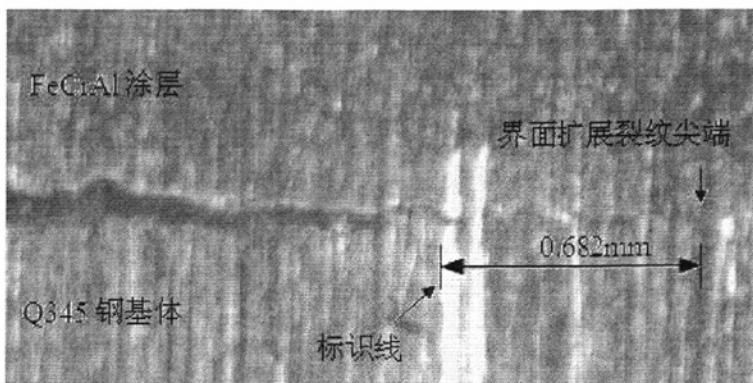
图 3-8 观察加载过程中试样界面裂纹尖端（或缺口）的远程显微镜

3.4 试验结果

C3PB 试样在弯曲试验中, 当载荷增加到一定程度, 裂纹从裂纹尖端开始沿着界面开始扩展, 在显微镜下可以清楚地观察到界面裂纹的扩展行为, 当时施加的载荷定义为破坏发生载荷 P_c 。N4PB 试样在弯曲试验中, 当载荷增加到一定程度时, 从缺口处开始沿着界面涂层剥离(显微镜下可以观察到), 当时施加的载荷定义为破坏发生载荷 P_c 。图 3-9 和图 3-10 分别为一个 C3PB 试样 (No.1)、和一个 N4PB 试样 (No.1) 的裂纹尖端(或缺口)附近区域在界面断裂前后的显微照片。



(a) 扩展前



(b) 扩展后

图 3-9 C3PB 试样 (No.1) 界面裂纹尖端附近区域在裂纹扩展前后的照片

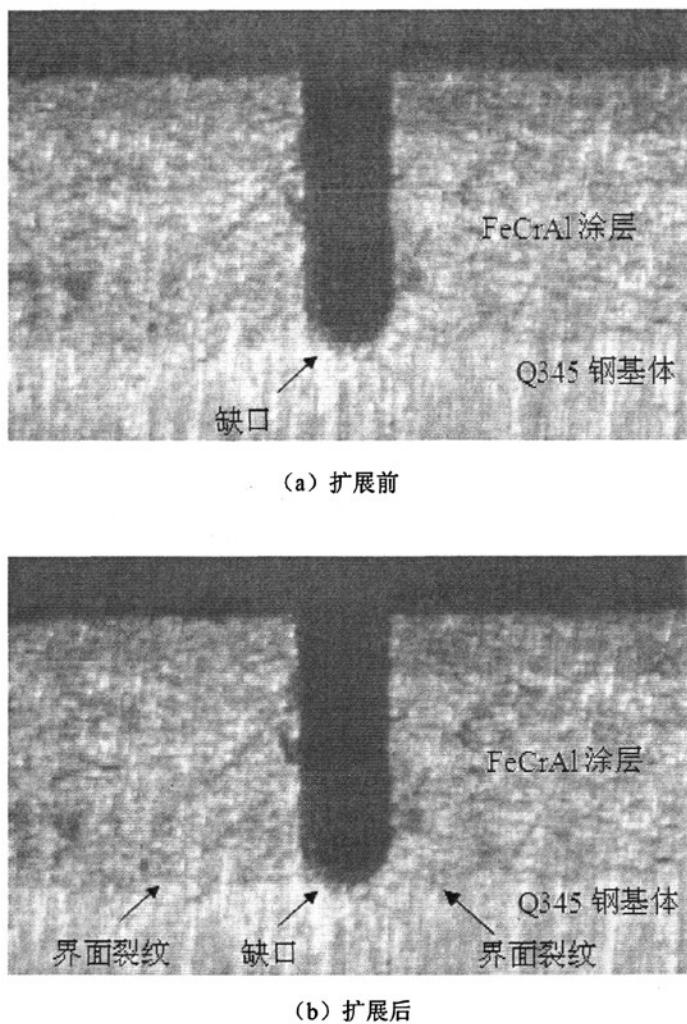


图 3-10 N4PB 试样 (No.1) 缺口附近区域在裂纹扩展前后的照片

从图 3-9 与 3-10 的显微照片可以看出，不论是带疲劳裂纹的三点弯曲试样 (C3PB)，还是带缺口的四点弯曲试样 (N4PB)，界面断裂破坏均发生在界面上。

图 3-11 为编号 NO.1 的 C3PB 试样在弯曲试验中的加载点位移-载荷曲线。可以看出弯曲试验的裂纹扩展过程中，试件发生的变形在弹性段内。

图 3-12 为编号 NO.1 的 N4PB 试样在弯曲试验中的加载点位移-载荷曲线。可以看出弯曲试验的裂纹扩展过程中，试件发生了一定的塑性变形。

文章中，对带疲劳裂纹的三点弯曲试样 (C3PB) 与带缺口的四点弯曲试样 (N4PB) 只各举了一例。分析所有的 C3PB 与 N4PB 试样，可以发现进行弯曲试验后有的试样发生的变形在弹性段内，而有的发生了一定的塑性变形。

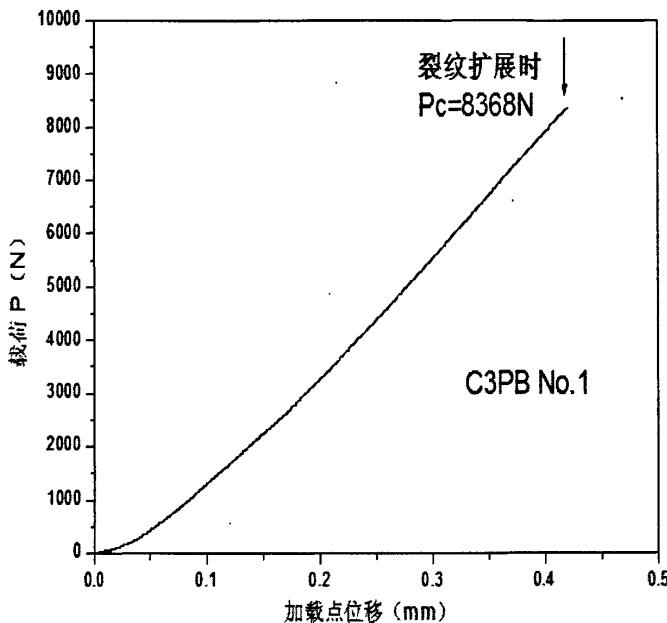


图 3-11 C3PB 试样在弯曲试验中的加载点位移-载荷曲线

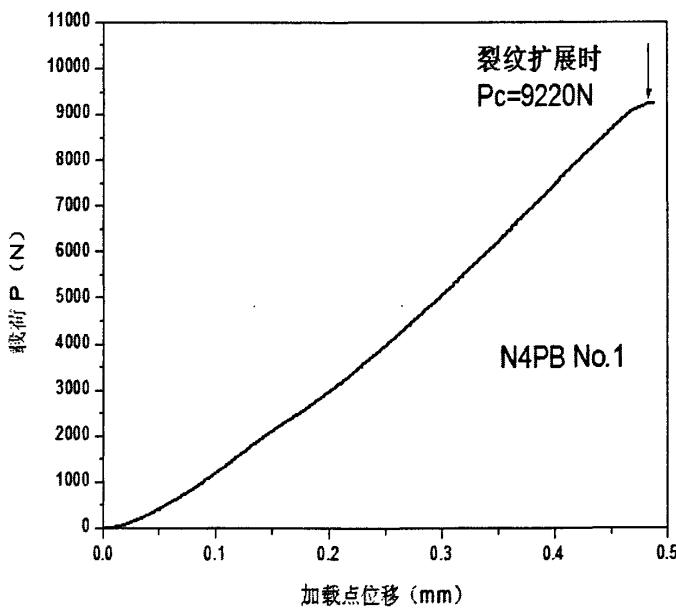


图 3-12 N4PB 试样在弯曲试验中的加载点位移-载荷曲线

表 3-3 为试验中测量到的两种弯曲试样界面发生断裂时的临界载荷值。

表 3-3 两类试样界面发生断裂时的临界载荷

编号	1	2	3	4	5	6	7	8
C3PB 临界载荷 $P_c(N)$	8368	8384	8440	8472	8688	8696	9000	9472
N4PB 临界载荷 $P_c(N)$	9220	9415	9700	9800	10054	10100	10200	10400

本章所测得的 C3PB 与 N4PB 试样的临界断裂载荷，为后面的 ABAQUS 有限元模拟分析、J 积分的计算和威布尔参数的求解提供有力的实验数据。

第四章 局部法评定 FeCrAl/Q345 涂层界面结构完整性的应用

本章中，首先简述 ABAQUS 有限元软件的分析过程，并利用 ABAQUS 有限元软件，对三点弯（C3PB）与四点弯（N4PB）两类试样进行有限元分析；而后介绍 J 积分的求解方法及证明了 J 积分的守恒性，并对传统单一断裂参量 J 积分评定 FeCrAl/Q345 钢涂层系统的有效性进行讨论；采用威布尔双参数局部法来评定 FeCrAl/Q345 钢涂层系统，这部分内容包括：对界面威布尔参数的估计方法和步骤进行介绍，并利用威布尔参数估计程序求出界面裂纹试样的界面局部断裂参量；基于局部法由一种有预制界面裂纹的三点弯曲试样（C3PB）对另一种带缺口的四点弯曲试样（N4PB）的界面断裂行为进行预测；最后，在基体成分相同情况下，对 FeCrAl/Q345 涂层界面的断裂失效概率预测结果与 LX88A/Q345 涂层系统进行对比。

4.1 ABAQUS 介绍

实验中有限元模拟分析使用的是 ABAQUS 有限元软件。ABAQUS 是功能强大的有限元软件，可以分析复杂的固体力学和结构力学系统，模拟非常庞大复杂的模型，处理高度非线性问题。ABAQUS 不但可以做单一零件的力学和多物理场的分析，同时可以完成系统级的分析和研究。ABAQUS 使用起来十分简便，可以很容易地为复杂问题建立模型。在建模过程中，用户需提供结构的几何形状、材料特性、边界条件和载荷工况等工程数据。在非线性分析中，ABAQUS 能自动选择合适的载荷增量和收敛准则，并在分析过程中不断地调整这些参数值，确保获得精确的解答。

4.1.1 ABAQUS 分析过程

一个完整的 ABAQUS 分析过程，通常由三个明确的步骤组成：前处理、模拟计算和后处理。这三个步骤的联系及生成的相关文件（如图 4-1）如下：

（1）前处理（ABAQUS/CAE）

在前处理阶段需定义物理问题的模型并生成一个 ABAQUS 输入文件。通常的做法是使用 ABAQUS/CAE 或其它前处理模块，在图形环境下生成模型。而

一个简单问题也可直接用文件编辑器来生成 ABAQUS 输入文件。

(2) 模拟计算 (ABAQUS/Standard)

模拟计算阶段用 ABAQUS/Standard 求解模型所定义的数值问题，它在正常情况下是作为后台进程处理的。一个应力分析算例的输出包括位移和应力，它们存储在二进制文件中以便进行后处理。完成一个求解过程所需的时间可以从几秒钟到几天不等，这取决于所分析问题的复杂程度和计算机的运算能力。

(3) 后处理 (ABAQUS/CAE)

一旦完成了模拟计算得到位移、应力或其它基本变量，就可以对计算结果进行分析评估，即后处理。通常，后处理是使用 ABAQUS/CAE 或其它后处理软件中的可视化模块在图形环境下交互式地进行，读入核心二进制输出数据库文件后，可视化模块有多种方法显示结果，包括彩色等值线图，变形形状图和 x—y 平面曲线图等。

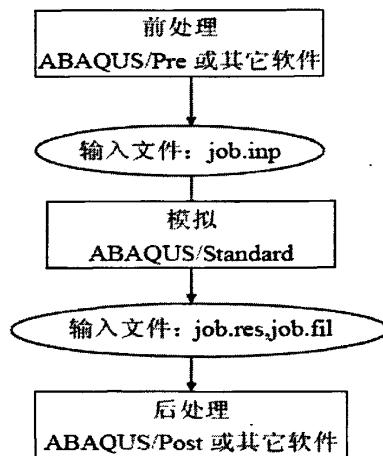


图 4-1 前处理、模拟、后处理的联系

4.1.2 ABAQUS 分析模型的组成

ABAQUS 模型通常由若干不同的部件组成，它们共同描述了所分析的物理问题和所得到的结果。一个分析模型至少要具有如下的信息：几何形状、单元特性、材料数据、荷载和边界条件、分析类型和输出要求。

(1) 几何形状

有限单元和节点定义了 ABAQUS 要模拟的物理结构的基本几何形状。每一个单元都代表了结构的离散部分，许多单元依次相连就组成了结构，单元之间通过公共节点彼此相互连结，模型的几何形状由节点坐标和节点所属单元的联结所确定。模型中所有的单元和节点的集成称为网格。通常，网格只是实际结构几何形状的近似表达。

网格中单元类型、形状、位置和单元的数量都会影响模拟计算的结果。网格的密度越高（在网格中单元数量越大），计算结果就越精确。

随着网格密度增加，分析结果会收敛到唯一解，但用于分析计算所需的时间也会增加。通常，数值解是所模拟的物理问题的近似解答，近似的程度取决于模型的几何形状、材料特性、边界条件和载荷对物理问题的仿真程度。

（2）单元特性

ABAQUS 拥有广泛的单元选择范围，其中许多单元的几何形状不能完全由它们的节点坐标来定义。例如，复合材料壳的叠层或工字型截面梁的尺度划分就不能通过单元节点来定义。这些附加的几何数据由单元的物理特性定义，且对于定义模型整体的几何形状是非常必要的。

（3）材料数据

对于所有单元必须确定其材料特性，然而高质量的材料数据是很难得到的，尤其是对于一些复杂的材料模型。ABAQUS 计算结果的有效性受材料数据的准确程度和范围的限制。

（4）加载和边界条件

加载使结构变形和产生应力。大部分加载的形式包括：

- 点载荷
- 表面载荷
- 体力，如重力
- 热载荷

边界条件是约束模型的某一部分保持固定不变（零位移）或移动规定量的位移（非零位移）。在静态分析中需要足够的边界条件以防止模型在任意方向上的刚体移动；否则，在计算过程中求解器将会发生问题而使模拟过程过早结束。在计算过程中一旦查出求解器发生了问题，ABAQUS 将发出错误信息，非常重要的一件事情是，用户要知道如何解释这些 ABAQUS 发出的错误信息。如在静态应力分析时看见警告信息“numerical singularity”（数值奇异）或“zero pivot”（主

元素为零), 必须检查模型是否全部或部分地缺少限制刚体平动或转动的约束。

(5) 分析类型

大多数模拟问题的类型是静态分析, 即在外载作用下获得结构的长期响应。在有些情况下, 可能令人感兴趣的是加载结构的动态响应: 例如, 在结构部件上突然加载的影响, 像冲击载荷的发生, 或在地震时建筑物的响应。

ABAQUS 可以实现许多不同类型的模拟, 但是这本指南只涵盖两种最一般的分析类型: 静态和动态的应力分析。

(6) 输出要求

ABAQUS 的模拟计算过程会产生大量的输出数据。为了避免占用大量的磁盘空间, 用户可限制输出数据的数量, 只要它能说明问题的结果即可。

4.1.3 ABAQUS 建模

ABAQUS 有限元的建模流程, 如图 4-2。

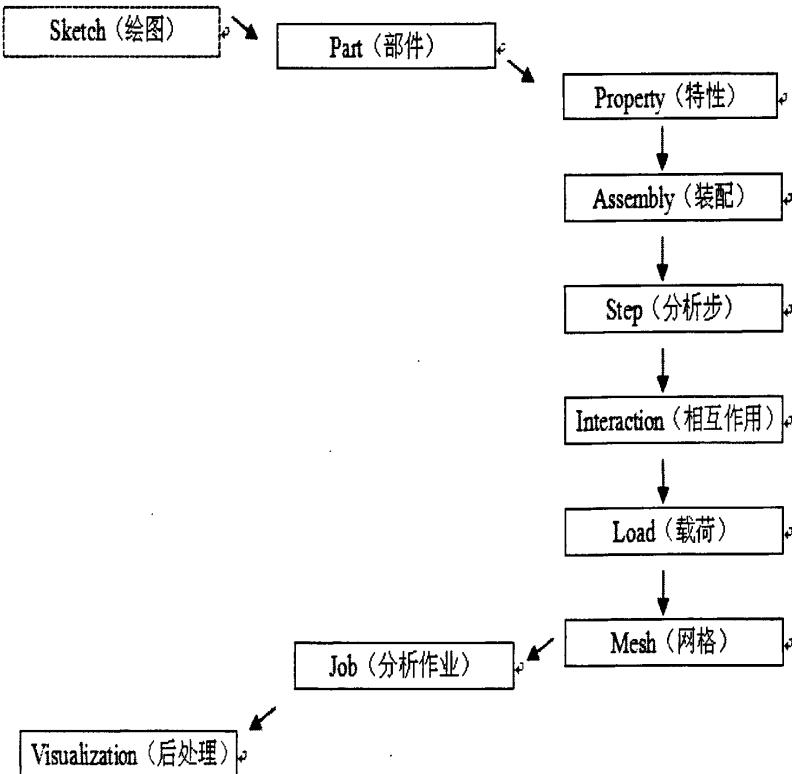


图 4-2 ABAQUS 的建模流程图

4.2 有限元分析

为了获得裂纹尖端（或缺口）附近的应力应变场，使用大型有限元软件 ABAQUS6.5-1 对三点弯（C3PB）与四点弯（N4PB）两种弯曲试样进行了三维有限元分析。

4.2.1 C3PB 有限元分析

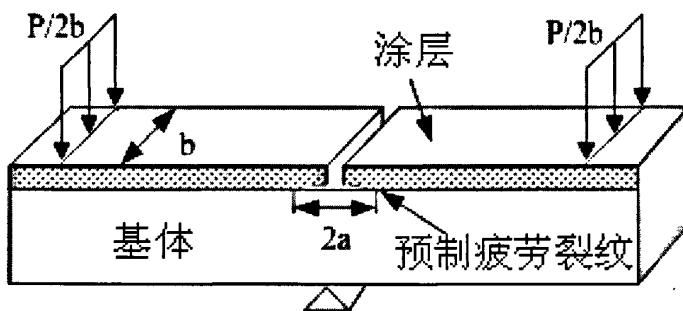


图 4-3 带预制疲劳裂纹的三点弯曲试样（C3PB）

带预制疲劳裂纹的三点弯曲式样（C3PB），如图 4-3。由于三点弯曲试样及界面裂纹的对称性，故对三点弯试样取 1/4 试样进行建模。

(1) 在 Part 功能模块中，通过绘图来完成部件的创建。见图 4-4。

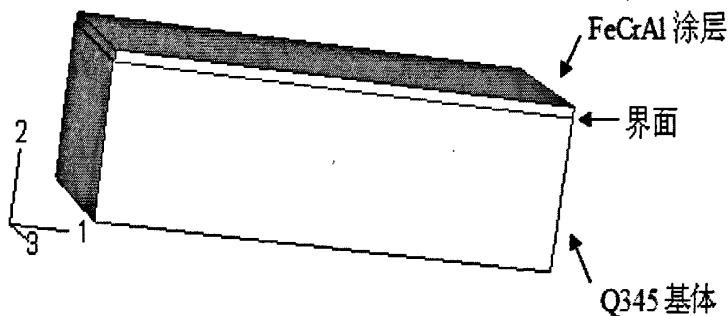


图 4-4 创建的部件

(2) 在 Property 功能模块中，来创建材料和截面属性。输入下面表格中的力学性能参数，见表 4-1。4-1(a)为 FeCrAl 涂层的力学性能参数，4-1(b)为 Q345 钢基体的力学性能参数。

表 4-1(a) FeCrAl 涂层力学性能参数

	弹性模量(MPa)	泊松比	屈服应力(MPa)	塑性应变
FeCrAl 涂层	50000	0.25	4902	0.0
			4902	0.1

表 4-1(b) Q345 钢基体力学性能参数

	弹性模量(MPa)	泊松比	屈服应力(MPa)	塑性应变
Q345 钢 基体	206000	0.3	380.4	0.0
			446.32	0.01815
			502.67	0.03265
			551.48	0.05065
			585.97	0.06935
			613.31	0.09055
			635.82	0.11415
			656.33	0.14225
			676.47	0.1880
			680.05	0.20841

(3) 在 Assembly 功能模块下, 来装配部件。虽然在创建部件过程中只有一个部件产生, 但这步也是不能省略的。选择创建独立实体 (independent instance), 这样可以直接对独立实体划分网格。

(4) 在 Step 功能模块下, 点击 Step Manager, 建立分析步骤。后面的载荷和约束条件都要通过分析步来实现; 点击 Field Output Manager, 选择输出的场变量, 如应力、应变场; 点击 History Output Manager, 选择输出的历史变量, 这里为裂纹尖端附近区域的 J 积分值。

(5) 在 Interaction 功能模块中, 点击 Special 菜单下的 Crack 选项, 来定义断裂面、裂纹尖端及裂纹扩展方向, 见图 4-5。在界面上线性裂纹左侧为模拟的预制疲劳裂纹。

(6) 在 Load 功能模块中, 点击 Load Manager 来在每个分析步中加载, 加载位置为基体一侧的压头位置, 施加的载荷为三点弯曲试验中得到的界面裂纹开裂时的临界载荷 (取 P_c 大小的 1/4)。点击 Constrain Boundary Manager 来施加约束条件, 在模型的的左边界侧面施加 X 方向的对称约束; 在模型的宽度方向一侧施加 Z 方向的对称约束; 在涂层面的跨距点位置, 施加 Y 方向上的位移约束。见图 4-6。

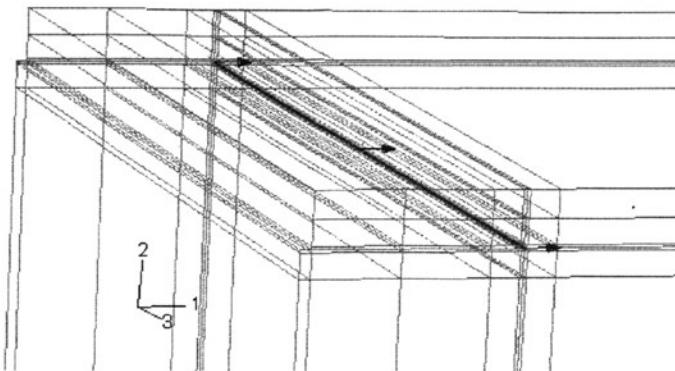


图 4-5 C3PB 的断裂面、裂纹尖端及裂纹扩展方向

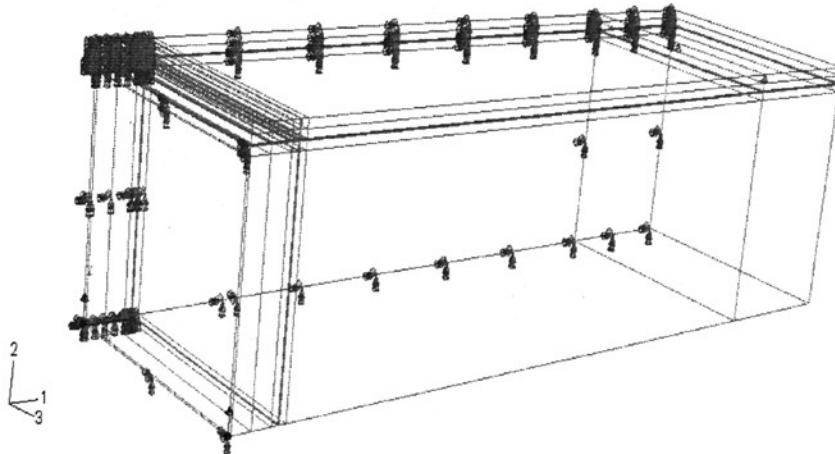


图 4-6 C3PB 的加载及约束

(7) 在 Mesh 功能模块中, 采用 8 节点六面体减缩积分单元 (C3D8R), 每个单元有 8 个积分点。网格划分如图 4-7 所示, 在界面裂纹尖端附近和界面两侧附近的区域网格划分精细, 在远离界面和裂纹尖端的地方网格划分稀疏。将试样 1/2 厚度划分 15 层, 各层厚度依次为 (从边界面到对称面排列): 0.260、0.292、0.328、0.368、0.412、0.463、0.519、0.582、0.653、0.733、0.822、0.922、1.034、1.160、1.302。

围绕裂纹尖端一个小长方形的区域 ($0.6\text{mm} \times 0.6\text{mm}$) 得到更精细的划分, 环绕裂纹尖端的第一层单元是四面体单元, 采用 1/4 节点单元, 用来模拟该处的应力奇异性, 如图 4-8。细化网格的最小单元尺寸为: $0.030 \times 0.030 \times 0.260$ 。

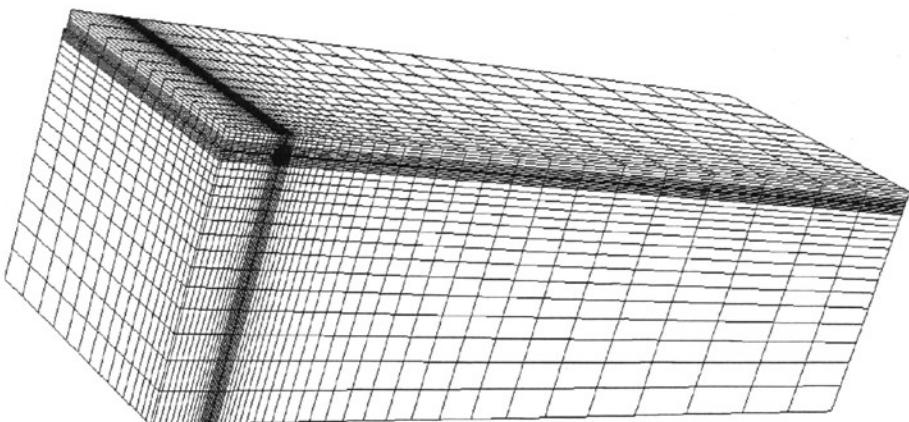


图 4-7 C3PB 的整体 1/4 模型网格

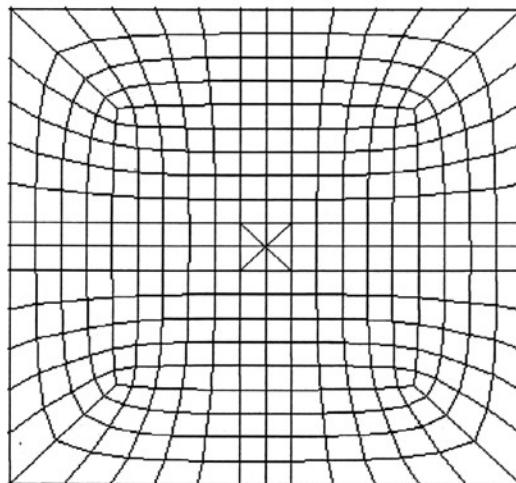


图 4-8 C3PB 的裂纹尖端区域网格

(8) 进入 Job 功能模块，点击 Job Manager，创建分析文件；点击 Submit，提交分析作业；点击 Monitor，可以监控分析作业的运行状态，动态显示分析过程中出现的警告和错误信息。在 Job Manager 窗口中，Status 标签下显示 Completed，即为分析过程结束。可进入后处理模块，进行操作。

(9) 进入 Visualization 功能模块，可对有限元分析后的数据进行后处理。例如，可以导出模型在每个载荷步下的应力、应变文件，也可以得到应力场、应变场的云图等。

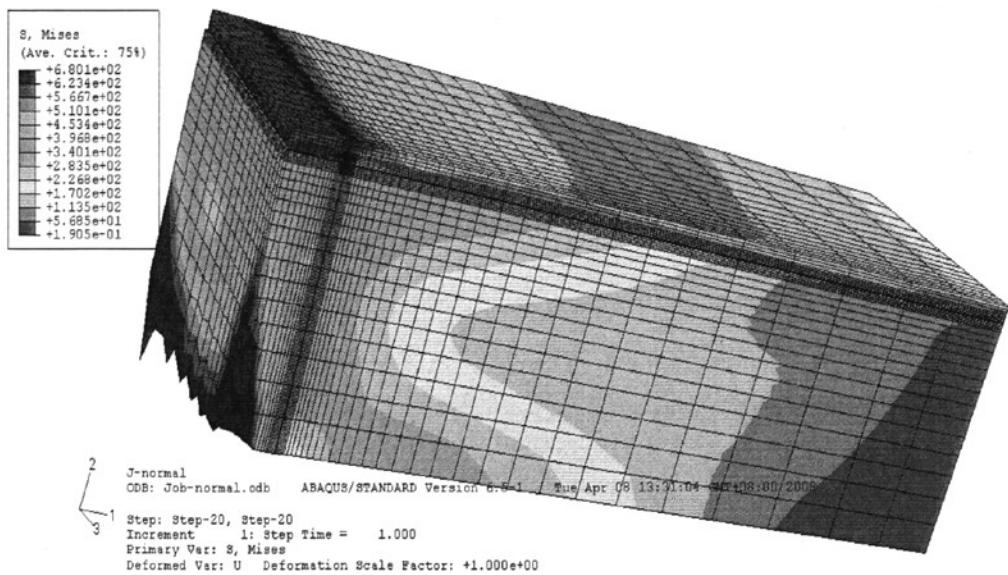


图 4-9 C3PB 的 1/4 模型 Mises 有效应力场云图

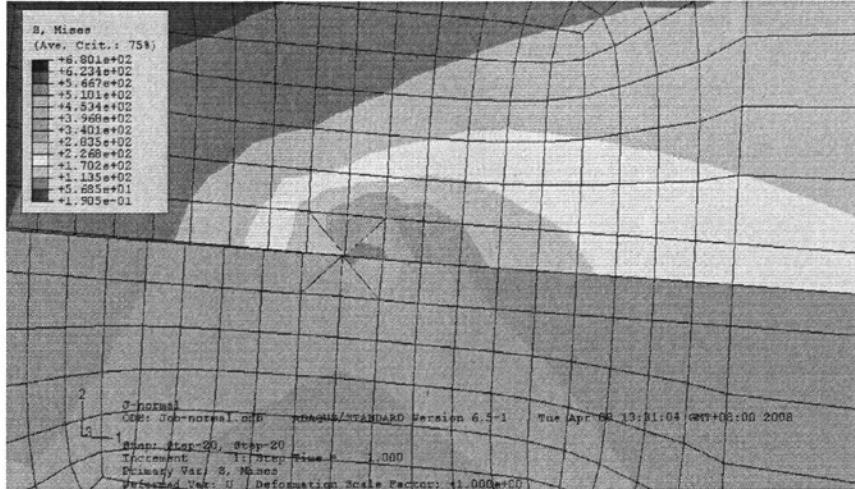


图 4-10 C3PB 的裂纹尖端区域的 Mises 有效应力场云图

图 4-9 为 C3PB 的 1/4 模型整体 Mises 有效应力场云图, 图 4-10 为 C3PB 的裂纹尖端区域的 Mises 有效应力场云图。可以看出, C3PB 试样发生了一定的塑性变形; 裂纹尖端附近区域应力很大, 具有奇异性。

4.2.2 N4PB 有限元分析

带缺口的四点弯曲式样 (N4PB)，如图 4-11。由于四点弯曲试样及缺口的对称性，故对四点弯试样也取 1/4 试样进行建模。

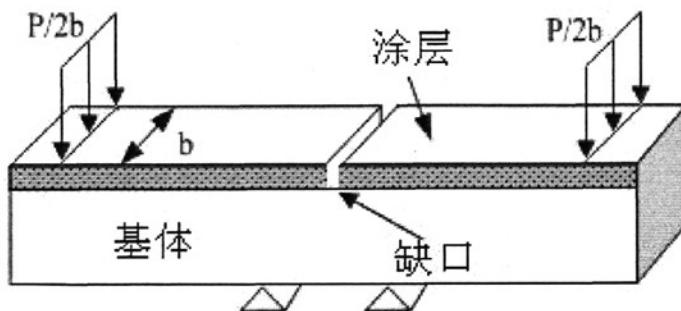


图 4-11 带缺口的四点弯曲试样 (N4PB)

N4PB 的模型建立与分析与 C3PB 基本相同，区别在于步骤 (5) Interaction 功能模块、(6) Load 功能模块、(7) Mesh 功能模块。

在 N4PB 的模型建立的过程中，由于无预制疲劳裂纹，无需对预制裂纹进行定义，所以省略对 Interaction 功能模块操作。

Load 功能模块中，四点弯曲的加载位置与三点弯曲不同，见图 4-12。

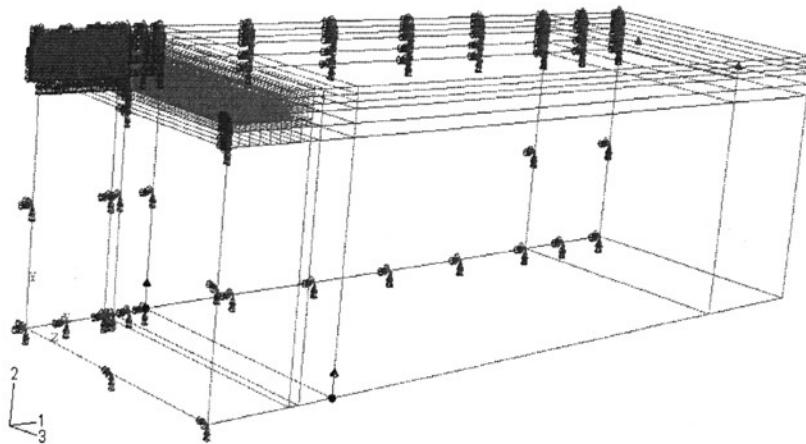


图 4-12 N4PB 的加载及约束

由于四点弯曲试样及缺口的对称性，故对四点弯试样均取 1/4 试样进行建模。采用 8 节点等参六面体减缩积分单元（C3D8R），每个单元有 8 个积分点。网格划分如图 4-13 所示，共有 10360 个节点，8860 个单元。在缺口附近和界面两侧附近的区域网格划分精细，在远离界面和或缺口的地方网格划分稀疏。将试样 1/2 厚度划分 10 层，各层厚度依次为（从边界面到对称面排列）：0.387、0.463、0.554、0.662、0.792、0.947、1.119、1.368、1.620、1.937。

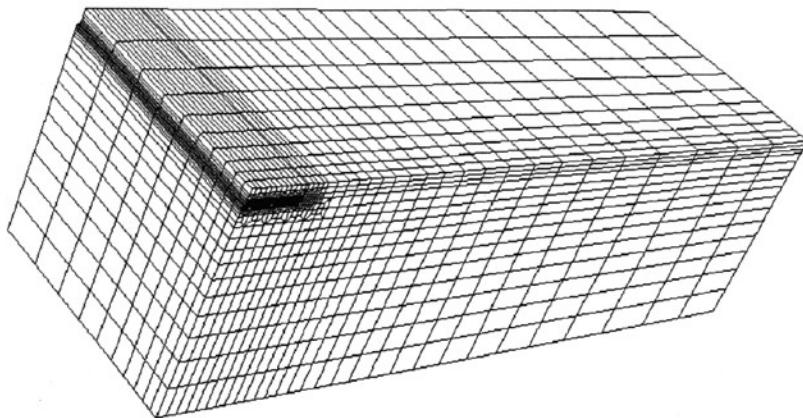


图 4-13 N4PB 的整体 1/4 模型网格

缺口区域附近的网格划分方法与三点弯曲带预制裂纹的裂纹尖端区域附近的网格划分方法不同。围绕缺口附近一个小长方形的区域（ $0.4\text{mm} \times 2.2\text{mm}$ ）得到更精细的划分，如图 4-14。细化网格的最小单元尺寸为： $0.050 \times 0.050 \times 0.387$ 。

图 4-14 N4PB 的缺口区域网格

34

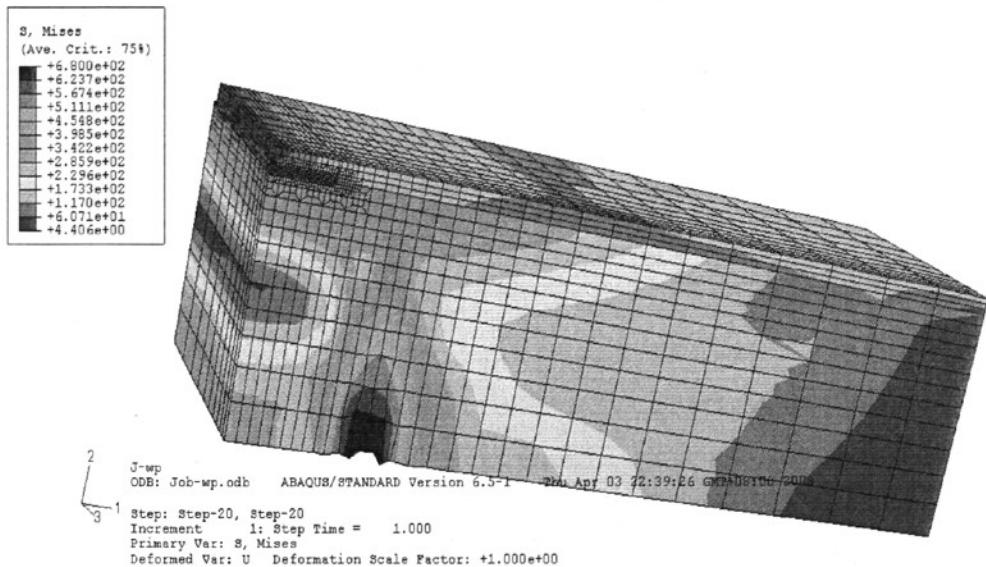


图 4-15 N4PB 的 1/4 模型整体 Mises 有效应力场云图

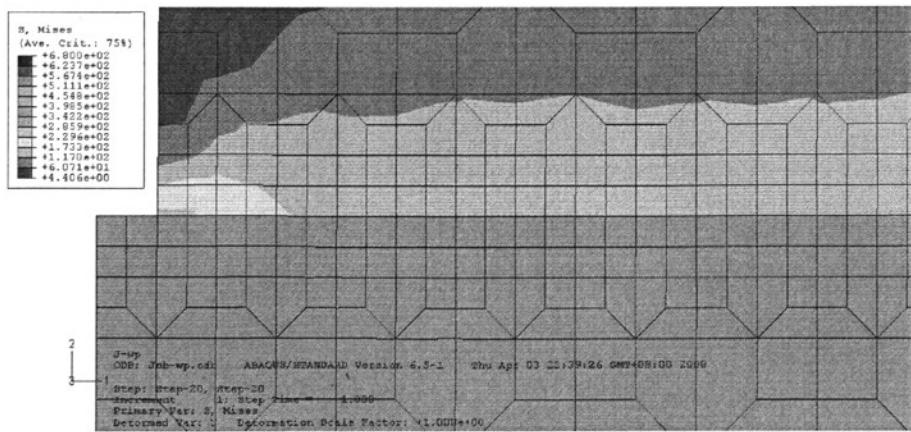


图 4-16 N4PB 的缺口附近区域 Mises 有效应力场云图

图 4-15 为 N4PB 的 1/4 模型整体 Mises 有效应力场云图, 图 4-16 为 N4PB 的缺口附近区域的 Mises 有效应力场云图。可以看出, N4PB 试样发生了一定的塑性; 但是 N4PB 缺口附近的 Mises 有效应力没有 C3PB 裂纹尖端的 Mises 有效应力大。

4.3 界面裂纹 J 积分有效性讨论

在材料科学和工程结构强度的分析研究中，应力强度因子与能量释放率是两个重要指标。对于线弹性材料，J积分与能量释放率等价。并且，J积分不仅适用于线弹性，还适合于非线性材料^[7]。在均质介质中，围绕裂纹尖端J积分与路径无关的性质和该积分的应用及物理意义的解释，已经被Rice^[40]和Hutchinson^[41]等人所证明和讨论。

三维条件下，J积分的回路积分定义已经不再适用，目前最常用的是虚拟裂纹扩展法，该方法计算简单，精度很高，不同路径的一致性也很好，而且容易推广到三维情况。虚拟裂纹扩展法是由Parks^[42]和Hellen^[43]分别提出的，它们在本质上都是通过假定裂纹有一个虚扩展，计算裂纹扩展前后的势能变化（即能量释放率）来达到目的。目前，采用虚拟裂纹扩展法计算J积分已经成为人们普遍使用的求解方法，著名的ABAQUS结构分析软件中，已经包括虚拟裂纹扩展法，使其成为求解J积分的标准算法。国内雷和荣等人^[44]，杨新岐等人^[45]也对三维能量释放率虚拟裂纹扩展算法进行了研究，印证了该方法的有效性。

4.3.1 虚拟裂纹扩展法的原理

J积分是通过裂纹扩展的能量释放率来定义的。对于一个裂纹体，假设虚拟裂纹扩展距离为 $\lambda(s)$ ，则能量释放率为：

$$J = \int_A \lambda(s) n \cdot H \cdot q dA \quad (4-1)$$

这里， dA 是沿一个环绕裂纹尖端或裂纹前沿、将要消失的小管状表面上的一个表面单元， n 是 dA 的外法线方向， q 是局部的虚拟裂纹扩展方向， H 以下面公式给出：

$$H = \left(W_I - \sigma \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \right) \quad (4-2)$$

这里，对于弹性材料行为， W 是弹性应变能；对于弹塑性或弹-粘塑性材料行为， W 是弹性应变能密度与塑性耗散能之和，也代表“等效弹性材料”中的应变能。由此，J积分仅适用于弹塑性材料的单调加载。

通过考虑一个有切线的前沿的裂纹，可以将J积分扩展到三维情况，如图 4-17 所示。局部的虚拟裂纹扩展方向同样由 q 给出， q 垂直于局部裂纹前沿并位于裂纹面上。当 $r \rightarrow 0$ 时，路径无关的条件适用于在 x_1-x_2 平面（该平面在 s 处垂直于裂纹前沿）上的任何围线。所以，平面内J积分可以被扩展，来代表沿着裂纹前沿逐点的能量释放率：

$$J(s) = \lim_{\Gamma \rightarrow 0} \int_{\Gamma} n \cdot H \cdot q d\Gamma \quad (4-3)$$

对于三维裂纹平面内虚拟裂扩展 $\lambda(s)$, 能量释放率为:

$$\bar{J} = \int_L J(s) \lambda(s) ds = \lim_{\Gamma \rightarrow 0} \int_A \lambda(s) n \cdot H \cdot q dA \quad (4-4)$$

这里, L 是裂纹前沿, dA 是沿一个环绕裂纹尖端或裂纹前沿、将要消失的小管状表面上的一个表面单元 (例如, $dA=dsd\Gamma$), n 是 dA 的外法线方向。

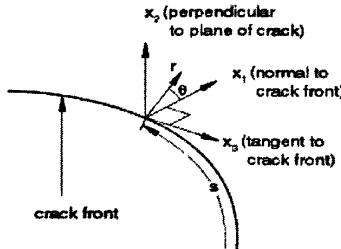


图 4-17 裂纹前沿上一点s处的局部笛卡尔坐标系的定义 (裂纹在x₁-x₃平面上)

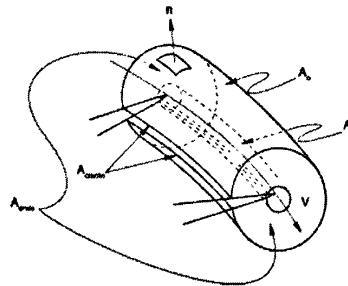


图 4-18 包围裂纹前沿的域的体积 (由表面 Ao 、 At 、 $Aends$ 和 $Acracks$ 围成)

\bar{J} 可以通过域积分方法计算得到。首先, 通过引入一个封闭的轮廓表面 Ao , 外表面 At , 端表面 $Aends$ (在裂纹前沿的端部, 当裂纹前沿形成封闭回路时, $Aends$ 消失), 和裂纹面 $Acracks$ (如图 4-18 所示), 将表面积分转化为一个体积分。

可以看到 $A=Ao+At+Aends+Acracks$ 围成另一个封闭的体 V 。权函数 \bar{q} 被定义为: 在面 Ao 上的值为 0, 在面 At 上为 $\bar{q}=\lambda(s)q$ 。认为面积 A 内的 \bar{q} 在这些值之间平缓的变化。在 $Aends$ 端表面上, 与表面不相切。所以, 我们可以重写公式(4-4)为:

$$\bar{J} = - \iint_A m \cdot H \cdot \bar{q} dA - \int_{A_{ends} + A_{cracks}} t \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \cdot \bar{q} dA \quad (4-5)$$

这里, m 是 A 的外法线方向 (在表面 At 上 $m=-n$) , 在表面 $Aends$ 和裂纹面 $Acracks$ 上, $t=m \cdot \sigma$ 是表面上的表面拉力。

使用散度理论，我们可以得到：

$$\bar{J} = - \int \left[H : \frac{\partial \bar{q}}{\partial x} + \left(f : \frac{\partial u}{\partial x} - \sigma : \frac{\partial \varepsilon^h}{\partial x} \right) \cdot \bar{q} \right] dV - \int_{A_{ends} + A_{tracks}} t \cdot \frac{\partial u}{\partial x} \cdot \bar{q} dA \quad (4-6)$$

利用有限元分析结果，对上式进行积分即可得到 J 积分的值。

4.3.2 界面裂纹 J 积分的守恒原理

在均质介质中，围绕裂纹尖端 J 积分与路径无关，即为 J 积分的守恒性。另外，只有 J 积分具有守恒性，才能将 J 积分做为断裂参量进行断裂分析。王利民等人^[46] 曾讨论过界面裂纹尖端 J 积分的守恒性，并通过数值方法进行了验证。

在二维条件下，对于无体力的单一均质材料，无论本构关系是线弹性还是非线性的，其介质内的应力可以表示为：

$$\sigma_{ij} = \partial W / \partial \varepsilon_{ij} \quad (4-7)$$

式中， W 是变形能密度。满足以上关系式的介质有下面 J 积分的定义式：

$$J = \int W dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \quad (4-8)$$

该积分在无奇异点的域内沿任一闭合回路的积分值为零，也就是均质介质中任何围绕裂纹尖端的 J 积分是守恒的，是与积分路径无关的。

若考虑具有界面裂纹的两相介质，其材料标号分别为 1# 和 2#，如图 4-19 所示。分别研究围绕裂纹尖端的三种围线 $\Gamma_1 = \overline{ABDGFEA}$ ， $\Gamma_2 = \overline{A^*E^*F^*GDB^*A^*}$ 和 $\Gamma = \Gamma_1 + \Gamma_2$ 。由于回路 Γ_1 与回路 Γ_2 不穿过界面，由 J 积分在单一均质介质中的守恒性原理可知，其回路上的 J 积分为零。即有：

$$J_{\Gamma_1} = J_{\Gamma_2} = 0 \quad (4-9)$$

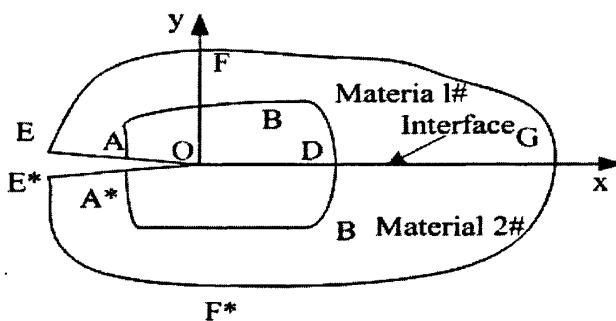


图 4-19 双介质界面裂纹尖端的 J 积分路径

当 Γ 穿越界面的回路线时, 由图 4-19 可知:

$$J_{\Gamma} = J_{\Gamma_1} + J_{\Gamma_2} + J_{DG} + J_{GD} \quad (4-10)$$

设界面以上变量均带符号“+”, 界面以下变量均带符号“-”, 因为在几何界面上有 $dy=0$, 而 Y 方向上的应力和位移均都连续, 故有:

$$T_y^+ = -T_y^-, \quad u_y^+ = -u_y^- \quad (4-11)$$

同时考虑到沿 DG 与 GD 间积分的方向性, 故:

$$J_{\Gamma} = 0 - \int_{DG} W^+ dy + \int_{DG} T_y^+ \frac{\partial u_y^+}{\partial x} dx - \int_{GD} W^- dy + \int_{GD} T_y^- \frac{\partial u_y^-}{\partial x} dx = 0 \quad (4-12)$$

这样就证明了具有界面裂纹的双相材料系统围绕裂纹尖端的 J 积分与路径无关的性质。

4.3.3 传统单一断裂参量 J 积分的有效性讨论

使用 4.2 中的有限元分析结果, 计算的 C3PB 的八个试样的界面裂纹尖端的 J 积分值见表 4-2。临界载荷 P_c 与 J 积分关系见图 4-20。

表 4-2 界面裂纹尖端的 J 积分

试样编号	1	2	3	4	5	6	7	8
临界载荷:Pc (N)	8368	8384	8440	8472	8688	8696	9000	9472
J 积分值(N/m)	0.92	1.01	1.04	1.06	1.20	1.22	1.45	2.01

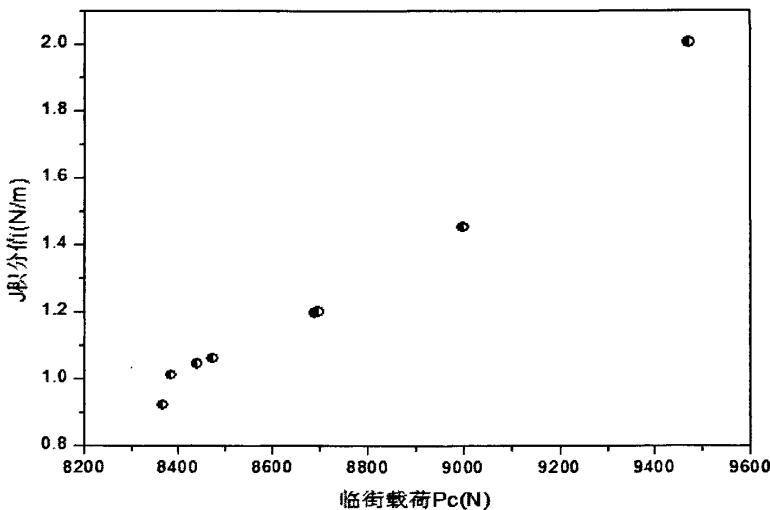


图 4-20 临界载荷 P_c 与 J 积分关系

按照断裂力学理论，传统的材料断裂参量 (J_{IC}) 是材料的属性，是一个常数。对于涂层与基体系统而言，由于涂层及涂层与基体的界面上随机分布着大量的气孔、夹杂物、未熔颗粒等微观缺陷，而界面断裂一般是由微观缺陷的断裂引起，且断裂的随机性较大，所以发生断裂时的临界载荷分散较大。由图 4-20 可以也看出，八个弯曲试样发生界面断裂时的 J 积分值分散很大。在这种情况下，使用单一断裂参量 J 积分来评价界面断裂是不适合的。

由于涂层及涂层与基体的界面上微观缺陷分布的随机性，对这些微观缺陷进行统计处理更为合理，所以基于概率断裂力学的局部法更适合用来评价涂层/基体系统的结构完整性。

4.4 威布尔双参数局部法评定 FeCrAl/Q345 涂层界面断裂的应用

根据局部法，若两种不同几何形式的试样威布尔应力相同，则这两类试样应具有相同的断裂概率，由此可以由一种几何形式试样的断裂数据对另一种几何形式试样的断裂行为进行预测。前面已经提到，威布尔参数 m 和 σ_u 是材料性能，而与几何形式和加载方式无关。由此，这些参数可以用来评价其他形式试样的断裂载荷分布。

4.4.1 威布尔参数的求解方法

采用的估算参数的步骤如流程图 4-21 所示。这种方法通过式 (2-25) 求概率分布参数 m 和 σ_u 。令 $P_{fem}(\sigma_w)$ 、 $P_{exp}(\sigma_w)$ 分别代表从有限元分析和通过断裂试验得到的相应的应力状态下威布尔应力 σ_w 的分布。通过假定 $P_{fem}(\sigma_w)$ 和 $P_{exp}(\sigma_w)$ 有相同的分布，校准过程就变成了决定一系列参数 $\{m, \sigma_u\}$ 使其满足这个条件的过程。

下面介绍了估算威布尔参数的步骤。为简单起见，用界面裂纹尖端的 J 积分代表载荷水平。

(1) 有限元分析

通过对带预制疲劳裂纹三点弯曲实验 (C3PB) 的数值分析，我们可以获得必要的应力应变场，并可计算试样界面裂纹尖端的 J 积分，由此可以确定特定的载荷水平（此处用 J 积分表示）下断裂控制区的尺寸。通过试验得到的界面裂纹的断裂韧性数据用来估计断裂时相应的威布尔应力值，这些值是求解界面威布尔参数的基础。

(2) 初始化威布尔参数

给定 m 的初始值(记为 m_0), 建立有限元模型中载荷水平 J 积分和测试试样的威布尔应力之间的联系, 记为 $(\sigma_w)_{FEM} = F(J, m)$ 。

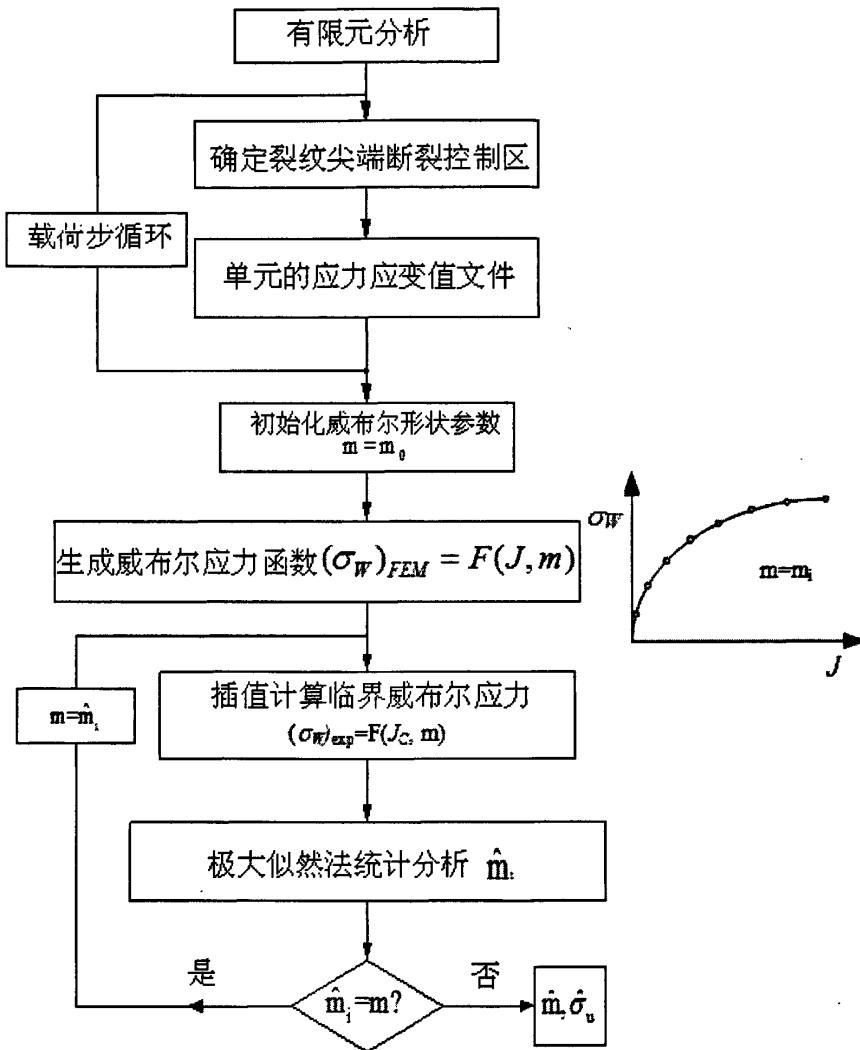


图 4-21 估算威布尔参数的流程图

(3) 生成威布尔应力函数

在每一个特定的载荷水平下, 通过对方程(2-24)进行数值积分, 建立 $(\sigma_w)_{FEM}=F(J, m)$ 函数关系。

(4) 确定断裂时临界威布尔应力

根据上步中得出的 J 积分和 σ_w 间的关系，将 J_C （临界载荷下的 J 积分，临界载荷由断裂力学试验获得，即界面裂纹起裂时的载荷）下代入 $F(J, m)$ ，即 $(\sigma_w)_{exp} = F(J_C, m)$ ，从而能够计算对应每个试样断裂韧性值 J_C 的临界威布尔应力，记为 $(\sigma_w)_{exp}$ 。不过，并不是直接用公式 $F(J, m)$ 进行计算，而是采用抛物线内插法得到 $F(J_C, m)$ 。

(5) 估计威布尔形状参数

$(\sigma_w)_{exp}$ 定义了 $P_{exp}(\sigma_w)$ 分布的统计样本，这种分布的统计分析服从威布尔参数的新估计 \hat{m}_i （我们主要是想估算形状参数 m ，所以尺度参数 σ_u 不必在每次迭代中都进行计算，只是在最后收敛后才计算）。通常采用极大似然法进行参数估计。

(6) 检查收敛性

若 $m_i \neq m_{i-1}$ ，则令 $m = m_i$ ，重复第(2)步以后的过程，直至 $m_i = m_{i-1}$ 为止（一般 $\left| \frac{\hat{m}_i - \hat{m}_{i-1}}{\hat{m}_i} \right| < 10^{-6}$ 可作为迭代终止条件， i 为迭代次数， \hat{m}_i 为第 i 次迭代的 \hat{m} 值）。

本文采用本节中介绍的界面威布尔参数估计的方法和步骤，针对涂层/基体系统的界面断裂问题编制了威布尔参数估计程序，将该程序用于对涂层/基体系统的安全评定中。

4.4.2 威布尔参数估计中的关键问题

(1) 断裂控制区的定义

这里，我们研究的断裂控制区是严格意义上的界面。在复杂的应力条件下，界面裂纹尖端附近的基体会发生一定的塑性变形，这时断裂控制区的长度要由界面一侧基体材料是否达到屈服来决定，这就需要通过屈服准则来判断。在各种屈服准则中最常用的是 Von Mises 屈服准则，即当 $\sigma_{vm} > \sigma_s$ 时，材料发生屈服，其中 σ_{vm} 为 Mises 应力， σ_s 为材料单轴拉伸屈服强度。Mises 应力与最大主应力的关系为：

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (4-1)$$

其中， $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为最大应力。

可以使用裂纹前端塑性变形区作为断裂控制区，即 $\sigma_{vm} > \lambda \sigma_s$ ，这种定义通过局部塑性流动直接与微观裂纹的形成相联系，这里 λ 常取 0.9。

试样断裂控制区的长度确定，以 C3PB 为例。从 ABAQUS 分析文件中导出

该区域边界附近单元的 Mises 有效应力文件, 利用 fortran 编写的程序, 找出具体的 $\sigma_{vm} > \lambda\sigma_s$, 即 $\sigma_{vm} > 0.9 \times 380.4 = 342.36$ (MPa) 单元, 确定断裂控制区的具体位置。

(2) 曲线拟合模型

拟合数值分析得到的威布尔应力(σ_w)_{FEM}与载荷参数J积分的关系曲线有许多方法, 通常可以采用多段线性插值多项式进行拟合。可以通过下面两个模型来得出威布尔应力与载荷参数的函数联系^[23]。

$$\text{模型 1 } \ln y = a_1 + a_2 \ln x + a_3 \ln^2 x$$

$$\text{模型 2 } y = a_1 x^{a_2}$$

(3) 参数估计方法

一般认为极大似然法能很容易计算出有效的参数估计。极大似然估计常常能够满足参数推断某些最优准则, 随着观察数目(样本尺寸)的增加渐近无偏性、渐近有效性增加。当可用的观察的样本数目较小时, 极大似然法对样本数据较为敏感, 偏差较大(8~20 个样本值时偏差约为 20%~7%)。但是它们可以通过无偏估计来简单校正。

设 N 为发生界面断裂的试件总数, $\sigma_{w,j}$ 为第 j 个试件的解理断裂的临界威布尔应力, $f_{\sigma_{w,j}}$ 为第 i 个试件发生解理断裂的概率, 则界面发生断裂的概率密度函数为:

$$f_{\sigma_{w,j}}(\sigma_{w,j}) = \left(\frac{m}{\sigma_u} \right) \left(\frac{\sigma_{w,j}}{\sigma_u} \right)^m \exp \left[- \left(\frac{\sigma_{w,j}}{\sigma_u} \right)^m \right] \quad (4-2)$$

令其对数似然函数为零, 从而解出 m 和 σ_u 极大似然解为:

$$\begin{cases} \hat{m} = \frac{N}{\sum_{j=1}^N \left[\left(\frac{\sigma_{w,j}}{\hat{\sigma}_u} \right)^{\hat{m}} \ln \left(\frac{\sigma_{w,j}}{\hat{\sigma}_u} \right) \right] - \sum_{j=1}^n \ln \left(\frac{\sigma_{w,j}}{\hat{\sigma}_u} \right)} \\ \hat{\sigma}_u = \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sigma_{w,j}^m \right)^{\frac{1}{\hat{m}}} \end{cases} \quad (4-3)$$

先给定一个初值 m, 进行迭代计算, 即可求出 \hat{m} 和 $\hat{\sigma}_u$ 。

4.4.3 基于局部法由预制裂纹试样预测缺口试样的临界断裂载荷

基于局部法理论可以由一种试样形式的试验数据来预测另一种试样形式的试验数据。令 $P_{fem}(\sigma_w)$ 、 $P_{exp}(\sigma_w)$ 分别代表从有限元分析和通过断裂试验得到的相应应力状态下威布尔应力 σ_w 的分布，对于计算出的参数 m 和 σ_u ， $P_{fem}(\sigma_w)$ 和 $P_{exp}(\sigma_w)$ 具有相同的分布，即 $P_{fem}(\sigma_w) = P_{exp}(\sigma_w)$ ，在这个基础上可以建立不同几何形式试样断裂韧性分布的估计程序。

该方法是先通过一个给定几何形式试样 (C3PB 带预制裂纹的三点弯曲试样) 的威布尔应力 σ_w 的分布，利用极大似然法计算出材料的威布尔参数 m 和 σ_u ，从而可以做出 N4PB 带预制缺口的四点弯曲试样的威布尔应力 σ_w 的失效概率预测曲线。另外，在有限元分析时可得到 N4PB 带预制缺口的四点弯曲试样的界面断裂载荷与威布尔应力 σ_w 的关系。在 $P_{fem}(\sigma_w) = P_{exp}(\sigma_w)$ 的基础上，通过图 4-22 演示的方法可以预测试样 N4PB 的临界断裂载荷试验数据的分布。

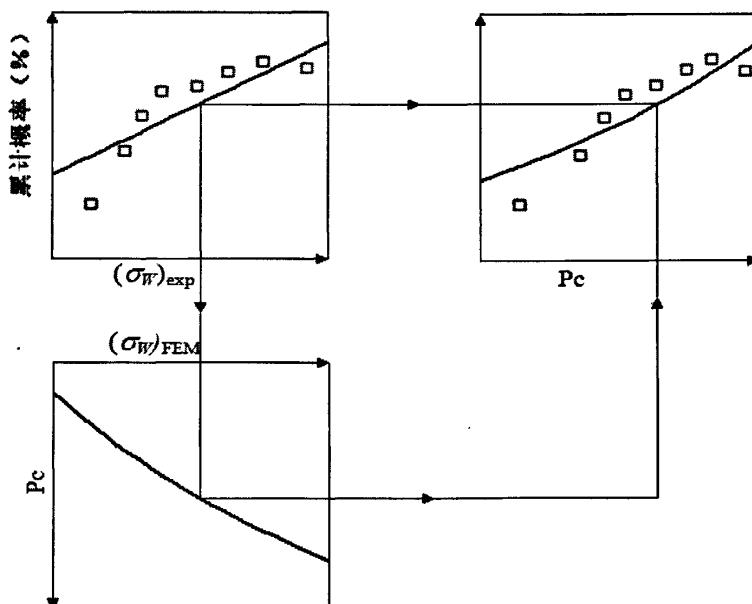


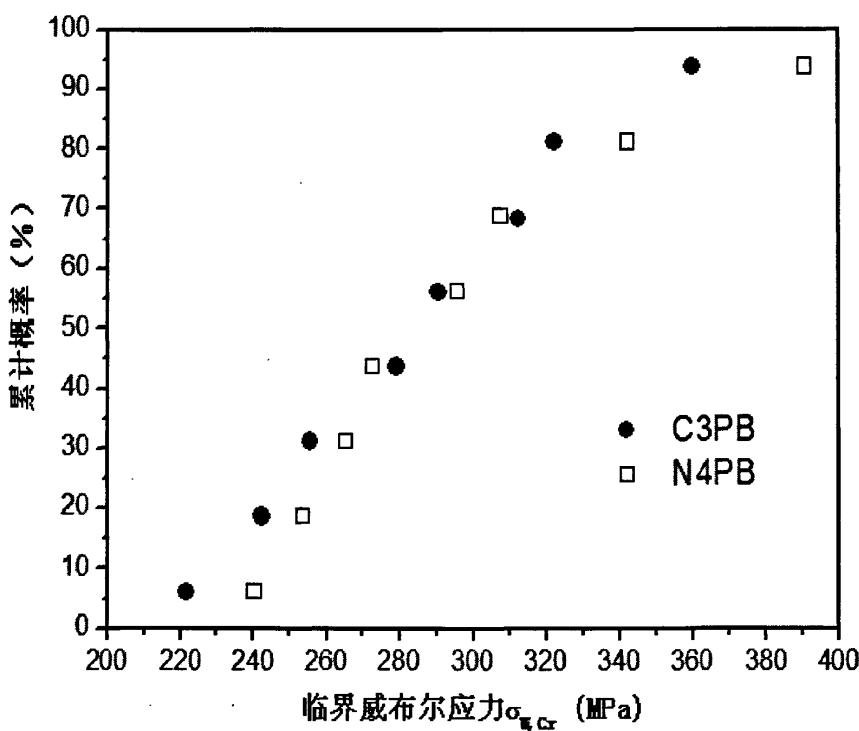
图 4-22 不同几何形式试样的临界断裂载荷分布预测流程图

在求解威布尔参数与应力时，利用的是单元平均应力准则，提取断裂控制区内界面两侧单元的应力 (ABAQUS 有限元软件分析后的临近界面的涂层与基体单元的应力值)。得到的威布尔参数为： $m=17.63$ ， $\sigma_u=313.71$ 。C3PB 试样与 N4PB 试样的临界威布尔应力 $\sigma_{w,Cr}$ ，见表 4-3。C3PB 试样与 N4PB 试样的临界威布尔应

力 $\sigma_{w,Cr}$ 的累计分布, 见图 4-23。图中的点表示试验测得的该种试样发生界面断裂时的威布尔应力, 其累积失效频率 F 通过将全部该种试样的威布尔应力按从小到大的顺序排列, 并使用公式 $F=(i-0.5)/N$ 获得。这里, i 表示试样的序号, N 是全部该种试样的数目。表明临界威布尔应力 $\sigma_{w,Cr}$ 从分布上看基本不受试件形状和加载方式影响, 因此利用威布尔应力评定界面的结合强度是可行的。

表 4-3 C3PB试样与N4PB试样的临界威布尔应力 $\sigma_{w,Cr}$

试样编号	C3PB的临界威布尔应力 $\sigma_{w,Cr}$ (MPa)	N4PB的临界威布尔应力 $\sigma_{w,Cr}$ (MPa)
1	221.40	240.22
2	242.21	253.64
3	255.48	265.36
4	279.07	272.57
5	290.38	295.51
6	312.34	307.62
7	321.96	342.16
8	359.83	390.55

图 4-23 C3PB试样与N4PB试样的临界威布尔应力 $\sigma_{w,Cr}$ 的累计分布

涂层系统的断裂强度失效概率分布公式 (2-25) 经变换有:

$$1 - H_f = \exp \left[-\left(\frac{\sigma_w}{\sigma_u} \right)^m \right] \quad (4-4)$$

式 (4-4) 两边取对数, 经变换有:

$$\ln \left(\frac{1}{1 - H_f} \right) = \left(\frac{\sigma_w}{\sigma_u} \right)^m \quad (4-5)$$

式 (4-5) 两边再取对数,, 有:

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - H_f} \right) \right] = m \ln(\sigma_w) - m \ln(\sigma_u) \quad (4-6)$$

由 (4-6) 式可以看出, $\ln \{ \ln [1/(1 - H_f)] \}$ 和 $\ln(\sigma_w)$ 理论上存在一种线性关系。在利用预制裂纹试样 (C3PB) 的试验数据求出界面的威布尔分布参数m和 σ_u 后, 根据得到的 $m = 17.63$, $\sigma_u = 313.71$, 做出 N4PB 带预制缺口的四点弯曲试样的威布尔应力 σ_w 的失效概率预测曲线, 如图 4-24 中的直线。图 4-24 中的点表示试验测得的 N4PB 试样发生界面断裂时的临界威布尔应力, 其累积失效频率 F 通过将全部该种试样的威布尔应力按从小到大顺序排列, 并使用公式 $F = (i-0.5)/N$ 获得。这里, i 表示试样的序号, N 是全部该种试样的数目。

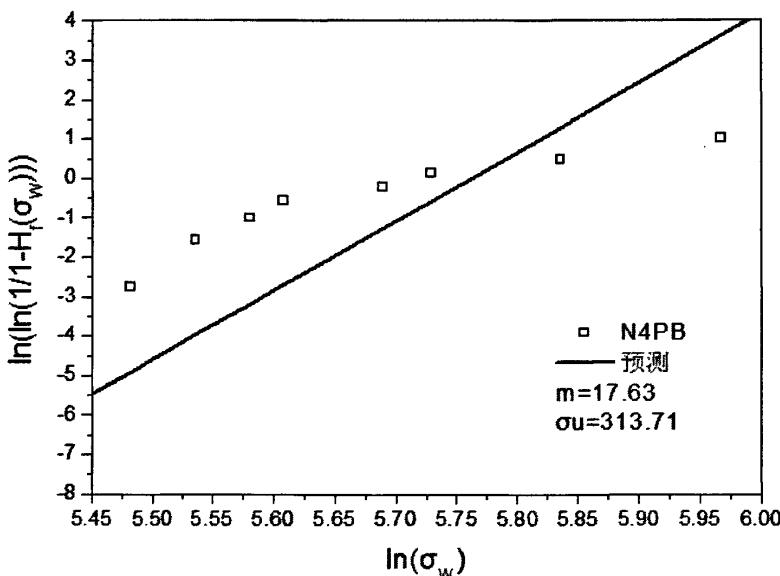


图 4-24 N4PB 试样威布尔应力 σ_w 的失效概率分布

在对缺口试样（N4PB）的有限元分析中，将试验中得到的最大的缺口试样临界断裂载荷作为施加的载荷，并在计算中分为许多个载荷步，由此可以从有限元分析结果中得到每个载荷水平下的应力、位移场。当断裂控制区确定后，可以根据公式（2-24）计算出在每个载荷水平下缺口试样的威布尔应力值，从而根据式（2-25）可以计算出每个载荷水平下试样的断裂强度。在ABAQUS有限元分析中，在每个载荷步下都有一个断裂载荷 P_c 对应的威布尔应力 σ_w ，将这些数据点提取出来，做出缺口试样（N4PB）发生界面断裂时多个载荷步下的威布尔应力 σ_w 对应的断裂载荷值 P_c 的曲线。如图 4-25。

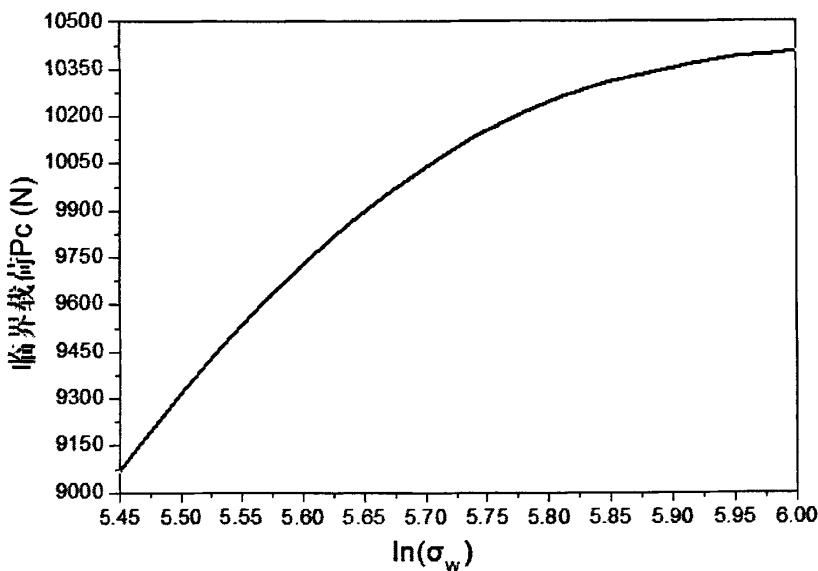


图 4-25 N4PB 试样威布尔应力 σ_w 与断裂载荷 P_c 之间的关系图

利用得到的图 4-24 N4PB 带预制缺口的四点弯曲试样的威布尔应力 σ_w 的失效概率预测曲线，图 4-25 缺口试样（N4PB）发生界面断裂时多个载荷步下的威布尔应力 σ_w 对应的断裂载荷值 P_c 的曲线，在 $P_{fem}(\sigma_w)=P_{exp}(\sigma_w)$ 的基础上，我们得到 N4PB 带预制缺口的试点弯曲试样的临界断裂载荷分布的预测曲线，如图 4-26。

图 4-26 中的点表示试验测得的该种试样发生界面断裂时的临界断裂载荷，其累积失效频率 F 通过将全部该种试样的临界载荷 P_c 按从小到大的顺序排列，并使用公式 $F=(i-0.5)/N$ 获得。这里， i 表示试样的序号， N 是全部该种试样的数目。图中粗实线代表对缺口试样发生界面断裂时临界断裂载荷值分布的预测曲线，图中虚线代表在 90% 置信度水平下的预测曲线。

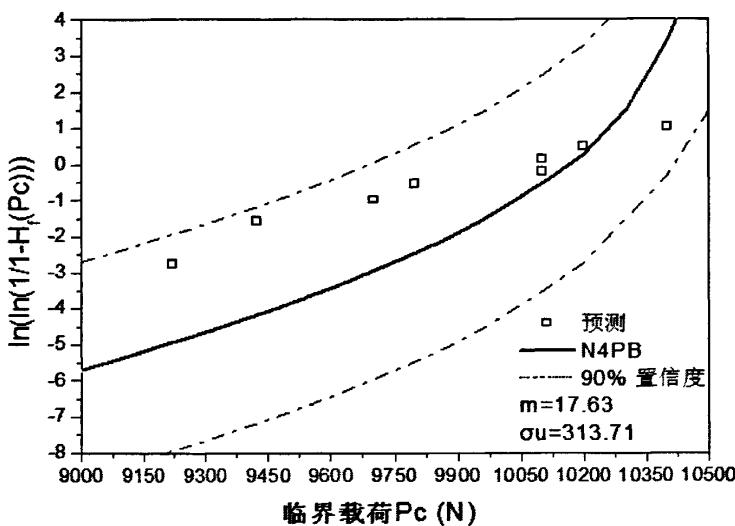


图 4-26 N4PB 试样的断裂载荷累计分布的预测

从图 4-26 中可以看出，基于局部法，对 N4PB 缺口试样的预测结果和试验数据吻合良好。

4.5 本实验涂层系统的断裂失效概率与 LX88A/Q345 涂层系统对比

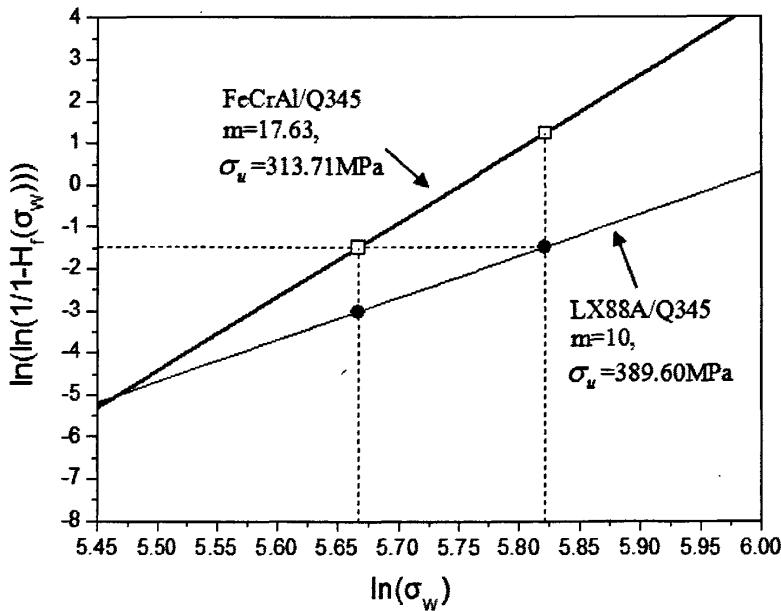


图 4-27 FeCrAl/Q345 与 LX88A/Q345 的断裂失效概率预测线

在徐的文中^[47]，研究的是LX88A/Q345 涂层系统，其中Q345 钢基体的成分与本实验中FeCrAl/ Q345 涂层系统的基体成分相同。测得LX88A/Q345 涂层系统的局部法参量 $m=10$ ， $\sigma_u=389.6\text{MPa}$ 。

由式 (4-6) 可知， $\ln\{\ln[1/(1-H_f)]\}$ 和 $\ln(\sigma_w)$ 理论上存在一种线性关系。根据本试验得到的FeCrAl/Q345 涂层系统的 m 和 σ_u ，与徐^[47]试验得到的LX88A/Q345 涂层系统的 m 和 σ_u ，可分别做出FeCrAl/Q345 涂层系统和LX88A/Q345 涂层系统的威布尔应力下的断裂失效概率预测线，如图 4-27。

由图 4-27 可以得出：

- (1) 在相同的断裂失效概率情况下，FeCrAl/Q345 涂层系统的威布尔应力 $\sigma_w(\text{FeCrAl})$ 小于LX88A/Q345 涂层系统的威布尔应力 $\sigma_w(\text{LX88A})$ 。由于威布尔应力是脆性断裂的驱动力，说明FeCrAl/Q345 涂层系统的抗裂能力要比LX88A/Q345 涂层系统差。
- (2) 在相同的威布尔应力 σ_w 的情况下，FeCrAl/Q345 涂层系统的断裂失效概率高于 LX88A/Q345 涂层系统的断裂失效概率。

第五章 结论

现今，表面工程已成为先进制造技术的重要组成部分，而作为表面工程中的一项重要技术热喷涂技术，是一种表面强化和表面改性技术，可使基本表面具有耐磨、耐蚀、耐高温氧化、电绝缘、隔热、防辐射、减磨和密封等性能；另外热喷涂技术还用于缺损部件的修复、高温耐磨等部件的预保护、功能涂层的制备等，可使工件获得所需要的尺寸和性能。由于涂层内部含有气孔、未熔颗粒、微裂纹等缺陷以及涂层颗粒与母材间的结合、粒子与粒子之间的结合属于机械嵌合等固有的特性，使得涂层的结合强度成为判定涂层适用性的重要标准之一。因此，对涂层及界面特性的了解和把握成为进一步扩大其工业应用的关键条件。本文从探讨涂层/基体系统完整性评定的方法出发，对传统断裂参量 J 积分在界面断裂问题中应用，以及基于局部法评定 FeCrAl/Q345 涂层系统的界面断裂行为等几个问题进行了研究，得出了以下结论：

(1) 对于涂层与基体系统而言，由于涂层及涂层与基体的界面上随机分布着大量的气孔、夹杂物、未熔颗粒等微观缺陷，而界面断裂一般是由微观缺陷的断裂引起，且断裂的随机性较大，所以发生断裂时的临界载荷分散较大。在这种情况下，使用单一断裂参量 J 积分来评价界面断裂是不适合的，对这些微观缺陷进行统计处理更为合理。

(2) 由于涂层及涂层与基体的界面上微观缺陷分布的随机性，所以基于概率断裂力学的局部法更适合用来评价涂层/基体系统的结构完整性。研究发现不同几何形式的试样在发生界面断裂时，在相同断裂概率下其威布尔应力基本上相同，并且基于预制裂纹试样的试验结果成功的预测了一种缺口试样断裂数据的分布。总之，基于局部法可以显著地减小断裂数据对几何形式和加载方式的依赖性，说明局部法可以用来描述双材料界面的断裂行为，并应用于对界面的完整性评定中。

(3) 在基体 Q345 钢成分相同情况下，FeCrAl/Q345 涂层系统的抗裂能力要比 LX88A/Q345 涂层系统差，FeCrAl/Q345 涂层系统的断裂失效概率要比 LX88A/Q345 涂层系统断裂失效概率高。

参考文献

- [1]徐滨士, 马世宁, 朱绍华, 等.表面工程与再制造工程的进展.中国表面工程, 2001, 14(1): 8-14.
- [2]李国英. 表面工程手册.北京: 机械工业出版社, 2004.3-5.
- [3]Vardelle M, Vardelle A, Leger A C, et al. Influence of Particle Parameters at Impact on Splat Formation and Solidification in Plasma Spraying Process. *J Thermal Spray Technology*, 1994, 4(1): 50-58.
- [4]Houben J M, Liempd G G. Metallurgical Interactions of Mo and Steel during Plasma Spraying . Proceedings of the 10th International Thermal Spray Conference. Germany: Germany Welding Society, 1983: 66-71.
- [5]高荣发. 热喷涂. 北京: 化学工业出版社, 1995: 1-3.
- [6]沈成康. 断裂力学. 上海: 同济大学出版社, 1996.
- [7]Hutchinson J W. Singular behavior at the end of a tensile crack in a hardening material. *Mech. Phys. Solids*, 1968, 16: 13-31.
- [8]Erdogan Fazil. Stress Distribution in a Nonhomogeneous elastic plane with cracks. *Transactions of the ASME*, 1963, 30: 232-236.
- [9]Rice J R, Sih G C. Plane problems of cracks in dissimilar media. *Transactions of the ASME*, 1965, 32: 418-423.
- [10]Comninou M. The interface crack. *Journal of applied mechanics. Transactions of the ASME*, 1977, 44(4): 631-636.
- [11]Comninou M. Interface crack with friction in the contact zone. *Journal of applied mechanics. Transactions of the ASME*, 1977, 44 (4): 780-781.
- [12]Comninou M, Schmueser D. The interface crack in a combined tension-compression and shear field. *Journal of applied mechanics. Transactions of the ASME*, 1979, 46(2): 345-348.
- [13]Rice J R. Elastic fracture mechanics concepts for interfacial cracks. *Journal of applied mechanics. Transactions of the ASME*, 1988, 55 (1): 98-103.
- [14]Thun G, Schneider G A, Bahr H-A et al. Toughness Anisotropy and Damage Behavior of Plasma Sprayed ZrO₂ Thermal Barrier Coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2000, 123(2-3): 147-158.
- [15]Chung H G.P, Swain M V, Mori T. Evaluation of the Strain Energy Release Rate for the Fracture of Titanium-porcelain Interfacial Bonding. *Biomaterials*. 1997, 18 (23): 1553-1557.
- [16]Moran B, Shih C F. A General Treatment of crack Tip Integrals. *International Journal of Fracture*, 1987, 35 (4): 295-310.

- [17]Moran B, Shih C F. Crack Tip and Associated Domain Integrals from Momentum and Energy Balance. *Engineering Fracture Mechanics*, 1987, 27 (6): 615-642.
- [18]Li F Z, Shih C F, Needleman A. A Comparison of Methods for Calculating Energy Release rates. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 25 (2): 405-421.
- [19]Shih C F, Moran B, Nakamura T. Energy Release Rate along a Three-dimensional Crack Front in a Thermally Stressed Body. *International Journal of Fracture*, 1986, 30 (2): 79-102.
- [20]Shih C F, Asaro R J. Elastic-plastic Analysis of Cracks on Bimaterial Interfaces: Part I-Small Scale Yielding. *Transactions of the ASME. Journal of Applied Mechanics*, 1988, 55(2): 299-316.
- [21]McClintock F A. ASTM STP 415, 1967. 170-180.
- [22]Beremin F M. A local criterion for cleavage fracture of a nuclear pressure vessel steel. *Metallurgical Transactions A (Physical Metallurgy and Materials Science)*, 1983, 14A (11): 2277-2287.
- [23]F. Minami, A. Bruckner-Foit, D. Munz et al. Estimation procedure for the Weibull parameters used in the local approach. *International Journal of Fracture*, 1992, 54(3): 197-210.
- [24]Ruggieri C, Minami F, Toyoda M. A statistical approach for fracture of brittle materials based on the Chain-of-Bundles model. *Transactions of the ASME. Journal of Applied Mechanic.*, 1995, 62(2): 320-328.
- [25]Ruggieri C, Dodds R H Jr. A transferability model for brittle fracture including constraint and ductile tearing effects: a probabilistic approach. *International Journal of Fracture*, 1996, 79(4): 309-340.
- [26]Ruggieri C, Dodds R H Jr. Probabilistic modeling of brittle fracture including 3-D effects on constraint loss and ductile tearing. *Journal de Physique IV (Colloque)*, 1996, 6(6): 353-362.
- [27]Ruggieri C, Dodds R H Jr. Numerical evaluation of probabilistic fracture parameters using WSTRESS. *Engineering Computations*, 1998, 15 (1): 49-73.
- [28]Ruggieri C. Probabilistic treatment of fracture using two failure models. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 1998, 13 (4): 309-319.
- [29]Gao X, Ruggieri C, R Dodds R H Jr. Calibration of Weibull stress parameters using fracture toughness data. *International Journal of Fracture*, 1998, 92 (2): 175-200.
- [30]Satoh S, Tsukamoto M, Minami F. et al. Evaluation of interface strength of plasma sprayed coatings by the local approach. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, v 3, *Materials Engineering*, 1996: 157-164.
- [31]Minami F, Satoh S, Tsukamoto M. Evaluation of interface strength of bonded dissimilar materials based on Weibull stress fracture criterion. *Mate*, 2000, 3-4: 67-72.

- [32]Chen Buo, Dillard D A. Numerical analysis of directionally unstable crack propagation in adhesively bonded joints. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38(38-39): 6907-6924.
- [33]Chen Buo, Dillard D A, Dillard J G et al. Crack path selection in adhesively bonded joints: the roles of external loads and specimen geometry. International Journal of Fracture, 2002, 114 (2): 167-190.
- [34]Chen Buo, Dillard D A, Dillard J G et al. Crack path selection in adhesively-bonded joints: The role of material property. Journal of Adhesion, 2001, 75 (4): 405-434.
- [35]Griffith A A. The theory of rupture. Proceedings of the first international congress for applied mechanics. Delft. 1924. 55-63.
- [36]Gumbel E J. Statistics of Extremes. Columbia University Press, New York, 1958.
- [37]Epstein B. Elements of the Theory of Extreme Values. Technometrics, 1960, 2: 27-41.
- [38]Courant R, John F. Introduction to calculus and analysis. 1965, Vol. I, John Wiley & Sons, Inc. New York.
- [39]Freudenthal A M. Statistical approach to brittle fracture. Fracture: An Advanced Treatise. Vol. II. H. Liebowitz, Ed., Academic Press, New York. 1968. 591-619.
- [40]Rice J R. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. Journal of Applied Mechanics, 1968, 35: 379-386.
- [41]Hutchinson J W. Singular behavior at the end of a tensile crack tip in a hardening material. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1968, 16(1): 13-31.
- [42]Parks D M. The virtual crack extension method for nonlinear material behaviour. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1977, 12(3): 353-364.
- [43]Hellen T K. On the method of virtual crack extensions. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1975, 9(1): 187-196.
- [44]雷和荣, 虞吉林. 虚裂纹扩展法计算J积分的研究. 中国科学技术大学学报, 1994, 24(2): 201-213.
- [45]杨新岐, 霍立兴, 张玉凤. 三维能量释放率虚拟裂纹扩展算法及工程应用. 天津大学学报, 1997, 30(1): 37-42.
- [46]王利民, 陈浩然. J 积分在多层介质中的守恒性和其应用. 应用数学和力学, 2001, 22 (10): 1097-1104.
- [47]徐连勇. 涂层/基体界面的断裂行为研究: [博士学位论文], 天津; 天津大学, 2006.

致 谢

本论文的工作是在我的导师荆洪阳教授的悉心指导下完成的，导师渊博的知识，严谨的治学态度，敏锐的洞察力，科学的工作方法和无私的敬业精神都给我留下了难以忘怀的印象，使我受益匪浅。在论文工作过程中，导师进行了精心的指导，付出了大量的心血和汗水。在此，谨向恩师致以最衷心的感谢和最诚挚的谢意。

在做论文期间，徐连勇老师对我的课题研究提出了不少宝贵意见，并给予细心指导，衷心感谢徐连勇老师在我硕士学习期间给予的关怀和帮助。

在实验室工作及撰写论文期间，周春亮、安俊超、李文亮、陈哲、何宾华、周辉等同学对我的论文研究工作给予了热情帮助，在此向他们表达我的感激之情。

同时衷心感谢全力支持我的家人，他们的关爱、理解和支持，使我能够在学校专心完成我的学业。

最后，向参加本文评审和答辩的老师们致以诚挚的谢意。