文章编号: 1671 - 5497(2006)03 - 0294 - 04

基体界面屈服强度和残余应力失配对界面裂纹扩展的影响

张国祥[1,2,3],陈光南[1],张 坤[1],罗耕星[1],李怀学[1,3]

(1. 中国科学院 力学研究所,北京 100080; 2. 山东理工大学 材料科学与工程学院,山东 淄博 255000; 3. 中国科学院 研究生院,北京 100049)

摘 要:对基体界面屈服强度和残余应力失配情况下的界面裂纹扩展机制进行了力学理论分析,并通过位错与裂纹的关系理论计算了界面裂纹尖端塑性区尺寸。结果表明:当界面裂纹由低强度区向高强度区扩展时,高强度区的残余压应力和屈服强度减少了裂纹尖端的塑性区长度和裂纹尖端张开位移,从而起到了抑制界面裂纹扩展的作用。

关键词:工程力学;界面裂纹;屈服强度;残余应力;失配;涂层/基体结构

中图分类号: O344.3 **文献标识码**: A

Effect of mismatch of yielding strength and residual stresses along substrate interface on interfacial crack propagation

Zhang Guo-xiang[1,2,3], Chen Guang-nan[1], Zhang Kun[1], Luo Geng-xing[1], Li Huai-xue[1,3]

(1. *Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing* 100080, *China*; 2. *Materials Science and Engineering School, Shandong University of Technology, Zibo* 255000, *China*; 3. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract: The mechanism of crack propagation at the interface between coating and substrate was analysed under the condition of yielding strength and residual stress mismatches along the interface. The dimension of plastic zone at the crack tips was numerically calculated using the correlative theory of dislocation and crack. Calculation results show that when the interfacial crack propagates from low strength zone to high strength zone, the residual compressive stress and yielding strength of the high strength zone lead to the reductions of the length of plastic zone and the opening displacement of crack tip. As a result the propagation of the crack at the interface is retarded.

Key words: engineering mechanics; interfacial crack; yield strength; residual stress; mismatch; coating/substrate structure

0 引 言

涂层从基体上剥落是影响涂层寿命的主要原因。为了增加抗剥落能力,往往采用功能梯度涂层[1]或在涂层和基体之间加粘结层形成层状涂层[2]。上述结构均属于在垂直界面方向上涂层与基体弹性或塑性失配的力学现象。文献[3-

收稿日期: 2005-08-20.
基金项目:国家自然科学基金资助项目(50471087).
作者简介:张国祥(1963-),男,副教授.研究方向:涂层破坏力学. E-mail: zgx20021@sina.com

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

6]研究了失配程度与表面裂纹或界面裂纹扩展之间的关系。针对某种特殊工况下的镀铬涂层,文献[7]提出了激光离散预处理基体表面提高铬层寿命的工艺方法。由于激光的离散强化,形成了一种基体表面残余应力和硬度周期性失配的涂层/基体新结构。该结构表面裂纹的出现与激光离散有关,并且在表面裂纹与界面交界处形成界面裂纹,界面裂纹由非激光处理区向激光处理区扩展[8]。

为了分析该类涂层/基体结构界面裂纹扩展的特点,作者根据硬度和屈服强度转化原理,将硬度用屈服强度表示。为此,将其实际结构表征为基体界面残余应力和屈服强度失配的涂层/基体力学问题。同时,利用连续位错函数与裂纹之间的关系理论,对简化力学模型的界面裂纹扩展特性进行了研究。

1　涂层/基体结构和裂纹特点

如图 1所示,在激光离散相变硬化处理的基体上镀铬,由于激光相变硬化的特点,形成了基体沿界面方向的屈服强度、残余应力周期性变化涂层/基体结构。图 2给出了经过热疲劳实验的铬层表面裂纹和界面裂纹形貌。表面裂纹出现在原始基体的铬层上,在表面裂纹与界面交界处,形成了由原始基体向激光处理区扩展的界面裂纹。

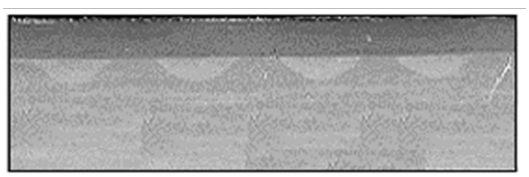

图 1　涂层/基体结构示意图

Fig 1　Sketch map of coating/substrate structure

图 2　表面裂纹和界面裂纹形貌

Fig 2　Surface and interfacial crack morphology

2　理论分析

根据上述实际结构和裂纹特点,作者采用如图 3所示的理论分析模型。该模型利用“剪、粘”研究裂纹,形成对称结构。实线部分为真实材料,虚线部分为与真实材料具有相同几何形状和力学性质的虚拟材料。Ⅰ代表低屈服强度和没有残余应力的材料区域,Ⅱ表示有高屈服强度并存在残余压应力的材料区域。对于实际激光离散处理的涂层/基体结构,Ⅰ、Ⅱ分别代表原始基体和激光处理区。a、e和 d分别表示裂纹中心到裂纹尖端、裂纹尖端塑性区端点的长度以及低强度区的半宽。由于模型结构的对称性,该模型计算值是其实际值的 4倍。

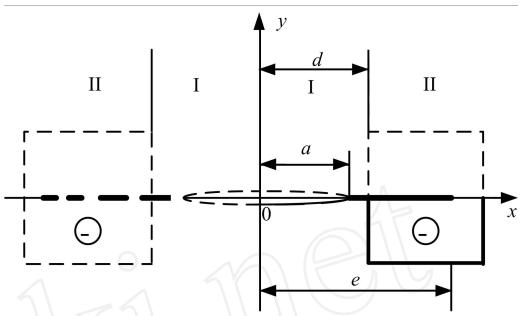

图 3　理论分析模型

Fig 3　Model of theoretical analysis

2 1　连续位错密度分布函数

根据连续位错密度分布函数与裂纹之间的关系[9],即在平行界面的外载荷、材料屈服强度和残余应力作用下,在裂纹和裂纹尖端塑性区内任一点处的位错应该与力保持平衡,因此在 $[-e, e]$区域内积分得:

$$B_2\int_{-e}^{-d}\frac{f(t)\,\mathrm{d}t}{t-x}+B_1\int_{-d}^{-a}\frac{f(t)\,\mathrm{d}t}{t-x}+B_1\int_{-a}^{a}\frac{f(t)\,\mathrm{d}t}{t-x}+B_1\int_{a}^{d}\frac{f(t)\,\mathrm{d}t}{t-x}+B_2\int_{d}^{e}\frac{f(t)\,\mathrm{d}t}{t-x}=P(x)+R(x)\quad(-e<x<e)\tag{1}$$

式中:$f(t)$为 x轴上任意一点的位错密度;B_1、B_2均为与弹性模量、泊松比、Burgers矢量有关的材料常数;$P(x)$、$R(x)$分别为作用力和材料的屈服强度二者的合力与残余应力。

为了求解方程(1),将其写成如下形式:

$$\int_{-e}^{e}\frac{F(t)\,\mathrm{d}t}{t-x}=P(x)+R(x)\tag{2}$$

式中:$F(t)$为规范位错密度分布函数,定义为:

$$F(t)=\begin{cases}B_1 f(t) & |t|<d\\ B_2 f(t) & d<|t|<e\end{cases}\tag{3}$$

一般情况下,$P(x)$是沿 x轴变化的。为了方便起见,作者假设 $P(x)$在材料Ⅰ、Ⅱ的裂纹区和塑性区是常数。根据结构特点,在材料Ⅱ区有残余

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

压应力,故令残余应力的分布如下:

$$R(x)=\begin{cases}0 & |x|<d\\ \sigma_R & d<|x|<e\end{cases} \tag{4}$$

式中:σ_R 为残余压应力。

求解方程(2)可得:

$$F(x)=\left(\frac{\sigma_{y2}-\sigma_{y1}}{\pi^2}\right)\times\left[\cosh^{-1}\left|\frac{e^2-dx}{e(d-x)}\right|-\cosh^{-1}\left|\frac{e^2+dx}{e(d+x)}\right|\right]+\frac{\sigma_{y1}}{\pi^2}\times\left[\cosh^{-1}\left|\frac{e^2-ax}{e(a-x)}\right|-\cosh^{-1}\left|\frac{e^2+ax}{e(x+a)}\right|\right]-\frac{\sigma_R}{\pi^2}\times\left[\cosh^{-1}\left|\frac{e^2-dx}{e(d-x)}\right|-\cosh^{-1}\left|\frac{e^2+dx}{e(d+x)}\right|\right]+\left\{\frac{\tau-\sigma_{y2}}{\pi^2\sqrt{e^2-x^2}}\left[\frac{\pi}{2}-\sin^{-1}\frac{d}{e}\right]\right\}+\frac{2\sigma_{y1}x}{\pi^2\sqrt{e^2-x^2}}\times\left[\sin^{-1}\frac{a}{e}+\left(\frac{\tau}{\sigma_{y1}}-1\right)\sin^{-1}\frac{d}{e}\right]+\frac{2\sigma_R x}{\pi^2\sqrt{e^2-x^2}}\left[\frac{\pi}{2}-\sin^{-1}\frac{d}{e}\right] \tag{5}$$

式中:σ_{y1}、σ_{y2}分别为低、高强度区的屈服强度;τ 为平行界面的外载荷。

2.2 裂纹尖端塑性区长度

由于裂纹尖端塑性区端点处的应力奇异性消失,可通过令式(5)的后三项等于零得到塑性区长度 r_p。裂纹尖端的塑性区长度由下式给出:

$$(\sigma_{y2}-\sigma_{y1})\sin^{-1}\frac{d}{e}+\sigma_{y1}\sin^{-1}\frac{a}{e}-\sigma_R\sin\frac{d}{e}+(\tau-\sigma_{y2}+\sigma_R)\frac{\pi}{2}=0 \tag{6}$$

对于给定的 a和 d,使用迭代法可从式(6)中求出 e,然后求出塑性区长度 r_p,$r_p=e-a$。根据模型假设,实际塑性区长度应为 $r_p/4$。

2.3 裂纹尖端张开位移

裂纹尖端($x=a$)张开位移可以表达为:

$$\delta_d=bN=b\int_a^e\frac{\sigma(x)\,dx}{A} \tag{7}$$

式中:N、b分别为塑性区的位错数和 Burgers矢量。

将式(5)带入式(7)中可得:

$$\sigma_d=\frac{b}{A}\left(\frac{\sigma_{y2}-\sigma_{y1}}{\pi^2}\right)\times\left[(d-a)\cosh^{-1}\left|\frac{e^2-da}{e(d-a)}\right|+(d+a)\cosh^{-1}\left|\frac{e^2+da}{e(d+a)}\right|\right]+\frac{2a\sigma_{y1}b}{\pi^2A}\ln\frac{d}{a}-\frac{\sigma_R}{\pi^2}\left[(d-a)\cosh^{-1}\left|\frac{e^2-da}{e(d-a)}\right|+(d+a)\cosh^{-1}\left|\frac{e^2+da}{e(d+a)}\right|\right] \tag{8}$$

对于该问题的 I型裂纹,Burgers矢量被选为用来产生 y方向的位移。例如,垂直裂纹面的刃位错。I型裂纹尖端的张开位移 σ_d可以由下式得出:

$$\sigma_d=\frac{4(1-\nu)}{\pi}\left(\frac{\sigma_{y2}-\sigma_{y1}}{\pi^2}\right)\times\left[(e-a)\cosh^{-1}\left|\frac{e^2-da}{e(d-a)}\right|+(d+a)\cosh^{-1}\left|\frac{e^2+da}{e(d+a)}\right|\right]+\frac{8a\sigma_{y1}(1-\nu)}{\pi E}\ln\frac{e}{a}-\frac{4\sigma_R(1-\nu)}{\pi E}\times\left[(d-a)\cosh^{-1}\left|\frac{e^2-da}{e(d-a)}\right|+(d+a)\cosh^{-1}\left|\frac{e^2+da}{e(d+a)}\right|\right] \tag{9}$$

由模型假设可知,实际裂纹尖端的张开位移为 $\delta_d/4$。

3 结果与讨论

为了分析基体界面屈服强度失配对界面裂纹扩展的影响,引用了焊接理论中的焊缝与基体材料屈服强度失配系数[10] M 来表示基体界面屈服强度失配程度,其表达式为:

$$M=\sigma_{y2}/\sigma_{y1} \tag{10}$$

3.1 残余压应力对裂纹尖端塑性区长度及张开位移的影响

取 $\sigma_{y1}=748$ MPa、$\sigma_{y2}=1186$ MPa、$\tau=200$ MPa、$a=0.15$ mm、$d=0.25$ mm,计算结果如图 4所示。计算结果表明,随着材料 II内的残余压应力的增加,塑性区的长度减小,这与双材料垂直界面的裂纹情况具有一样的趋势。随着材料 II内的残余压应力的增加,裂纹尖端张开位移下降,起到了屏蔽裂纹作用。

3.2 屈服强度失配对裂纹尖端塑性区长度及张开位移的影响

在上述参数设定的情况下,取残余压应力 $\sigma_R=-100$ MPa,通过改变 M 分析屈服强度失配的影响(如图 5所示)。由计算曲线可知,随着材料 II屈服强度的提高,塑性区的长度也在减小,与残余压应力的作用结果相同。随着材料 II的屈服

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

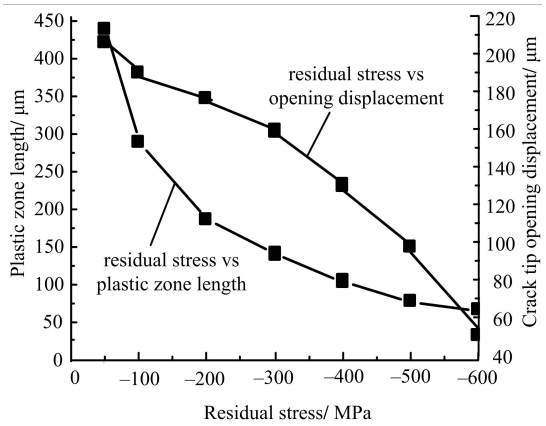

图 4　残余压应力与裂纹尖端塑性区长度及张开位移的关系

Fig. 4　Relationship between residual stress vs crack tip plastic zone length and opening displacement

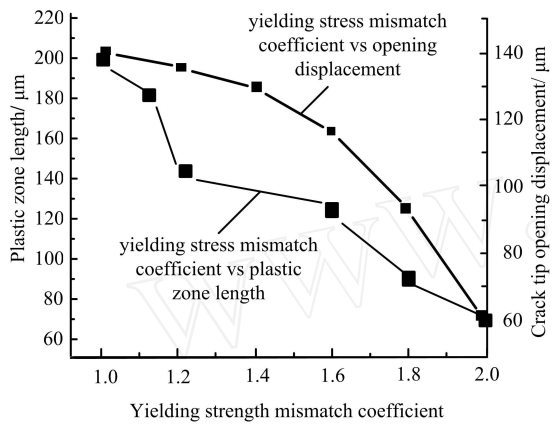

图 5　屈服强度失配系数与裂纹尖端塑性区长度及张开位移的关系

Fig. 5　Relationship between yielding strength mismatch coefficient vs crack tip plastic zone length and opening displacement

强度增加,裂纹尖端张开位移下降,与残余压应力同样起到屏蔽作用。

4　结　论

(1) 对于基体界面的屈服强度和残余应力不匹配的涂层/基体结构,当界面裂纹由低强度区向高强度区扩展时,高强度区的残余压应力和屈服强度减少了裂纹尖端的塑性区长度和裂纹尖端张开位移,具有减少界面裂纹驱动力的作用。

(2) 对于镀铬的涂层/基体结构,激光离散处理基体表面能够提高铬层寿命,其强化区延缓了界面裂纹的扩展是主要因素之一。

(3) 裂纹尖端和界面的距离对塑性区尺寸影响与残余应力和屈服强度失配系数对塑性区尺寸影响的主次问题是将来要开展的工作。

参考文献:

[1] Suresh S[美], Mortensen A[瑞]. 功能梯度材料基础——制备以及热机械行为[M]. 李守新 等译. 北京:国防工业出版社, 2000: 1-6.

[2] Yuan Huang, Chen Jian. Copmuational analysis of thin coating layer failure using a cohesive model and gradient plasticity[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2003, 70: 1929-1942.

[3] Romeo Alberto, Ballarini Roberto. A cohesive zone model for cracks terminating at a bimaterial interface[J]. J Solids Structures, 1997, 34(11): 1307-1326.

[4] Wappling D, Gunnars J, Stahle P. Crack growth across a strength mismatched biomaterial interface[J]. International Journal of Fracture, 1998, 89: 223-243.

[5] Chandra N, Li H, Shet C, Ghoenem H. Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interface[J]. International Journal of Solids and Structure, 2002, 39: 2827-2855.

[6] Tergarrd V. Effect of plasticity on cleavage crack growth resisitance at an interface[J]. Journal of the Mechanics and Plysics of Solids, 1999, 47: 1095-1112.

[7] 陈光南,罗耕星,张坤,徐向阳,沈还. 提高镀铬身管寿命的激光强化新方法[J]. 兵工学报, 2003, 24(增刊): 6-10.
Chen Guang-nan, Luo Geng-xing, Zhang Kun, Xu Xiang-yang, Shen Huan. A new method for improving service life of chrome-plated gun barrels by laser strengthing[J]. Acta Armamentaria, 2003, 24(sup): 6-10.

[8] 胡莹,张坤,陈光南,吴臣武. Matlab在Cr涂层微裂纹组态分析中的应用[J]. 金属热处理, 2005, 30(增刊): 161-163.
Hu Ying, Zhang Kun, Chen Guang-nan, Wu Chen-wu. Matlab used in analyzing the microcracks of Cr coating[J]. Heat Treatment Metals, 2005, 30(sup): 161-163.

[9] Lardner R W. Mathematical theory of dislocation and fracture[M]. Canada: University of Toronto Press, 1974: 150-176.

[10] Kim Yun-Jae, Schwalbe Karl-Heinz. Mismatch effect on plastic yield loads in idealized weldment II heat affected zone cracks[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2001, 68(2): 183-199.

(责任编辑　陈永杰)

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net