

刘淑红,郑宝瑞,胡青华.地震荷载作用下带裂纹重载铁路隧道的动态断裂[J].地震工程学报,2018,40(1):1-5.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.001

LIU Shuhong,ZHENG Baorui,HU Qinghua.Dynamic Fracture of Heavy Haul Railway Tunnels with Cracks Under Seismic Loads[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(1):1-5.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.001

地震荷载作用下带裂纹重载铁路隧道的动态断裂^①

刘淑红^{1,2}, 郑宝瑞³, 胡青华¹

(1. 石家庄铁道大学工程力学系, 河北 石家庄 050043; 2. 河北省大型结构健康诊断与控制实验室, 河北 石家庄 050043;
3. 河北建设勘察研究院有限公司, 河北 石家庄 050031)

摘要: 在隧道的施工和运营中,隧道衬砌不可避免会产生裂纹。裂纹和地震荷载的相互作用将加剧隧道的破坏,因此研究带裂纹隧道衬砌地震荷载作用下的破坏具有重要的意义。为了证明本文二维有限元数值模拟计算结果的正确性,首先用相互作用积分的方法计算动载作用下的静态裂纹,并与解析解进行比对,发现二者的吻合性很好。计算结果表明相互作用积分法可以用来精确地计算动载作用下带裂纹结构的动应力强度因子。用这种经过验证的方法来计算带裂纹重载铁路隧道衬砌的动应力强度因子和动承载力安全系数,可以看出在地震荷载作用下,I型裂纹的动应力强度因子在隧道结构的安全中起控制作用。当裂纹的长度大于某特定值时,隧道处于很危险的状态。

关键词: 隧道; 裂纹; 地震荷载; 动应力强度因子; 有限元

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)01-0001-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.01.001

Dynamic Fracture of Heavy Haul Railway Tunnels with Cracks Under Seismic Loads

LIU Shuhong^{1,2}, ZHENG Baorui³, HU Qinghua¹

(1. Department of Engineering Mechanics, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, Hebei, China;

2. The Key Laboratory for Health Monitoring and Control of Large Structures of Hebei Province, Shijiazhuang 050043, Hebei, China;

3. Hebei Research institute of Construction & Geotechnical Investigation Co., Ltd., Shijiazhuang 050031, Hebei, China)

Abstract: Tunnel damage is aggravated by the interaction between cracks and earthquake loading. Thus, the study of the dynamic fracture of tunnel lining with cracks under earthquake loading is of great importance. In this study, the correctness of the simulated results was calculated by the two-dimensional finite element method, while the dynamic stress intensity factors for a plate with a stationary crack under dynamic loads were first computed by the interaction integral method. The numerical results were then compared to the analytical solutions, with whom they were found to be in good agreement. The computational results showed that the interaction integral method can be used to obtain accurate dynamic stress intensity factors for cracked structures under dynamic loads. Subsequently, the method was used to calculate the dynamic stress intensity factors and the bearing capacity safety factors for the lining of heavy haul railway tunnels with

① 收稿日期: 2016-11-25

基金项目: 河北省自然科学基金(A2015210089); 河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2015101)

作者简介: 刘淑红(1968—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事结构和材料的力学性能研究。E-mail: liushu@stdu.edu.cn。

cracks. The Xixian heavy haul railway tunnel located in the south-central area of the Shanxi Province was considered as a case study, with additional consideration given to twelve working conditions. A 2D finite element model was established in order to compute the dynamic fracture of a tunnel with cracks under earthquake loading. The results showed that under the seismic loads, the dynamic stress intensity factors of mode I cracks controlled the safety of the tunnel structure. Thereby, if the length of the crack was greater than a certain value, the tunnel was assessed as dangerous.

Key words: tunnel; crack; seismic load; dynamic stress intensity factor; finite element method

0 引言

近期几次严重的地震使得地震荷载作用下隧道结构的动响应引起了广泛的重视。由于结构和地震荷载的复杂性,很难得到解析解,因此解决此类问题时多采用数值计算的方法。如运用有限元软件,建立二维平面应变模型模拟隧道横断面,分析地震工况下隧道的稳定性及动应力、位移、应变的变化规律^[1-3]。建立三维有限元模型研究隧道衬砌结构和围岩在地震波和水相互作用下动响应^[4-7]。丁祖德等^[8]和刘淑红等^[9]分别运用有限差分法和有限元法,建立了隧道-围岩相互作用的动力计算模型,分析了高速铁路列车振动荷载作用下隧道结构的动力响应。不同静载荷作用下,LIU等^[10-11]采用复变函数的方法研究了不同长度的孔边裂纹的静态断裂问题。有限元法中的相互作用积分法最早用来计算静态的、均匀介质的应力强度因子,后来扩展到计算非均匀介质的动态效应^[12-13]。KUMAR等^[14]提出了在扩展有限元中用相互作用积分法计算带裂纹结构的动态断裂。

在隧道的施工和运营中,隧道衬砌不可避免会产生裂纹,在裂纹和地震荷载的作用下,隧道的破坏将会加剧。如前所述,目前文献多为研究地震波作用下隧道结构及围岩的动响应,研究带裂纹隧道衬砌在动载作用下的动态断裂问题则很少见,尤其是最新发展的重载铁路隧道。因此,本文通过有限元软件 ANSYS 建立二维有限元模型,研究地震荷载作用下带裂纹重载铁路隧道衬砌的动态断裂,得到动应力强度因子和动承载力安全系数,以期评估隧道的安全性。

1 模型的建立

本研究以晋中南隰县重载铁路隧道为例。隧道呈马蹄形,宽 11.37 m,高 11.13 m,埋深为 23.92 m。为消除边界效应,模型长取 105 m,高 70 m。二维有限元模型及网格划分如图 1。模型由围岩、衬砌、

锚杆和道床组成。围岩认为均匀的Ⅳ级,采用 Drucker-Prager 理想的弹塑性本构关系。其他材料采用理想的弹性本构关系。围岩、衬砌和道床、锚杆分别采用 4 结点平面单元、8 结点平面单元和杆单元。顶面的边界是自由的,下边界和两侧边界采用黏弹性人工边界^[9]。图 2 给出了带裂纹隧道衬砌的网格图,本文根据不同的裂纹长度和位置的组合,考虑了 12 种工况:边裂纹长度分别是 5、15、25 及 35 cm,位置分别在衬砌的顶部、肩部和腰部。主要的材料常数如表 1 所列。

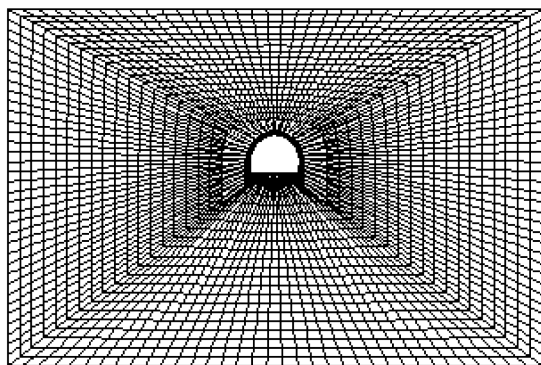


图 1 整体有限元模型

Fig.1 Whole finite element model

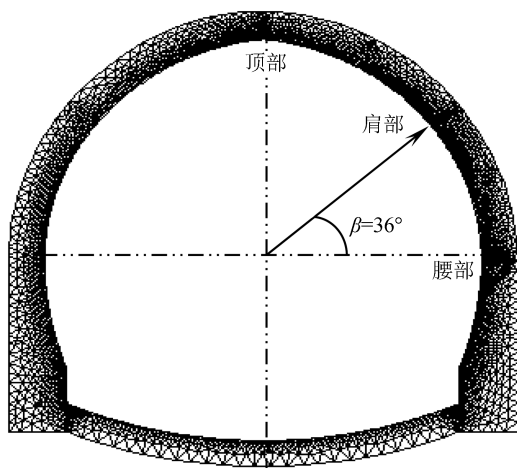


图 2 带裂纹衬砌的有限元网格

Fig.2 Finite element mesh of lining with cracks

表 1 材料常数
Table 1 Material constants

隧道结构	密度 /(kg·m ⁻³)	弹性模量 /GPa	泊松比	黏聚力 /MPa	摩擦角 /(°)
围岩	2 200	4	0.32	0.5	35
衬砌	2 500	30	0.20		
锚杆	7 800	210	0.25		
道床	2 500	32	0.20		

2 地震波的输入

地震激励采用 1940 年 5 月 18 美国的 EI-Centro 地震波前 20 s 的加速度,包含 1 000 个加速度值。水平和竖直加速度时程曲线如图 3 所示。

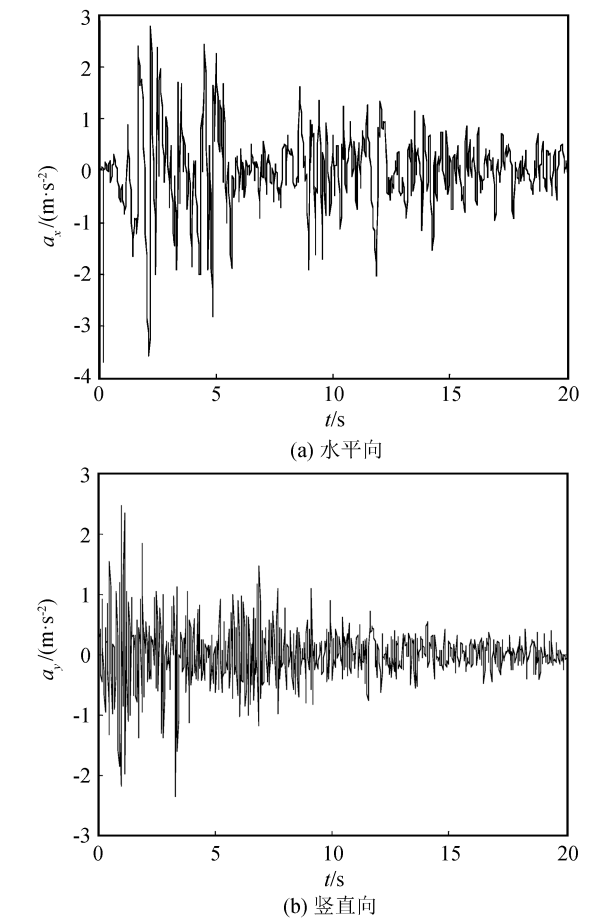


图 3 EI-Centro 加速度时程曲线
Fig.3 Acceleration time history curves under the input of EI-Centro wave

3 分级荷载作用下均匀材料中的静态裂纹

为验证后文所求带裂纹隧道衬砌的动应力强度因子的正确性,采用相互作用积分法,得到分级荷载作用下均匀材料的板中含一个边裂纹动应力强度因

子,并与已有的解析解进行比较。板、裂纹的几何形状和尺寸及加载情况见图 4,分级荷载见图 5。采用 ANSYS 数值模拟时,取板长 $L=10\text{ m}$ 、板高 $2H=4\text{ m}$ 和裂纹长度 $a=5\text{ m}$;在板的上边界施加均匀的拉伸荷载,荷载集度 $\sigma_0=500\text{ MPa}$ 。材料的杨氏弹性模量 $E=210\text{ GPa}$,泊松比 $\mu=0.30$,密度 $\rho=8\,000\text{ kg/m}^3$,纵波速度 $c_d=5\,944\text{ m/s}$ 。

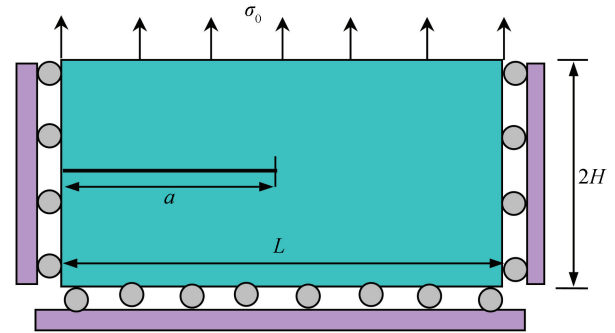


图 4 均匀材料板中的边裂纹
Fig.4 An edge crack in homogeneous material plate

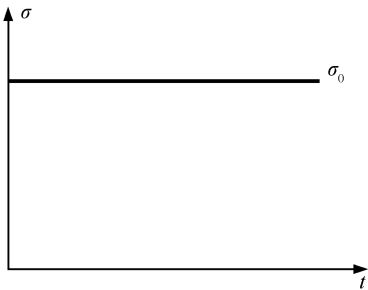


图 5 分级荷载
Fig.5 Step loading

在图 5 所示分级荷载作用下,图 4 中静止裂纹动应力强度因子的解析解为^[14]:

$$K_I^{\text{dyn}}(t) = \begin{cases} 0 & t < t_c \\ \frac{2\sigma_0}{1-\mu} \sqrt{\frac{c_d(t-t_c)(1-2\mu)}{\pi}} & t \geq t_c \end{cases} \quad (1)$$

其中: $t_c = H/c_d$ 。

图 6 给出了无量纲的动应力强度因子的解析解和数值解的比较。为无量纲化,将时间除以 t_c ,I 型动应力强度因子(DSIF)除以系数 $\sigma_0 \sqrt{H}$ 。可以看出,数值计算结果与解析解吻合很好,但在 $t=t_c$ 附近有误差。由于在数值模拟时,应力波在到达裂纹尖端之前到达了动应力强度因子计算区域。图 6 的计算结果几乎与 KUMAR 等^[14] 完全一致,说明用相互作用积分法来计算动应力强度因子是准确、方便和有效的。

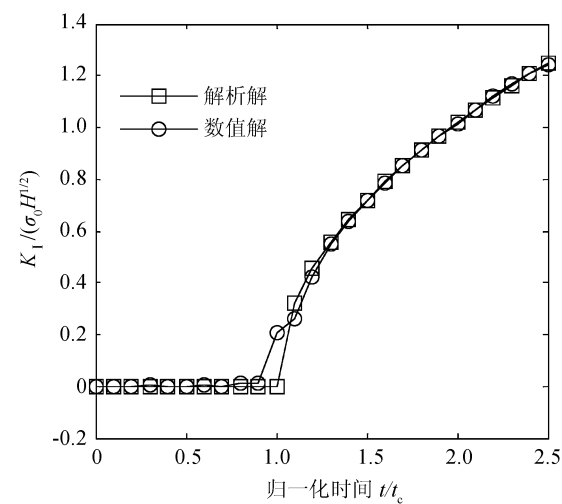


图 6 无量纲的Ⅰ型动应力强度因子
Fig.6 Variation of the mode I DSIF

4 数值计算结果

4.1 动应力强度因子

考虑衬砌的拱顶、拱肩和拱腰三个不同位置产生 $a=5、15、25$ 和 35 cm 不同长度的边裂纹,共 12 种组合工况,采用第 2 节中的地震载荷激励。表 2 给出了不同工况下最大的动应力强度因子。可以看出,当裂纹长度相等时,在拱顶取得最小的Ⅰ型动应力强度因子 K_{I} ,在拱腰和拱肩分别取得最大的Ⅰ型和Ⅱ型动应力强度因子 K_{I} 和 K_{II} 。在任意位置,当裂纹的长度由 5 cm 增加至 35 cm 时,最大的动应力强度因子都明显增加。在三个位置处, K_{I} 的最大值均远远大于 K_{II} 的最大值,说明在地震荷载作用下 K_{I} 对隧道结构的安全起控制作用。作为示例,图 7 给出了拱腰处裂纹长度为 25 cm 时,动应力强度因子 K_{I} 和 K_{II} 的时程曲线。可以看出,在 $t=0.92\text{ s}$ 和 $t=2.54\text{ s}$ 时刻, K_{I} 和 K_{II} 分别取得最大值 $1\,280\,245\text{ N}\cdot\text{m}^{-3/2}$ 和 $-48\,771\text{ N}\cdot\text{m}^{-3/2}$,与表 2 中的值一致。表 2 中其他不同位置处不同裂纹的最大动应力强度因子均如此得出。

表 2 最大的动应力强度因子(单位: $\text{N}\cdot\text{m}^{-3/2}$)

Table 2 Maximum dynamic stress intensity factors (Unit: $\text{N}\cdot\text{m}^{-3/2}$)		裂纹			
衬砌位置	动应力强度因子	5 cm	15 cm	25 cm	35 cm
拱顶	K_{I}	256 679	368 810	443 848	505 804
	K_{II}	12 383	45 885	81 729	118 481
拱肩	K_{I}	374 073	641 727	837 150	999 673
	K_{II}	29 742	67 355	93 502	126 018
拱腰	K_{I}	555 457	974 644	1 280 245	1 549 033
	K_{II}	-7 832	-24 158	-48 771	-75 024

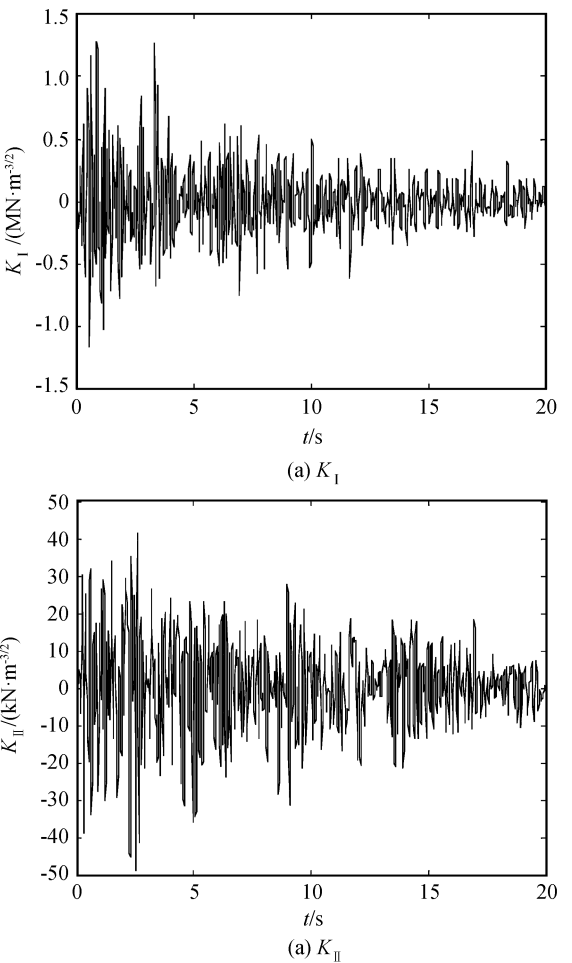


图 7 拱腰处裂纹长度为 25 cm K_{I} 、 K_{II} 时程曲线
Fig.7 Time-history curves of K_{I} 、 K_{II} at the haunch of lining with the crack length of 25 cm

4.2 承载力安全系数

在本研究中,二维混凝土结构的断裂准则采用下式:

$$K_{\text{I}}^2 + 4.2K_{\text{II}}^2 = K_{\text{IC}}^2 \tag{2}$$

其中: K_{IC} 为混凝土的临界应力强度因子,由实测数据知,其值在 $0.3 \sim 1.4\text{ MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ 范围内,本研究取 $K_{\text{IC}}=0.8\text{ MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ 。由式(2)如下定义承载力安全系数 f :

$$f = \frac{K_{\text{IC}}^2}{K_{\text{I}}^2 + 4.2K_{\text{II}}^2} \tag{3}$$

由式(3)求出地震荷载作用下不同位置、长度的最小承载力安全系数(表 3)。可以看出,当裂纹的位置一定时,裂纹长度越长,承载力安全系数越小。在拱顶的承载力安全系数均大于 1,说明拱顶是安全的。在拱肩和拱腰处,当裂纹的长度分别大于 25 cm 和 15 cm 时,得到的最小承载力安全系数比 1 小。这说明如果衬砌中裂纹的长度大于某个特定

值,在地震荷载作用下隧道结构是不安全的。

表 3 最小的承载力安全系数

衬砌位置	裂纹			
	5 cm	15 cm	25 cm	35 cm
拱顶	9.71	4.70	3.24	2.49
拱肩	4.46	1.51	0.90	0.63
拱腰	2.07	0.67	0.39	0.27

5 结论

通过建立二维有限元模型研究地震荷载下带裂纹隧道衬砌的动态断裂,得到以下结论:

- (1) 先用相互作用积分的方法计算了动载作用下静态裂纹的动应力强度因子,表明相互作用积分法用于计算动应力强度因子是准确、方便和有效的。
- (2) I 型裂纹的动应力强度因子在隧道结构的安全中起控制作用,其最大值在拱腰处取得。
- (3) 当衬砌中有裂纹,且裂纹的长度大于某个值时,在地震荷载作用下隧道结构是不安全的,且拱腰处的裂纹要比拱顶和拱肩处的更危险,要注意采取补强措施。

参考文献(References)

[1] 张国斌,巨建民.铁路隧道地震动力响应数值分析[J].低温建筑技术,2012,34(3):97-99.
ZHANG Guobin, JU Jianmin. The Numerical Analysis of Railway Tunnel Seismic Dynamic Response[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2012, 34(3): 97-99.

[2] 梁建文,于军港,张季,等.基于黏弹性边界的地下隧道非线性地震响应分析模型[J].地震工程学报,2014,36(3):434-440.
LIANG Jianwen, YU Jungang, ZHANG Ji, et al. A Nonlinear Seismic Response Analysis Model for Underground Tunnels Based on the Viscous-spring Boundary[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(3): 434-440.

[3] 施有志,车爱兰,周先齐,等.双洞八车道大断面隧道地震动力响应数值分析[J].地震工程学报,2016,38(4):510-518.
SHI Youzhi, CHE Ailan, ZHOU Xianqi, et al. Numerical Seismic Dynamic Response Analysis of Double-hole Eight-lane Large Section Tunnel[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(4): 510-518.

[4] YANG Z H, LAN H X, ZHANG Y S, et al. Nonlinear Dynamic Failure Process of Tunnel-fault System in Response to Strong Seismic Event[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 64:

125-135.

[5] SHEN Y S, GAO B, YANG X M, et al. Seismic Damage Mechanism and Dynamic Deformation Characteristic Analysis of Mountain Tunnel after Wenchuan Earthquake[J]. Engineering Geology, 2014, 180: 85-98.

[6] WANG X Q, JIN X L, WANG P Y, et al. Parallel Dynamic Analysis of a Large-scale Water Conveyance Tunnel Under Seismic Excitation Using ALE Finite-element Method[J]. Applied Sciences, 2016, 6(2): 36.

[7] DENG J, XIAO M. Dynamic Response Analysis of Concrete Lining Structure in High Pressure Diversion Tunnel Under Seismic Load[J]. Journal of Vibroengineering, 2016, 18(2): 1016-1030.

[8] 丁祖德,彭立敏,雷明锋,等.高速铁路隧道列车振动响应影响因素分析[J].铁道科学与工程学报,2011,8(4):1-6.
DING Zude, PENG Limin, LEI Mingfeng, et al. Analysis of Influence Factors on Dynamic Response of High-Speed Railway Tunnel Under Vibration Load[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2011, 8(4): 1-6.

[9] 刘淑红,王露霖,郑宝瑞,等.高速列车荷载作用下双线隧道的动力响应[C]//2016 高速铁路建设养护与装备安全技术交流会.北京,2016.
LIU Shuhong, WANG Luting, ZHENG Baorui, et al. Dynamic Response of Double-track Tunnel Subjected to High-speed Train Loads[C]//2016 Exchange Conference of High Speed Railway Construction Maintenance and Equipment Safety Technology. Beijing, 2016.

[10] LIU S H, DUAN S J. Analytical Solutions of Cracks Emanating from an Elliptic Hole in an Infinite Plate Under Tension[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(5): 1057-1063.

[11] LIU S H, DUAN S J. Analytical Solutions of Cracks Emanating from an Elliptical Hole Under Shear[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(4): 829-834.

[12] SONG S H, PAULINO G H. Dynamic Stress Intensity Factors for Homogeneous and Smoothly Heterogeneous Materials Using the Interaction Integral Method[J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(16): 4830-4866.

[13] WANG Z Y, MA L, YU H J, et al. Dynamic Stress Intensity Factors for Homogeneous and Non-homogeneous Materials Using the Interaction Integral Method[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2014, 128: 8-21.

[14] KUMAR S, SINGH I V, MISHRA B K, et al. New Enrichments in XFEM to Model Dynamic Crack Response of 2-D Elastic Solids[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 87: 198-211.