

# 高速列车脱落螺栓对轨道板的冲击损伤数值模拟研究<sup>\*</sup>

宋小林<sup>†</sup> 刘悦

(西南交通大学 轨道交通运载系统全国重点实验室, 成都 610031)

**摘要** 高速列车运行中存在螺栓脱落风险,可能引起轨道板损伤.为了研究螺栓脱落对轨道板的冲击损伤,利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立了螺栓垂直冲击轨道板有限元模型,并和相关文献结果进行了对比,接触力及损伤形貌计算结果与文献结果一致性较好,在此基础上分析了轨道板的裂纹扩展情况及损伤特性.计算结果表明:当螺栓冲击速度在 100km/h 到 350km/h 范围内,轨道板均为轻度损伤,其破坏模式基本相同,首先在螺栓与轨道板的接触区域边缘产生环状裂纹,然后形成径向裂纹,随着冲击速度的增加,径向“喇叭状”裂纹从两组增加至四组,最后逐渐合并成十字形.随着冲击速度的增加,冲击作用持续时间越长,损伤变量、径向裂纹最大长度和凹坑深度均有明显增加;轨道板的损伤变量随径向裂纹最大长度及凹坑深度的增加而线性增加,最大线性偏离度在 19% 以内.

**关键词** 高速列车, 螺栓, 冲击, 数值模拟, 裂纹扩展, 损伤特性

**中图分类号:**U211.2

**文献标志码:**A

## Numerical Simulation of Impact Damage to Track Slab Caused by Bolt Detached From High-Speed Train<sup>\*</sup>

Song Xiaolin<sup>†</sup> Liu Yue

(State Key Laboratory of Rail Transit Vehicle System, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract** During high-speed train operations, there exists a risk of bolt detachment that can lead to track slab damage. A dynamic finite element analysis model for the impact of bolts on track slab was established utilizing the ANSYS/LS-DYNA software. The numerical results demonstrate good agreement with literature data in terms of contact force and damage morphology. Based on the finite element model, the crack propagation and damage characteristics were investigated. The numerical results show that all the damages of the track slab are slight and exhibit similar patterns when the impact speeds range from 150 km/h to 350 km/h. During impact events, initial circular cracks are distributed around the edge of the contact region between bolts and the track slab, and the radial cracks are formed subsequently. With the augment of the impact velocity, the number of radial cracks evolves from two groups of “trumpet-shaped” cracks to four groups, ultimately propagating into a cruciform crack. As the impact speed increases, the duration time of the impact event prolongs, and it shows an obvious increase in the damage variability, the pit depth, as well as the maximum radial crack length. Moreover, the damage variable of the slab exhibits a linear increase in relation to both the maximum length of the radial crack and the depth of the dimple, and the maximum linear deviation is within 19%.

2022-11-20 收到第 1 稿,2022-12-18 收到修改稿.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(52078433, 11790283), 四川省国际合作重点项目(2020YFH0007), 国家重点实验室自主课题资助项目(2019TPL-T05), National Natural Science Foundation of China(52078433, 11790283), the International Cooperation Key Project of Sichuan Province(2020YFH0007) and Independent Project of State Key Laboratory(2019TPL-T05).

<sup>†</sup> 通信作者 E-mail: xlsong@swjtu.edu.cn

**Key words** high-speed train, bolt, impact, numerical simulation, crack propagation, damage characteristic

## 引言

在列车运行过程中,由于配件本身结构、材质以及作业人员技术等问题,车辆零部件存在脱落等风险,可能会对列车、线路、设备及乘客安全造成危害<sup>[1]</sup>.如文献[2]中动车组在入所检修时发现,因作业人员在恢复裙板时未紧固到位,导致裙板脱落丢失;文献[3]中列车制动装置在运行中受力及外来因素的影响下脱落,造成列车脱轨或颠覆等重大事故;文献[4]中制动梁脱落在钢轨上滑行飞起将另外一辆车的制动主管的辅助管打断后停车,险些造成列车脱轨重大事故;文献[5]中制动缸的6条安装螺栓螺母因为脱落撞击下行正线,造成了铁路交通事故.由于列车运行速度较高,列车零部件以较大的动能脱落冲击轨道,引起轨道结构裂纹和损伤的发生,严重时可能将影响列车运行安全.

我国地域辽阔,列车运行线路较长,在运行中如果列车出现零部件脱落的情况很难判断零部件具体的脱落位置,从而难以判断线路基础结构的损伤是否是因为零部件脱落撞击导致,所以目前对零部件脱落的研究主要是从列车角度出发,通过改善列车配件结构从而减少螺栓脱落.如仇佩信<sup>[6]</sup>为防止转向架螺栓脱落,在吊座处安装挡铁;陈长明等<sup>[7]</sup>通过改进支柱圆销防止制动部件中螺栓的脱落;于亦刚<sup>[8]</sup>通过控制闸瓦摩擦块整体与瓦背的弧度,来抑制螺栓脱落从而避免可能发生的事故.但仅仅改善列车配件结构,列车零部件脱落的情况还是无法完全避免,且零部件的脱落时刻、脱落位置及脱落速度具有较大随机性,从而导致对基础结构的冲击作用也具有随机性,冲击参数难以确定,所以目前关于高速列车脱落零部件对线路基础结构冲击损伤的相关研究较少.

徐天平<sup>[9]</sup>统计了2015年发生车辆配件丢失及故障情况的数量,其中螺栓丢失事件的发生数量占配件丢失事件总数的近三分之一,所以本文选择螺栓作为高速列车脱落配件.螺栓尺寸小质量轻脱落速度低,对轨道的冲击为局部冲击,而轨道板尺寸大强度高,冲击作用难以传递至砂浆层,轨道层间

结构对螺栓冲击损伤的影响可以忽略不计,因此本文将轨道结构简化为轨道板以减少计算时间,运用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立螺栓冲击轨道板有限元模型,研究螺栓脱落对轨道板的冲击损伤,为基础结构稳定服役提供一定的参考.

## 1 螺栓冲击轨道板计算模型及验证

### 1.1 计算模型

由于列车脱落螺栓尺寸不一,为使计算结果更具普遍性,螺栓尺寸选择较为常见的规格 M16,螺杆直径为 8mm,长度为 40mm,螺帽选择 6 边形.轨道板模型按照西南交通大学轨道交通实验室内铺设的 CRTSⅢ型板式轨道实尺结构建立,长宽高分别为 5.35m、2.5m 和 0.19m.

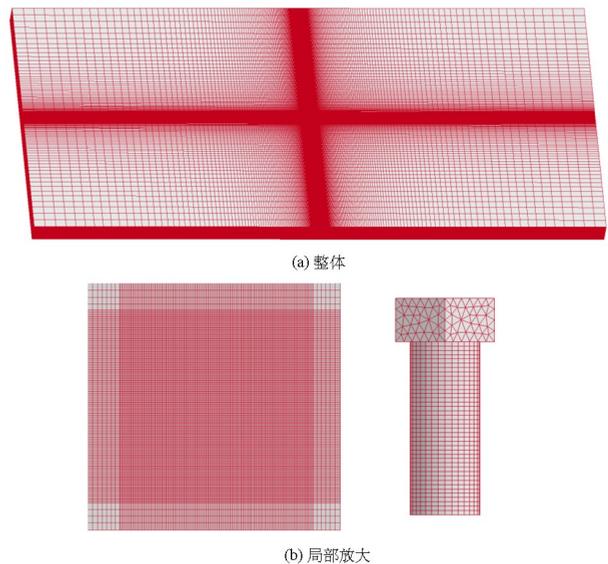


图1 螺栓冲击轨道板有限元模型  
Fig.1 Finite element model of bolt impact track slab

为了减小模型计算时间,建模方式采用四分之一模型,因为轨道板的撞击部位是损伤及动态响应的关键位置,所以模型采用区域化网格划分,在冲击中心  $80 \times 80 \text{mm}$  区域划分  $0.5 \text{mm}$  尺寸单元,其余部分采用过渡网格,靠近轨道板边缘网格逐渐稀疏,采用 SOLID164 单元模拟,有限元模型及局部放大如图 1 所示,上部为螺栓,下部为轨道板.按照轨道板实际布置方式,对其底面设置全约束,其余

各面自由,并在底面和四周施加无反射边界。

虽然螺栓脱落时水平速度基本等同于车速,但垂直方向上的速度分量较小,为研究最不利工况,参考高速列车运营速度,将螺栓垂直冲击速度定为 100~350km/h,研究螺栓以不同速度垂直冲击下轨道板的冲击损伤,暂不改变螺栓的冲击角度、冲击部位及形状。

## 1.2 材料参数选择

螺栓一般为钢材制作,在 LS-DYNA 中 24 号 \*MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY 材料考虑了应变率效应的弹塑性硬化,因此本文选择该材料作为螺栓材料,根据文献[10]中的相关参数,最终确定螺栓的计算参数,主要参数如表 1 所示。

轨道板主要材料为混凝土,而混凝土材料具有不均匀性,力学性能复杂,在外来冲击荷载作用下的响应是高应变率、大变形的综合反应,因此材料

本构模型的选择非常重要,HJC(Holmquist Johnson Cook)模型是耦合各向同性损伤的弹粘塑性模型,具有压力依赖性、应变率敏感性和损伤软化等特点,是目前应用最为广泛的混凝土冲击本构模型,因此本文选用 HJC 本构模型作为轨道板的动态材料本构模型。

表 1 螺栓参数设置

Density/ kg/m <sup>3</sup>	E/GPa	Poisson's ratio	Stress of yield/GPa	Strain of failure
7850	210	0.284	0.5	1.5

轨道板的强度为 C60,参考文献[11],将轨道板材料参数设置为密度 2600kg/m<sup>3</sup>、弹性模量 36GPa、泊松比 0.2,同时根据文献[12]中 HJC 本构模型参数的计算方法,最终确定了轨道板 HJC 本构模型的计算参数,如表 2 所示。

表 2 轨道板 HJC 本构模型参数

Table 2 HJC constitutive model parameters of track slab

Strength parameter			Equation state parameter				Damage parameter			Rate effect parameter		
A	B	N	SFMAX	$P_L$ /GPa	$K_1$ /GPa	$K_2$ /GPa	$K_3$ /GPa	$D_1$	$D_2$	EFMIN	C	
0.79	1.6	0.61	7	0.8	85	-171	208	0.04	1.0	0.01	0.007	

由于 HJC 材料缺少拉伸破坏准则,需要通过增加关键字 \*MAT\_ADD\_EROSION 来定义额外的损伤破坏准则,参考文献[13],本文加入体积应变失效准则以及最大剪切失效准则来模拟损伤。

## 1.3 模型验证

由于冲击问题非线性强,有限元计算往往要结合或者参考试验结果开展分析,但在利用轻气炮驱动螺栓冲击轨道板模型试验中发现,螺栓长径比和冲击速度较低(小于 350km/h),脱靶后会发生偏转,冲击角度具有较大随机性,试验难以完成,所以本文对文献[14]的试验及仿真结果进行数值验证,以验证模型的建模方式、参数设置以及网格划分等合理性。

文献[14]中的数值模型为平头弹冲击混凝土靶板,平头弹形状为圆柱形,半径为 12.5mm,高度为 75mm,混凝土靶板的长宽高分为 310mm、310mm 和 50mm。平头弹以速度 58.2m/s、76.0m/s 和 104.0m/s 冲击混凝土靶板中心。模型采用四分

之一建模方式,网格划分采用过渡网格,模型如图 2 所示,材料选取与参数设置与文中相同。

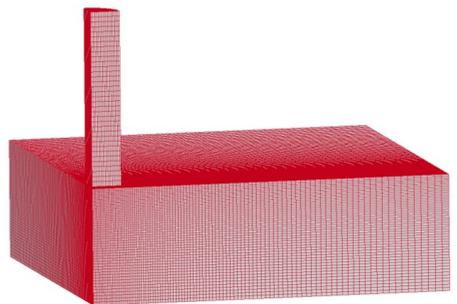


图 2 平头弹冲击混凝土靶板数值模型

Fig.2 Numerical model of concrete target impacted by flat ended projectile

图 3 绘制了三种速度下平头弹与混凝土靶板接触面的接触力时程曲线的结果对比。

从图 3 中可以看出各速度下接触力波形基本一致。速度为 58.2m/s 时,文献[14]接触力峰值为 114.6kN,本文接触力峰值为 113.3kN,相差 1.1%;速度为 76m/s 时,文献[14]接触力峰值为 134.6kN,本文接触力峰值 133.3kN,相差 1.0%;速度

为 104m/s 时,文献[14]接触力峰值为 152.8kN,本文接触力峰值 146.1kN,相差 4.4%。

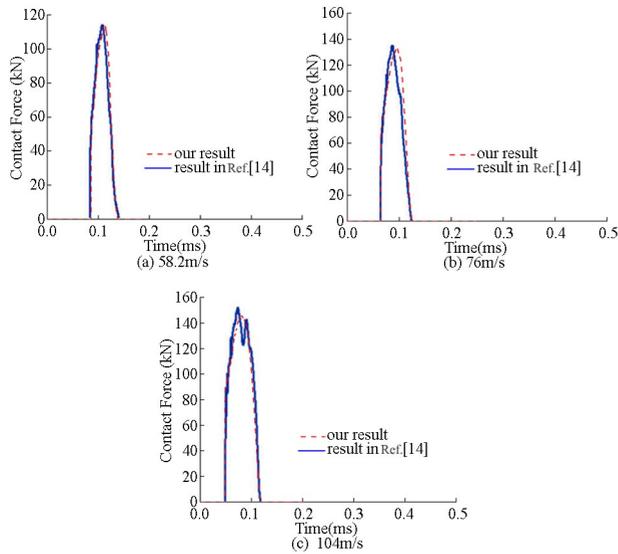


图3 接触力曲线结果对比

Fig.3 Comparison of contact force curve result

图4给出了平头弹以 104m/s 的速度冲击下混凝土靶板时靶板的剖面损伤形貌扩展结果对比,左为文献[14]结果,右为本文结果.从图4中可以看出结果一致性较好。

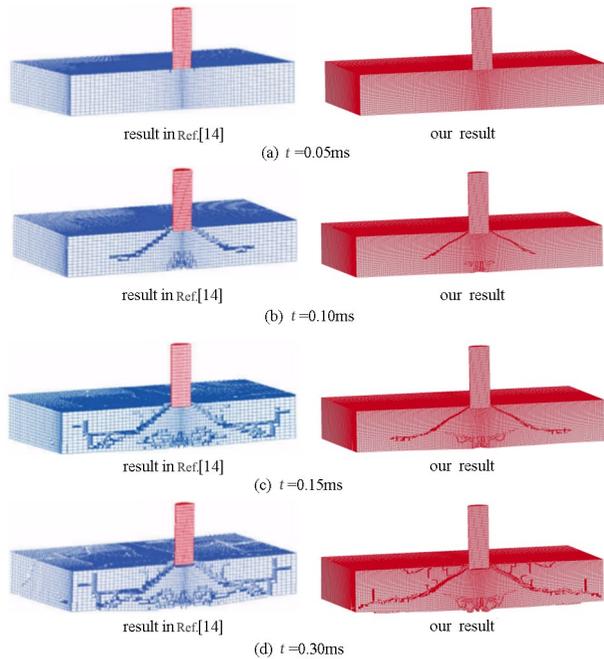


图4 速度 104m/s 下剖面损伤形貌扩展对比

Fig.4 Comparison of damage profile expansion at speed of 104m/s

图5显示了三种速度下弹丸冲击混凝土靶板的剖面最终损伤形貌对比结果,其中上为文献[14]的实验与数值结果,下为数值验证结果.从图5中可以看出结果一致性较好。

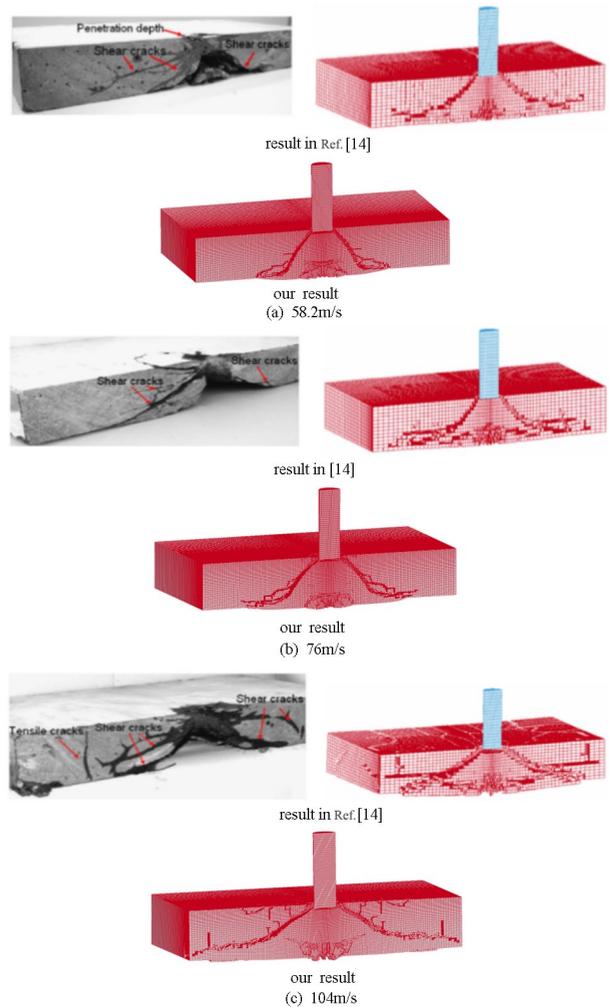


图5 最终损伤形貌结果对比

Fig.5 Comparison of final damage morphology result

结合图(3)~图(5)的对比情况,数值验证计算的接触力和损伤形貌与文献[14]中相似度较高,可以认为本文数值模拟的建模方式、参数设置以及网格划分等是合理的。

## 2 螺栓对轨道板的冲击损伤数值计算结果

### 2.1 轨道板的损伤过程分析

众所周知,螺栓对轨道板的冲击损伤随着冲击速度的增加而增大,所以本文以速度 350km/h 的工况为例,研究轨道板的冲击损伤过程.由于螺栓尺寸小、质量轻,轨道板尺寸大、强度高,螺栓对轨道板沿冲击方向剖面造成的冲击损伤较小,损伤裂纹并不明显,为便于在实际线路上能更好辨别轨道板的损伤是否为螺栓脱落所致,本文重点分析轨道板冲击面的损伤形貌及裂纹扩展情况。

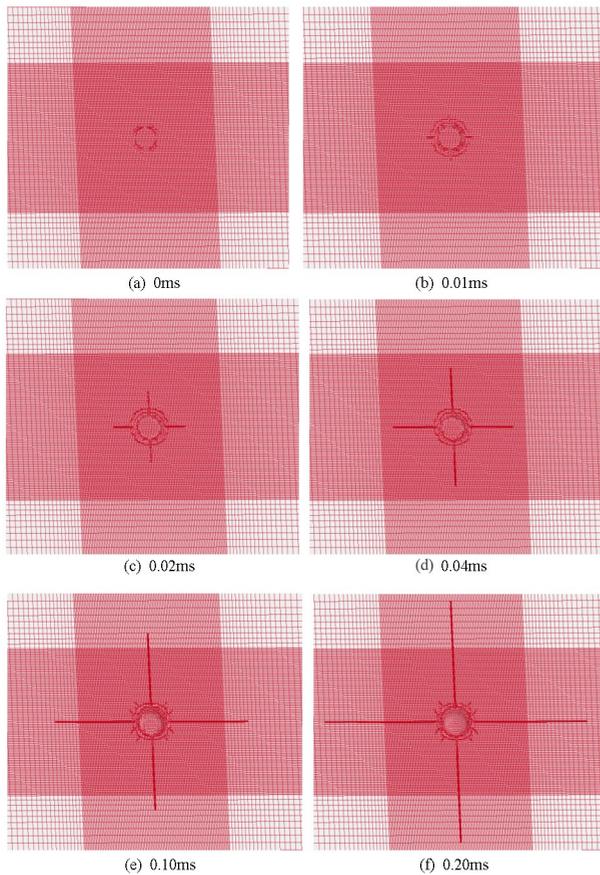


图 6 冲击面的裂纹扩展过程(速度 350km/h)  
Fig.6 Crack growth process of impact surface (350km/h)

为更好的描述裂纹扩展情况,本文通过在裂纹附近取点的方式计算径向裂缝长度,并将最长径向裂纹的长度定义为径向裂缝最大长度.图 6 给出了速度为 350km/h 时轨道板冲击面的裂纹扩展过程.在  $t=0\text{ms}$  时,螺栓刚接触轨道板,轨道板冲击面在接触区域边沿形成裂纹,如图 6(a) 所示;在  $t=0.01\text{ms}$  时,接触区域边沿的裂纹进一步扩展,形成环状裂纹,此时径向裂纹初步形成,最大长度为 4.4mm,如图 6(b) 所示;然后环状裂纹基本成型缓慢扩展,而径向裂纹开始发展,在  $t=0.02\text{ms}$  时最大长度为 15.0mm,如图 6(c) 所示;随后径向裂纹快速扩展,最大长度在  $t=0.04\text{ms}$  时扩展至 32.7mm,如图 6(d) 所示;在  $t=0.1\text{ms}$  时,因应力集中效应,轨道板表面的环状裂纹周围次生出了细小裂纹,而径向裂纹继续发展但发展速度减慢,此时裂纹最大长度为 55.7mm,如图 6(e) 所示; $t=0.20\text{ms}$  时,裂纹停止扩展,冲击基本结束,此时径向裂纹最大长度为 80.9mm,如图 6(f) 所示.

图 7 给出了速度 350km/h 时轨道板冲击面径向裂缝最大长度随时间的变化规律,从图 7 中可以

看出,裂纹长度在碰撞初期(0~0.065ms 内)快速增长,随着时间的推移,增速逐渐降低,在 0.15ms 后裂纹长度增长缓慢最终趋于定值.

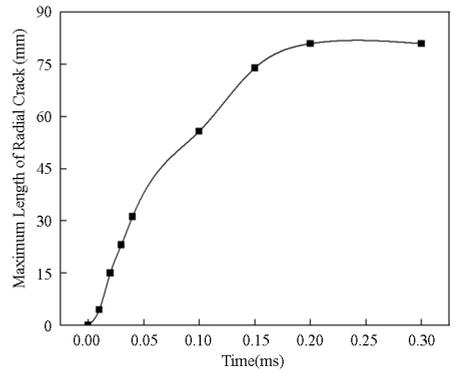


图 7 轨道板径向裂缝最大长度随时间变化规律(350km/h)  
Fig.7 The radial crack maximum length of track slab with change of time (350km/h)

### 2.2 不同冲击速度下轨道板损伤形貌结果对比

图 8 展示了不同速度下轨道板冲击面的最终损伤形貌.从图 8 中可以看出,轨道板冲击面的损伤模式基本相同,在速度 100~350km/h 范围内皆出现环状裂纹,但径向裂纹数量略有变化:速度为

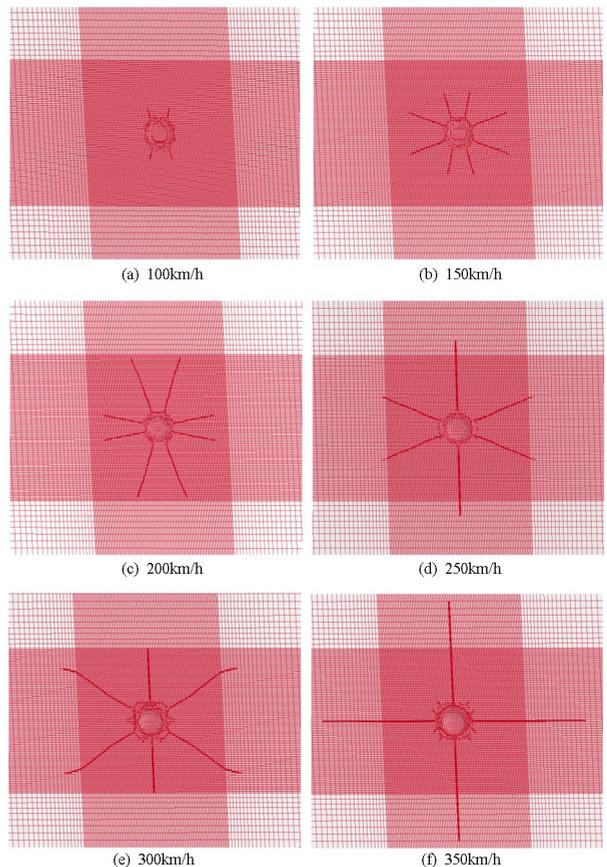


图 8 冲击面的损伤形貌  
Fig.8 Damage morphology of impact surface

100km/h时,环状裂纹的上下位置各出现一对呈喇叭状的径向裂纹,如图8(a)所示;速度为150~200km/h时,径向裂纹增加至四对,如图8(b)和图8(c)所示;速度增加至250km/h时,上下位置的两对径向裂纹合并成一条直裂纹,如图8(d)所示;速度增加至300km/h时,环状裂纹周围开始次生出细小裂纹,如图8(e)所示;速度增加至350km/h时,左右位置的两对径向裂纹也合并成一条直裂纹,此时径向裂纹演变成十字形放射状,如图8(f)所示。

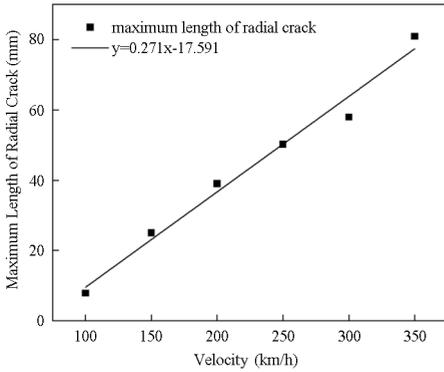


图9 不同速度下的径向裂纹最大长度

Fig.9 Maximum length of radial crack at different velocities

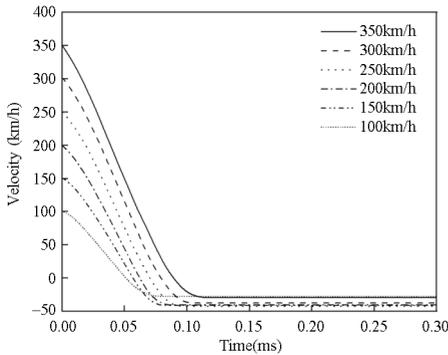


图10 不同速度下的螺栓速度随时间变化曲线

Fig.10 Curve of bolt velocity with change of time at different velocities

图9绘制了不同速度下轨道板冲击面径向裂纹最大长度,从图9中可以看到当速度从100km/h增加到350km/h,径向裂纹最大长度以近似线性的趋势从7.9mm增加到80.9mm。

不同速度下螺栓在冲击过程中速度随时间的变化规律如图10所示,轨道板的凹坑深度随速度的变化规律如图11所示.从图10和图11中可以看出,螺栓速度以近似对数的趋势快速降低,当冲击速度从100km/h增加到350km/h,螺栓速度降为0的时间越长,凹坑最大深度则从0.7mm近似

指数增加到4.3mm.上述结果表明冲击速度越高,螺栓与轨道板的冲击时间越长,冲击对轨道板产生的凹坑深度越大。

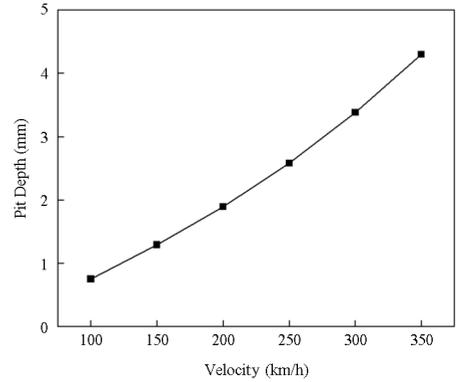


图11 凹坑深度随冲击速度的变化曲线

Fig.11 The curve of pit depth with change of impact velocities

### 2.3 轨道板损伤评价

为更好描述轨道板的损伤程度,本文基于微元体强度服从统计分布的假定<sup>[15]</sup>,用统计损伤变量来反映损伤,该方法使用方便且结果准确,在混凝土损伤数值计算中使用较多.假设损伤单元数为 $F$ ,则统计损伤变量 $D$ 为已损伤单元数 $F$ 与总单元数 $N$ 之比. $D=0$ 时表示材料为无损状态; $D=(0\sim 0.1)$ 时定义为轻度损伤; $D=(0.1\sim 0.4)$ 时定义为中度损伤; $D=(0.4\sim 0.7)$ 时定义为重度损伤; $D=(0.7\sim 1.0)$ 为破坏性损伤, $D=1$ 时表示材料为完全破坏状态。

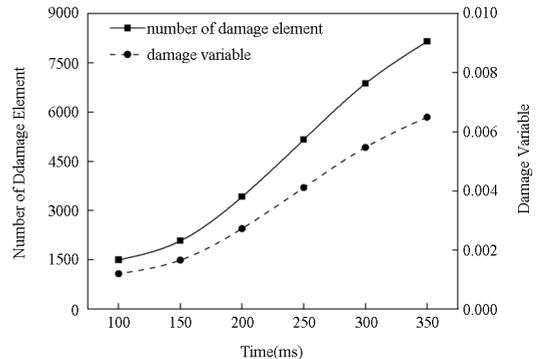


图12 不同速度下损伤单元数及损伤变量

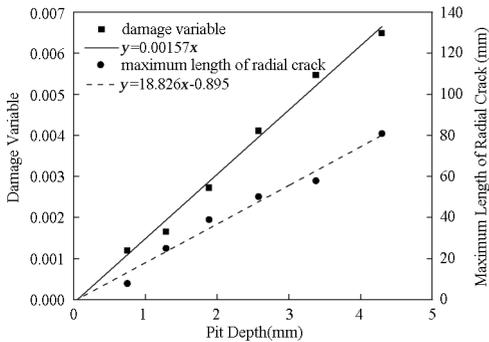
Fig.12 Number of damage element and damage variable at different velocities

轨道板的总单元数 $N=1255000$ ,不同速度下损伤单元数及损伤变量如图12所示,从图12中可以看出,当速度从100km/h增加到350km/h,轨道板的损伤单元数 $F$ 以近似线性的规律从1498到8146,损伤变量 $D$ 从0.0012增加到0.0065.因损伤

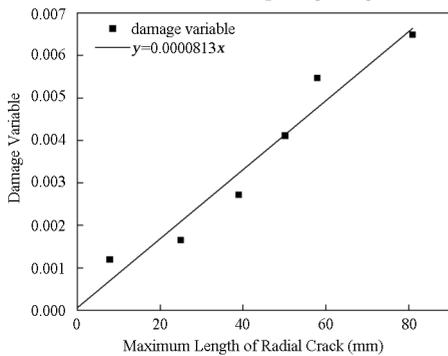
变量皆小于 0.1, 轨道板的损伤程度为轻度损伤。

## 2.4 损伤变量随径向裂纹最大长度及凹坑最大深度变化规律分析

损伤变量随径向裂纹最大长度及凹坑最大深度的变化曲线如图 13 所示。



(a) 损伤变量和径向裂纹最大长度随凹坑深度的变化曲线  
(a) The curve of damage variable and maximum length of radial crack with change of pit depth



(b) 损伤变量随凹坑深度的变化曲线

(b) The curve of damage variable with change of pit depth

图 13 损伤变量随径向裂纹最大长度及凹坑深度的变化曲线  
Fig.13 The curve of damage variable with change of maximum length of radial crack and depth of pit

从图 13 中可以看出, 损伤变量和径向裂纹最大长度皆随着凹坑最大深度的增加以线性增加, 平均线性偏离度分别为 6.79% 和 12.3%, 损伤变量随着径向裂纹最大长度的增加而线性增加, 平均线性偏离度为 19.0%。

## 3 结论

本文利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立了螺栓垂直冲击轨道板有限元模型, 分析了轨道板的裂纹扩展情况及损伤特性. 主要结论如下:

(1) 在相同工况下, 接触力及损伤形貌计算结果与文献结果一致性较好;

(2) 当螺栓冲击速度在 100km/h 到 350km/h 范围内, 轨道板均为轻度损伤, 其破坏模式基本相同, 首先在螺栓与轨道板的接触区域边缘产生环状

裂纹, 然后形成径向裂纹, 随着冲击速度的增加, 径向“喇叭状”裂纹从两组增加至四组, 最后逐渐合并成十字形。

(3) 随着冲击速度的增加, 冲击作用持续时间延长, 凹坑最大深度(从 0.7mm 增加到 4.3mm)和损伤变量(从 0.0012 增加到 0.0065)呈近似指数增加, 而径向裂纹最大长度(从 7.9mm 增加到 80.9mm)则近似线性增大;

(4) 轨道板损伤变量随径向裂纹最大长度及凹坑最大深度的增加而线性增加, 最大线性偏离度小于 19.0%。

## 参考文献

- [1] 刘运海. 浅谈客车配件脱落的危害及应对措施 [J]. 哈尔滨铁道科技, 2012, 1: 12+15.
- [2] 彭波. 动车组高压牵引系统散热装置热保护故障分析及应对方案 [J]. 铁道车辆, 2019, 57(10): 29-30+5.  
PENG B. Analysis of troubles in heat protection of heat radiation device in the high voltage traction system on multiple units and the counter scheme [J]. Rolling Stock, 2019, 57(10): 29-30+5. (in Chinese)
- [3] 苏大鹏. 货车制动部件脱落的非接触式检测装置 [J]. 机械工程师, 2004(4): 60.
- [4] 王振龙. 滑槽制动梁脱落的原因及预防 [J]. 铁道机车车辆, 1995, 15(3): 59-61.
- [5] 张晓峰. 关于铁路货车车辆悬挂装置安装方式的改进建议 [J]. 科技风, 2012(3): 112.
- [6] 仇佩信. 防止 202 型转向架制动零件脱落的建议 [J]. 铁道车辆, 1981, 19(12): 43.
- [7] 陈长明, 蔡达源. 建议改进支柱圆销防止制动零件脱落事故 [J]. 铁道车辆, 1996, 34(2): 57-59.
- [8] 于亦刚. 委内瑞拉动车闸瓦瓦体脱落问题分析 [J]. 四机科技, 2006(3): 21-22.
- [9] 徐天平. 铁路运用货车配件脱落的原因及对策 [J]. 上海铁道科技, 2016(4): 156-157.
- [10] 梁斌. 弹丸对有界混凝土靶的侵彻研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2004.
- [11] 蔡小培, 罗必成, 常文浩, 等. 严寒地区 CRTSⅢ 型板式无砟轨道变形与损伤 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(12): 92-97+115.  
CAI X P, LUO B C, CHANG W H, et al. Research on deformation and damage of CRTSⅢ slab track in

- severe cold regions [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(12): 92–97+115. (in Chinese)
- [12] 张凤国, 李恩征. 混凝土撞击损伤模型参数的确定方法 [J]. *弹道学报*, 2001, 13(4): 12–16+23.  
ZHANG F G, LI E Z. A method to determine the parameters of the model for concrete impact and damage [J]. *Journal of Ballistics*, 2001, 13(4): 12–16+23. (in Chinese)
- [13] 王文谈. 超高性能纤维增强混凝土(UHPFRC)的实验研究及低速冲击有限元模拟 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.  
WANG W T. Experimental study and finite element simulation of low-speed impact for ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [14] TAI Y S. Flat ended projectile penetrating ultra-high strength concrete plate target [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2009, 51(2): 117–128.
- [15] 王世鸣. 冲击荷载下早龄期混凝土力学和损伤特性的试验研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2014.  
WANG S M. Experimental study on the mechanical properties and damage performance of early age concrete under dynamic loading [D]. Changsha: Central South University, 2014. (in Chinese)