

# 刨削式防爬器的吸能特性及防爬性能研究

冯 帅 刘艳文 王 璐 郑成功

(中车长春轨道客车股份有限公司国家轨道客车工程研究中心, 130062, 长春//第一作者, 工程师)

**摘 要** 刨削式防爬器的防爬性能直接影响其吸能的稳定性。基于 EN 15227:2020《铁路应用-铁路车辆车体的耐撞性要求》,采用 LS-DYNA 软件的大变形碰撞仿真分析技术建立有限元模型,对刨削式防爬器的吸能特性和防爬性能进行研究,再通过刚性墙碰撞试验验证刨削力与压缩行程的关系,通过垂向加载试验测量残余塑性变形进而验证防爬器的防爬性能。研究表明:刨削式防爬器的吸能特性及防爬性能良好;仿真分析与试验结果误差在 20% 以内,具有较好的一致性,仿真分析结果真实可信,防爬性能研究方法实用可行。

**关键词** 轨道交通车辆;刨削式防爬器;吸能特性;防爬性能;仿真分析;试验验证

**中图分类号** U213.5\*5

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2023.04.019

## Research on Energy Absorption Characteristics and Anti-climbing Performance of Planing Anti-climber

FENG Shuai, LIU Yanwen, WANG Lu, ZHENG Chenggong

**Abstract** The anti-climbing performance of planing anti-climber directly affects the stability of its energy absorption. According to EN 15227:2020 Railway Applications—Crashworthiness Requirements for Rail Vehicles, the large deformation collision simulation analysis technology of LS-DYNA software is used to establish the finite element model, the energy absorption characteristics and anti-climbing performance of planing anti-climber are studied. Then, the relation between planing force and compression stroke is verified by the rigid wall crash test, and the residual plastic deformation is measured by the vertical loading test to verify the anti-climbing performance of anti-climber. Research shows that the anti-climbing performance and energy absorption characteristics of planing anti-climber are good. The error between simulation analysis and test is within 20% and has good consistency. The simulation analysis results are credible, and the research method of anti-climbing performance is practical and feasible.

**Key words** rail transit vehicle; planing anti-climber; energy absorption characteristics; anti-climbing performance; simulation analysis; test verification

**Author's address** National Engineering Research Center of Railway Vehicle, CRRC Changchun Railway Vehicles Co., Ltd., 130062, Changchun, China

在有效保障司乘人员的安全方面,车端防爬器为最广泛应用的传统被动安全性设计结构<sup>[1-3]</sup>。常用的车端防爬器主要有刨削式防爬器、铝蜂窝防爬器及胀管式防爬器。与其他防爬器相比,刨削式防爬器性能优越、碰撞力值稳定、抗偏载能力强、结构紧凑、安装及拆卸方便<sup>[4-5]</sup>,已得到广泛应用。

对刨削式防爬器的吸能特性研究日渐深入。文献[6]发现刨削力的大小同刨削深度、刨削宽度及刨刀的外形等有关;文献[7]研究了刀具前角、切屑圆角、切削深度和切削速度四个因素对切削式吸能装置吸能过程的影响程度。

然而,鲜有对刨削式防爬器防爬性能的研究。刨削式防爬器的防爬性能直接影响其吸能的稳定性。为更加有效地验证刨削式防爬器的防爬吸能特性,本文基于 EN 15227:2020《铁路应用-铁路车辆车体的耐撞性要求》<sup>[8]</sup>,先采用 LS-DYNA 仿真分析方法对刨削式防爬器的吸能、防爬性能进行研究,再用试验的方法分别加以验证,以期对刨削式防爬器的防爬性能研究方法提供借鉴,也为刨削式防爬器的设计提供依据。

## 1 刨削式防爬器性能仿真分析

### 1.1 刨削式防爬器吸能特性仿真分析

根据设计要求,基于 LS-DYNA 软件的大变形碰撞仿真分析技术,对刨削式防爬器进行有限元离散,建立有限元模型如图 1 所示。此刨削式防爬吸能结构的设计压缩行程为 343 mm,设计力值为 700 kN,可吸收 240 kJ 能量。在防爬器刨削过程中,防爬齿、基座和刨刀的变形极小,用 Mat20 材料模拟;刨削筒属于硬质塑性材料,可用 Mat03 材料模拟。

刨削筒的材料参数如表 1 所示。应用准静态方法,模拟刨削式防爬器压缩过程。刨削筒的失效应变为 0.75,以此应变失效模式来模拟刨花产生的过程。

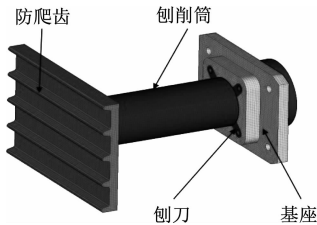


图 1 刨削式防爬器有限元模型

Fig. 1 Finite element model of planing anti-climber

表 1 刨削筒的材料参数

Tab. 1 Material parameters of planing cylinder

参数	密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量/ GPa	屈服应力/ MPa	切线模量/ MPa
数值	7 865	210	345	768

参数	失效应变	应变率 参数 <i>C</i>	应变率 参数 <i>P</i>	应变硬化 参数
数值	0.75	5	40	0.3

防爬齿的刨削深度为 5 mm,刨削过程如图 2 所示。刨削时间  $t = 0$  时,刨刀位于刨削筒导向槽内,防爬器未开始切削; $t = 30$  ms,碰撞开始后,刨刀与刨削筒接触产生相对运动,刨刀开始沿着刨削筒稳定有序地切削,吸收大量的碰撞能量; $t = 100$  ms 时,防爬器压缩至最大行程,整个刨削过程结束。

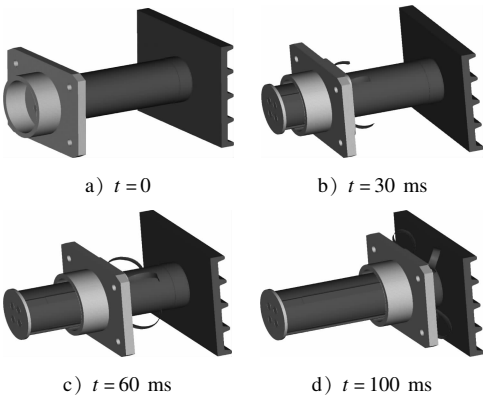


图 2 刨削式防爬器刨削过程图

Fig. 2 Planing process diagram of planing anti-climber

刨削力及吸能量随压缩行程变化的仿真曲线如图 3 所示。由图 3 可见:在刨刀接触刨削筒瞬间,刨削力值迅速攀升;随后,刨削力稳定为 680 kN 左右;与刨削力的设计值相比,仿真值略低,误差为

2.86%;整个刨削过程平稳有序;压缩行程达到 343 mm 时,基座与防爬齿接触,刨削力值增大,刨削过程结束。整个刨削过程的刨削式防爬器吸能量达到 233.8 kJ,与设计值相比,吸能量的误差为 2.58%。

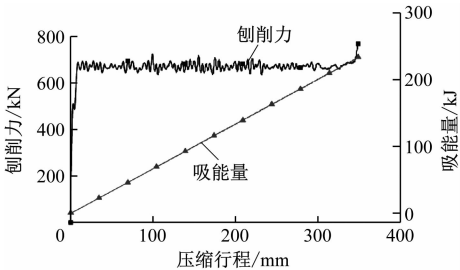


图 3 刨削力、吸能量随压缩行程变化的仿真曲线

Fig. 3 Simulation curve of planing force and absorbed energy changing with compression stroke

1.2 刨削式防爬器防爬性能研究

为检验刨削式防爬器的防爬性能,对其加载 75 kN 垂向载荷后的残余塑性变形进行仿真分析。根据试验评估准则,垂向加载后的残余塑性变形应小于 1 mm。重新建立有限元模型(见图 4),对基座施加全约束,对防爬齿施加垂直向上的力。加载力随时间的变化曲线如图 5 所示。

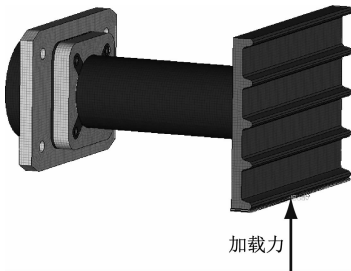


图 4 防爬性能研究有限元模型

Fig. 4 Finite element model for anti-climbing performance study

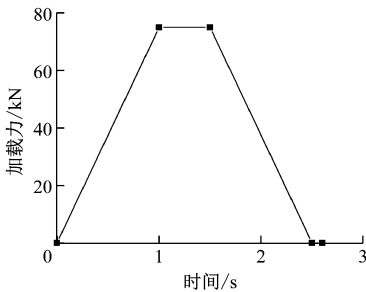


图 5 加载力随时间的变化曲线

Fig. 5 Curve of loading force changing with time

经计算,得出防爬齿垂向位移随时间的变化曲

线如图 6 所示。

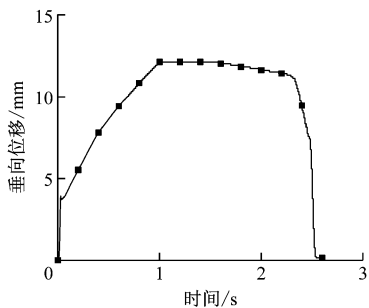


图 6 防爬齿垂向位移随时间的变化曲线

Fig. 6 Curve of anti-climbing teeth vertical displacement changing with time

结合仿真计算结果可知:加载力达到 75 kN 时,垂向位移最大,为 12.15 mm;随着力的卸载,垂向位移迅速减小;载荷完全释放后,得出防爬器的残余塑性变形为 0.15 mm,远小于 1.00 mm,满足准则要求。

## 2 刨削式防爬器性能的试验验证

### 2.1 刚性墙碰撞试验

根据 EN 15227:2020《铁路应用-铁路车辆车体结构耐撞性要求》,进行刚性墙碰撞试验,以对刨削式防爬器的撞击变形、压缩行程、撞击力进行验证。

表 2 记录了本次刚性墙碰撞试验的各部件质量及速度,根据 EN 15227:2020 标准,撞击速度(试验速度至少为标准值  $\pm 0.5$  km/h)和试验车辆质量(试验值至少为标准值的  $\pm 5\%$ )均满足试验要求。

表 2 碰撞质量及速度记录表

Tab. 2 Crash mass and speed record

数值	试验车辆质量 (包含配重块)/kg	刨削式防爬器 质量/kg	碰撞速度/ (km/h)
目标值	24 300	80(试验样件)	16.00
实际测量值	24 364	78(试验样件) 125(连接部件)	15.61

在进行刚性墙碰撞试验时,刨削式防爬器通过连接部件安装在试验车辆上。试验车辆可以通过增减配重块调节目标质量。首先,由智能驱动系统通过车钩牵引试验车辆(包括防爬器及配重块)进行加速;当试验车辆加速到预定速度,且距离刚性墙 100 m 时,试验车辆的车钩解钩,智能驱动系统同时进行制动;随后,试验车辆以一定速度撞击刚性墙,完成刚性墙碰撞试验。

刚性墙碰撞试验所用测试系统主要包含动态测力系统、高速摄影系统、车载测试系统、速度测试系统、智能驱动系统、试验车辆系统及灯光控制系统。刚性墙碰撞试验实景图如图 7 所示。

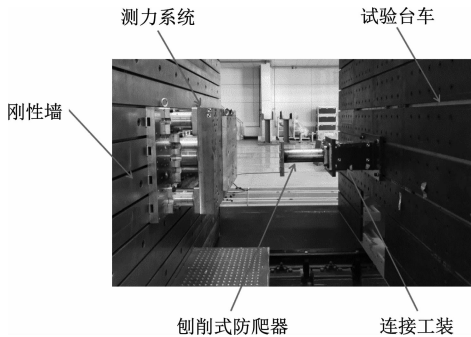


图 7 刚性墙碰撞试验实景图

Fig. 7 Real scene of rigid wall crash test

经过试验,得到刨削式防爬器压缩行程记录表,如表 3 所示。由表 3 可见,借助高速摄影系统测得的刨削式防爬器压缩行程  $s = 327.1$  mm,手动测得  $s = 328.0$  mm,两者相差仅为 0.9 mm。说明测量结果真实有效。

表 3 刨削式防爬器压缩行程记录表

Tab. 3 Compression stroke record of planing anti-climber

数据来源	防爬器纵向长度/mm		s/mm
	试验前	试验后	
手动测量	343.0	15.0	328.0
高速摄影	343.0	15.9	327.1

整个碰撞变形过程如图 8 所示。由图 8 可见,刚性墙碰撞试验中刨削筒始终沿着纵向压缩方向移动,变形稳定有序,与设计理念一致。

通过动态测力系统检测刨削力  $F$ ,进而得到刨削式防爬器的  $F$ - $s$  曲线如图 9 所示。撞击过程中, $F$  先迅速上升;待刨削平稳后, $F$  变化呈相对稳定,进入平台期,其平均值为 717.1 kN。与  $F$  设计值(700 kN)相比,该阶段  $F$  的设计误差仅为 2.38%,小于 7.5%。

由试验结果计算可知,刨削式防爬器在刚性墙碰撞试验中通过塑性变形所吸收的能量  $E_k = 225.84$  kJ,如图 10 所示。进一步分析可知,本次试验中防爬吸能结构未完全压缩,尚存在 15 mm 压缩余量。由图 10 曲线趋势可见,压缩后半段进程的  $F$  较大。取压缩后半段数据中  $F$  值较小的一段( $s = 200 \sim 300$  mm)进行分析求得  $F$  平均值为 770 kN。



a) 碰撞开始前



b) 压缩行程约为总压缩行程的一半时



c) 碰撞结束后

图8 刨削式防爬器碰撞变形过程

Fig. 8 Collision deformation process of planing anti-climber

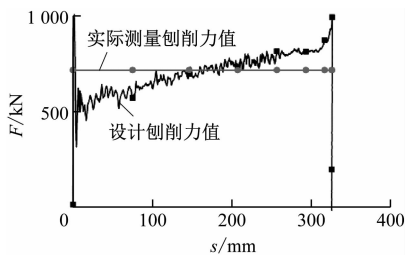


图9 刨削式防爬器的  $F-s$  曲线

Fig. 9  $F-s$  curve of planing anti-climber

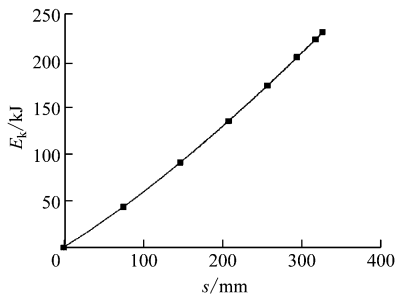


图10 刨削式防爬器的能量吸收曲线

Fig. 10 Energy absorption curve of planing anti-climber

由  $E_k = Fs$  计算可得,刨削式防爬器 15 mm 压缩余量对应的能量至少为 11.55 kJ。综合评定此防爬器所储备的能量至少为 242.09 kJ。防爬器吸收能量的设计值为 240 kJ,设计误差为 0.87%,试验所用能量占比为 93.29%。根据 EN 15227:2020 标准规

定:在正常情况下,  $E_k$  至少应为防爬器所能吸收最大能量的 80%。可见,刨削式防爬器的能量吸收情况符合试验测试标准。

对比分析试验结果和仿真结果可知:此刨削式防爬器  $F$  值的设计误差为 2.38%,  $E_k$  的设计误差为 0.87%,均小于 7.50%;  $F$  仿真值与试验值相差仅 5.17%,小于 20%,且  $F$  试验值较高;  $E_k$  仿真值与试验值相差仅 0.60%,小于 20%;仿真分析数据较平稳,试验数据波动较大。经分析,由于刨削式防爬器存在加工精度误差,而且试验样件和工艺装备的安装误差也会导致防爬器产生垂向或者纵向位移,故试验数据存在较大波动。此外,仿真分析是在趋于理想化的条件下进行的,这也加大了试验数据和仿真数据的数值偏差。

## 2.2 防爬性能验证试验

为验证该刨削式防爬器的防爬性能,对该防爬吸能结构进行垂向加载试验。如图 11 所示,防爬器通过紧固件安装在试验设备上,加载装置和测力传感器安装在防爬器下方,位移传感器安装在防爬器上方。

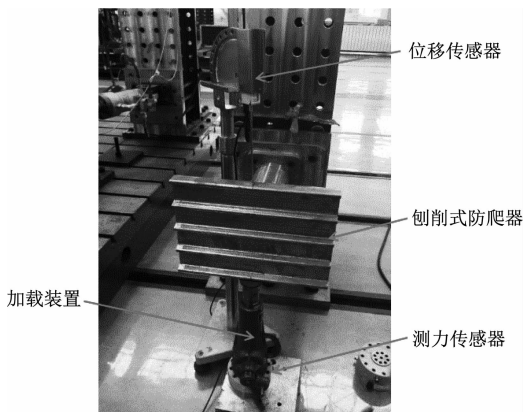


图11 刨削式防爬器垂向加载试验实景图

Fig. 11 Real scene of planing anti-climber vertical loading test

为确保试验结果的准确性,对同一刨削式防爬器进行 3 次垂向加载试验。试验前,位移传感器及测力传感器调零;施加 75 kN 的向上载荷,并保持负载 60 s;释放负载并确保加载装置不再与防爬器接触,读取位移传感器显示的数值,即刨削式防爬器的残余塑性变形。刨削式防爬器垂向加载试验结果如表 4 所示。

由表 4 可见,3 次试验的残余塑性变形均  $\leq 1$

mm,满足试验评估准则的要求。

表 4 刨削式防爬器垂向加载试验结果

Tab.4 Vertical loading test results of planing anti-climber

试验 编号	初始垂向 位移/mm	最大垂向 位移/mm	残余塑性 变形/mm
1	0	8.184	0.130
2	0	8.286	0.091
3	0	8.304	0.090

取 3 次试验中安全系数最低的一组数据作为最不利试验数据,其与仿真数据的对比如表 5 所示。两种分析方法下,防爬器的残余塑性变形均 < 1 mm,对比误差为 13.33%。

表 5 最不利试验数据与仿真数据的对比

Tab.5 Comparison of the most unfavorable test data and simulation data

数据 来源	初始垂向 位移/mm	最大垂向 位移/mm	残余塑性 变形/mm
仿真数据	0	12.144	0.150
最不利试验数据	0	8.184	0.130

3 结语

基于某地铁车辆刨削式防爬器,通过建立有限元模型仿真分析和试验验证两种分析方法对其吸能特性及防爬性能进行研究验证,结论如下:

1) 仿真结果和刚性墙碰撞试验结果均验证了刨削式防爬器良好的吸能性能。仿真分析得到的  $F-s$  曲线平稳, $F$  的仿真分析误差为 2.86%;经试验验证,防爬器刨削稳定有序,吸能效率高,与设计理念一致, $E_k$  的设计误差约为 0.87%。 $F$  仿真值与试验值相差仅为 5.17%, $E_k$  仿真值与试验值相差仅为 0.60%,均小于 20%,验证了仿真分析结果的可靠性。

2) 由垂向加载试验和仿真计算对防爬性能进行验证分析发现,刨削式防爬器的残余塑性变形均远小于 1 mm,说明防爬性能良好;对比误差为 13.33%,小于 20%,说明仿真分析结果真实可信。

参考文献

[1] 李本怀. 轨道客车车体碰撞吸能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.  
LI Benhuai. Research on crashworthiness of railway vehicle carbody[D]. Changchun: Jilin University, 2014.

[2] 杜彦品, 陈海俊, 李华丽, 等. 铁路客车耐碰撞车体结构研究[C]//第十七届中国科协年会——分7 综合轨道交通体系学术沙龙论文集. 广州: 中国科学技术协会, 2015: 506.  
DU Yanpin, CHEN Haijun, LI Huali, et al. Research on collision resistant carbody structure of railway passenger train[C]// Proceedings of 17th China Association for Science and Technology Annual Conference — division 7 comprehensive rail transit system academic salon. Guangzhou: China Association for Science and Technology, 2015: 506.

[3] 刘艳文. 轨道客车碰撞被动安全性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.  
LIU Yanwen. Research on collision passive safety for railway passenger vehicle [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.

[4] 张云峰. 刨削吸能式防爬器在城轨车辆碰撞安全设计中的应用[J]. 铁道车辆, 2014, 52(10): 20.  
ZHANG Yunfeng. Application of the peeling energy absorption type anti-climbing device in the collision safety design of urban rail vehicles[J]. Rolling Stock, 2014, 52(10): 20.

[5] 张云峰, 杭志洲, 方吴任. 刨削式与整体型蜂窝式车辆防爬器对撞性能分析[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(2): 26.  
ZHANG Yunfeng, HANG Zhizhou, FANG Jiongren. Collision performance analysis of planing and integral honeycombing anti-climbs for vehicles[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(2): 26.

[6] 常宁. 切削式吸能过程仿真研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.  
CHANG Ning. Simulation of energy-absorbing process in metal-cutting way[D]. Changsha: Central South University, 2009.

[7] 雷成, 肖守讷, 罗世辉. 轨道车辆切削式吸能装置吸能特性研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(2): 263.  
LEI Cheng, XIAO Shoune, LUO Shihui. Research on energy absorption characteristics of rail vehicle energy-absorbing component in cutting way [J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(2): 263.

[8] CENELEC. Railway applications—crashworthiness requirements for rail vehicles: EN 15227: 2020[S]. Brussels: CENELEC, 2020.

(收稿日期:2022-08-01)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》  
投稿网址:tougao. umt1998. com