

# 新型城市轨道交通车辆切削式防爬器研究<sup>\*</sup>

陈佳明 朱 涛 肖守讷 阳光武 杨 冰

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 610031, 成都)

**摘 要** [目的] 当前, 切削式防爬器存在切削初始峰值力过高问题, 会出现刀具脱落或断裂, 造成防爬器失效的情况。而且, 既有双切削式防爬器极易出现内部切屑在管内堆积的情况。因此需对新型城市轨道交通车辆切削式防爬器进行研究。[方法] 先建立切削式防爬器的有限元模型, 通过将切削式防爬器的切削力、碰撞吸能仿真结果同相关文献的试验结果对比, 验证有限元模型模拟方法的准确性。介绍蜂窝切削复合式防爬器和改进的内外双切削式防爬器的工作原理, 并通过有限元模型的模拟计算, 分析两种新型切削式防爬器的切削性能。[结果及结论] 在切削式防爬器出现初始峰值力的位置设置诱导槽, 可以有效地降低该峰值力; 诱导槽的深度不小于切削深度效果更佳; 诱导槽的宽度过大, 会导致二次峰值力的增加, 且刀具通过该诱导槽之后切削力会出现较大波动。与传统的抽屉式蜂窝防爬器相比, 蜂窝切削复合式防爬器不仅吸能能力极为优秀, 还能更换部件, 具有可重复利用的特性。新型内外双切削式防爬器能将切屑从管内顺利排出, 从而避免了切屑堆积。对比单切削式的防爬器, 新型内外双切削式防爬器的吸能性能更优。

**关键词** 城市轨道交通车辆; 切削式防爬器; 蜂窝; 碰撞吸能; 诱导结构; 数值模拟

**中图分类号** U270.38<sup>+</sup>9

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.01.022

## Research on New Cutting-type Anti-climbers for Urban Rail Transit Vehicles

CHEN Jiaming, ZHU Tao, XIAO Shoune, YANG Guangwu, YANG Bing

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, 610031, Chengdu, China)

**Abstract** [Objective] Currently, the CAC (cutting-type anti-climber) faces the issue of excessively high initial peak cutting force, leading to cutting tool detachment or fracture and finally the anti-climber failure. Moreover, the existing double-cutting type anti-climbers are prone to the accumulation of internal chips within the pipe. Therefore, the study on new CAC for urban rail transit vehicles is necessary. [Method] First, a CAC finite element model is established. The simulation results

of CAC cutting force and collision energy absorption are compared with the experimental results in relevant literature to verify the accuracy of the finite element model simulation method. The working principles of the honeycomb composite CAC and the improved internal-external double CAC are introduced. The cutting performance of two new CAC devices is analyzed through finite element model simulation calculations. [Result & Conclusion] Setting an induction groove at the position where the CAC initial peak force occurs can effectively reduce the peak force. The depth of the induction groove should not be less than the cutting depth for optimal results. But excessive width of the induction groove increases the secondary peak force and causes significant fluctuations in cutting force after the cutting tool passes through the induction groove. In comparison with the conventional drawer-type honeycomb anti-climbers, the honeycomb composite CAC not only exhibits excellent energy absorption capacity, but also allows for component replacement, making them reusable. The new internal and external double CAC can smoothly discharge the chips from the pipe, thereby avoiding the chip accumulation. Compared to a single CAC, the new internal-external double CAC demonstrates superior energy absorption performance.

**Key words** urban rail transit vehicle; cutting-type anti-climber; honeycomb; collision energy absorption; induction structure; numerical simulation

一旦发生城市轨道交通列车碰撞事故, 人员伤亡和财产损失难以估计。由此可见, 改善和提高城市轨道交通车辆的吸能防爬性能十分重要。吸能防爬器能吸收碰撞过程中产生的巨大能量, 从而给司乘人员提供更大的生存空间, 极大地降低碰撞造成的破坏。相较于压溃式的吸能装置, 切削式的吸能防爬器通过金属的摩擦、破裂和塑性变形综合作用来吸收能量, 吸能效果更具优势<sup>[1]</sup>。

现阶段国内外学者对于切削式防爬器的研究越来越深入, 其中一部分学者的工作是对其结构参

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(52172409)

数进行优化设计,对影响切削防爬器吸能特性的几个重要参数进行了对比,例如切削深度、切削圆心角、刀具前角、切削速度等等<sup>[2-4]</sup>。文献[5]使用多元线性回归模型研究参数拟合,探讨不同参数对整体吸能的影响程度。一部分学者在现有切削式防爬器基础上对其结构进行了改进。文献[6]设计了一种双向冲击承载能力更强的双拉削式防爬器,通过试验对比了拉削形式对吸能的影响。为改善碰撞能量的优化吸收,文献[7]提出了将切削式防爬器设计成切削厚度渐变的形式。

对切削式防爬器的研究也暴露出一些问题。一方面,切削式防爬器要求刀具材料及连接刀具的螺栓应具有很高的抗冲击性,一旦刀具在切削过程中脱落或破裂,就会使防爬器无法正常吸能,几乎失去作用。文献[6]中的试验即因发生此情况而失败。在中车长春轨道客车股份有限公司压溃试验台的切削防爬器试验中,也曾因刀具脱落而造成防爬器失效。另一方面,双切削式防爬器极易出现内部切屑在管内堆积的情况,这会阻碍刀具向前运行,并伴随切削力到后期不断增大的现象。对此,本文在现有切削式防爬器模型的基础上,提出了两种改进的切削式防爬器,通过与文献[2]的试验对比来验证模型建立方法的可靠性,并通过仿真来研究这两种改进切削式防爬器的吸能特性,以期为新式切削式防爬器的研发提供有价值的参考。

## 1 切削式防爬器的有限元模型及验证

### 1.1 材料模型

切削式防爬器的碰撞过程与材料的应变率相关。一般防爬器使用的碳钢属于应变率敏感型材料,其在不同的加载速度下的应变率差异很大。为准确模拟被切削材料在刀具的切割下产生塑性变形、切屑剥离的过程,有限元仿真模型采用结构塑性动力学领域应用较广的 Johnson-Cook 本构模型(以下简称“J-C 模型”)。该模型与应变率相关,常用于结构冲击问题,其等效流动应力表示为<sup>[8]</sup>:

$$\hat{\sigma} = [\sigma_0 + B(\bar{\varepsilon})^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_{\text{melt}} - T_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中:

$\hat{\sigma}$ ——等效应力;  
 $\sigma_0$ ——初始屈服应力;

$\bar{\varepsilon}$ ——等效塑性应变;

$\dot{\varepsilon}$ ——塑性应变率;

$\dot{\varepsilon}_0$ ——参考应变率,取  $1.0 \text{ s}^{-1}$ ;

$T$ ——变形温度;

$T_0$ ——室温;

$T_{\text{melt}}$ ——熔化温度;

$B$ ——硬化模量;

$n$ ——加工硬化指数;

$C$ ——依赖于应变率的系数;

$m$ ——热软化系数。

J-C 模型中的碳钢材料采用与文献[7]相同参数的热轧 20 钢。模型中热轧 20 钢的参数为: $\sigma_0 = 280 \text{ MPa}$ ,  $B = 480 \text{ MPa}$ ,  $n = 0.23$ ,  $C = 0.016$ ,  $m = 1.83$ 。J-C 模型尺寸及碰撞工况也与文献[7]相同。切削式防爬器有限元模型如图 1 所示。

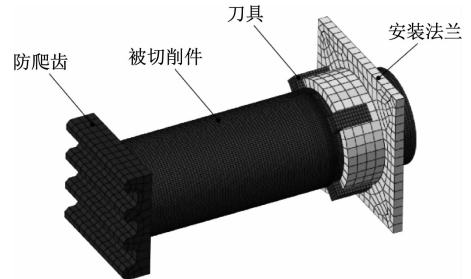


图 1 切削式防爬器有限元模型

Fig. 1 Finite element model of cutting-type anti-climber

### 1.2 仿真结果对比

根据仿真结果绘制切削力-位移仿真曲线,并与文献[2]的试验曲线进行对比。图 2 为切削力-位移仿真曲线和试验曲线。

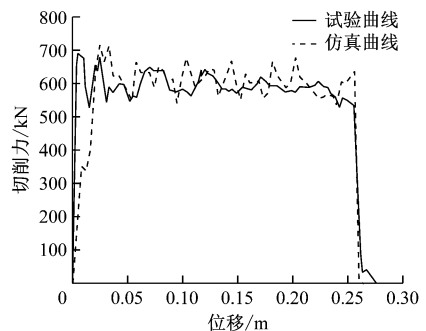


图 2 切削力-位移仿真曲线及文献[2]的试验曲线

Fig. 2 Cutting force-displacement simulation curve and literature [2] test curve

从图 2 中可以看到,两者的变化趋势比较接近。其中:切削力峰值仿真值最大为 716.0 kN,试验值为 699.4 kN,相差 2.31%;平均切削力仿真值为

576.53 kN, 试验值为 583.23 kN, 相差 1.15%。此外, 由计算可得, 吸能量仿真值为 154.23 kJ, 试验值为 151.64 kJ, 相差 1.68%。可见, J-C 模型仿真值与文献试验值非常接近, 足以证明该建模方法的准确性。

## 2 诱导槽对切削式防爬器的影响

### 2.1 诱导槽的设计

由图 2 可知, 在切削式防爬器刀具与被切削件刚接触时, 存在着一个较大的峰值切削力。从仿真曲线可以看出, 该峰值切削力出现在切削位移为 35 mm 左右的位置。为降低峰值切削力的影响, 在距离刀具与被切削圆管接触的部位 35 mm 附近设置 4 种不同类型的诱导槽结构, 并对比其对峰值切削力及最终吸能的影响。其中, 诱导槽 1 为 3.0 mm (宽) × 3.0 mm (深), 诱导槽 2 为 9.0 mm (宽) × 3.0 mm (深), 诱导槽 3 为 6.0 mm (宽) × 3.0 mm (深), 诱导槽 4 为 6.0 mm (宽) × 1.5 mm (深)。诱导槽样式如图 3 所示。

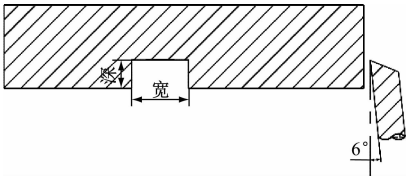


图 3 诱导槽样式示意图

Fig. 3 Diagram of induction groove forms

### 2.2 诱导槽的影响分析

防爬器参数选为: 切削深度为 3.0 mm, 切削行程为 260 mm, 切削圆心角为 30°, 刀具个数为 4, 刀具前角为 6°。在切削速度为 5 m/s 的工况条件下, 对诱导槽不同的防爬器进行切削仿真, 并与无诱导槽防爬器进行对比。

图 4 为不同诱导槽设置情况的防爬器切削力-位移曲线。表 1 为诱导槽设置情况不同的防爬器切削力峰值情况, 其中二次峰值力是指切削力初始峰值经过诱导槽后的值。

由图 4 可见, 诱导槽 1 和诱导槽 2 都对初始切削力峰值有削弱作用, 诱导槽 3 的切削力初始峰值反而增大了, 说明诱导槽的深度宜不小于刀具的切削深度; 当诱导槽宽度从 3.0 mm 增至 6.0 mm 时, 切削力初始峰值随之降低; 当诱导槽宽度从 6.0 mm 增至 9.0 mm 时, 切削力初始峰值又超过了无诱导槽的情况。此外, 过宽的诱导槽还会导致切削力二

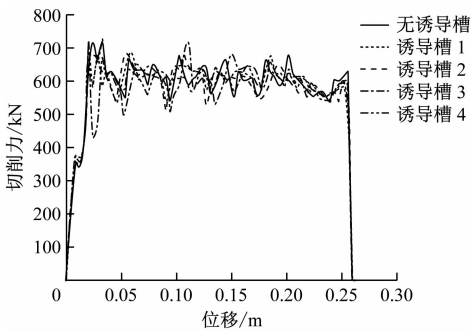


图 4 不同诱导槽设置情况的防爬器切削力-位移曲线

Fig. 4 Anti-climber cutting force displacement curves of different induction groove setting conditions

表 1 不同诱导槽设置情况的防爬器切削力峰值

Tab. 1 Peak cutting force of the anti-climber under different induction groove setting conditions

诱导槽设置情况	切削力/kN	
	初始峰值	二次峰值
无诱导槽	716.0	676.2
诱导槽 1	709.4	676.6
诱导槽 2	685.5	675.9
诱导槽 3	722.2	723.2
诱导槽 4	726.9	647.2

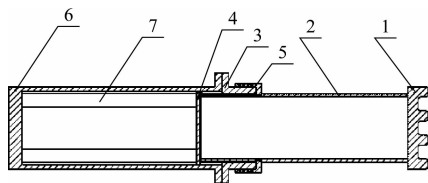
次峰值的增大, 表现为在刀具经过诱导槽之后, 后续的切削力波动较大。故诱导槽并不是越宽越好, 要根据实际情况设置合理值。根据该仿真情况, 建议在切削速度为 5 m/s 时, 优先选用宽度为 6.0 mm 左右的诱导槽, 从而达到减小切削力的最优结果。

## 3 蜂窝切削复合式防爬器

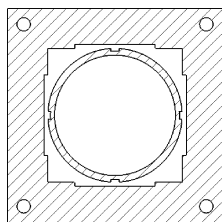
### 3.1 工作原理

为防止出现由刀具脱落或崩裂而造成切削式防爬器彻底失效的情况, 在传统切削式防爬器的后端增设铝蜂窝结构, 设计出蜂窝切削复合式防爬器。图 5 为蜂窝切削复合式防爬器的结构示意图, 图 6 为蜂窝切削复合式防爬器的有限元模型。

蜂窝切削复合式防爬器的刀具通过螺栓连接在刀具安装座上; 被切削件外径与刀具安装座内径相配合, 被夹持固定; 刀具安装座与铝蜂窝套筒也通过螺栓相连。铝蜂窝套筒内的隔板截面为不规则多边形, 可以在套筒凹槽内滑动。被切削件后端紧贴隔板, 隔板和铝蜂窝套筒内的空间根据吸能容量要求填充相应规格铝蜂窝。



a) 剖面视图 1



b) 剖面视图 2

注:1—防爬齿;2—被切削件;3—刀具安装座;4—隔板;5—刀具;6—套筒;7—铝蜂窝。

图 5 蜂窝切削复合式防爬器的结构示意图

Fig. 5 Diagram of honeycomb composite cutting-type anti-climber

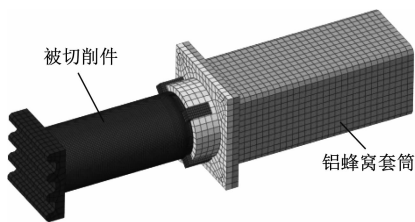


图 6 蜂窝切削复合式防爬器的有限元模型

Fig. 6 Finite element model of honeycomb composite cutting-type anti-climber

蜂窝切削复合式防爬器工作原理为:当碰撞发生之后,防爬齿受到冲击首先向后退回,当剪应力超过被切削件材料的屈服极限后,被切削件开始被刀具切削。同时,被切削件退回撞到隔板,从而通过隔板挤压套筒内部的铝蜂窝,铝蜂窝开始压溃吸能。在整个碰撞过程中,即使连接刀具的螺栓被剪断,或者刀具断裂失效,后端的铝蜂窝也依然能发挥其吸能特性,对防爬器仍将起到被动安全防护的作用。

### 3.2 与单一式蜂窝防爬器的吸能能力对比

单一式蜂窝防爬器多采用抽屉式结构,其有限元模型如图 7 所示。

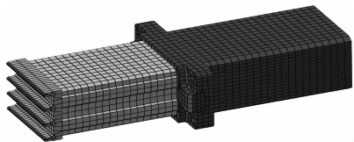


图 7 单一式蜂窝式防爬器的有限元模型

Fig. 7 Finite element model of single honeycomb anti-climber

为了简化建模过程和减少仿真计算时间,将有限元模型中的蜂窝部分用 dyna 指令中 119 号材料 beam 梁单元模拟,并按蜂窝的压溃力与时间的曲线赋值该梁单元。单一式蜂窝防爬器和蜂窝切削复合式防爬器的平均压溃力都设置为 400 kN;除防爬齿外,其余的防爬器部分的长度都设置为 530 mm;仿真试验设置相同的碰撞工况——将防爬器固定,用刚性墙以 5 m/s 的速度进行压溃。

单一式蜂窝防爬器和蜂窝切削复合式防爬器的切削力仿真结果如图 8 所示。根据仿真结果,蜂窝切削复合式防爬器的平均切削力高达 968 kN,而单一式蜂窝防爬器的平均切削力仅为 465 kN。

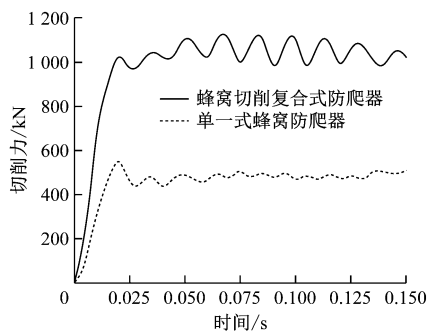


图 8 单一式蜂窝防爬器和蜂窝切削复合式防爬器的切削力仿真结果

Fig. 8 Simulation results of cutting force for single honeycomb anti-climber and honeycomb composite cutting-type anti-climber

经分析,单一式蜂窝防爬器在前管走完行程,完全滑入后管之后,其内部所填充的铝蜂窝并不能被全部压完,压溃的蜂窝长度也只是前管走过的那段行程长度。与单一式蜂窝防爬器相比,在压溃蜂窝长度相同时,蜂窝切削复合式防爬器除了以蜂窝压溃吸能,还可切削吸能,故其吸能能力极为优秀。

此外,蜂窝切削复合式防爬器除了在刀具失效后能保证被动安全以外,在完成一次碰撞之后,还可以更换内部被压溃的蜂窝和被切削件,具有可重复利用的特性。

## 4 改进的内外双切削式防爬器

### 4.1 工作原理

内外双切削式防爬器在防爬器被切削件的内部和外部均布置刀具。在防爬器工作时,外刀具切削被切削件的外表面切料,内刀具切削被切削件的内表面切料,从而在不增加切削深度的情况下,增



大整个过程的切削力,从而改善防爬器的吸能能力。

文献[8]设计并研究了一种新型的内外双拉削式防爬器。通过与单一的外拉削式防爬器对比,发现此类内外双拉削式防爬器不仅吸能能力更优,稳定性也更好,抗双向冲击的能力也更强。然而,一般的内外双拉削式防爬器存在内部切屑无法排出的问题。内部切屑不断堆积在被切削管件内,阻碍了刀具向前的切削过程,造成后续切削力的增大。

鉴于文献[8]的情况,本研究在单切削式防爬器的基础上对结构进行改进,并在其前端增添一根导向管。该导向管前端与防爬齿相连,后端嵌入内刀具,并与被切削件内径配合。通过该导向管,内部切屑可从被切削件内,由前向后顺利排出。

改进后的内外双切削式防爬器切削过程如图 9 所示。

1)阶段一。在碰撞发生后,受到撞击的防爬齿向后退回,导向管也随之后退,内刀具开始切削被切削件内部。

2)阶段二。当内刀具向后切削时,被切削件在切削力的作用下也会有向后退的趋势;只要被切削件与安装座上外刀具的接触力达到一定值,就会触发外刀具同时开始切削,如图 9 b)所示。

3)阶段三。外刀具继续切削被切削件外部,直到完成整个切削过程。

由图 9 c)可以看到,内部切屑可以从管内顺利排出,并不影响切削过程。

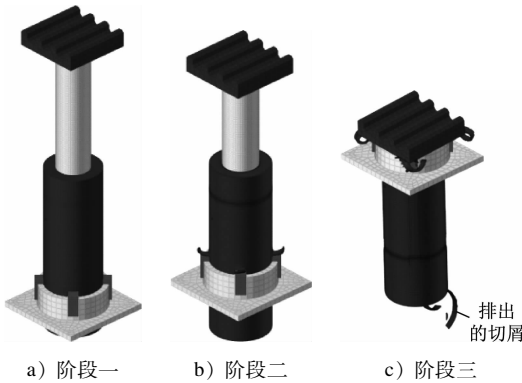


图 9 内外双切削式防爬器切削过程

Fig. 9 Cutting process of internal and external double-cutting anti-climber

4.2 与单切削式防爬器的吸能性能对比

总吸能效率  $I_{total}$  是衡量吸能防爬器结构性能的重要指标之一[8]。 $I_{total}$  可综合评估结构吸能时载荷的波动情况和结构的有效利用程度。 $I_{total}$  越高,则吸能结构的载荷吸收越稳定,而且更符合轻量化的

要求。 $I_{total}$  的值为:

$$I_{total} = \frac{F_a L_E}{F_p L} \tag{2}$$

式中:

- $F_a$ ——平均切削力;
- $F_p$ ——峰值切削力;
- $L_E$ ——被切削件的有效切削长度;
- $L$ ——被切削件的总长度。

通过有限元模型仿真模拟对改进的内外双切削式防爬器在整个切削过程的切削力,结果如图 10 所示。

由图 10 可见,内刀具切削力略小于外刀具切削力,在撞击发生后两者几乎同时开始切削,最终各自走完其切削行程。

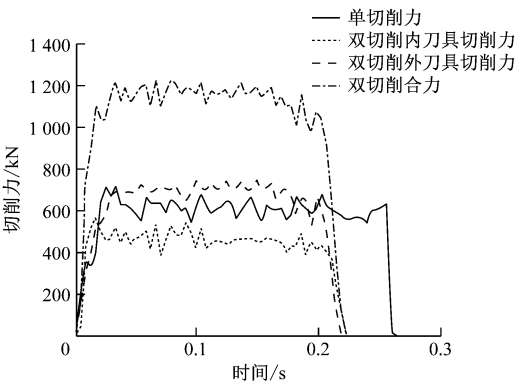


图 10 改进的内外双切削式防爬器在整个切削过程的切削力仿真结果

Fig. 10 Cutting force simulation results of the improved internal external double-cutting anti-climber throughout the entire cutting process

双切削形式防爬器的有效行程,应为内外刀具两者切削的有效行程之和。内外刀具切削的有效行程均为 220 mm,引导管和被切削管的总长为 530 mm。两种防爬器的吸能性能指标如表 2 所示。

表 2 两种防爬器的吸能性能指标

Tab.2 Comparison of energy absorption performance between two types of anti-climbers efficiency					
防爬器类型	刀具切削的有效行程/mm	引导管和被切削管总长/mm	切削力平均值/kN	切削力峰值/kN	$I_{total}$
单切削式防爬器	260	340	576.5	716.0	0.62
改进的内外双切削式防爬器	440	530	1 087.5	1 225.1	0.74

由表 2 可见,与单切削式防爬器相比,双切削式防爬器的  $I_{\text{total}}$  提高了 19.35%,说明其载荷波动更小,结构的有效利用程度也更高。

## 5 结论

1) 通过在切削式防爬器出现峰值切削力的位置设置诱导槽,可以有效地降低该峰值切削力。诱导槽的深度最好不要小于切削深度,诱导槽的宽度并不是越宽越好。如果宽度过大,则会导致二次峰值切削力的增加,且刀具通过该诱导槽之后切削力会出现较大的波动。建议在 5 m/s 的切削速度下,优先选用 6 mm 左右的诱导槽宽度。

2) 与传统的单一式蜂窝防爬器相比,本文提出的蜂窝切削复合式防爬器吸能能力明显更优越。

3) 蜂窝切削复合式防爬器在刀具出现脱落和崩裂时,仍能靠内部蜂窝发挥其吸能效果。内部蜂窝可改变吸能容量,与不同轨道交通车辆的吸能要求相匹配,适应性较好。在该防爬器碰撞吸能之后,还能重新更换被切削件和内部蜂窝,可重复利用性好。

4) 双切削式防爬器具有更好的切削稳定性,其  $I_{\text{total}}$  比单切削式  $I_{\text{total}}$  提高了 16.2%。

5) 本文所改进的双切削式防爬器可将切屑从管内顺利排出,从而避免了切屑堆积所造成切削力不断增大的后果。

## 参考文献

- [1] 刘国伟,夏茜,王千叶,等. 切削式吸能的惯性效应[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(3): 62.  
LIU Guowei, XIA Xi, WANG Qianye, et al. Inertia effects of cutting energy absorption[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(3): 62.
- [2] 刘艳文,修瑞仙,李本怀,等. 基于动态 J-C 本构的轨道交通车辆新型切削式吸能装置耐撞性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(6): 28.

- LIU Yanwen, XIU Ruixian, LI Benhuai, et al. On crashworthiness of the new cutting energy-absorbing device installed on railway vehicles based on dynamic Johnson cook constitutive[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(6): 28.
- [3] 汤礼鹏. 城轨车辆切削式专用吸能装置研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.  
TANG Lipeng. Research on the special energy-absorbing structure of mass transit vehicles[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [4] 毛从强. 刨削式防爬器刨削力的控制[J]. 铁道车辆, 2014, 52(3): 14.  
MAO Congqiang. Control of the planing force of the planing type climbing prevention device[J]. Rolling Stock, 2014, 52(3): 14.
- [5] 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.
- [6] 岳伟玲. 轨道车辆拉削式防爬器吸能特性的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.  
YUE Weiling. Study on energy absorption characteristics of railway vehicle broaching anti-climber[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [7] 梁炬星. 一种新型切削式防爬器研究[J]. 机车电传动, 2018(3): 48.  
LIANG Juxing. Study of a new type of broaching anti-climber[J]. Electric Drive for Locomotives, 2018(3): 48.
- [8] HORTIG C, SVENDSEN B. Simulation of chip formation during high-speed cutting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 186(1/2/3): 66.

· 收稿日期:2021-07-02 修回日期:2021-09-02 出版日期:2024-01-10  
Received:2021-07-02 Revised:2021-09-02 Published:2024-01-10  
· 第一作者:陈佳明,硕士研究生,413033354@qq.com  
通信作者:朱涛,副研究员,zhutao034@swjtu.cn  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

## 2023 年 11 月份城市轨道交通运营数据

2023 年 11 月,31 个省(自治区、直辖市)和新疆生产建设兵团共有 55 个城市开通运营城市轨道交通线路 300 条,运营里程 9 915.6 km,实际开行列车 321 万列次,完成客运量 25.8 亿人次,进站量 15.5 亿人次。本月客运量环比减少 0.7 亿人次、降低 2.8%,同比增加 11.6 亿人次、增长 81.9%。本月全国总运营里程的平均客运强度为 0.868 万人次/(km·d)。本月新增运营里程 53.6 km。新增运营线路 1 条,为成都地铁 19 号线;新增运营区段 2 个,为重庆地铁 5 号线一期中段和 10 号线二期南段。

(来源:交通运输部官网)