

铁路轨道铣削除冰装置设计与仿真分析

徐爱民^{1*}, 赵 旺¹, 吴文海², 杨志军³

¹北京市地铁运营有限公司线路分公司, 北京

²西南交通大学机械工程学院, 四川 成都

³西南交通大学创新创业学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年3月7日; 录用日期: 2025年3月31日; 发布日期: 2025年4月7日

摘 要

针对铁路钢轨冬季覆冰问题, 本文提出了一种基于机械式铣削原理的除冰方法, 旨在提高除冰效率和保障铁路运营安全。通过对铣削除冰的工作原理进行深入分析, 结合有限元仿真和实验研究, 对关键参数如铣刀倾斜角度、切削深度、切削速度和铣刀转速进行了优化。仿真结果显示, 减小铣刀倾斜角度和增加切削深度均能提升冰层所受的切削应力, 而切削速度和铣刀转速则需控制在一定范围内以达到最佳除冰效果。实验研究表明, 所设计的铣削式除冰装置在模拟低温环境下表现出色, 能有效清除不同厚度和硬度的冰层, 且对钢轨表面损伤较小。本研究不仅为铁路冬季运营安全提供了有力保障, 还推动了机械式除冰技术在铁路领域的应用和发展。

关键词

铁路钢轨覆冰, 机械式铣削除冰, 关键参数优化, 有限元仿真

Design and Simulation Analysis of a Railway Track Milling De-Icing Device

Aimin Xu^{1*}, Wang Zhao¹, Wenhai Wu², Zhijun Yang³

¹Line Branch of Beijing Metro Operation Co., Ltd., Beijing

²School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

³College of Innovation and Entrepreneurship, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Received: Mar. 7th, 2025; accepted: Mar. 31st, 2025; published: Apr. 7th, 2025

Abstract

Addressing the issue of winter icing on railway tracks, a de-icing method based on the mechanical milling principle is proposed in this paper, aiming to enhance de-icing efficiency and ensure railway

*第一作者。

文章引用: 徐爱民, 赵旺, 吴文海, 杨志军. 铁路轨道铣削除冰装置设计与仿真分析[J]. 机械工程与技术, 2025, 14(2): 114-124. DOI: 10.12677/met.2025.142012

operational safety. Through in-depth analysis of the working principle of milling de-icing, combined with finite element simulation and experimental research, key parameters such as milling cutter inclination angle, cutting depth, cutting speed, and milling cutter rotational speed were optimized. Simulation results indicate that reducing the milling cutter inclination angle and increasing the cutting depth can both elevate the cutting stress applied to the ice layer, while the cutting speed and milling cutter rotational speed need to be controlled within a certain range to achieve optimal de-icing results. Experimental studies show that the designed milling de-icing device performs excellently in simulated low-temperature environments, effectively removing ice layers of different thicknesses and hardnesses with minimal damage to the railway track surface. This research not only provides robust support for railway operational safety in winter, but also promotes the application and development of mechanical de-icing technology in the railway sector.

Keywords

Railway Rail Icing, Mechanical Milling De-Icing, Key Parameter Optimization, Finite Element Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

在寒冷的冬季,铁路系统面临着严峻的钢轨覆冰问题,当气温骤降,空气中的水分凝结并附着在钢轨表面,随着时间的推移,这些冰层会逐渐增厚,对列车的安全运行构成严重威胁。钢轨覆冰不仅会增加列车行驶的阻力,降低运行效率,还可能导致制动距离延长,甚至引发脱轨等安全事故。因此,及时有效地清除钢轨上的冰层,对于保障铁路冬季运营安全具有重要意义[1]。

在钢轨覆冰研究方面,尽管近年来也取得了一定进展,但相较于接触网覆冰研究,其研究深度和广度仍有待加强[2][3]。其中传统的人工除冰仍是最常用的方式,但效率较低[4];热力除冰法虽然有效,但能耗高、操作复杂,且在大范围应用时效率较低[5]。化学除冰法则可能对环境造成污染,且长期使用会腐蚀钢轨材料[6]。相比之下,机械式除冰技术以其高效、环保的特点,逐渐成为研究热点[7]。机械式除冰技术在其他领域,如道路除雪、桥梁防冻等方面已得到广泛应用,然而,由于铁路系统的特殊性和复杂性,直接将现有技术应用于铁路钢轨除冰仍存在诸多困难。针对铁路钢轨覆冰的机械式除冰设备设计尚不完善,尤其是在关键参数优化和效能评估方面仍存在较大空白[8]。因此,开展针对性的研究,优化机械式铣削除冰法的关键参数,提升钢轨除冰效率,具有重要的现实意义和理论价值。

本文旨在优化机械式铣削除冰法的关键参数,提升钢轨除冰效率,通过深入分析现有除冰技术的局限性,结合铁路系统的实际需求,设计一种高效、环保的铁路轨道铣削除冰设备,并对其关键参数进行仿真优化。研究成果不仅将为铁路冬季运营安全提供有力保障,还将推动机械式除冰技术在铁路领域的应用和发展。

2. 机械式铣削除冰法

2.1. 铣削除冰的工作原理

机械式铣削除冰法主要利用铣刀的切削原理,通过高速旋转的铣刀对铁路钢轨表面的冰层进行铣削和破碎。这种方法适用于清除密度大、硬度高的冰膜状、冻结状冰雪,除净率较高。

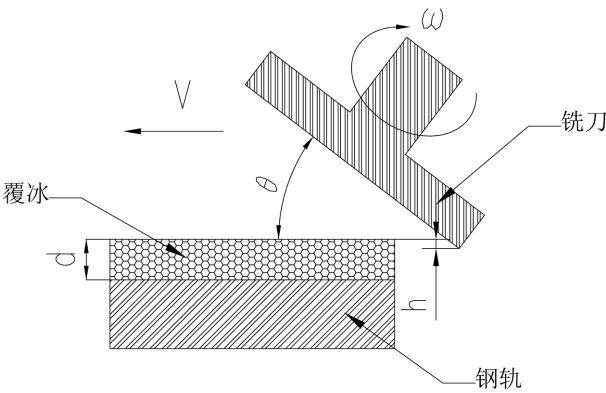


Figure 1. Schematic diagram of the milling de-icing principle
图 1. 铣削除冰原理示意图

在特定的气象环境下，空气中的过冷却水滴一旦与钢轨表面接触，便会迅速冻结，形成一层初始的覆冰。随着时间的推移，更多的水滴不断在这一薄冰层上累积并继续冻结，导致冰层逐渐增厚，铣削除冰原理见图 1，用“ d ”来代表不断累积的冰层厚度。这层覆冰与钢轨表面紧密结合，形成了一个顽固且难以轻易去除的障碍物。若天气条件持续不变，覆冰的厚度将进一步增加，对铁路的安全运行构成严重威胁。在这种情况下，传统的软刷清扫方式已难以对冰层产生有效的清除效果。

为了应对这一挑战，引入铣削除冰技术，铣刀通过高速旋转，产生出强大的切削力，对冰层进行有力的破坏。图中所示的旋转速度“ ω ”是铣刀旋转速度的重要表征，它直接影响切削的效率和效果，成为除冰过程中的关键因素之一。在铣刀的持续作用下，覆冰被不断切削和破碎，最终实现了对钢轨上覆冰的有效清除。

在整个除冰过程中，铣刀不仅保持了高速旋转，还以一定的速度向前移动，确保了切削动作的连续性和高效性。切削速度用“ V ”来表示。为了应对不同覆冰附着力和冰层厚度的情况，铣刀与覆冰之间的倾斜角度“ θ ”可以进行灵活调节，调节范围在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间，以达到最佳的切削效果。

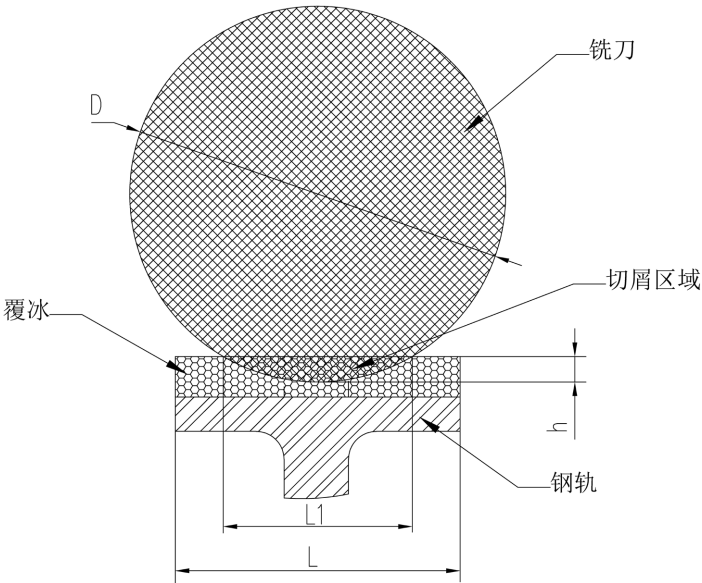


Figure 2. Schematic cross-section of the cutting area in milling de-icing
图 2. 铣削除冰切削区域截面示意图

同时,为了确保不对钢轨造成损伤,铣刀在作业时必须保持一定的安全距离,即铣刀的最低点必须高于钢轨的轨面。这就意味着图中所示的铣刀进入冰层的深度“ h ”必须小于冰层的厚度“ d ”,以确保在有效清除覆冰的同时,不会对钢轨的安全运行造成任何潜在威胁。

2.2. 铣削除冰的理论分析

当铣刀与覆冰之间的倾斜角度 $\theta = 0^\circ$ 时,铣刀与覆冰处于平行状态,只需要铣刀直径大于覆冰的宽度,铣刀即可对整个覆冰区域产生切削力影响。当 θ 增大后,铣刀对覆冰区域的影响面积逐步减小,到 $\theta = 90^\circ$ 时达到最小。

铣削除冰切削区域见图 2,当 $\theta = 90^\circ$ 时,即铣刀与覆冰处于相对垂直状态时,铣刀对覆冰的影响范围 $L1$ 最小。

$$L1 = 2 \times \left[\frac{D^2}{4} - \left(\frac{D}{2} - h \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中, $L1$ 代表铣刀对覆冰的影响范围, D 为铣刀直径, h 为铣刀切削冰层的深度。为了避免铣刀对钢轨轨面的影响,切削冰层的深度始终要小于覆冰的厚度,因此, $L1$ 受到限制,覆冰区域受到影响的范围最小。

为了全面探究铣刀切削力对覆冰的影响,针对三种不同的角度状态,即 $\theta = 0^\circ$ 、 $\theta = 45^\circ$ 和 $\theta = 90^\circ$ 进行了详细分析。同时,通过调整切削速度“ v ”、切削冰层的深度“ h ”和铣刀旋转速度“ ω ”这几个参数,对铣削除冰过程进行多角度、全方位的深入分析。

3. 仿真建模

3.1. 有限元模型

在钢轨除冰作业中,鉴于冰与钢轨之间存在着显著的强度差异,在此假设钢轨为不可变形的刚体,而主要关注并分析覆冰的应力状态与失效情况[9]。

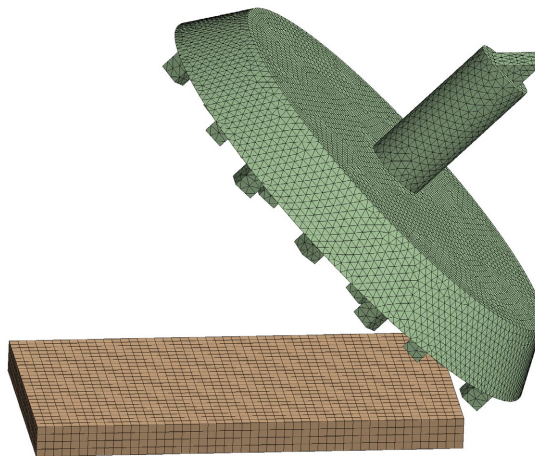


Figure 3. Finite element model for milling de-icing
图 3. 铣削除冰有限元模型

铁路钢轨铣削除冰的有限元模型见图 3,其中覆冰被设定为矩形结构,模拟了钢轨顶部被冰层均匀全面覆盖的情形。铣刀端面设计了多个刀刃,这些刀刃在铣刀旋转时能够施加巨大的切削力于冰层之上,从而实现对冰层的有效破坏。此外,铣刀与覆冰之间被设定为一定的倾斜角度“ θ ”,以增强切削效果。

值得注意的是,该模型在设计中省略了被冰覆盖的钢轨部分,以简化分析。在构建模型时,采用了 ANSYS 软件进行网格划分,全部网格类型均为六面体网格,确保了模型的精确性。具体而言,网格的单元总数达到了 91,532 个,这为后续的仿真分析提供了坚实的基础。

3.2. 边界条件设置

1) 在 LS-DYNA 分析模块中,将铣刀材料选为常见的结构钢,刚度定义为刚体,对冰的材料属性进行重新定义,刚度定义为柔性体,材料参数见表 1。

Table 1. Material parameters [10] [11]

表 1. 材料参数[10] [11]

名称	结构钢	冰
弹性模量/Mpa	2×10^5	5.2×10^3
泊松比	0.3	0.3
密度/(kg·m ⁻³)	7850	852
剪切强度/Mpa	490	1.5 (0℃) 10 (-20℃)

2) 对覆冰底部进行固定约束,对铣刀施加自转的固定角速度“ ω ”,同时对铣刀定义沿前进方向的切削速度“ V ”,使铣刀经过整个覆冰表面,对铣刀其他方向的旋转和位移进行远程约束。

3) 将几何体交互类型设置为摩擦,接触特性定义为侵蚀接触,约束公式采用罚函数。

3.3. 工况设定与参数变化

在铣削除冰仿真中,需要考虑多种因素,包括冰层厚度“ d ”、铣刀转速“ ω ”、铣刀倾斜角度“ θ ”、切削速度“ V ”以及切削冰层的深度“ h ”等,这些因素的定义及可能的取值范围见表 2。

Table 2. Parameter setting

表 2. 参数设定

名称	代表符号	参数范围
冰层厚度	d	10 mm
铣刀倾斜角度	θ	0~90°
切削速度	V	0.4~1.6 m/s
切削冰层的深度	h	2~8 mm
铣刀转速	ω	1~5 转/s

4. 有限元结果分析

4.1. 铣刀倾斜角度的影响

由于铁路轨道铣削除冰一般针对较为顽固的覆冰,冰层相对较厚,因此设定冰层厚度为 $d = 10\text{ mm}$,铣刀倾斜角度 θ 可在 0°~90°范围内调整,选定 0°、45°和 90°这三种工况进行分析,切削速度设置为 0.8 m/s,切削冰层的深度设置为 4 mm,铣刀转速设置为 2 转/s,取一段覆冰长度作为分析对象,得到的仿真结果如下。

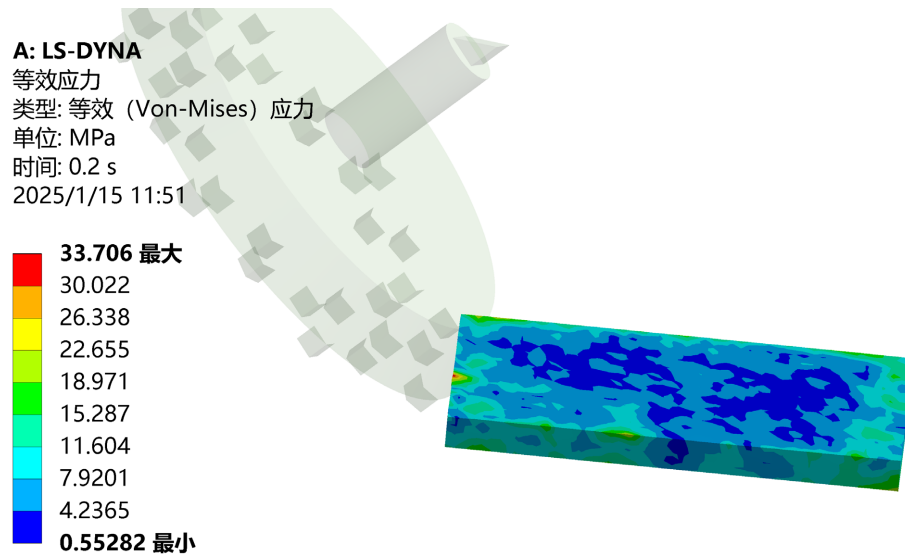


Figure 4. Stress distribution cloud map of milling de-icing ($\theta = 45^\circ$)
图 4. 铣削除冰应力分布云图($\theta = 45^\circ$)

$\theta = 45^\circ$ 铣削除冰应力分布见图 4, 当铣刀在自转的同时, 自右向左穿越整个冰层时, 由于其被视为一个刚性体, 所受到的影响相较于冰层而言可忽略不计。因此, 我们的主要关注点在于冰层的变化。若将铣刀隐藏不考虑, 冰层底部与钢轨接触面上的应力分布见图 5。

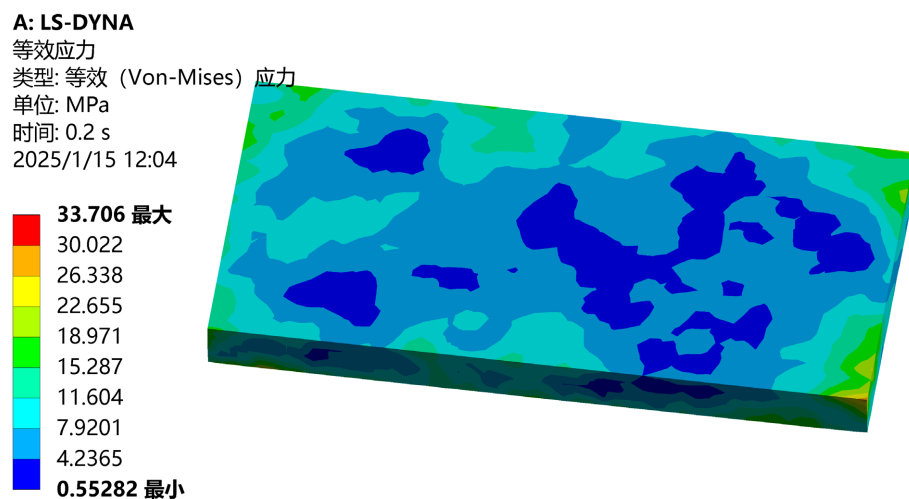


Figure 5. Stress distribution cloud map at the interface between the bottom of ice layer and railway track ($\theta = 45^\circ$)
图 5. 冰层底部与钢轨接触面应力分布云图($\theta = 45^\circ$)

铣削除冰的主要目标是将冰层从钢轨上剥离。在此过程中, 铣刀主要作用于冰层的特定区域。具体而言, 冰层四周由于受到较大的切削力影响, 展现出了较高的应力值。相对而言, 冰层底部某些区域所受的切削力影响较小, 因此应力值也较低, 其中最小的应力值达到了 0.55 MPa, 这一数值低于冰在常温 (如 0°C) 下的剪切强度。尽管如此, 整个冰层所承受的平均应力值为 6.4 MPa, 这一数值虽然远高于冰在 0°C 时的剪切强度, 但仍然小于冰在 -20°C 被冻得更为坚固后的剪切强度。

冰层内部的应力分布情况见图 6, 在铣削作业过程中, 铣刀采用 45° 的倾斜角度, 以 2 转/秒的自转速

度和 0.8 米/秒的平移速度对冰层实施铣削。铣削完成后，冰层内部仍有部分单元应力值保持在 1.5 Mpa 以下，显示这些区域受到的切削影响较小，意味着预期的切削效果未能完全实现。

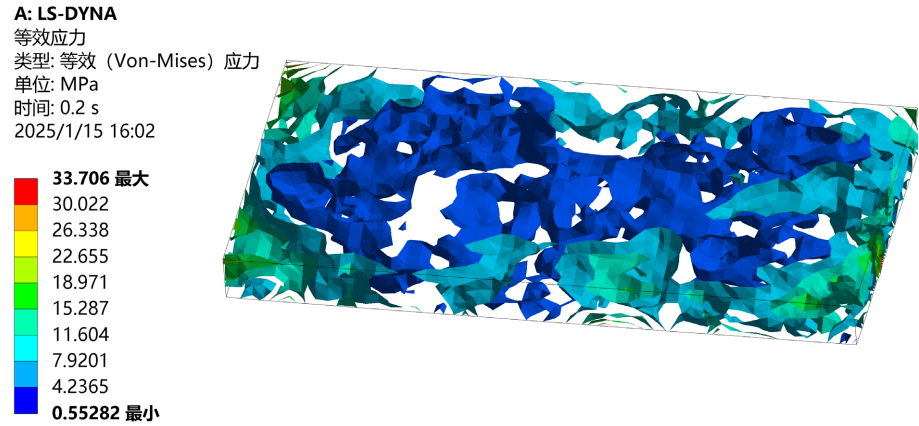


Figure 6. Isosurface distribution cloud map inside the ice layer ($\theta = 45^\circ$)
图 6. 冰层内部等值面分布云图($\theta = 45^\circ$)

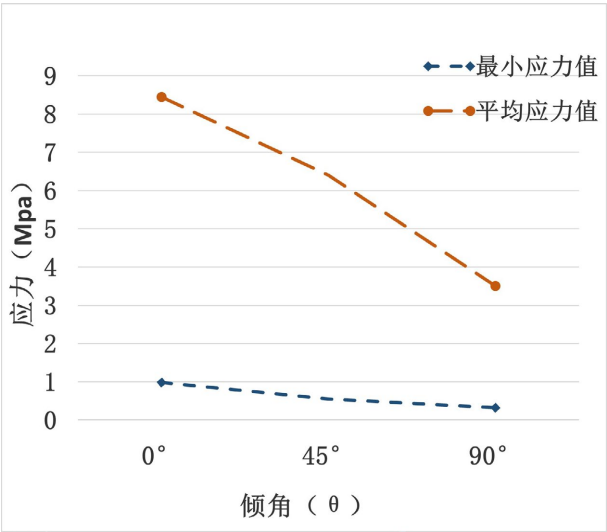


Figure 7. Influence curve of inclination angle on milling stress
图 7. 倾角对铣削应力的影响曲线

在保持其他参数不变的情况下，仅调整铣刀的倾斜角度“ θ ”，倾角对铣削应力的影响见图 7，随着 θ 的增大，冰层所承受的平均应力值和最小应力值均呈现显著的下降趋势。这一现象的原因在于，当倾斜角度 θ 增加时，在其余条件恒定的情况下，铣刀对冰层的作用范围 L1 逐渐缩小。特别地，当 $\theta = 90^\circ$ 时，这一作用范围达到最小，此时铣刀对冰层施加的铣削力影响也最为微弱，因此应力值达到最低，切削效果也随之减弱。仿真分析的结果与理论预期相吻合。针对厚度较大且强度较高的冰层，建议减小倾斜角度 θ 以提高切削效率；相反，对于较薄或结构较为松散的冰层，则可以选择较大的倾斜角度进行作业。

4.2. 铣刀切削深度的影响

通过上述分析，为了保持较大的切削力，取 $\theta = 0^\circ$ ，其他参数仍然不变，仅改变切削冰层的深度“ h ”，得到的仿真结果见图 8。

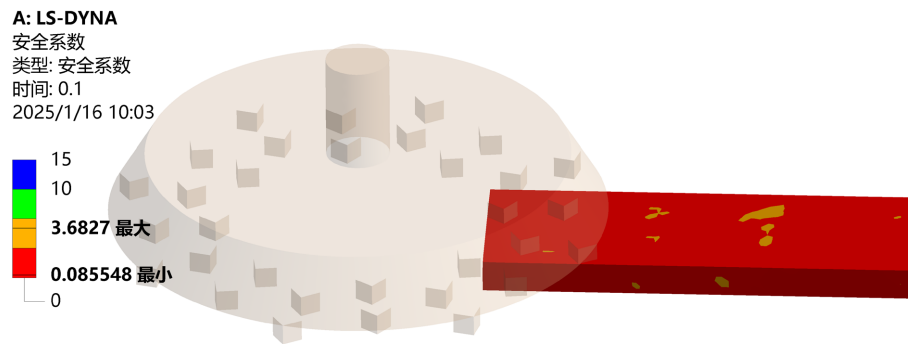


Figure 8. Safety factor distribution cloud map of ice layer ($h = 8 \text{ mm}$)

图 8. 冰层安全系数分布云图($h = 8 \text{ mm}$)

当切削深度设定为 8 mm 时, 冰层整体的安全系数平均值达到 0.4 (小于 1 即为失效), 显示出切削力对冰层造成了广泛影响。仅冰层中间存在极少数单元的安全系数超过 1 。然而, 这并不意味着这些少数单元能够保持完整, 因为它们的周围单元已因切削力而破坏失效。换言之, 尽管有部分单元未达到直接被破坏的数值标准, 但整个冰层在整体上已经因为相邻单元的破坏而失去完整性。这一结果表明, 采用此切削深度进行除冰的效果非常显著。

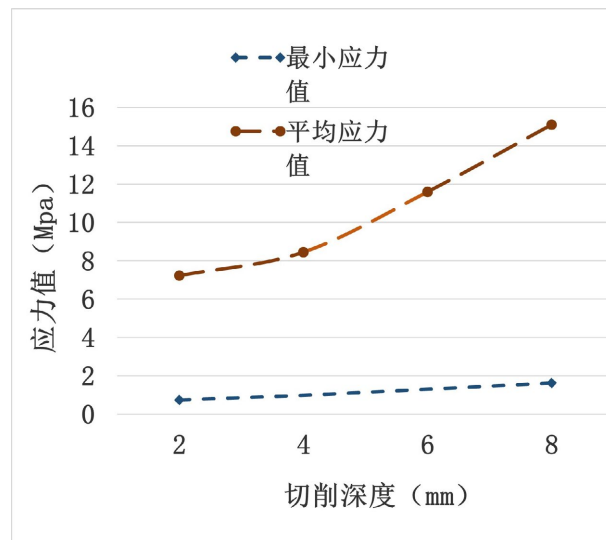


Figure 9. Influence curve of cutting depth on milling stress

图 9. 切削深度对铣削应力的影响曲线

切削深度对铣削应力的影响见图 9, 随着切削深度的增大, 冰层所受的最小应力值和平均应力值均呈现上升趋势。这意味着切削深度越深, 冰层所承受的切削力就越大, 进而切削效果也更为显著, 这与我们常规认知相符合。然而, 与此同时, 切削深度的增加还会导致铣刀与钢轨轨面之间的距离逐渐缩小。因此, 为了保障钢轨的安全使用, 我们不能无限制地增加切削深度。相反, 应根据冰层的实际情况, 选择适宜的切削深度以确保作业的安全与效率。

4.3. 切削速度的影响

由于铣刀的刀刃通过自身旋转产生切削力来切削冰层, 在铣刀旋转速度不变的情况下, 铣刀往前进方向的切削速度也会对切削效果产生影响。

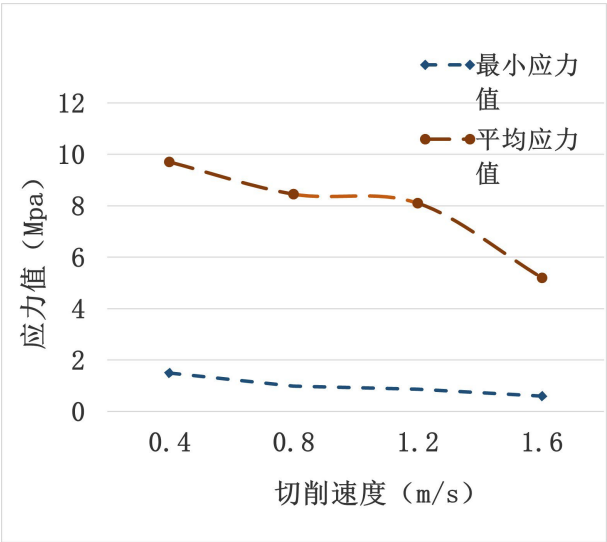


Figure 10. Influence curve of cutting speed on milling stress
图 10. 切削速度对铣削应力的影响曲线

切削速度对铣削应力的影响见图 10，在 $\theta = 0^\circ$ ，冰层厚度 $h = 4 \text{ mm}$ 的条件下，其他参数维持不变，仅调整铣刀的切削速度(也即除冰速度)时，观察到随着切削速度的提升，冰层所承受的切削应力显著下降。因此，在铣刀旋转速度恒定的情况下，切削速度不宜设置得过高，以确保获得理想的切削效果。

4.4. 铣刀转速的影响

铣刀转速“ ω ”是铣削除冰一个非常重要的参数，保持 $\theta = 0^\circ$ ， $h = 4 \text{ mm}$ ， $V = 0.8 \text{ m/s}$ ，其他条件均保持不变，仅改变铣刀转速，其结果见图 11。

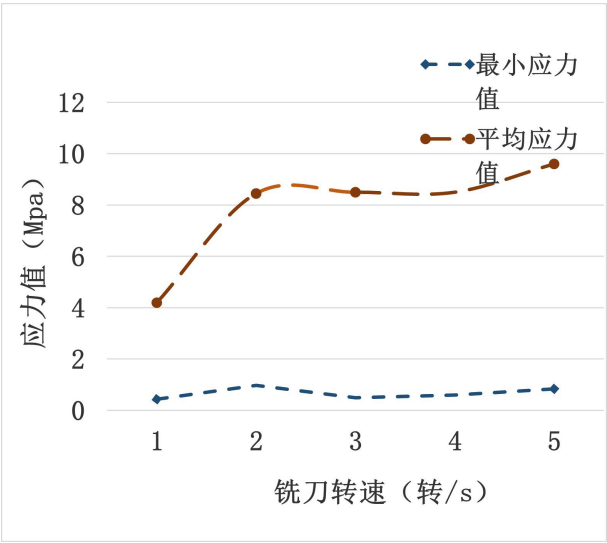


Figure 11. Influence curve of milling cutter rotational speed on milling stress
图 11. 铣刀转速对铣削应力的影响曲线

当铣刀转速超过 2 转/s 后，随着转速的进一步提升，冰层所承受的铣削应力增加变得不再明显。这意味着，一旦铣刀转速达到 2 转/s 以上，冰层已被有效破坏，在此基础上继续增加转速，并不会带来更

为积极的效果。因此，没有必要将铣刀转速设置得过高。

5. 实验研究

5.1. 样机设计

根据以上仿真分析结果，对样机进行了设计，铣刀结构见图 12，坚固的铣刀刀刃可以有效去除比较坚固的冰层，针对冰层较薄或冰层被铣削破坏后的残余碎冰，在铣刀四周设置软刷进行处理，这种软硬结合的方式更有利于处理不同厚度和不同硬度的冰层。

5.2. 实验

在实验室搭建了一个模拟的实验环境，见图 13，其中包括了一条铺设好的实验轨道，实验轨道的长度和宽度均根据真实轨道的标准进行设定，以确保测试结果的准确性。同时，还设置了必要的监测设备，

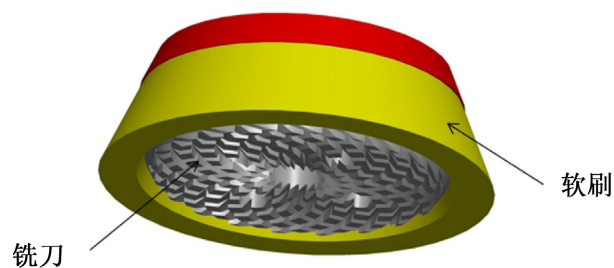


Figure 12. Schematic diagram of milling cutter structure

图 12. 铣刀结构示意图



Figure 13. Experimental test track

图 13. 实验测试轨道



Figure 14. Railway track milling de-icing experiment

图 14. 铁路轨道铣削除冰实验

用于记录和分析测试过程中的各项数据。

采用冰箱和液氮等制冷设备对实验轨道进行冰冻处理。通过精确控制制冷设备的运行时间和温度，成功地在实验轨道上形成了不同厚度和硬度的冰层，以模拟户外可能出现的各种冰雪情况。

铁路轨道铣削除冰实验见图 14，在模拟的低温环境中，铣削式除冰装置展现出了卓越的除冰能力。无论是在薄冰层还是较厚的冰层上，除冰装置都能迅速而有效地清除冰雪。除冰过程中，除冰装置与钢轨的接触面积和夹角角度得到了精确的控制，确保了除冰效果的同时，最大限度地减少了对钢轨表面的损伤。测试结果显示，除冰后的钢轨表面平整光滑，无明显的划痕或损伤。

6. 结论

本研究针对铁路钢轨覆冰问题，优化了机械式铣削除冰法的关键参数。通过理论分析明确了铣刀倾斜角度、切削深度、切削速度和铣刀转速等参数对除冰效果的影响。利用 ANSYS 有限元仿真深入分析了冰层应力状态，并通过实验验证了仿真结果的准确性。研究发现，适当改变铣刀倾斜角度和切削深度能提高除冰效率，但需权衡以避免钢轨损伤；切削速度和铣刀转速也需合理控制。本研究为铁路冬季运营安全提供了技术支持，推动了机械式除冰技术的发展。

参考文献

- [1] 徐展, 钟选明, 廖成. 电气化铁路隧道激光除冰研究[J]. 现代电子技术, 2023, 46(14): 28-32.
- [2] 孟遂民, 卢银均, 杨鸽子, 等. 输电线压弯除冰机理研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(1): 31-35.
- [3] 张发军, 杨先威, 张烽, 等. 除冰机器人仿生双臂交越避障结构及其分析[J]. 机械工程师, 2018(4): 12-15.
- [4] 陈森. 电气化铁路隧道内除冰方案初探[J]. 水电工程, 2015, 7(1): 121.
- [5] 魏传元. 智能电气化铁路隧道融冰装置研究与应用[J]. 电气化铁道, 2013, 24(3): 5-7.
- [6] 巢亚锋, 岳一石, 王成, 等. 输电线路融冰、除冰技术研究综述[J]. 高压电器, 2016, 52(11): 1-9.
- [7] 宫衍圣, 王强, 黄文勋, 等. 接触网机械除冰技术研究[J]. 高速铁路技术, 2018, 9(1): 43-47.
- [8] 朱自成, 张学军, 李超新, 等. 机械铣削除冰装置的设计与试验研究[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(2): 49-51.
- [9] 熊威, 吕勇, 张栋梁, 等. 输电线碾压除冰的有限元仿真[J]. 桂林航天工业学院学报, 2015, 78(2): 137-141.
- [10] 李顺秋, 王中长. 悬挂式铁路接触网除冰机的设计[J]. 机械制造, 2022, 60(5): 26-29.
- [11] 严波, 陈科全, 祖正华, 等. 覆冰四分裂导线除冰过程模拟研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(11): 101-105.