

2023年“科创中国”高端装备制造产学研融合会议

钢轨砂带新型绿色高效养护技术的研究与实践

樊文刚 副教授/副所长/博导

北京交通大学 机械与电子控制工程学院

2023年9月11日

PART

1

轨道上的中国





轨道上的中国



- 铁路是国民经济大动脉、关键基础设施和重大民生工程，是综合交通运输体系的骨干和主要运输方式之一，其对应着**国家经济社会主战场和重大需求**！
- 国铁集团《**新时代交通强国铁路先行规划纲要**》提出，到2035年全国铁路网运营里程将大幅度增加到**20万**公里左右，其中高铁约为**7万**公里。截至2022年底，全国铁路营业里程已经达到**15.5万**公里，其中高铁**4.2万**公里，发展迅猛！



轨道上的中国



智能高铁

- 京张铁路
- 京雄铁路

高坡高原高寒铁路

- 青藏铁路
- 川藏铁路

重载铁路

- 大秦铁路
- 浩吉铁路



轨道上的中国



■ 截至2022年12月31日，中国内地共有 **55** 个城市开通了城市轨道交通项目，运营总里程达到 **10291.95** 公里，其中地铁 **8012.85** 公里，占比 **77.85%**；市域快轨占比 **11.89%**；有轨电车占比 **5.49%**；跨座式单轨占比 **1.41%**；磁悬浮仅占比 **0.56%**。

PART

2

钢轨打磨行业背景





轮轨制式轨道交通系统钢轨表面和表层病害的产生不可避免

正线区域



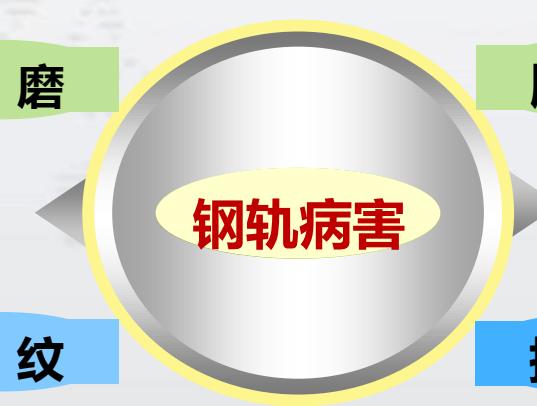
辙叉区域



波 磨



裂 纹



肥 边



掉 块



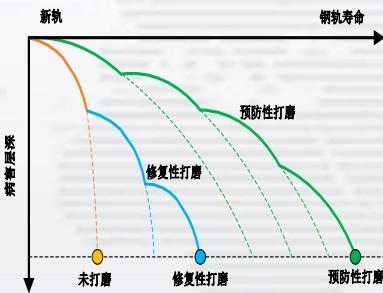


城轨饱受波磨、鱼鳞纹、掉块等病害困扰，甚至超过大铁系统





钢轨打磨是目前世界上钢轨养护的通用和唯一有效手段



消除或延缓病害
改善轮轨关系

延长钢轨
使用寿命

保证运行
安全稳定



提高乘客
舒适度



改善曲线
通过能力





钢轨打磨装备



96头钢轨打磨列车



48头钢轨打磨列车



道岔打磨车



高速打磨车

大型钢轨打磨车



钢轨铣磨车



钢轨打磨车作业视频





钢轨打磨装备



道岔打磨机



焊缝打磨机



波磨打磨机



槽型轨打磨机

小型钢轨打磨机



轨腰打磨机



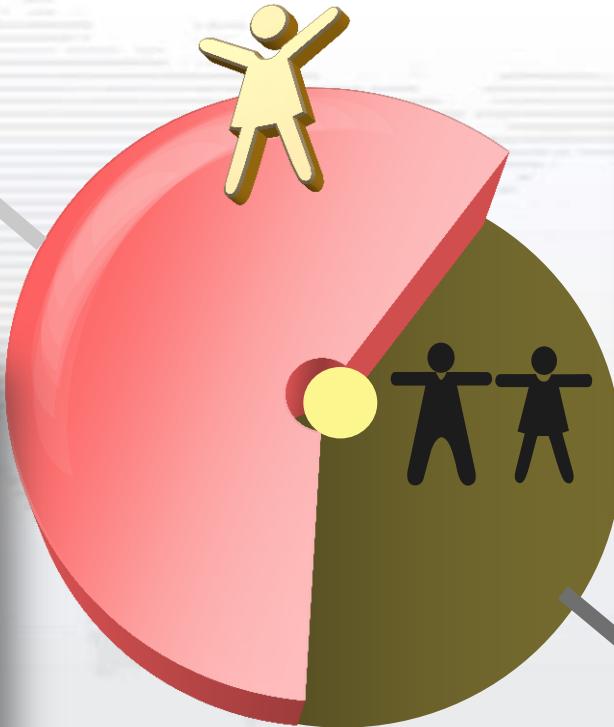
钢轨打磨机作业视频





钢轨打磨装备

大机打磨为主



钢轨打磨原则



小机打磨为辅



钢轨打磨装备



意大利Mecno



瑞士Autech



德国Bernhard



德国Vossloh



清洛铣磨车



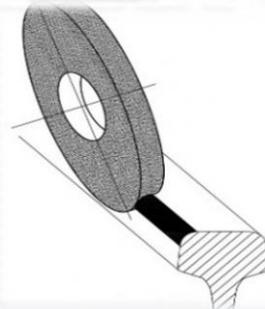
哈尔滨科研所



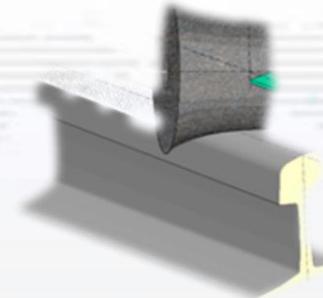
自主高端钢轨打磨养护技术装备严重缺乏



砂轮端面打磨



砂轮周面打磨



砂轮被动打磨



铣磨复合打磨

我国原创性钢轨打磨技术与装备产品几为空白，由国外引进时付出了巨大经济代价，且现有技术装备存在不足，尚不能完全满足我国复杂线路维护的客观需求，与高铁动车组、桥梁和隧道建造技术等形成极大反差！



研发自主高端打磨养护技术装备迫在眉睫

- **政策方面**：《新时代交通强国铁路先行规划纲要》、《十四五铁路科技创新规划》等要求进一步完善高速铁路、普速铁路检测、监测和养护技术装备体系，提高维修检修专业化
→→ 关乎重大安全问题
- **市场方面**：2018-2022年中国铁路检测、维修行业市场规模分别达到155.5亿元、172.48亿元、193.1亿元、219.79亿元、253.62亿元，预计到2023年将达到 **301.02亿** 元，年复合增长达到 **11.64%**





钢轨打磨未来发展趋势

钢轨打磨未来发展趋势

打磨作业
高效化

打磨策略
精细化

打磨质量
标准化

打磨过程
智能化

打磨装备
多样化

PART

3 团队概况





团队简介

- **团队概述**：团队成立于2010年，长期从事高速、普速、重载、高原高寒铁路及地铁、有轨电车等城市轨道交通系统钢轨打磨养护基础理论研究、关键技术攻关、装备系统研制及成果转化和产业化工作，承担各级别各类科研项目超过50项，发表SCI/EI检索期刊论文超过100篇，获授权发明专利超过80项，总体技术水平在国内高校中处于领先地位
- **人员构成**：拥有教授1名、副教授3名、讲师2名以及博硕士研究生近40名，人员年龄结构和专业背景组成较为合理





个人简介



北京市轨道交通学会杰出青年人才

北京交通大学青年英才

中国机械工程学会机床专业委员会委员及副秘书长

全国金属切削机床标准化技术委员会磨床分会委员

中国机械工程学会极端制造分会委员

中国力学学会流体控制工程委员会青年专家委员

北京韧性城市建设研究中心专家委员

瑞士日内瓦国际发明最高奖：特别嘉许金奖

全国铁路青年科技创新奖

中国产学研合作创新奖

中国技术市场协会金桥奖

山东省省长杯优秀设计奖

山东省潍坊市鸢都产业领军人才



钢轨打磨养护发展方向大事件



2010年4月与二七厂合作
研发GMC96国产控制系统



2010年在二七厂建立
国内首个砂轮直线式试验台



2013年提出砂带新型打磨技术
建立砂带实验台，获铁总立项支持



PART

4

基础理论研究





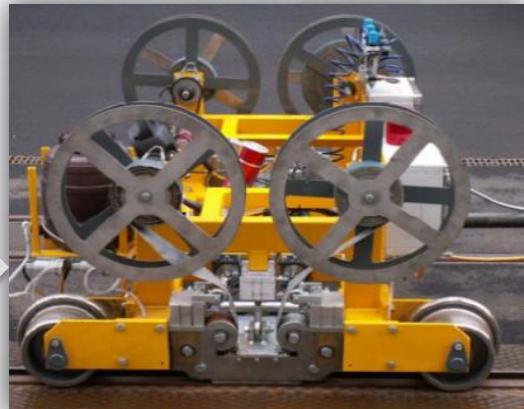
砂带磨削性能早已远超既有认知范畴



- 长针状磨料的破碎工艺
- 高品质磨料的问世
- 特殊并可控的植砂工艺
- 涂层、聚合、超硬砂带出现
- 适用于复杂型面恒压力磨削
- 磨削能力超过铣削5~10倍
- 美国为49:51，德国为45:55
- 中国涂附磨具占有量攀升



闭式 vs 开式





砂带磨削性能早已远超既有认知范畴

砂带打磨技术优势

● **高效磨削**—磨粒规则排布，磨削比约为砂轮10-20倍以上

● **弹性磨削**—接触轮、砂带基材弹性，对钢轨冲击小

● **冷态磨削**—散热周期长、面积大，打磨温度低

● **集尘率高**—单向火花，易于收集

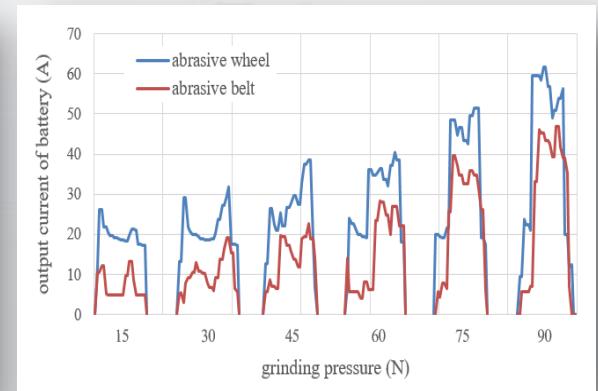
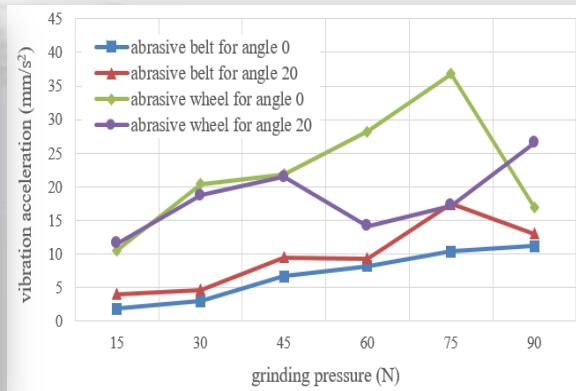
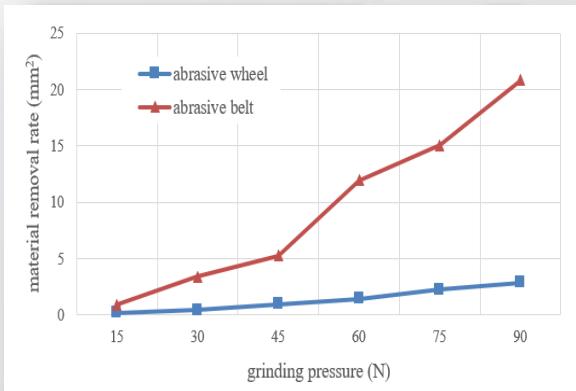
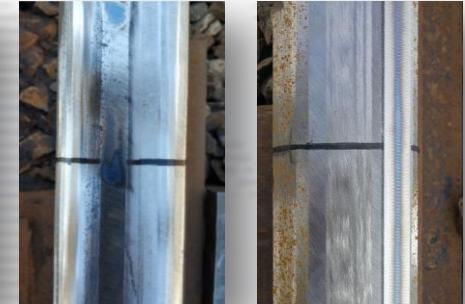
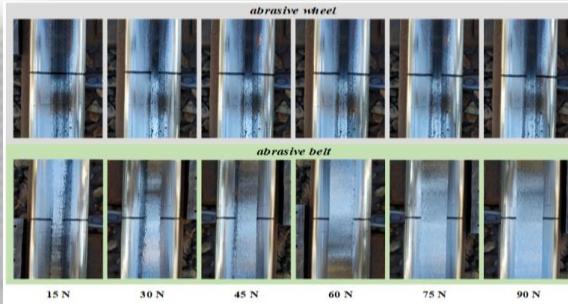
● **安全性好**—柔性安全性高，单向火花不易引发火灾

● **经济性好**—打磨成本仅为砂轮数分之一

● **更换简便**—可通过张紧机构快速完成



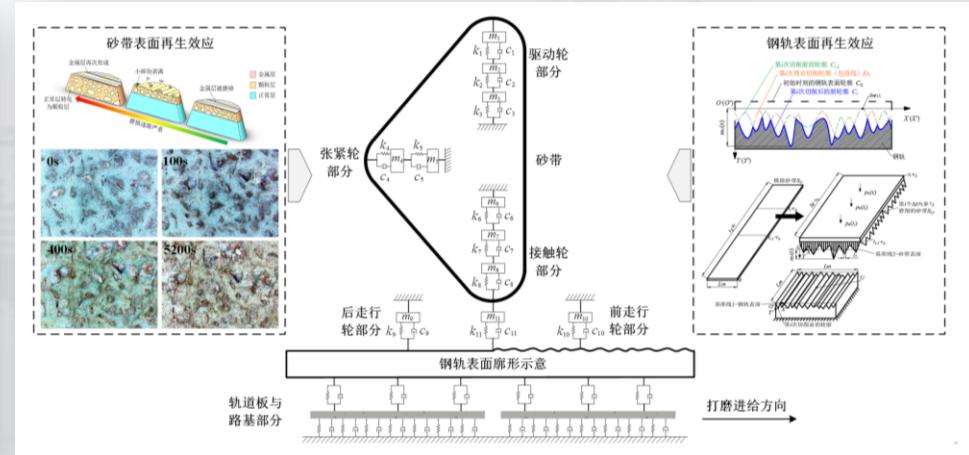
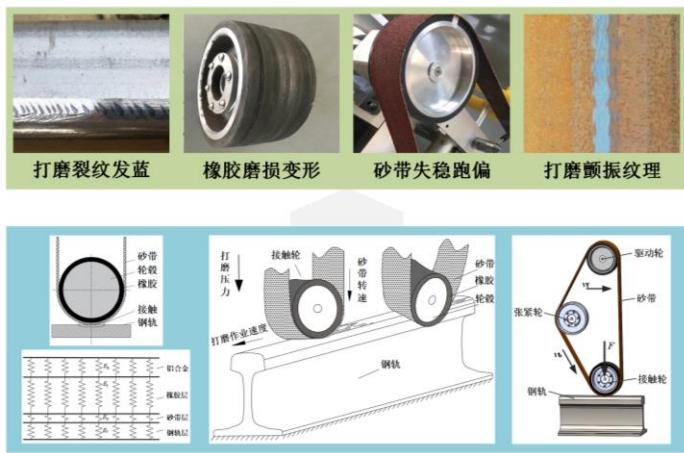
砂带打磨相对于砂轮打磨具有显著优势





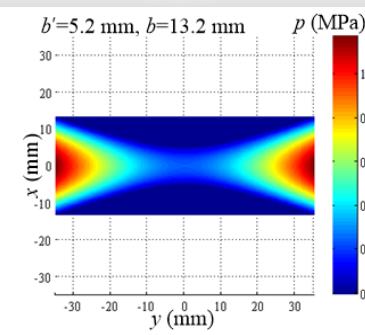
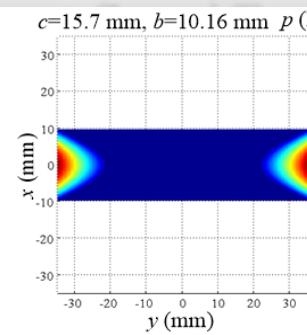
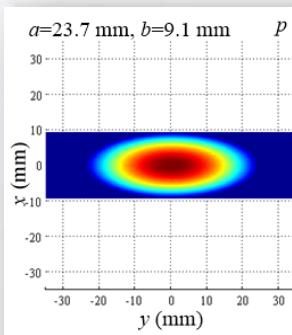
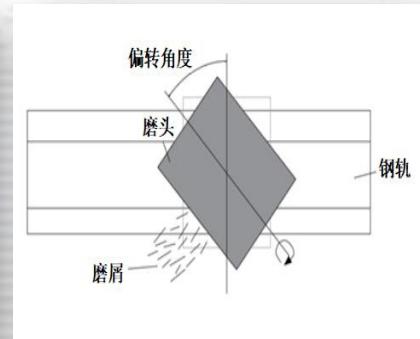
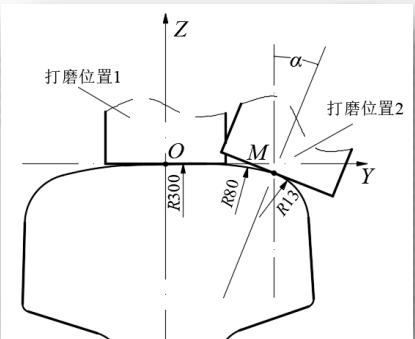
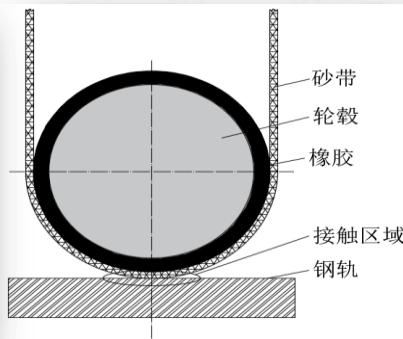
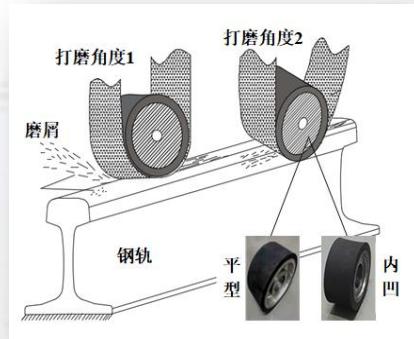
砂带打磨面临诸多理论和技术难题

工程需求：钢轨砂带打磨工况与砂带磨床磨削有着极大不同，打磨作业时钢轨既是打磨装备运行的导轨又是被磨对象，加之砂带和橡胶接触轮天然具有柔性和弹性，其工艺系统被赋予了“轨道车辆动力学”和“柔性动力学”的双重特征，导致打磨作业过程中力、热等多物理行为之间的非线性交互作用更为复杂和显著





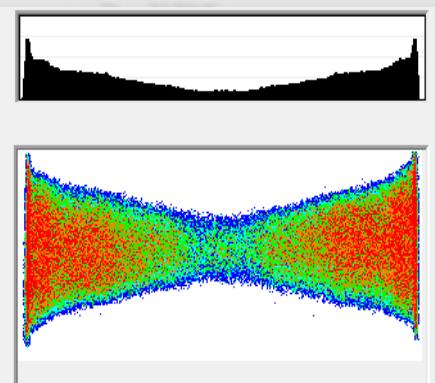
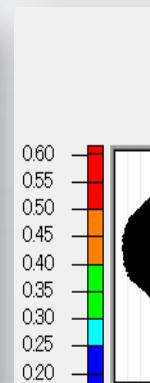
研究内容一：复杂非线性刚柔混合静动态接触作用机理



(a) 椭圆形

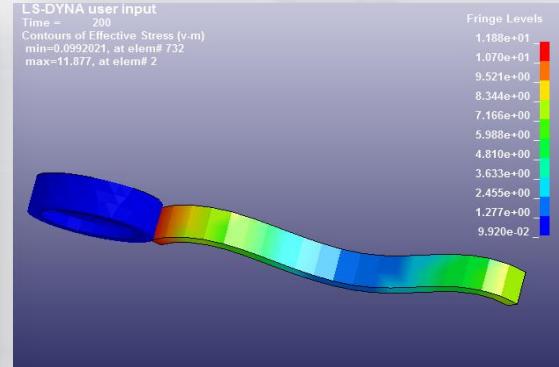
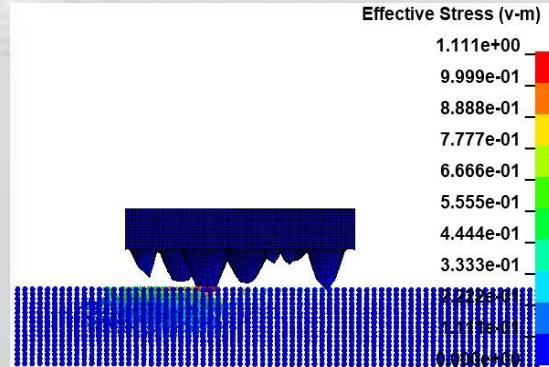
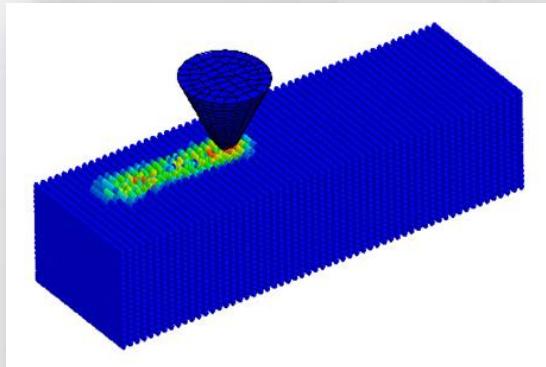
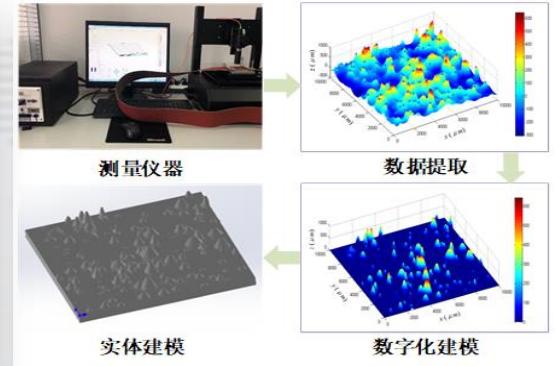
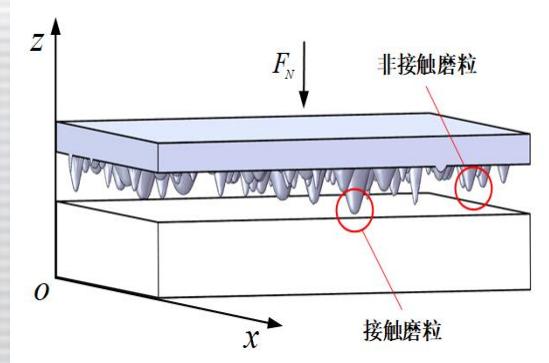
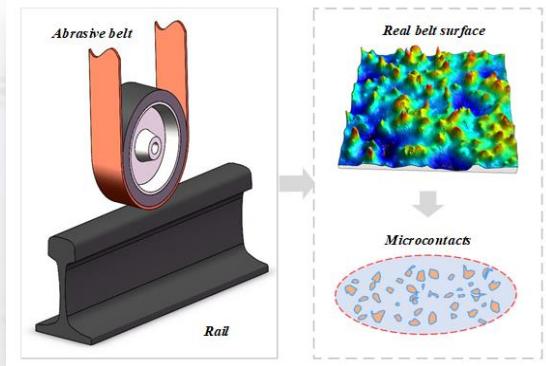
(b) 双三角形

(c) 马鞍形



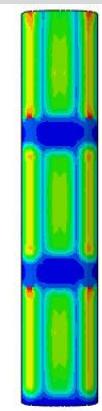
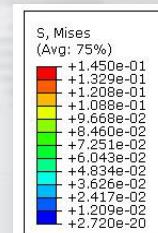
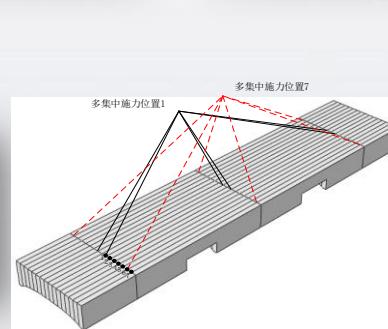
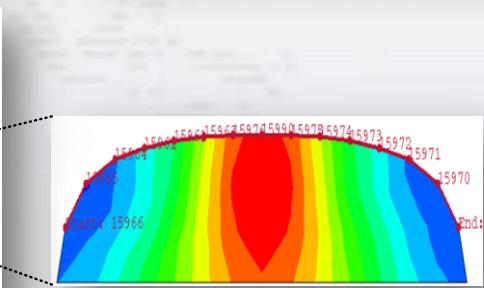
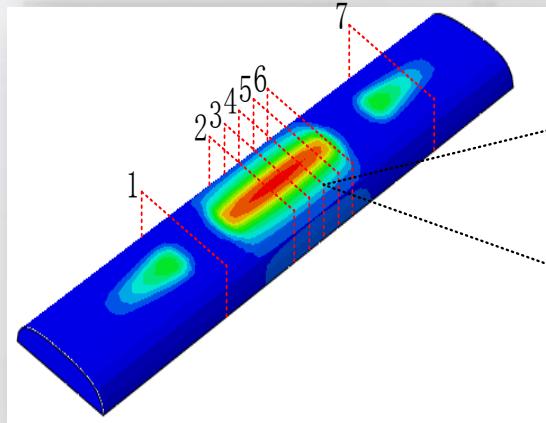
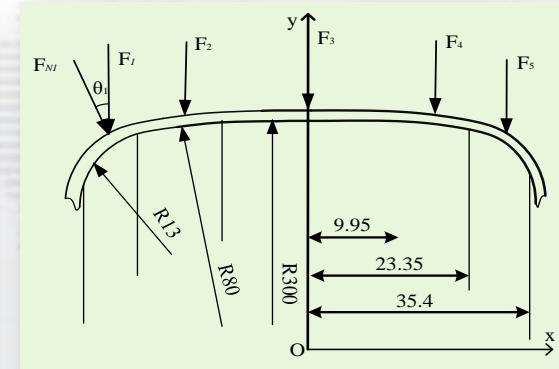
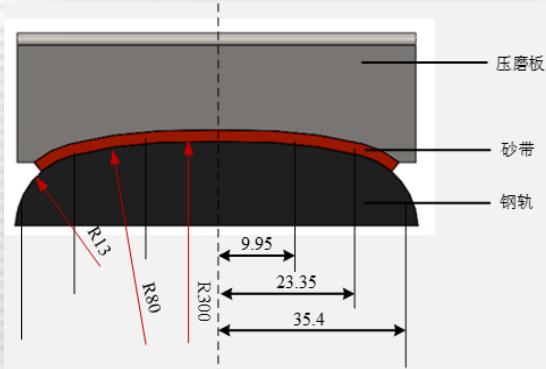
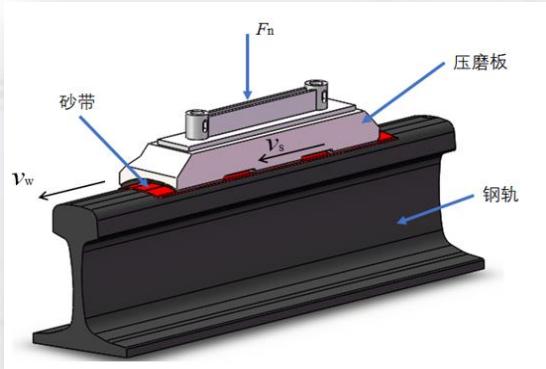


研究内容一：复杂非线性刚柔混合静动态接触作用机理



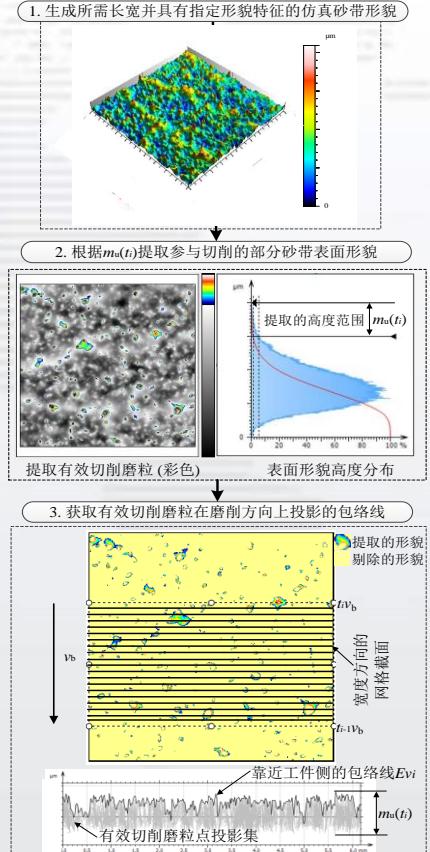
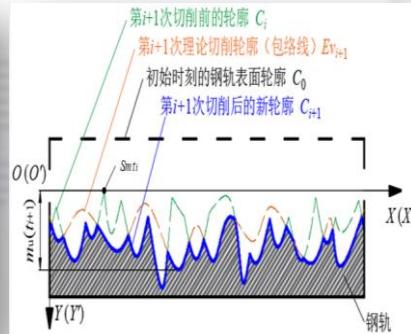
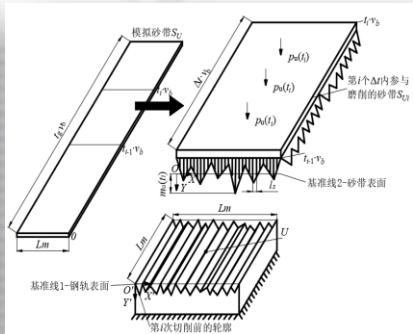
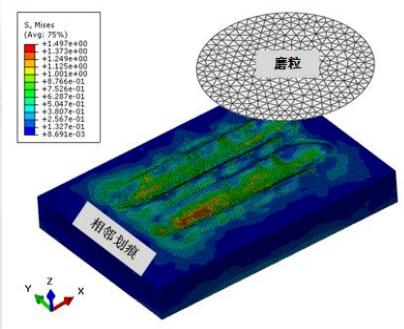


研究内容一：复杂非线性刚柔混合静动态接触作用机理





研究内容二：钢轨砂带打磨材料去除深度和去除量



单颗磨粒的去除体积：

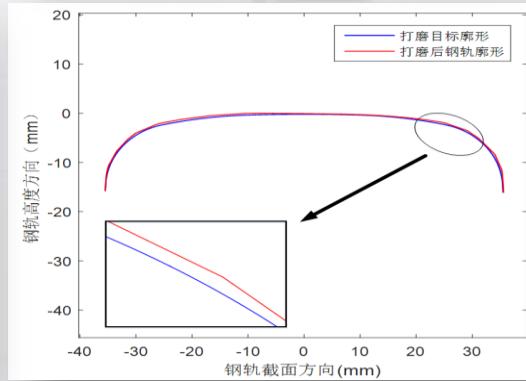
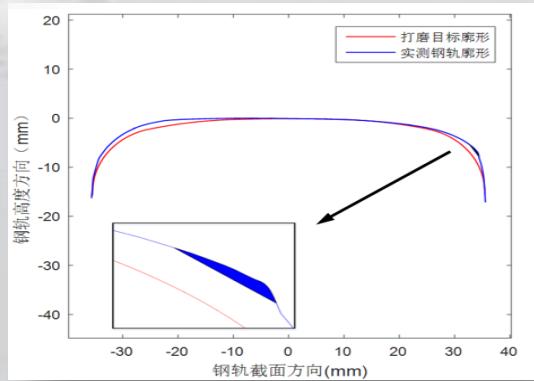
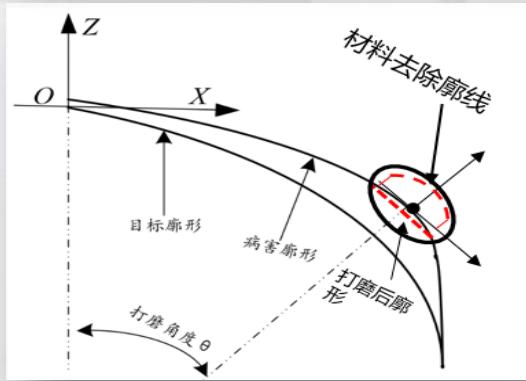
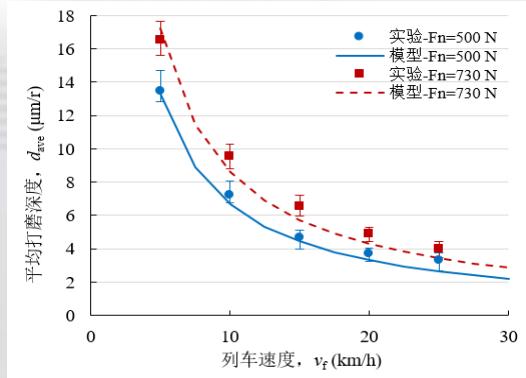
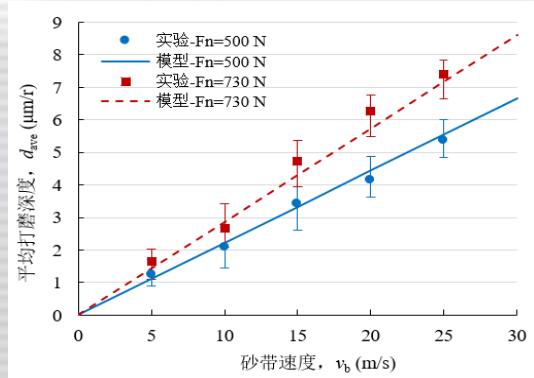
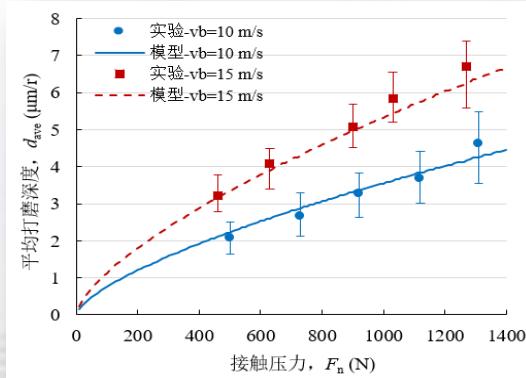
$$V_0 = k^2(h - h_0)^2 \tan(\alpha/2)l = k^2(h - (3\sigma - m))^2 \tan(\alpha/2)l$$

砂带在单位时间内切除的材料体积（材料去除率）：

$$Z = V/t = vw l N_0 k^2 \tan(\alpha/2) \int_{3\sigma-m+\delta_{\max}}^{3\sigma} (h - (3\sigma - m))^2 f(h) dh$$

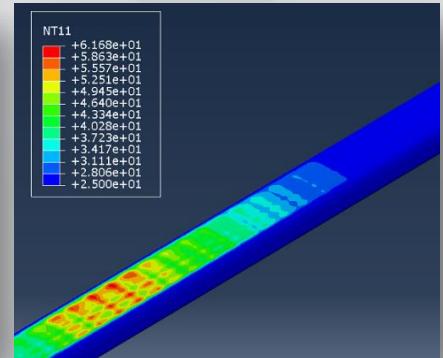
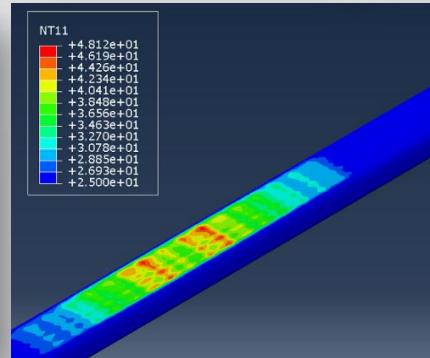
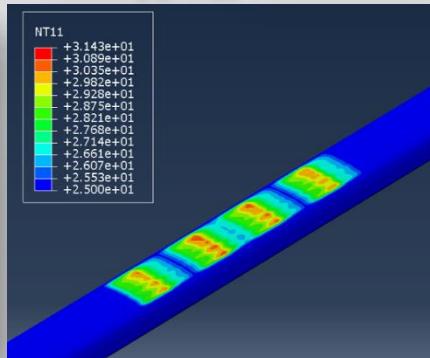
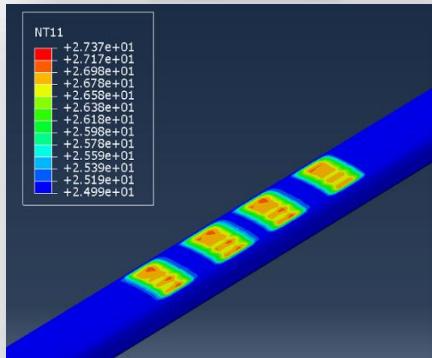
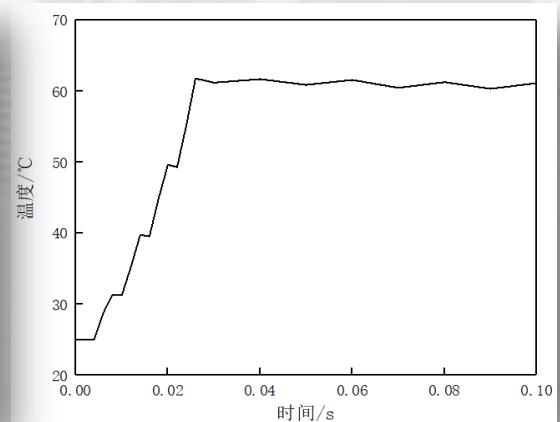
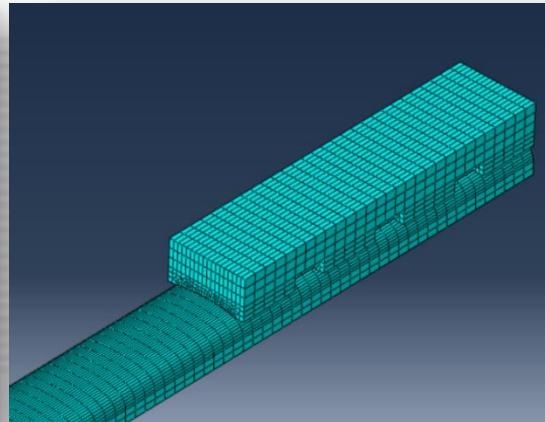
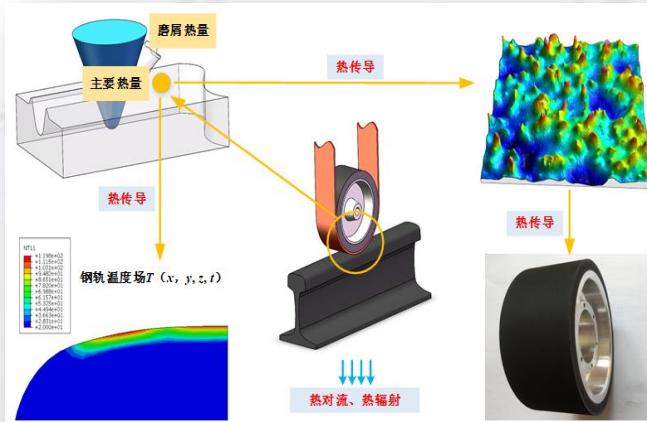


研究内容二：钢轨砂带打磨材料去除深度和去除量



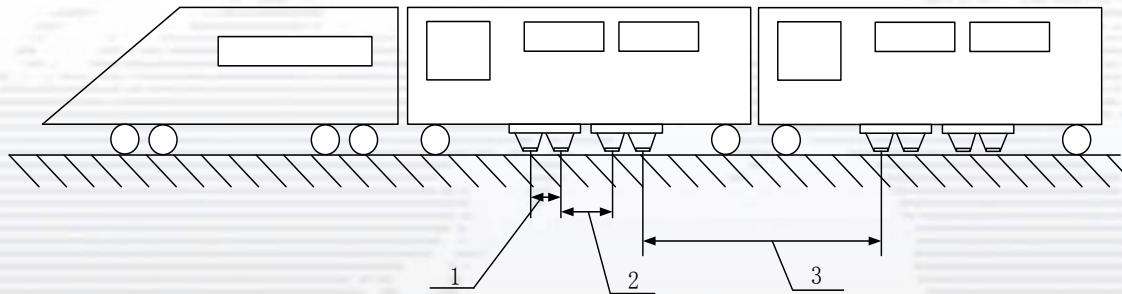


研究内容三：钢轨砂带打磨温度场

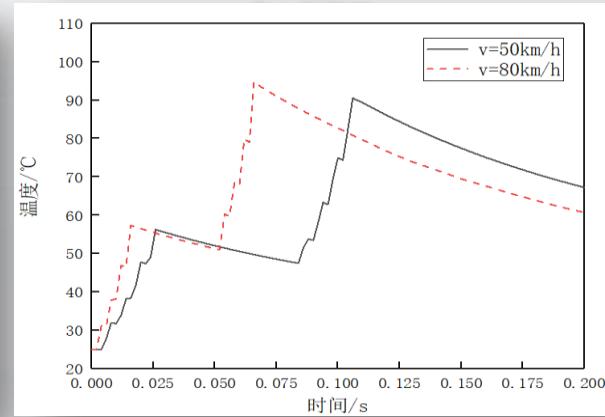
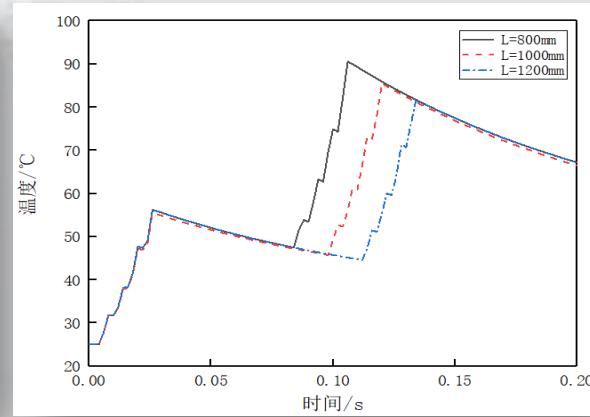
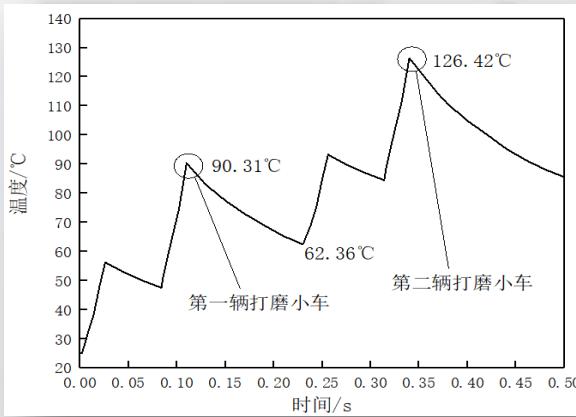




研究内容三：钢轨砂带打磨温度场

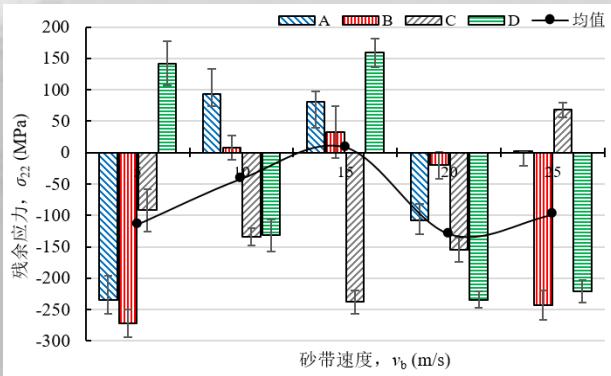
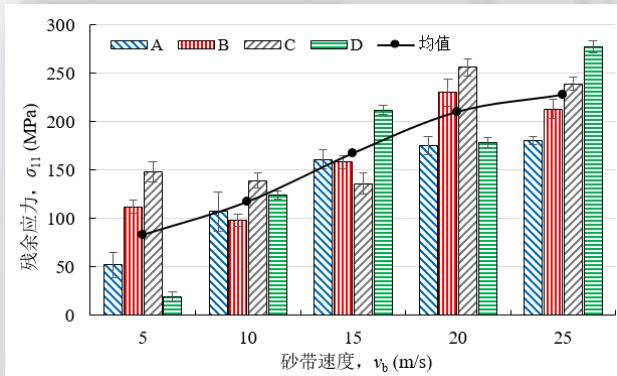
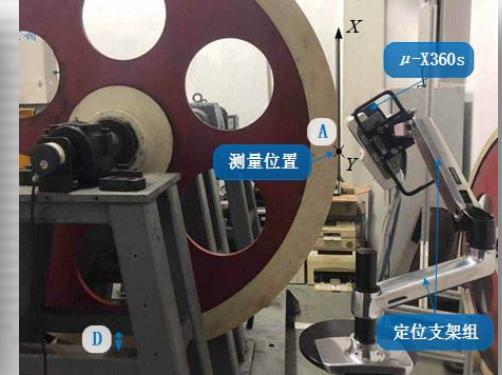
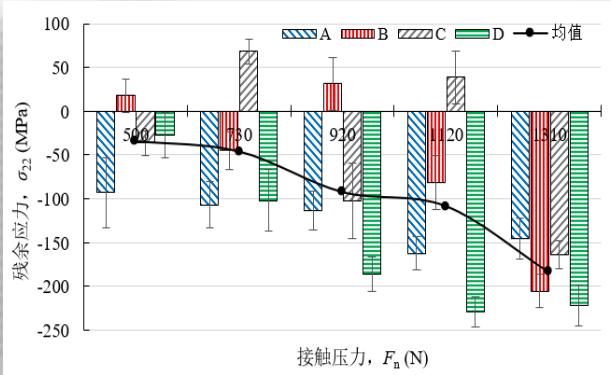
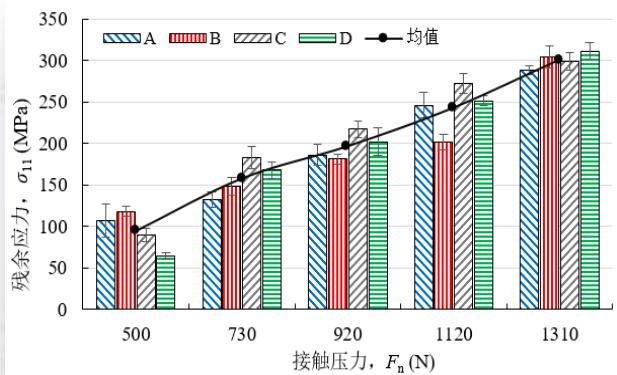


1-同一辆打磨小车打磨单元间距 2-相邻打磨小车打磨单元间距 3-相邻车厢内打磨单元间距





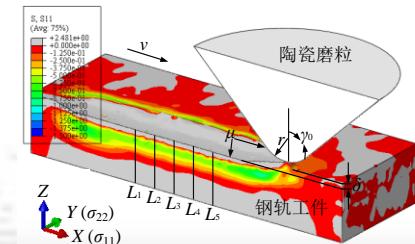
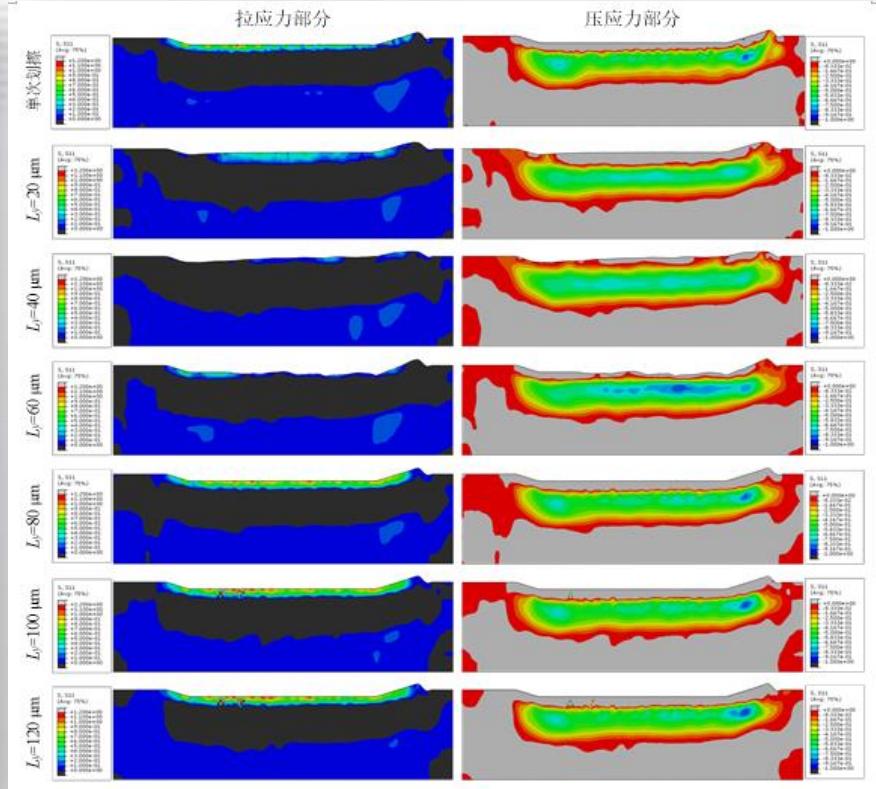
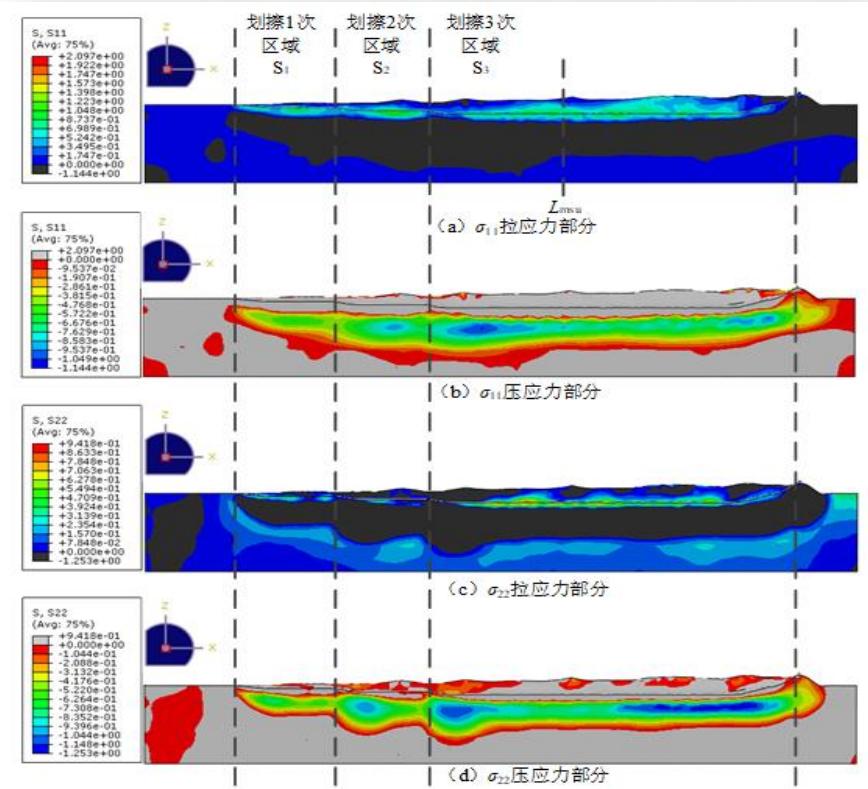
研究内容四：钢轨砂带打磨残余应力



在磨削方向上呈拉应力形式，在轨面另一正交方向主要呈压应力形式，随接触压力和砂带速度的增加，列车速度的降低，轨面磨削方向残余拉应力幅值相应升高

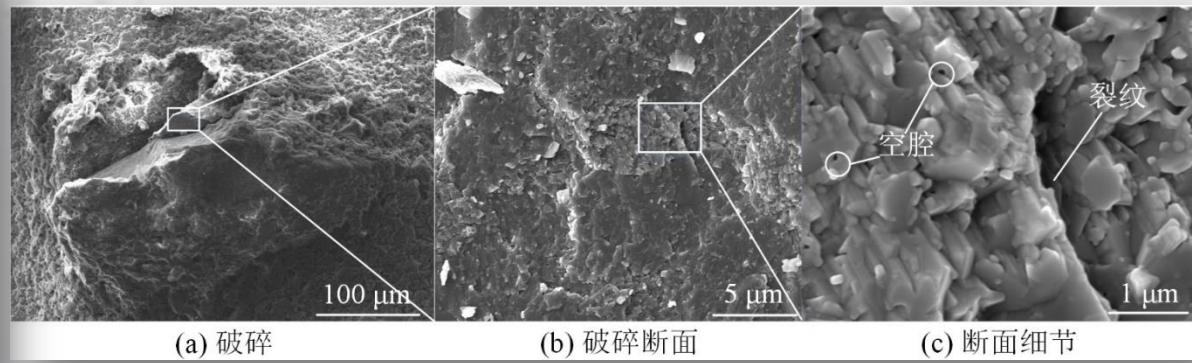
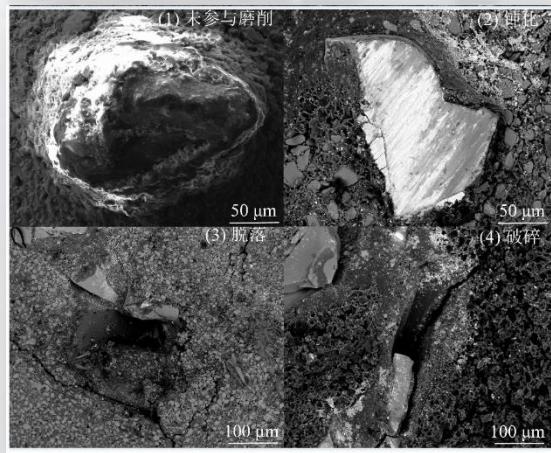
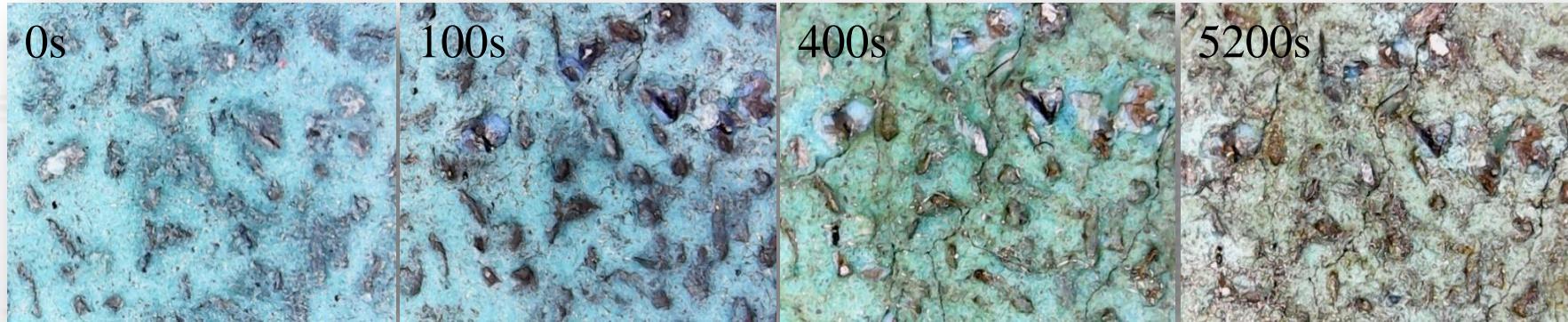


研究内容四：钢轨砂带打磨残余应力



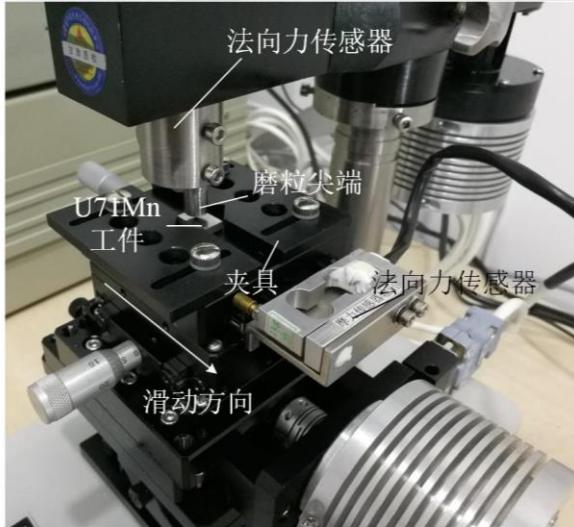


研究内容五：砂带磨损机理及规律

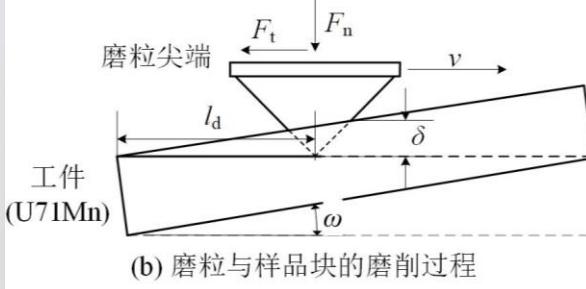




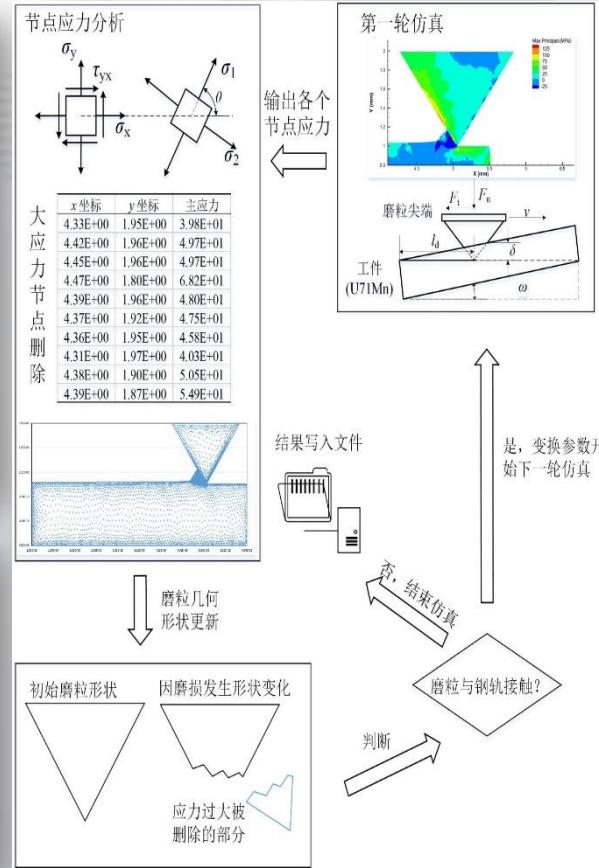
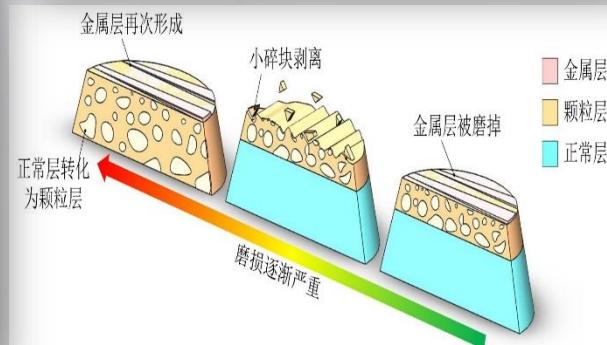
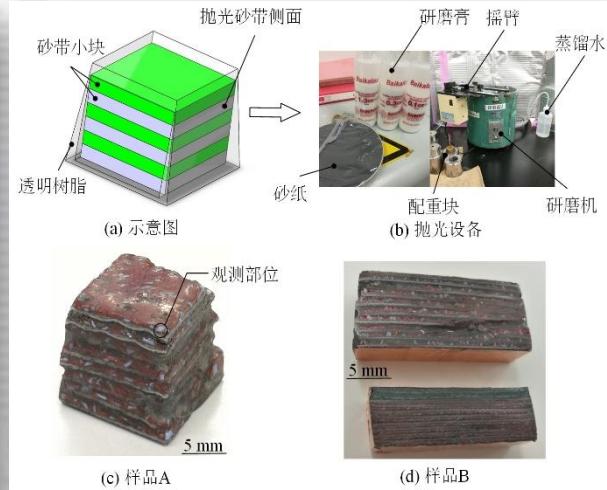
研究内容五：砂带磨损机理及规律



(a) 单颗磨粒划擦设备



(b) 磨粒与样品块的磨削过程





研究内容六：砂带磨损状态监测与剩余寿命预测

X

砂带图像信号

- 图像质量难以保证
- 相机镜头易破损

X

磨削温度信号

- 红外测温传感器
- 受外部环境干扰

X

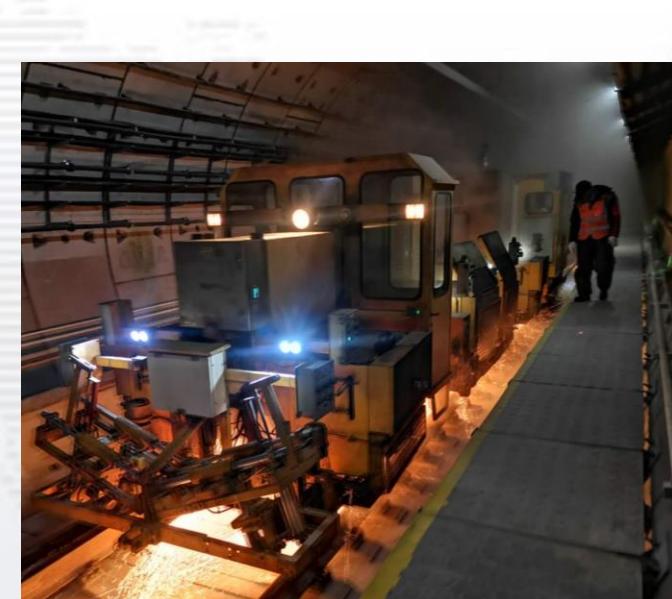
声发射信号

- 安装要求严格
- 采集设备成本高

X

振动信号

- 接触轮橡胶隔振
- 打磨车振动干扰



磨削声音信号

- 传声器
- 高频信息丰富
- 安装方便

电流信号

- 电流传感器
- 反映切向力低频部分
- 成本低、性价比高

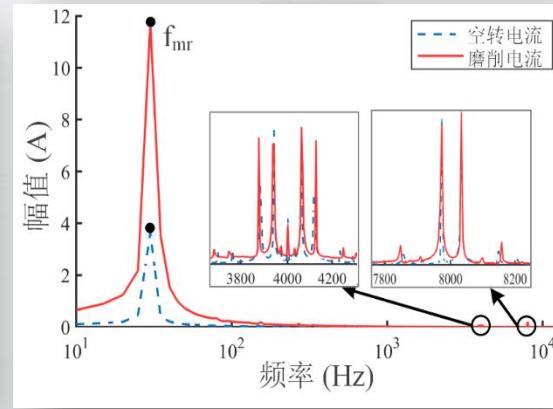
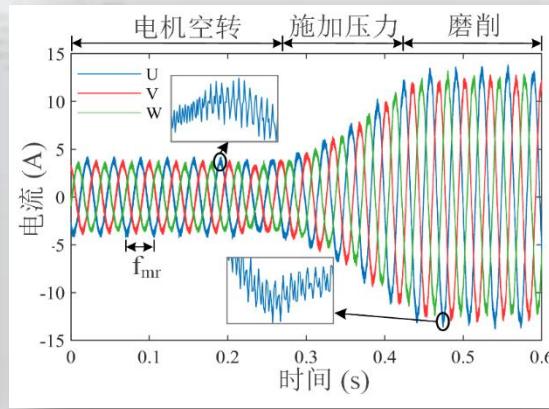
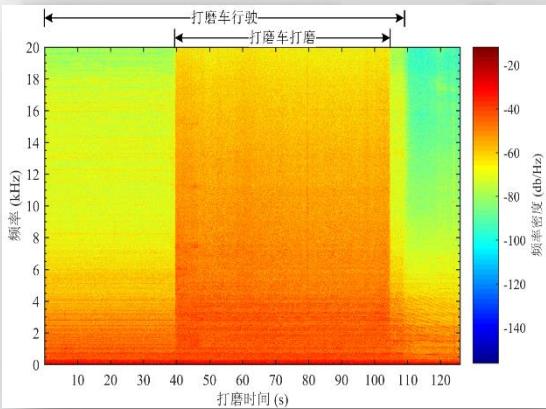
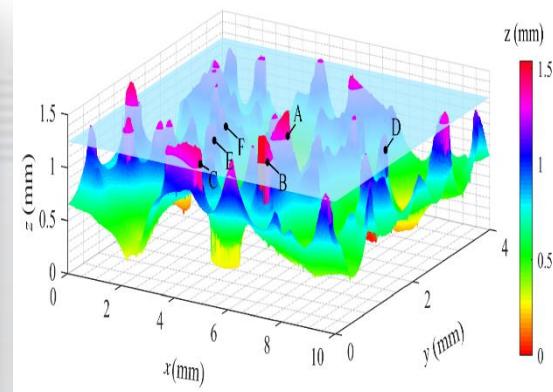
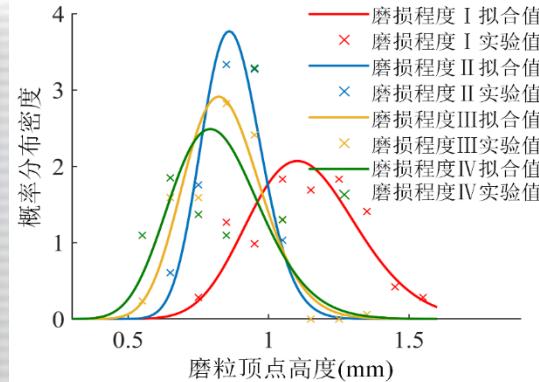
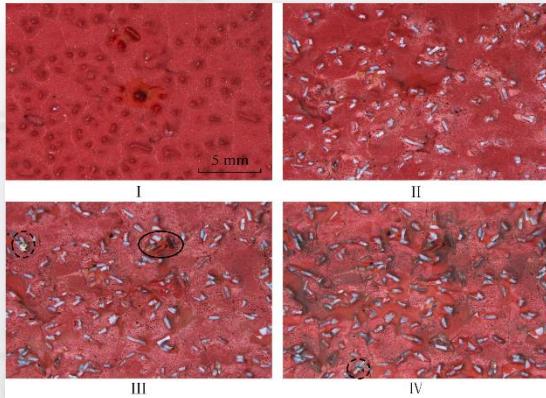
工况：火花四溅、烟雾弥漫

接触轮：弹性阻尼材料

信息互不干扰
易于工程应用



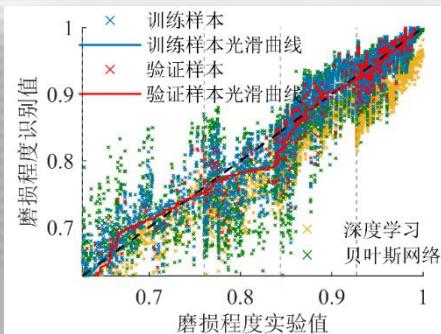
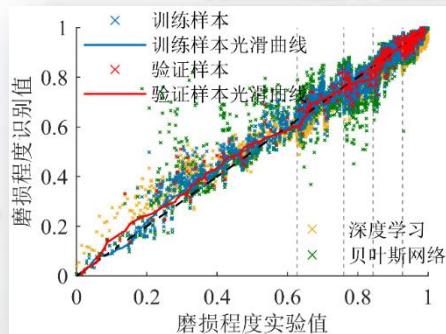
研究内容六：砂带磨损状态监测与剩余寿命预测



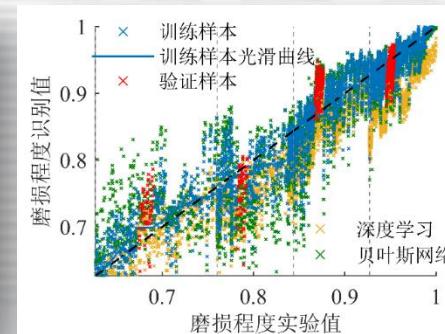
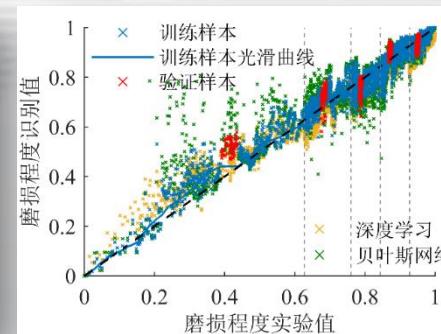


研究内容六：砂带磨损状态监测与剩余寿命预测

砂带磨损程度识别结果

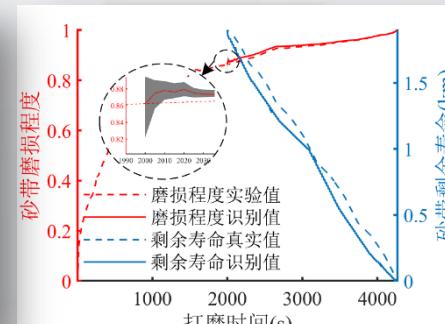
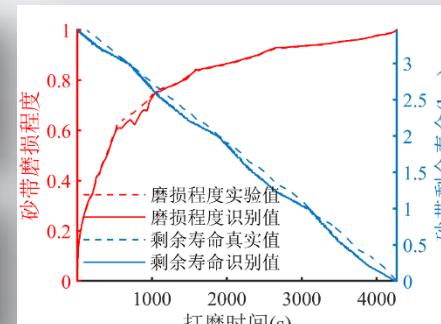


砂带磨损程度识别结果（缺少相同工艺样本）



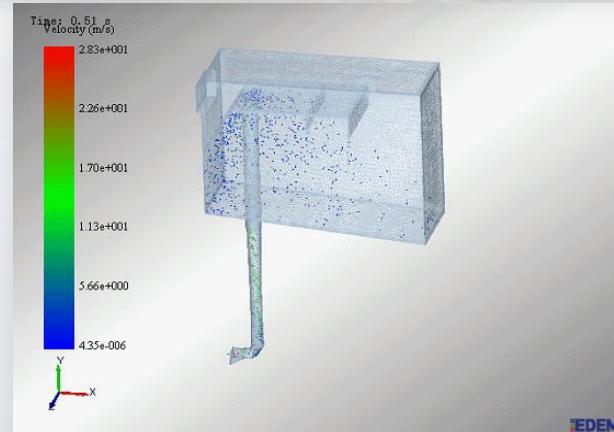
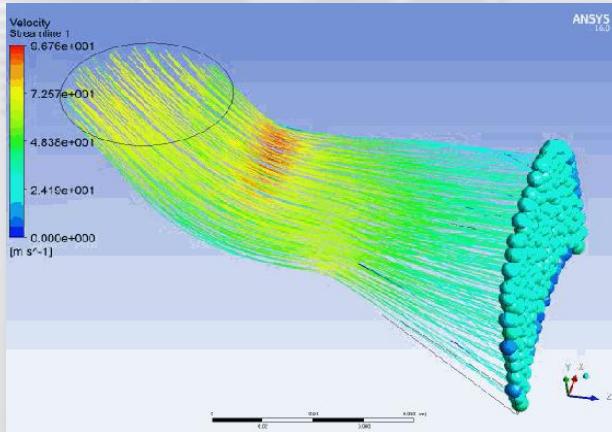
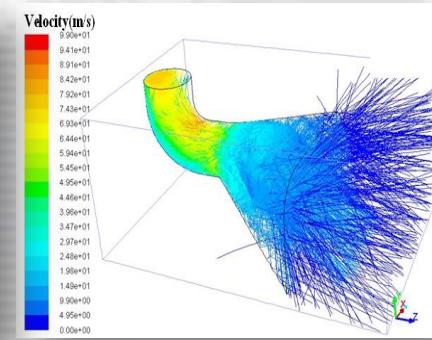
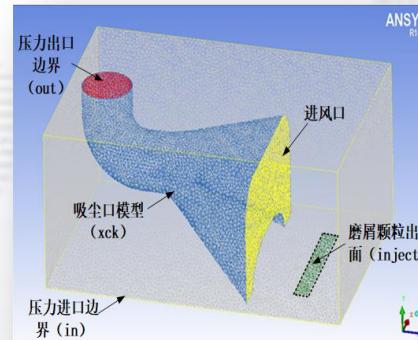
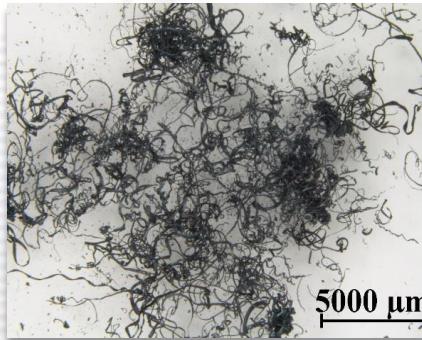
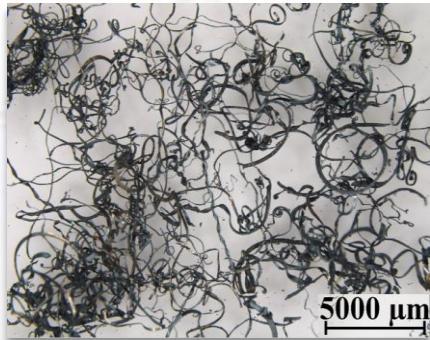
	均值	贝叶斯网络	深度学习	信息融合
均值	0.204			
贝叶斯网络	0.143 (70.1%)	0.061		
深度学习	0.141 (69.1%)	-0.002 (-3.3%)	0.063	
信息融合	0.165 (80.9%)	0.022 (36.1%)	0.024 (38.1%)	0.039

	磨损程度识别误差	剩余寿命预测误差 (km)	剩余寿命预测准确度
新砂带	0.010	0.096	0.992
服役 300 s 后砂带	0.014	0.101	0.992
服役 2600 s 后砂带	0.007	0.108	0.990



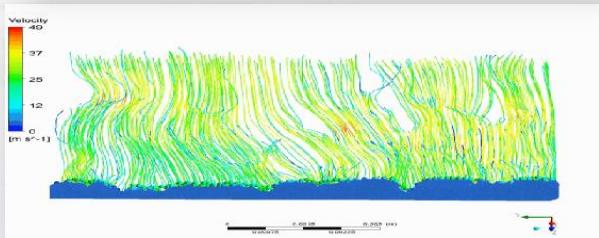
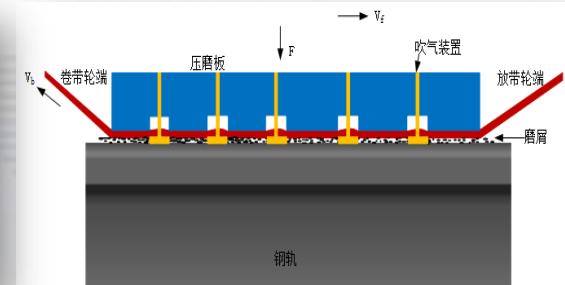
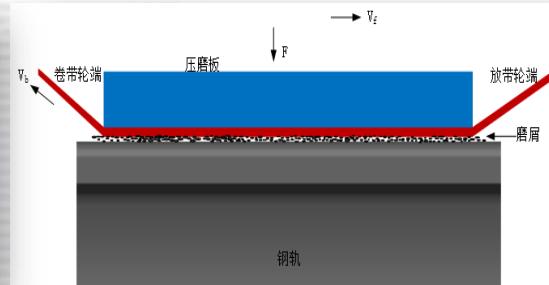
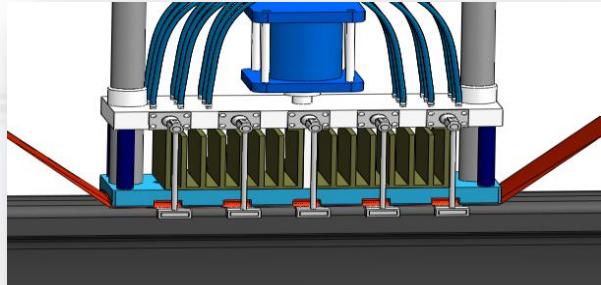


研究内容七：砂带打磨磨屑复杂运动规律及控制

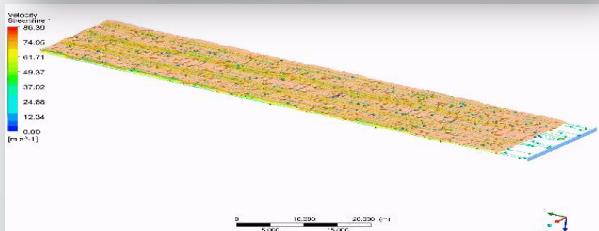




研究内容七：砂带打磨磨屑复杂运动规律及控制



无气流



有气流



PART

5

装备系统研发





研发内容一：锂电式小型钢轨打磨机



CRCC
中铁检验认证中心



砂带精磨机



砂带波磨机



砂带垂磨机



手动砂带机



铣磨一体机



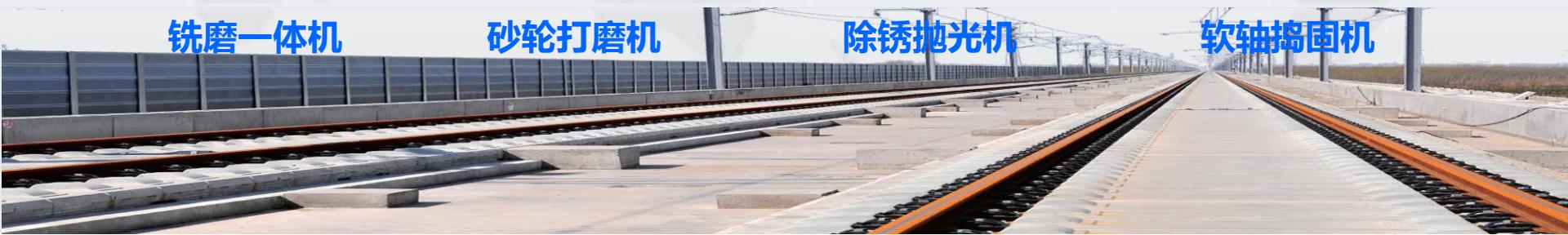
砂轮打磨机



除锈抛光机

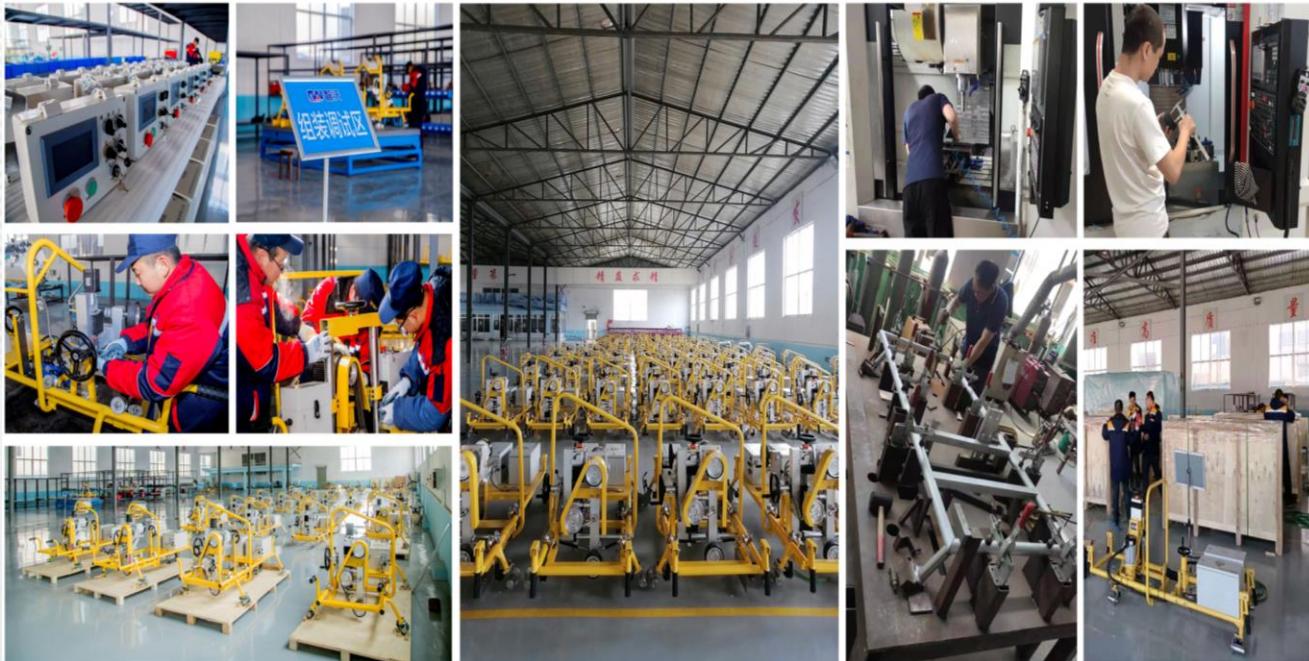


软轴捣固机





研发内容一：锂电式小型钢轨打磨机





研发内容一：锂电式小型钢轨打磨机

- 超强磨削能力**：同等条件下，砂带磨削能力是传统砂轮打磨的 **8-20 倍以上！**
- 专治疑难杂症**：特别擅长去除鱼鳞纹、掉块、高低接头、波磨等较严重病害，效果奇佳！
- 绿色环保节能**：锂电驱动噪声低、振动小、耗能低、成本低，劳动环境得到改善！
- 人机交互良好**：砂带更换方便，单人即可，整机保养简单！



**19年国铁工务安全会议
(武汉局麻城工务段)**



目前已有超过 400 台设备应用于国内十八个铁路局以及部分城市轨道交通系统中，市场前景广阔！



研发内容一：锂电式小型钢轨打磨机

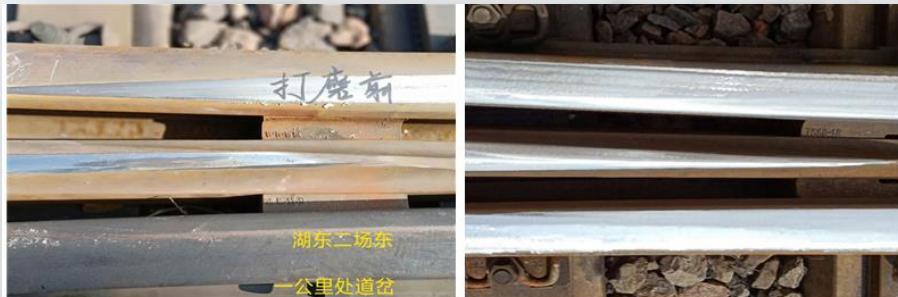
鱼鳞纹打磨前后



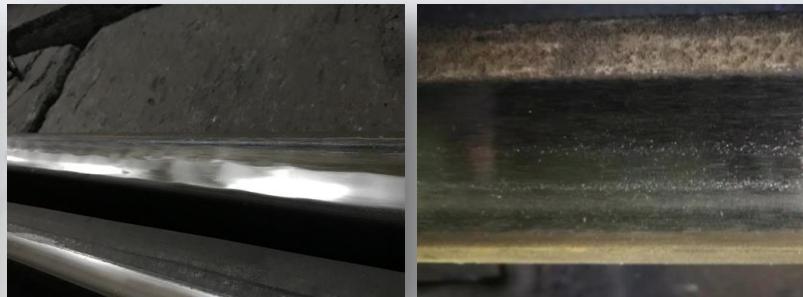
接头打磨前后



岔心打磨前后

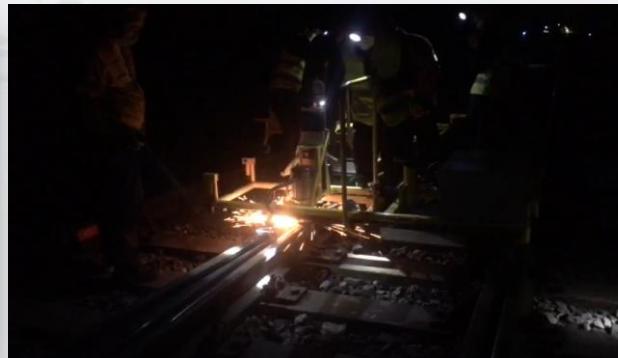


波磨打磨前后





研发内容一：锂电式小型钢轨打磨机



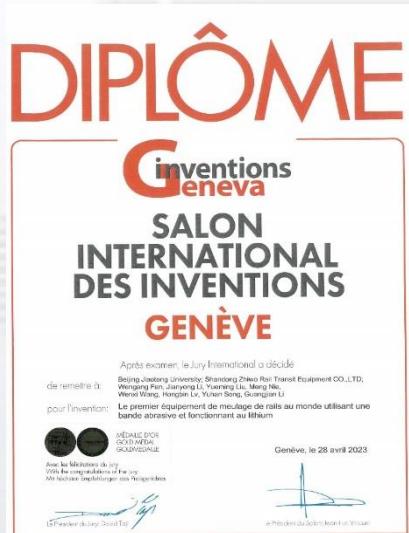


被主流媒体人民视频和CCTV-2《经济半小时》栏目报道





获得瑞士日内瓦国际发明最高奖：评审团特别嘉许金奖





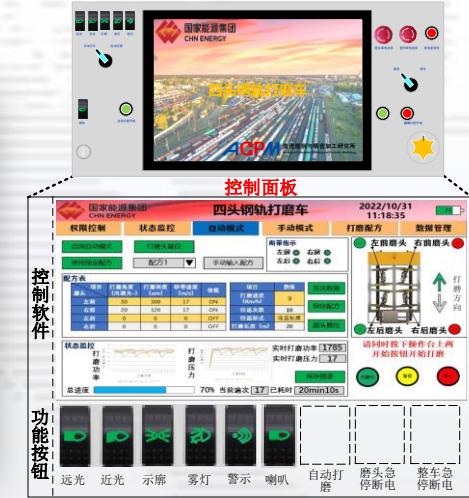
研发内容二：中型智能钢轨砂带打磨车

研发目标：在理论层面研究以及砂带打磨机积累的关键技术、现场经验与公众广泛认可基础上，研发中型智能多头砂带打磨车，专门用于道岔（受限区域除外）、城市轨道交通以及铁路专用线路的打磨养护！





研发内容二：中型智能钢轨砂带打磨车（已被神华集团采购）

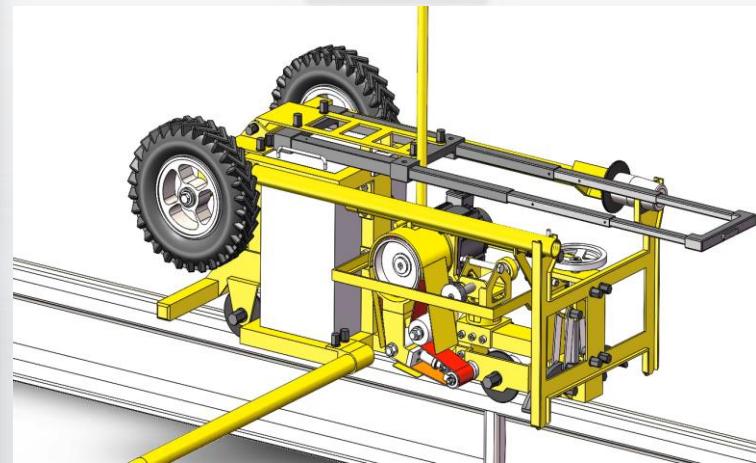
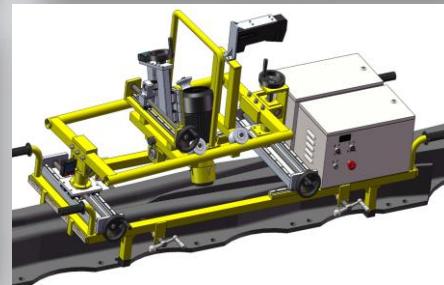
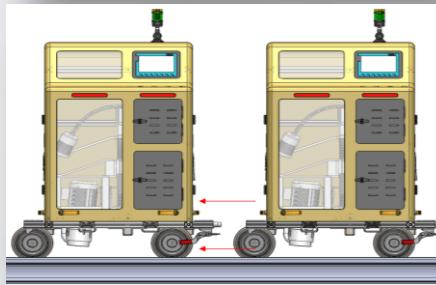
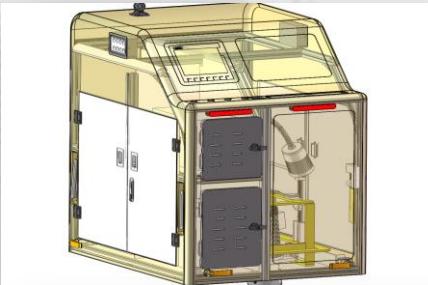
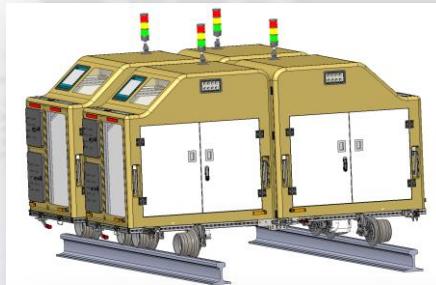


- 锂电驱动自行走及打磨作业
- 软编组多台车智能协作作业
- 可集成检测打磨一体化系统
- 指令远程无线传输与控制
- 作业状态在线监控与传输
- 轻量化设计便捷高效运输



研发内容三：模块化钢轨智能打磨车/打磨机器人

目标定位：研发一种新型模块化多功能钢轨智能打磨车，具有**自主化**（原创思想+核心知识产权）、**模块化**（匹配我国铁路工务系统特点）、**多功能**（满足钢轨多种病害的打磨需求）、**智能化**（融检测、模式生成、打磨作业与评价为一体）





研发内容四：特长尖轨机器人自动化打磨装备系统（铁科院采购）



需求：

去除毛刺、圆角打磨



重要性：

已被列入重大安全风险
范畴（终身追责）



存在问题：

- ◆ 工人劳动强度大
- ◆ 打磨效率低
- ◆ 打磨质量一致性差
- ◆ 污染较为严重
- ◆ 责任重大

尖轨型面复杂、需打磨长度长（18号轨超过20米，42号轨超过40米），采用“高精度型面测量+移动式机器人+误差补偿策略”的专用打磨装备系统是相对最佳方案



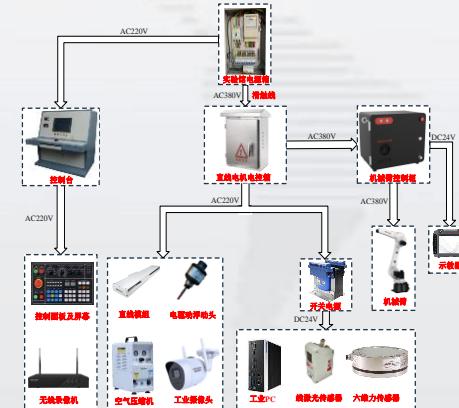
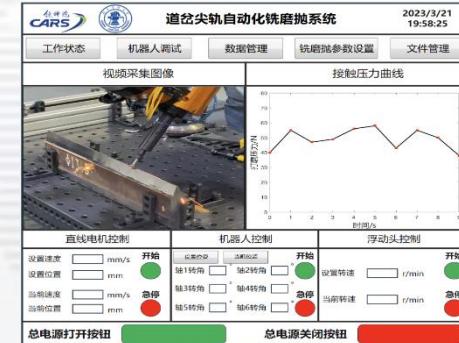
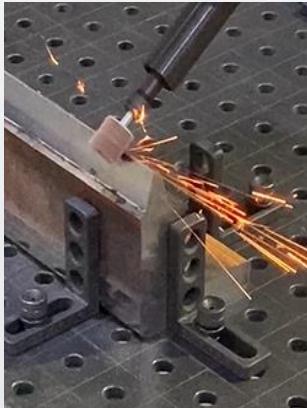
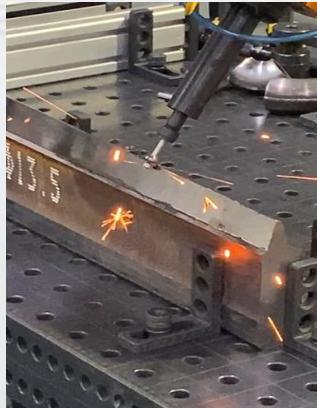
研发内容四：特长尖轨机器人自动化打磨装备系统



旋转锉刀



百叶轮





研发内容五：钢轨病害检测、打磨方案制定与质量评价



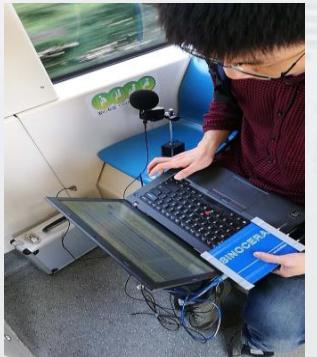
廓形测量



波磨测量



独立病害调查



列车振动测量



噪声测量



轮对廓形测量



研发内容五：钢轨病害检测、打磨方案制定与质量评价

- 对广州（含华为）、深圳、珠海、淮安、沈阳、济南等线路进行调查与方案制定



广州现代有轨电车线路状态信息管理系统

● 检测前形
● 钢轨状态
● 异常病害
● 基本参数

查询条件设置
运营方向: 上行
列车识别号:
五点取数
起始位置:
结束位置:
矫正距离量程:
1000000
最近从线里程:
2000.00
最近地名:
2020-7-30 00
最小坡度:
0
最大坡度:
0
开始查询
导出数据图片

1 上行 970... 左侧 2.31 142 0 0 201... 焊工 Non
2 上行 970... 右侧 2.76 175 0 0 201... 焊工 Non
3 上行 970... 左侧 2.95 194 0 0 201... 焊工 Non
4 上行 970... 右侧 3.01 162 0 0 201... 焊工 Non
5 上行 970... 右侧 3.24 172 0 0 202... 焊工 Non
6 上行 970... 左侧 2.37 128 0 0 201... 焊工 Non
7 上行 970... 右侧 2.71 156 0 0 201... 焊工 Non
8 上行 970... 左侧 3.04 182 0 0 201... 焊工 Non
9 上行 970... 右侧 3.29 194 0 0 201... 焊工 Non
10 上行 970... 左侧 3.42 198 0 0 202... 焊工 Non

里程: 2.31 2.76 2.95 3.01 3.24 2.37 2.71 3.04 3.29 3.42
坡度: 142 175 194 162 172 128 156 182 194 198
时间: 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
状态: 焊工 Non
曲线图: A graph showing rail profile data from -60 to 80 meters, with a sharp dip around 40 meters.

广州现代有轨电车线路状态信息管理系统

● 检测前形
● 钢轨状态
● 异常病害
● 基本参数

查询条件设置
运营方向: 上下行
列车识别号:
五点取数
起始位置:
结束位置:
矫正距离量程:
1000000
最近从线里程:
2000.00
最近地名:
2020-7-30 00
最小坡度:
0
最大坡度:
0
开始查询
导出数据图片

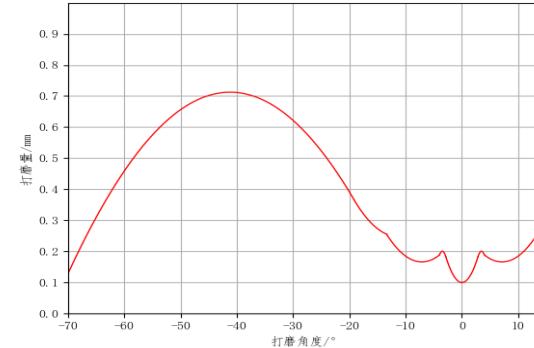
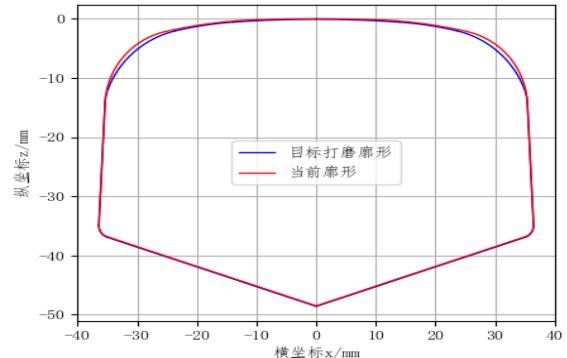
1 上行 110... Right 0.02 200... 焊工 None
2 上行 110... Right 10... 0.01 201... 焊工 None
3 上行 110... Right 10... -0.02 201... 焊工 None
4 上行 110... Right 10... 0.05 201... 焊工 None
5 上行 920... Right 10... 0.2 202... 焊工 None
6 上行 870... Right 10... -0.1 202... 焊工 None

里程: 110 10 10 10 920 870
坡度: 0.02 0.01 -0.02 0.05 0.2 -0.1
时间: 200 201 201 201 202 202
状态: 焊工 None None None None None None
曲线图: A graph showing rail profile data from -60 to 80 meters, with a sharp dip around 40 meters.





研发内容五：钢轨病害检测、打磨方案制定与质量评价



序号	角度	打磨量	序号	角度	打磨量	序号	角度	打磨量
1	15°	0.27	11	-15°	0.27	21	-45°	0.70
2	12°	0.22	12	-18°	0.33	22	-48°	0.67
3	9°	0.17	13	-21°	0.42	23	-51°	0.64
4	6°	0.16	14	-24°	0.49	24	-54°	0.59
5	3°	0.19	15	-27°	0.56	25	-57°	0.53
6	0°	0.10	16	-30°	0.62	26	-60°	0.45
7	-3°	0.19	17	-33°	0.66	27	-63°	0.37
8	-6°	0.16	18	-36°	0.69	28	-66°	0.27
9	-9°	0.17	19	-39°	0.70	29	-69°	0.16

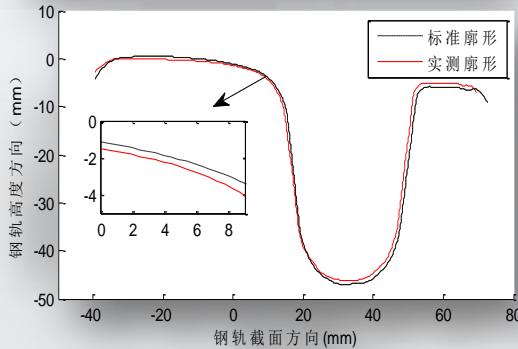


研发内容五：钢轨病害检测、打磨方案制定与质量评价



目 录

1. 概述	2
2. 打磨施工	2
3. 测量验收方案	2
4. 质量验收	3
4.1 打磨廓形	3
4.2 钢轨波磨	5
4.3 光带	8
4.4 表面粗糙度	9
4.5 接头	10
4.6 发蓝情况	11
4.7 其它	11
5. 打磨效果	13
5.1 列车运行平稳性	13
5.2 列车运行噪声	15
6. 总结	17
附录 1 验收表	18
附录 2 打磨前后波磨值	29
附录 3 表面粗糙度	33
附录 4 列车运行噪声	37
附录 5 接头改善情况	38



波长	10-30	Th1:	99.44%	Th2:	0.56%	Th3:	0.00%
波长	30-100	Th1:	96.64%	Th2:	3.36%	Th3:	0.00%
波长	100-300	Th1:	95.96%	Th2:	4.04%	Th3:	0.00%
波长	300-1000	Th1:	99.44%	Th2:	0.56%	Th3:	0.00%

PART

7

几点浅显思考





几点浅显思考——欢迎开展产学研战略合作

面向CR450工程的轮轨复杂接触关系与钢轨病害演变行为研究

钢轨线路病害特征识别、几何参数检测与综合信息管理系统研制

满足工务转场需求的下一代模块化多功能钢轨智能打磨车研制

工业/协作机器人和人工智能技术在铁路复杂场景中的应用研究

激光技术在铁路线路养护以及关键零部件性能提升领域的应用研究



谢谢！
望各位专家批评指正！