文章编号：2097-5899(2025)05-0037-06　　**中图分类号**：U298.5　　**文献标识码**：A
DOI：10.16669/j.cnki.issn.2097-5899.202404280001
引用格式：杨露萍，陆松，王帅一，等. 铁路货物运输外来火源及摩擦起火试验研究[J]. 铁路物流，2025，43(5)：37-42.
YANG Luping，LU Song，WANG Shuaiyi，et al. Tests on External Fire and Friction-Induced Disasters in Railway Freight Transportation[J]. Railway Logistics，2025，43(5)：37-42.

铁路货物运输外来火源及摩擦起火试验研究

杨露萍[1]，陆　松[1]，王帅一[2]，李思颖[3]

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 运输及经济研究所，北京　100081；2. 中国铁路沈阳局集团有限公司 货运部，辽宁 大连　116019；3. 中国铁道科学研究院集团有限公司 铁道科学技术研究发展中心，北京　100081)

摘　要：通过进行外来火源引燃货包试验，分析不同形式、不同能量的火源对货包、车地板的影响，结果表明接触温度和铁屑质量是影响铁屑引发火灾的主要因素。模拟铁路运输途中可能存在的摩擦生热工况，通过货包与地板、衬垫材料之间系列摩擦以及冲击摩擦试验、模拟装卸作业摩擦试验等，结果表明车辆运行中货包之间、货包与车厢侧壁、地板之间如果长时间处于摩擦状态，在封闭、积热不散等特定条件下，接触的包装材料可通过缓慢反应而集聚能量，导致货包局部温度缓慢升高。根据试验结论，针对包装材料、装卸作业等环节提出铁路货物安全运输措施，为防范铁路货物运输过程中火灾事故提供理论支撑。

关键词：铁路货运；摩擦；外来火源；试验；防范措施

在我国铁路突发事故中，火灾事故仅次于行车事故，对我国铁路运输安全构成威胁[1]。仅2020年2月—2022年8月期间，铁路就发生了6起货物运输火灾事故，分析事故原因，主要包括包装或包装衬垫物与车体、集装箱间摩擦，运输过程中外来火种如沿途烧荒产生的火星等进入车厢内引发火灾等[2]。通过开展外来火源引燃货包试验和摩擦试验，模拟研究铁路运输工况下可能导致火灾的影响因素，根据试验结论，有针对性地提出铁路货物安全运输措施，为防范铁路货物运输火灾事故提供技术支撑。

1　外来火源引燃试验研究

制备质量为0.04 g，0.09 g，0.15 g，0.33 g 4种规格的铁屑，分别加热至170 ℃，220 ℃，300 ℃以及380 ℃四级温度后，将其直接飞置于纸塑复合包装袋、瓦楞纸、聚氨酯等常见包装、衬垫材料以及车地板材料的木板上，观察铁屑与上述材料的作用情况。

加热后的铁屑与纸塑复合包装袋接触情况如表1所示。由表1可以看出，无论多大质量的铁屑作用到纸塑复合包装袋上，当温度低于220 ℃时，纸塑复合包装袋均没有发生碳化现象；当铁屑温度达到300 ℃及以上

表1　加热后的铁屑与纸塑复合包装袋接触情况

Tab.1　Contact between heated iron filings and paper plastic composite packaging bags

温度/℃		170	220	300	380
0.04 g铁屑	状态	无碳化	无碳化	碳化	碳化
	能量/J	0.3	0.4	0.9	1.5
0.09 g铁屑	状态	无碳化	无碳化	碳化	碳化（穿透）
	能量/J	0.6	0.8	2.1	3.3
0.15 g铁屑	状态	无碳化	无碳化	碳化	碳化（穿透）
	能量/J	1.1	1.4	3.5	5.5
0.33 g铁屑	状态	无碳化	无碳化	碳化（穿透）	碳化（穿透）
	能量/J	2.3	3.0	7.6	12.1

收稿日期：2024-04-28
基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(J2022X007)

时，纸塑复合包装袋均发生碳化，铁屑温度在300 ℃时，0.33 g的铁屑作用到纸塑复合包装袋上发生碳化并穿透；铁屑温度在380 ℃时，0.09 g，0.15 g以及0.33 g铁屑作用到纸塑复合包装袋上均碳化并穿透。实验室条件下，纸塑复合包装袋没有发生阴燃冒烟或明火现象。加热后的铁屑与瓦楞纸接触情况如表2所示。

表2　加热后的铁屑与瓦楞纸接触情况

Tab.2　Contact between heated iron filings and corrugated paper

温度/℃		170	220	300	380
0.04 g铁屑	状态	碳化	碳化	碳化	碳化
	能量/J	0.3	0.4	0.9	1.5
0.09 g铁屑	状态	碳化	碳化	碳化	碳化
	能量/J	0.6	0.8	2.1	3.3
0.15 g铁屑	状态	碳化	碳化	碳化	碳化（穿透）
	能量/J	1.1	1.4	3.5	5.5
0.33 g铁屑	状态	碳化	碳化	碳化	碳化（穿透）
	能量/J	2.3	3.0	7.6	12.1

由表2可以看出，加热后的铁屑与瓦楞纸接触后，均出现了碳化现象，这是由于瓦楞纸燃点较纸塑复合包装袋低。当铁屑与瓦楞纸接触点温度达到170 ℃，瓦楞纸表面出现碳化现象，且随着铁屑温度的升高和铁屑质量的增加碳化逐渐严重，对于0.15 g和0.33 g的铁屑当温度升高到380 ℃时，已经可以将瓦楞纸碳化穿透。加热后的铁屑与聚氨酯接触情况如表3所示。

由表3可以看出，当170℃铁屑作用到聚氨酯上后，聚氨酯发生局部萎缩，更高温度铁屑作用到聚氨酯上，聚氨酯发生融化甚至出现融穿现象，铁屑温度达到380 ℃时，聚氨酯均被融穿。加热后的铁屑与木板接触情况如表4所示。

表3　加热后的铁屑与聚氨酯接触情况

Tab.3　Contact between heated iron filings and corrugated paper

温度/℃		170	220	300	380
0.04 g铁屑	状态	局部萎缩	融化	融化	融化（融穿）
	能量/J	0.3	0.4	0.9	1.5
0.09 g铁屑	状态	局部萎缩	融化	融化（融穿）	融化（融穿）
	能量/J	0.6	0.8	2.1	3.3
0.15 g铁屑	状态	局部萎缩	融化	融化（融穿）	融化（融穿）
	能量/J	1.1	1.4	3.5	5.5
0.33 g铁屑	状态	局部萎缩	融化	融化（融穿）	融化（融穿）
	能量/J	2.3	3.0	7.6	12.1

表4　加热后的铁屑与木板接触情况

Tab.4　Contact between heated iron filings and wooden boards

温度/℃		170	220	300	380
0.04 g铁屑	状态	无碳化	碳化	碳化	碳化
	能量/J	0.3	0.4	0.9	1.5
0.09 g铁屑	状态	无碳化	碳化	碳化	碳化
	能量/J	0.6	0.8	2.1	3.3
0.15 g铁屑	状态	无碳化	碳化	碳化	碳化
	能量/J	1.1	1.4	3.5	5.5
0.33 g铁屑	状态	无碳化	碳化	碳化	碳化
	能量/J	2.3	3.0	7.6	12.1

由表4可以看出，170 ℃的铁屑作用到木板上，木板均没有碳化现象，当铁屑温度高于170 ℃时，木板则均出现碳化现象，但没有发生冒烟、阴燃及明火。

以上试验结果说明，接触温度和铁屑质量是影响铁屑对铁路货物包装、衬垫及车底板材料作用的主要因素。体积越大的铁屑接触材料表面积越多，在相同的接触温度下，更有利于热量在表面的积聚和蔓延，从而更容易使其集中碳化或者融化。反之，体积较小的铁屑在较低的温度下则不容易引起碳化。而当铁屑温度很高时，体积较小的铁屑也足以引发接触面迅速碳化并向深层扩散。受传热速率等条件的影响，铁屑作用于材料表面的能量大小与其是否碳化并不呈线性关系。

2　摩擦试验研究

采用振动试验台模拟车厢振动，对铁路运输过程中货包与车地板、衬垫材料之间的摩擦进行模拟试验。采用将货包放置于小推车上冲击撞击墙壁的方法，模拟铁路调车工况，通过冲击摩擦试验对调车作业可能引发火灾因素进行试验研究[3-4]。

2.1　货包与车地板、衬垫材料摩擦试验

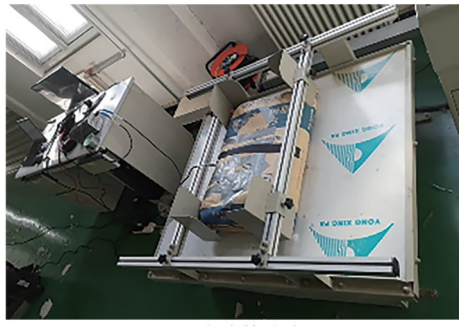
采用HD－216型小型运输包装振动试验台和HD－A521型大型运输包装振动试验台，参考国际安全运输协会振动测试标准和美国材料与试验协会试验标准《运输包装箱及系统性能测试》进行摩擦升温试验研究。

将铁路常运PVC货包按照1包25 kg、2包叠装50 kg、5包叠装125 kg3种方式放置在试验台上，将热电偶传感器埋入货包内，紧贴底部包装袋，温度数据

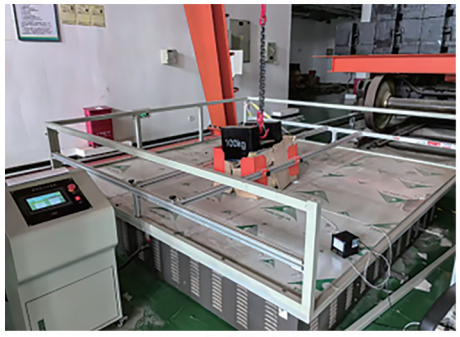
通过IMC数据采集仪和Supmea专用温度数据采集仪采集，进行货包与金属地板、货包与衬垫材料、金属材料与金属地板、木材与金属地板之间模拟摩擦试验研究。摩擦模拟试验如图1所示。



a　1包摩擦试验
a　Single-pack friction test



b　2包摩擦试验
b　Two-pack friction test



c　5包摩擦试验
c　Multi-pack friction test

图1　摩擦模拟试验

Fig.1　Tribological simulation test

参考国际安全运输协会振动测试标准和美国材料与试验协会试验标准，摩擦振动频率设为2.0～5.0 Hz。因试验过程中摩擦振动频率为5.0 Hz时，货包发生剧烈跳动，与铁路实际振动工况相差较大，因此，试验频率最终确定为2.0 Hz，3.0 Hz和4.0 Hz。振幅采用国际安全运输协会振动测试标准和美国材料与试验协会试验标准中的25.4 mm。

货包与金属地板摩擦试验结果如表5所示。

表5　货包与金属地板摩擦试验结果

Tab5　Friction test results between the package and the metal floor

货包数量	频率/Hz	温度升高/℃
单包	2	0.8
	3	2.3
	4	11.4
两包	2	2.8
	3	1.7
	4	11.7
多包	2	1.9
	3	9.5
	4	11.4

由表5可以看出，货包包装与金属地板摩擦，单包、2包、多包(5包125 kg)与金属地板在2 Hz，3 Hz，4 Hz试验工况下摩擦试验时，均在4 Hz试验工况下温度升高最高，温升分别为11.4 ℃，11.7 ℃，11.4 ℃。

货包与瓦楞纸衬垫材料摩擦试验结果如表6所示。

表6　货包与瓦楞纸衬垫材料摩擦试验结果

Tab 6　Friction test results of package and lining material

货包数量/包	频率/Hz	温度升高/℃
1	2	0.2
	3	1.4
	4	6.9
2	2	2.7
	3	1.4
	4	9.1
5	2	3
	3	16.8
	4	22.8

由表6可以看出，货包包装与衬垫材料摩擦，1包、2包、5包与衬垫材料在2 Hz，3 Hz，4 Hz试验工况下摩擦试验时，均在4 Hz试验工况下温度升高最高，温升分别为6.9 ℃，9.1 ℃，22.8 ℃。货包金属材料与金属地板摩擦试验结果如表7所示。

由表7可以看出，货包金属材料与金属地板摩擦，1包、2包、5包金属材料与金属地板在2 Hz，3 Hz，4 Hz试验工况下摩擦试验时，均在4 Hz试验工况下温度升高最高，温升分别为7.1 ℃，7 ℃，12.7 ℃。

表7　货包金属材料与金属地板摩擦试验结果

Tab 7　Friction test results of metal materials and metal flooring in the cargo package

货包数量/包	频率/Hz	温度升高/℃
1	2	0.7
	3	5
	4	7.1
2	2	1.5
	3	7
	4	5.3
5	2	1.1
	3	10
	4	12.7

综合表5、表6、表7，在频率20 Hz、振幅2 mm的试验工况下，2包总重220 kg、金属与金属间摩擦温升最高8.6 ℃的试验结果相似，没有达到包装衬垫材料点燃温度。

随摩擦时间延长，摩擦接触面一直保持缓慢温升状态，如果货包之间、货包与车厢侧壁、地板之间长时间处于摩擦状态，在封闭、积热不散等特定条件下，接触的包装材料可通过缓慢反应而集聚能量，导致货包局部温度缓慢升高，试验中5包包装与衬垫材料在4 Hz摩擦试验工况下温度升高了22.8 ℃。

2.2　铁路冲击摩擦试验

列车行驶途中制动、编组站调车等都会产生较强的冲击力，引起货包与车(箱)壁、货包与货包之间的相互撞击及摩擦，从而引起摩擦物温度升高[5-7]，冲击摩擦模拟试验如图2所示。



a　撞击模拟试验装置　　b　撞击模拟试验图

a　Impact simulation test device　　b　Impact test diagram

图2　冲击摩擦模拟试验

Fig.2　Impact friction simulation test

将货包放置于小推车上，模拟铁路调车工况，按恶劣条件试验。试验时采用人力和卡车推小推车撞击墙壁，撞击试验速度分别为5 km/h，10 km/h，15 km/h，冲击试验红外热像图如图3所示。

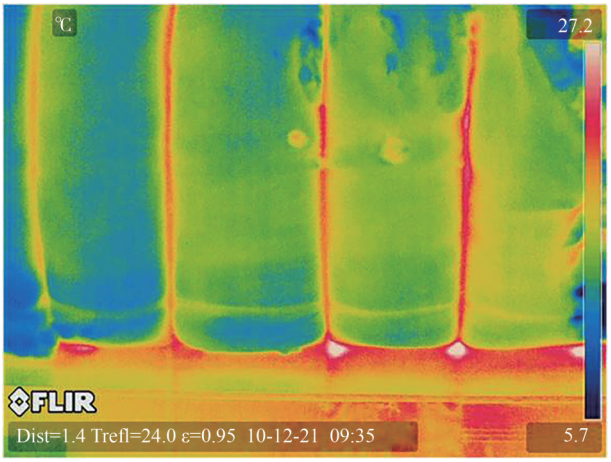


图3　冲击试验红外热像图

Fig.3　Thermal image of the impact test

图3中，红色代表温度较高，蓝色代表温度较低。捆扎钢丝与钢板接触处温度最高，受热传导的作用，钢丝的温度高于货包本体，钢丝周围也有一定的温度上升。

3　安全防范措施

(1) 防范外来火源要求。根据外来火源引燃试验结果，外来火源的介质质量及温度是导致火灾的重要因素。因此，需要重视烧荒、人为扔掉的烟头等进入铁路货车或集装箱内，引发火灾，同时重点做好装卸过程中火源管理[8-9]。应避免使用无防火板、门窗变形或关闭不严、车顶烟囱孔无盖或盖不严、车底板与壁板有明显裂缝、孔、洞的车辆、集装箱。装运过油类、腐蚀品、易燃易爆物品车辆在装运前必须认真检查，彻底清洗，不得留有残渣等[10]。

(2) 包装、衬垫材料要求。运输的包装应完整，避免未经处理的磨损严重的破包、被油污污染的货包装车，衬垫材料应无磨损、起毛。为防止货包捆扎钢带、捆扎钢丝与车(箱)地板、侧壁剧烈摩擦升温，或冲击摩擦产生铁屑引发着火事故，应尽量使用塑钢带等非金属捆扎带。采用钢带、钢丝捆扎的货包，包索结扣应避免朝向车(箱)地板或接触车(箱)内壁、车门，结扣翘起要进行处理，相邻两包结扣禁止对向装载，确实无法避免结扣相对时，货包之间采取防磨衬垫措施。

(3) 车辆、集装箱装载要求。为防止运输过程中摩擦引火，对采用金属捆扎带的货包或金属材料包装，货包之间、货包与地板、侧壁间应采用瓦楞纸等衬垫材料隔开。对车(箱)内较多的金属凸起物，应采取适当措施进行处理，达到无锐角突起，避免与钢质包索、

结扣直接接触后方准使用。装车前，依据货物尺寸、装载车辆内部结构设计装载方案，按方案装车，并做好拉牵、塞挡等加固措施，确保货包装载紧密稳固，减少货包移动间隙。

（4）装卸作业要求。进行装卸作业时，装卸机械铁质突出部位必须做好防护，防止作业时与车壁板、货包钢丝、雨棚、仓库的支柱、墙体摩擦起火。杜绝野蛮装卸作业，装卸车过程中禁止砸、摔、拖包，禁止使用装卸机具顶撞货包和车辆端侧墙。电瓶车、铲车、吊车、叉车等装卸机械应安装防止打出火花的安全装置；装卸作业时，排气管不准靠近货物；装卸机械搬运货物时应将货包抬离地面20 cm以上，不得硬拖、硬铲；装卸机械铲齿、夹头应镀锌、镀铜为宜，装卸使用铁钩不可敲击捆扎钢丝；禁止使用装卸机具顶撞货包。

4　结束语

通过模拟铁路运输工况，对铁路货物运输途中因摩擦生热、冲击、外来火源等引发铁路货物运输火灾的可能性进行实验室试验，结果表明，车辆运行过程中因调车作业、加减速等引起的相邻货包金属件(如捆扎钢丝等)之间、金属件与车厢侧壁、地板之间、车门与车厢侧壁之间的剧烈冲击摩擦产生的高温铁屑作用于货包上，以及交会客车产生烟头、铁路线路周边燃烧秸秆等外来火源作用于货包上是引发铁路运输火灾的主要原因。为防止铁路运输火灾事故，应防范外来火源，同时规范货物包装、衬垫材料，车辆、集装箱装载，装卸作业等要求。研究为防范铁路运输火灾事故，保障铁路运输安全提供技术支撑。

参考文献：

[1] 乔　俊，孟学雷，孙慧萍，等.铁路突发事件分类分级研究[J].铁道运输与经济，2019，41(4)：118-122.
QIAO Jun，MENG Xuelei，SUN Huiping，et al. A Study on Classification and Gradation of Railway Emergency[J]. Railway Transport and Economy，2019，41(4)：118-122.

[2] 张大庆，徐立运，程广远，等.铁路集装箱运输起火安全风险评价技术研究[J].铁道货运，2024，42(2)：39-46.
ZHANG Daqing，XU Liyun，CHENG Guangyuan，et al.Research on Fire Safety Risk Assessment Technique in Railway Container Transportation.[J].Railway Freight Transport，2024，42(2)：39-46.

[3] 陆　松.铁路集装箱装运棉花安全技术研究[J].铁道运输与经济，2017，39(5)：64-67.
LU Song.Study on Safety Technologies to Transport Cotton in Railway Containers[J].Railway Transport and Economy，2017，39(5)：64-67.

[4] 殷　涛.棉花铁路安全运输模拟试验的研究[J].铁道运输与经济，2016，38(4)：89-93.
Yin Tao.Study on Simulation Tests of Safe Cotton Transportation by Railway[J].Railway Transport and Economy，2016，38(4)：89-93.

[5] 肖明轩.机械摩擦火花火源特性及点火能力研究[D].沈阳：东北大学，2020.

[6] 王　玥，李　晋，吕　东，等.摩擦型机械火花能量的判定方式[J].消防科学与技术，2018，37(9)：1176-1177.
WANG Yue，LI Jin，LYU Dong，et al.Determination Method of Friction Mechanical Spark Energy[J].Fire Science and Technology，2018，37(9)：1176-1177.

[7] 宋佳云.飞火输运及点燃的理论和实验研究[D].合肥：中国科学技术大学，2023.

[8] 李文东.棉花火灾特性实验研究[D].天津：天津商业大学，2018.

[9] KOO E，PAGNI P J，WEISE D R，Firebrands and Spotting Ignition in Large-Scale Fires[J]. International Journal of Wildland Fire，2010，19(7)：818-843.

[10] 张　成.原油铁路运输安全风险分析与对策研究[J].铁道货运，2022，40(7)：38-43.
ZHANG Cheng. Study on Safety Risks and Countermeasures of Crude Oil Transported by Railways[J]. Railway Freight Transport，2022，40(7)：38-43.

（责任编辑：金　晶）

Tests on External Fire and Friction-Induced Disasters in Railway Freight Transportation

YANG Luping[1]，LU Song[1]，WANG Shuaiyi[2]，LI Siying[3]

(1. Transportation & Economics Research Institute，China Academy of Railway Sciences Corporation Limited，Beijing 100081，China；2. Freight Department，China Railway Shenyang Group Co.，Ltd.，Dalian 116019，Liaoning，China；3. Railway Science & Technology Research & Development Center，China Academy of Railway Sciences Corporation Limited，Beijing 100081，China)

Abstract: Tests on cargo package fire caused by external fire were carried out. The effects of fire sources with different forms and different energy on cargo packages and vehicle floors were analyzed. The results show that the contact

temperature and the quality of iron filings are the main factors affecting the fire induced by iron filings. The frictional heat generation condition that may exist in railway transportation is simulated, and tests on the series friction among the cargo package, the floor, and the liner material, as well as the impact friction test and the simulated loading and unloading operation friction test, are carried out. The result shows that if there is friction between the cargo packages, as well as between the cargo packages and the side wall and the floor of the carriage for a long time during the operation of the vehicle, the packaging material in contact can accumulate energy through a slow reaction, resulting in a slow increase in the local temperature of the cargo package under specific conditions such as closure and heat accumulation. According to the test results, measures for safe railway freight transportation are proposed for packaging materials, loading and unloading operations, etc., so as to provide theoretical support for preventing fire accidents during railway freight transportation.
Keywords: Railway Freight Transportation; Friction; External Fire; Test; Countermeasure

（上接第 36 页）

Construction Technology of Decision Support System for Adjustment of Railway Freight Car Flow Routing

LIU Haitao[1], YANG Wenhao[2], ZHANG Wei[1], QIN Sheng[1], YOU Yanwen[1]

(1. Transportation & Economics Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;
2. Freight Transport Department, China State Railway Group Co., Ltd., Beijing 100844, China)

Abstract: The optimization and adjustment of railway freight car flow routing is an important way to deepen the supply-side structural reform of railway transportation, optimize the utilization of road network capacity, and improve freight quality, efficiency, transportation, and revenue. It has been a hot issue in the field of railway freight organization. By analyzing the requirements for refined and efficient management and assisted decision adjustment of railway freight car flow routing in the new situation, the study proposed the overall structure of the decision support system for adjustment of railway freight car flow routing. It designed the functional modules of basic road network visualization search, freight flow distribution search, car flow routing search and maintenance, and assisted decision for car flow routing adjustment and formed key technologies for decision on car flow routing adjustment in typical scenarios such as new lines, market demand changes, and capacity transformation, thereby providing technical support for building a digital and intelligent platform for car flow routing optimization and adjustment and promoting fine management and scientific decision-making of car flow routing.
Keywords: Railway Freight; Car Flow Routing; Optimization and Adjustment; Assisted Decision; System Construction