

火箭橇滑块高速重载磨损行为的研究进展



李小凯¹, 严凯¹, 吴琳¹, 林乃明¹, 王振霞¹, 王玮华², 曾群锋³, 吴玉程⁴

1. 太原理工大学, 山西 太原 030024

2. 航空工业航宇救生装备有限公司, 湖北 襄阳 441003

3. 西安交通大学, 陕西 西安 710049

4. 合肥工业大学, 安徽 合肥 230009

摘要: 火箭橇试验是高超声速技术领域的技术基础, 已成为世界范围内高端装备博弈的热点之一, 开展火箭橇系统的运维与损伤控制研究尤为重要。作为火箭橇与火箭滑轨连接的纽带, 滑块是火箭橇试验在高速重载工况下可靠服役的关键。火箭橇滑块在特定服役工况下的磨损, 威胁着火箭橇试验系统的可靠运行和长寿命服役安全, 更是制约火箭橇发展和应用的主要技术瓶颈。因此, 开展火箭橇滑块高速重载磨损行为研究具有重要的理论价值和工程意义。本文首先介绍了国内外火箭橇试验系统的发展沿革与现状; 进而, 基于试验、模拟仿真、试验与模拟仿真结合, 综述了火箭橇滑块高速重载磨损行为的研究进展。最后, 着眼于模拟手段、高性能新型金属材料设计与制备、表面防护涂层等展望了解决火箭橇滑块磨损的可行途径, 旨在为极端工况下材料服役损伤行为与控制技术提供借鉴与参考。

关键词: 火箭橇; 滑块; 高速重载; 磨损行为

中图分类号: V219

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.04.001

高超声速技术是未来大国间科技竞逐的关键点, 自20世纪90年代起, 高超声速技术进入蓬勃发展时期, 世界各国在高超声速技术发展上持续发力, 至今一直处于高速发展阶段。作为发展高超声速技术的关键之一, 火箭橇试验安全性和长期稳定性的研究是不可或缺的重点环节^[1-2]。

火箭橇滑轨系统作为一种可控性和可靠性强、高精度地面动态模拟试验设备, 以火箭发动机为推进系统, 模拟试验件在空中的高速运行状态, 主要用于研究航空航天等尖端武器装备以及民用高新技术产品在超高速运行时可能遇到的一系列技术问题, 以提高试验件的可靠性, 缩短研制周期, 节约费用开支。火箭橇动态试验可以模拟试验件真实飞行的综合试验环境, 通过模拟飞行过程获得大量易测且准确的数据, 并且试验的重复性、可操作性、可控性、维修保养等均优于传统的风洞试验^[3]。

火箭橇滑轨系统依据其使用的滑轨数量和形式可分为多种类型, 其中以单轨和双轨火箭橇为主, 两者又各有优势和不足。双轨火箭橇滑轨系统, 顾名思义就是使用了两条标准滑轨作为导向约束, 其优势在于承载能力更大、系统稳定性高, 不足之处在于所占空间较大、易受空气阻力影响, 不适合超过 $Ma\ 3$ 的试验, 而单轨火箭橇滑轨系统仅仅使用了一条滑轨, 其优势在于极大地削弱了气动阻力的影响进而可实现更高速度的试验, 是完成超高速试验的首选火箭橇滑轨系统, 但其弊端是承载能力有限、系统运行过程中稳定性差。

火箭橇沿滑轨滑动是通过滑轨上的滑块滑动来进行的, 滑轨上的滑块在设计上, 不仅需要确保滑块牢牢地扣住滑轨, 使试验设备在滑轨上处于高速运行的过程中不至于脱离, 还需要保证滑块与滑轨之间有一定程度的间隔, 使滑

收稿日期: 2023-10-15; 退修日期: 2024-01-29; 录用日期: 2024-02-28

基金项目: 航空科学基金(20200029029001); 山西省科技合作交流专项(202204041101021); 山西省中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX20231A018); 陕西省自然科学基金项目(2022JM-251)

引用格式: Li Xiaokai, Yan Kai, Wu Lin, et al. Research progress on wear behavior of rocket sled slider under high speed and heavy load conditions[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(04): 1-8. 李小凯, 严凯, 吴琳, 等. 火箭橇滑块高速重载磨损行为的研究进展[J]. 航空科学技术, 2024, 35(04): 1-8.

块成功在滑轨上滑行^[4]。实际上,火箭橇动态试验过程是典型的高速重载荷试验,而其滑块部件作为火箭橇与滑轨相接触的重要连接纽带,随着火箭橇试验速度的提高,滑块在滑轨上运动时将承受复杂、苛刻的干摩擦以及较大的负载正压和冲击力作用。试验过程中,正是由于不断地振动、冲击载荷的增加,以及在干摩擦作用下生成大量的摩擦热会进一步引起热应力^[5]集中从而加剧了磨损,且在与高速重载荷共同作用下导致滑块出现塑性变形,这将制约动态试验过程的完成,因此对火箭橇滑动过程中的摩擦磨损行为进行研究,并对改进滑块摩擦磨损性能、兼顾耐磨性和减摩性以及提高其抗动态冲击性的研究显得尤为必要。因此,滑块材料的研究成为当前开展高速和超高速火箭橇试验技术研究的关键方向之一。

1 试验研究

调研发现,国内外大多数研究学者以对火箭橇试验后的滑块试样进行摩擦磨损分析为主,然而,火箭橇试验具有相当高昂的经济成本和时间成本,这对于收集表征摩擦磨损现象所需的数据是不利的,且火箭橇试验所获得的滑块样本量少、运行环境等客观不确定性因素较多,因此试验研究通常很难揭示高速滑行时滑块摩擦磨损的演变历程。图1为火箭橇滑轨及滑块受力示意图。

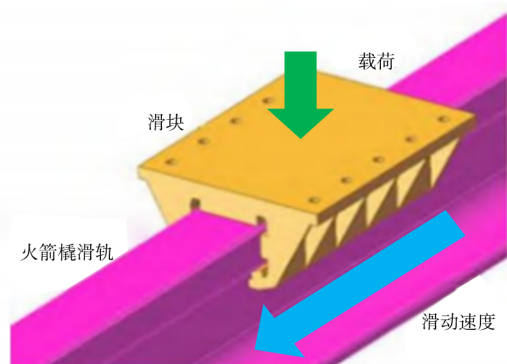


图1 火箭橇滑轨及滑块受力示意图^[6]

Fig.1 Schematic diagram of the force on the rocket skid slide rail and slider^[6]

2018年,俄罗斯科学家 Gerasimov 等^[7]开展了火箭橇轨道设施高速滑动过程中材料力学性能变化、塑性变形以及表面烧损情况的研究,研究发现滑块高速滑动所产生的摩擦热有21%用于加热烧损滑块,其余热量则由于热传导或辐射而损失,这导致了滑块工作表面的力学性能降低以及

发生剧烈塑性变形。

资料显示,1992年杨兴邦最早提到火箭橇滑动摩擦会导致滑块磨损,表示滑块材料选择及其与滑轨之间的间隙是十分重要的。然而,直到2010年关于滑块磨损问题依旧没有取得实质性进展,王云^[8]指出火箭橇滑块和滑轨作为重要的基础配套设施,解决火箭橇突破热障后出现的滑块磨损问题仍然是未来发展需要。

为了解决这一问题,诸多学者进行了相关科学研究。杨忠诚等^[9]于2013年针对火箭橇滑块的选材,采用NM500耐磨钢、0Cr18Ni9Ti不锈钢分别与QU-100轨道材料进行了摩擦磨损试验,试验发现室温时两种钢的磨损机制均存在磨粒磨损,而在400℃及以上高温时均存在氧化磨损,但耐磨钢在高温时的耐磨性能比常温下优异,不锈钢则出现了表面的严重氧化,因此,在相同温度下,NM500耐磨钢相较于0Cr18Ni9Ti不锈钢具有更好的耐磨性能。2017年Liu Jun等^[10]采用了销盘试验分别对0Cr18Ni9Ti和T250两种材料在不同工况下的耐磨性进行了测试,并建立了在试验中评价滑块磨损的等效转换方法,结果表明T250具有更好的耐磨性,这为不同速度和载荷范围内火箭橇滑块材料的选择提供了参考。

滑块选材问题终究是由于滑块磨损机制不同而产生磨损差异,因此厘清滑块磨损机制也是必要的。2016年薛进进等^[11]以当前使用的高速火箭橇滑块材料30CrMnSiNi2A为研究对象,进行了中速条件(30~60m/s)下的摩擦磨损试验,发现随着温度的升高,滑块材料性能严重恶化,高温耐磨性较差,但摩擦因数趋于稳定。2019年汪笑鹤等^[12]分析了火箭橇动态试验后铜合金滑块的表面形貌,分析发现滑块表面明显的温度梯度变化致使组织结构变化,导致出现以磨粒磨损和黏着磨损为主的磨损机制,此外产生的划痕沿着滑动方向呈现彼此平行分布,且在部分区域出现不规则的撕裂状表面,大多数划痕侧面存在材料堆积,即明显的塑性变形。2020年王伟华等^[6]分析了0Cr18Ni9Ti滑块历经938m/s、850kg高速重载后的摩擦磨损失效机理,发现滑块在重载荷和摩擦热综合作用下是以磨粒磨损和疲劳磨损为主要、黏着磨损和氧化磨损为次要的失效机理,且由于摩擦热引起的加工硬化导致硬度在1.6mm厚度范围内由表向里呈梯度降低变化。

在苛刻服役条件下,为避免滑块出现严重磨损,既要提高滑块耐磨性又要解决滑块减摩问题,在滑块表面制备减摩耐磨涂层成为重要的手段之一^[13]。2018年雷逸舟^[14]研究了火箭橇滑块表面制备含Ni包MoS₂粉末的Cr₃C₂-25NiCr

复合涂层在高温下的减摩耐磨性,研究发现复合涂层呈现出出色的减摩性能并有效降低了摩擦因数。

2020年,苏静雨等^[15]为了实现减轻在高速干摩擦条件下火箭橇滑块由于颗粒磨损以及摩擦热而引起的磨损和烧蚀,使用超声速火焰喷涂技术在滑块材料 VascoMax 300 钢表面制备了 NiCr-Cr₃C₂ 耐磨涂层,并加入不同质量分数的 Ni 包覆 MoS₂ 粉末进行涂层性能优化,试验结果发现当粉末加入量在 16%~24% 时涂层综合效果最好,且制备的涂层不仅起到了减摩耐磨的作用,也缓解了滑块表面的温升,进而有效抑制了热损伤的发生。

2021年,吕涛^[16]以火箭橇滑块基体材料 0Cr18Ni9Ti 不锈钢和 QA19-4 铝青铜为研究对象,利用等离子喷涂技术在基体材料表面制备了良好机械结合的镍-石墨涂层,分析并比较了两种滑块材料及其有涂层时的干摩擦磨损性能和润滑情况下的磨损性能,试验发现室温低速低载荷或高载荷下涂层的体积磨损量均低于两种滑块基体材料,涂层表现出优异的减摩耐磨性,而在润滑条件下,由于润滑油膜提供了减摩效果并降低了材料磨损,滑块材料体积磨损量均低于干摩擦时的磨损量。减摩耐磨涂层无疑是解决火箭橇滑块磨损问题的手段,但与基体结合强度不高的涂层往往会发生涂层剥落,产生的硬质涂层颗粒反而会加剧滑块表面的磨损。

2 模拟仿真研究

伴随着计算机科学的高速发展,基于计算机模拟分析的方法逐渐被应用于火箭橇滑块的摩擦学问题研究。

2009年,Burton等^[17]首先对滑块、滑块衬垫和轨道顶部的原始样品和使用样品的表面高度轮廓进行了详细测量,来保留几乎所有重要的表面特征(包括粗糙度特征),随后使用 ABAQUS 软件建立了滑块与滑轨相互作用问题的二维有限元模型,进而研究了摩擦因数对模型特征和物理变量(载荷)的依赖关系,研究结果发现粗糙度越高,摩擦因数也会越大,而随着压力的增加,滑块磨损形式将发生变化,摩擦因数对压力的依赖性也变得更为复杂。2011年,Huber^[18]基于欧拉-拉格朗日方法对速度区间在 200~1500m/s 的霍洛曼滑轨摩擦副进行了磨损模拟,获得的磨损体积仅为实际值的 49.31%~80.87%,尽管模拟结果与实际结果相差较大,但考虑到实际值受诸多外界因素的影响,而模拟值是基于理想情况、不考虑外界因素所得的,因此模拟结果依然具有一定的可信度。

预测磨损的发生及其变化是必要的,但在实际情况下,

高速摩擦往往伴随大量摩擦热的产生,升高的温度会进一步促进机械磨损,因此为了了解火箭橇滑块滑动进程中所产生的热环境,2015年,Palazotto等^[19]通过建立的三维有限元分析模型系统地研究了滑块和轨道的热力学损伤行为,考虑了 20m/s、200m/s 以及 1500m/s 三种滑动速度条件,模拟结果发现滑块和滑轨表面的损坏过程和模式非常依赖于滑动速度和滑块温度,在 20m/s 时滑块的磨损损坏情况逐渐严重,此时滑块表面会产生犁状连续划痕,而当速度在 200m/s 及以上时,滑块表面开始显示出切削型的损伤模式,同时在轨道的凹槽中出现了切碎的材料去除。

2016年,Alban等^[20]采用二维 ABAQUS 有限元模型模拟火箭橇滑块材料内的热传导,并将对流空气动力学效应应用于所建立的二维有限元模型中,获得了较为完整的滑块材料温度分布,模拟结果发现,由于摩擦热的影响使得滑块底部(即与滑轨相接触的面)温度随时间的增加而明显增加,而在越靠近滑块顶部位置的温度反而受对流空气的影响逐渐降低。

近年来高熵合金材料的优异性能被发掘,尤其以难熔高熵合金为例,其在高温高压等苛刻条件下具有高温抗氧化性、耐磨性以及优异的综合力学性能^[21-22],这为火箭橇滑块的选材问题提供了更好的解决方案。2018年,丁欣恺等^[23]针对火箭橇滑块材料需满足能够承受高温高压等极端条件问题,采用第一性原理计算方法研究了 NbMoTaWV_x (0≤x≤1.5) (x为V在该合金中的含量)高熵合金在平稳态条件下的相结构和弹性力学性质,计算发现V组元的增加会导致合金相的稳定性降低、理论强度下降,但内在塑性有所提高,且弹性各向异性几乎不会发生改变。

李雪洁等^[24]的研究为新一代高超声速火箭橇滑块材料的研发提供了一定的参考,他们在 2022 年同样基于第一性原理探究了 Ti、Zr、Hf 以及 Sn 等替代元素(Ti/Zr/Hf/Sn/W) NbMoTaV 高熵合金塑韧性的影响,计算结果表明,替代元素会降低合金成键稳定性和共价性,进而引起母合金材料弹性性能降低,且(Ti/Zr/Hf/Sn)NbMoTaV 合金材料的强度均低于 WNbMoTaV 合金。高熵合金的优异使用性能毋庸置疑,但相应加工工艺的可行性和高昂价格限制了其更广泛的应用。

2020年,冯瑞雪等^[25]使用某有限元模拟软件建立了由火箭橇滑块与滑轨组成的高速干摩擦滑动摩擦副的热-结构耦合场模型,探讨了滑块磨损过程中含 Ni 包覆 MoS₂/Cr₃C₂-25NiCr 涂层对温度变化的影响,模拟结果发现有涂层相比于无涂层时,滑块最高温度下降了 27.4%。

在计算机模拟分析方面。2011年,肖虹等^[26]采用流体场分析了火箭橇动态试验过程中的气压分布,模拟结果发现,随着速度的增大,火箭橇贴近滑轨的空间范围内高压区域逐渐扩大。虽未直接研究滑块的磨损,但对于解释实际情况下滑块磨损要比理想情况下更严重提供了依据,这是由于高压区域产生的高压对滑块磨损造成了直接影响,高压有时甚至会高于火箭橇自身所承载的重量,使得滑块承受更高的纵向载荷,严重恶化滑块的磨耗^[27]。

而在2014年王伯阳等^[28]使用某有限元模拟软件建立了火箭橇动态试验过程中滑块与滑轨间滑动摩擦热,即结构耦合场三维分析模型(见图2),并考虑了摩擦因数以及材料热物性参数的变化,模拟分析了滑块在运动时的温度场和应力场变化,结果表明,材料热物性参数以及摩擦因数变化对模拟结果有很大影响,在距接触表面6mm处应力集中且产生大量摩擦热,以致于滑块在该区域更容易受到破坏。

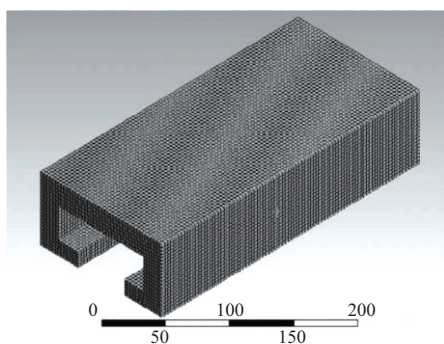


图2 滑块的三维网格^[28](单位:mm)

Fig.2 Three-dimensional mesh of slider^[28](Unit:mm)

摩擦因数变化与速度变化息息相关,2017年房明等^[29]对某型号火箭橇进行了动力学分析、建模和流体场模拟,得到了火箭橇动态试验过程中摩擦因数关于速度的计算公式,计算值与试验值之间的最大误差仅为2.87%。摩擦因数计算公式为本文后续开展沟槽型织构的模拟奠定了基础。2022年周学文等^[30]建立了滑块滑轨非线性接触力学模型,并考虑了轨道的不平顺性和滑块的磨损问题,结合Newmar $k-\beta$ 方法和Newton-Raphson局部迭代方法,求解了非线性方程,并获得了火箭橇在轨动力特性数值解。计算结果发现,火箭橇滑块磨损主要发生在高速运行阶段,此阶段的磨损量占到了整个磨损阶段的84%。对于高速重载下滑块磨损特性的演变过程,严凯等^[31]基于Archard磨损模型和弹塑性变形理论,利用有限元开展了0Cr18Ni9Ti-

U71Mn火箭橇摩擦副在高速重载下磨损行为的数值模拟。结果表明,在高速重载条件下,通过控制载荷可以有效减少火箭橇滑块的磨损,延长滑块的服役寿命。同时,他们对沟槽型织构化火箭橇滑块磨损行为进行了有限元模拟^[32],结果为表面织构对火箭橇滑块的积极作用提供了理论支撑。

3 试验与模拟仿真结合

总体而言,国内外学者对火箭橇滑块磨损问题的研究手段主要为实测试验分析和计算机模拟分析,因此接下来也将根据这两种分析手段阐述滑块磨损研究进展。美国作为火箭橇数量最多的国家,自1969年起就对火箭橇滑块磨损问题开展了广泛研究,且国外大多数学者并非纯粹地使用模拟软件进行仿真,为了考量模拟结果与实际情况的相符度,需要对实际情况加以分析探讨^[33]。

2008年Cameron等^[34]以压力和速度的乘积将低速磨损试验与高速应用相联系,并使用了由桑迪亚国家实验室开发的用于分析超高速冲击动力学问题的仿真软件来评估高速磨损,并考虑了速度、温度、轨道涂层以及粗糙度的影响,结果发现在平滑钢轨情况下环氧树脂涂层的存在会显著降低接触界面温度,另外从动态数据中解析地确定了火箭橇滑块的磨损,通过分析模型确定的磨损量产生了符合实际的结果。

同年Chmiel^[35]利用某有限元软件对霍洛曼滑轨摩擦副在低速时的磨损进行了预测,采用了两种方法来确定磨损量,即分别为基于传统的Archard磨损方程的宏观增量方法以及基于失效准则的微观材料性能方法,结果均发现仿真磨损结果与试验数据相符,并且较小的时间步长和精细的网格提高了计算的准确度,其中增量法得到了准确的结果,但存在许多数值问题,而微观材料性能法是一种可行的解决办法。

1987年,Barker等^[36]对特定工况条件下的滑块凿削进行了计算,与试验观察结果一致,并结合实际试验分析了凿削磨损的形成机理。2009年,Cinnamon等^[37]修正了二维模拟程序计算模型,对凿削磨损的形成过程进行了模拟,通过材料本构试验和热力学性能测试的研究发现,轨道的不平整度在凿削磨损的过程中有着重要影响,模拟结果与实际试验相对应。2019年,饶翼^[38]基于火箭橇运行阶段的理论分析,通过试验和模拟仿真相互结合的方法,系统研究了火箭橇轨道系统耦合的动力响应规律,探索了滑轨与滑块耦合作用关键影响因素敏感性,并获得了各因素的影响程度排序。影响火箭橇前滑块动力响应因素的显著性依次为火

箭橇的运行速度、滑块刚度、滑轨刚度;对火箭橇后滑块动力响应影响较为显著的因素依次为火箭橇的运行速度、滑轨刚度和滑块刚度。

基于有限元法,2023年杨经纬等^[39]建立了火箭橇滑块的三维凿削磨损模型,在热力耦合场下对凿削过程进行了模拟。结果表明,在初始航向速度和温度条件下,当竖向速度超过1.75m/s时,将发生凿削磨损;在初始航向速度和竖向速度条件下,温度超过400℃时,凿削磨损发生。在初始航向速度条件下,凿削磨损率随着竖向速度和温度的提高而增大;而当航向速度由1200m/s提升到1800m/s时,临界竖向速度由1.65m/s增大至3.00m/s,临界温度由400℃提高到800℃,临界夹角由0.079°上升至0.096°。结果显示,通过降低滑靴竖向速度和温度,可以有效避免凿削磨损的发生。

4 结论与展望

火箭橇是在专用轨道上利用火箭发动机作动力推动火箭滑车高速前进以获取试验测试数据的动态试验装备。火箭橇滑块在高速重载服役条件下的磨损严重威胁着火箭橇的可靠运行和服役安全,更是制约火箭橇发展和应用的技术瓶颈之一。当前滑块在高速重载的情况下存在严重的氧化磨损、疲劳磨损、磨粒磨损、黏着磨损。对此,在滑块的材料选择以及表面防护方面,国内外学者通过试验取得了有效的成果,同时通过模拟仿真手段对复杂条件下滑块的磨损形式进行了预测及分析,并对表面涂层及滑块材料选择进行了有效评估。本文分别从试验和模拟仿真的角度陈述了相关研究进展,鉴于高速重载极端工况的复杂性,火箭橇滑块的磨损问题仍然有待进一步探究。

(1)开展三体磨损的微观模拟。高速重载干摩擦工况下,火箭橇滑块接触面因剧烈摩擦引起显著的性状变化,以致于形成疏松的颗粒状膜或致密的片状膜(即第三体)。第三体的行为及其状态严重地影响材料的摩擦磨损。然而,当前的试验手段难以捕捉到第三体的动态演化规律及其对接触界面磨损的影响,且有限元法偏向于从宏观角度展示接触界面的变形以及热分布等信息,精确地模拟第三体的动力学行为尚且存在困难。因此开展第三体的模拟,特别是通过基于离散元法的软件、基于分子动力学的软件或可实现可移动元胞自动机法的软件,有望实现第三体的动力学行为的有效模拟,进而从微观角度分析火箭橇滑块的磨损问题。

(2)高熵合金一体化滑块或制备冶金结合多层涂层。

高熵合金的价格昂贵无可非议,然而其优异的性能更是毋庸置疑,采用低成本3D打印、避免高昂价格元素的掺入,结合计算模拟、高通量计算以及第一性原理计算等方法已经实现了高熵合金的多方位研究,因此高熵合金一体化滑块是发展趋势。

(3)此外,也可采用全新的接触界面设计策略在滑块接触面上制备冶金结合多层涂层。相较于单层涂层,多层涂层已经被证实可以显著地提高机械部件的耐磨性及其长期服役性,且冶金结合多层涂层体系在设计方面具有极高的灵活性,随着深入探究多层涂层的设计及其制备过程中诸多工艺参数对其摩擦学性能的影响,有望获得具有优越性能的多层涂层体系。

AST

参考文献

- [1] 王俊伟,冯丽,叶蕾,等. 2022年国外高超声速领域发展研究[J]. 战术导弹技术, 2023, 44(2): 15-24.
Wang Junwei, Feng Li, Ye Lei, et al. Review of the development of foreign hypersonic fields in 2022 [J]. Tactical Missile Technology, 2023, 44(2): 15-24. (in Chinese)
- [2] 肖雨欣,冯钰博,王嘉禄,等. 摩擦发光材料在航空航天设备破损监测领域的研究进展及展望[J]. 航空科学技术, 2023, 34(10): 1-8.
Xiao Yuxin, Feng Yubo, Wang Jialu, et al. Research progress and prospects of triboluminescent materials in the field of aerospace equipment damage monitoring[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(10): 1-8. (in Chinese)
- [3] 景建斌. 导弹红外导引头火箭橇试验评估方法[J]. 导航与控制, 2018, 17(1): 103-106.
Jing Jianbin. Evaluation method for missile infrared seeker rocket sled test [J]. Navigation and Control, 2018, 17(1): 103-106. (in Chinese)
- [4] 杨兴邦. 火箭橇试验滑轨[J]. 航空精密制造技术, 1992, 20(4): 35-37.
Yang Xingbang. Rocket sled test slide [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 1992, 20(4): 35-37. (in Chinese)
- [5] 秦强,成竹. 考虑认知不确定性的热防护结构瞬态温度场分析[J]. 航空科学技术, 2023, 34(5): 61-66.
Qin Qiang, Cheng Zhu. Analysis of transient temperature field of thermal protection structures considering cognitive uncertainty[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(5): 61-66. (in Chinese)

- [6] 王玮华, 谢发勤, 吴向清, 等. 火箭橇滑块超声速、大载荷摩擦磨损失效机理[J]. 材料导报, 2020, 34(16): 16136-16139.
Wang Weihua, Xie Faqin, Wu Xiangqing, et al. Investigation on friction and wear failure mechanism of rocket sled slide at supersonic and under high load[J]. Materials Reports, 2020, 34 (16): 16136-16139. (in Chinese)
- [7] Gerasimov S I, Erofeev V I, Kamchatnyi V G, et al. The sliding contact condition in stability analysis of stage motion for a rocket sled track facility[J]. Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2018, 47(3): 221-226.
- [8] 王云. 火箭橇试验滑轨的发展与展望[J]. 航空科学技术, 2010, 20(1): 30-32.
Wang Yun. Development and prospect of rocket sled test slide [J]. Aeronautical Science & Technology, 2010, 20(1): 30-32. (in Chinese)
- [9] 杨忠诚, 谢发勤, 姚小飞, 等. 温度对NM500和0Cr18Ni9Ti干摩擦磨损性能的影响[J]. 材料导报, 2013, 27(22): 96-100.
Yang Zhongcheng, Xie Faqin, Yao Xiaofei, et al. Effect of temperature on dry friction wear properties of NM500 and 0Cr18Ni9Ti [J]. Material Reports, 2013, 27(22): 96-100. (in Chinese)
- [10] Liu Jun, Wang Weihua, Zhao Feng, et al. Comparison of two rocket sled slipper materials for resistance to wear[C]. 2nd International Conference on Materials science, Resource and Environmental Engineering, 2017.
- [11] 薛进进, 孙琨, 方亮, 等. 30CrMnSiNi2A 钢干滑动摩擦磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2016, 36(5): 614-621.
Xue Jinjin, Sun Kun, Fang Liang, et al. Study on dry sliding friction wear characteristics of 30CrMnSiNi2A steel [J]. Journal of Tribology, 2016, 36(5): 614-621. (in Chinese)
- [12] 汪笑鹤, 刘彬, 肖军, 等. 火箭橇滑块摩擦磨损失效机理及形貌特征分析[J]. 表面技术, 2019, 48(3): 141-148.
Wang Xiaohe, Liu Bin, Xiao Jun, et al. Investigation on friction and wear topography features and failure mechanism of slide of rocket sled[J]. Surface Technology, 2019, 48(3): 141-148. (in Chinese)
- [13] 国增磊, 李敏, 王淑峰, 等. 金属表面减摩方法研究综述[J]. 表面技术, 2023, 52(10): 20-31.
Guo Zenglei, Li Min, Wang Shufeng, et al. A review of the research on friction reduction methods on metal surfaces[J]. Surface Technology, 2023, 52(10): 20-31. (in Chinese)
- [14] 雷逸舟. 高超声速火箭橇滑靴含 MoS₂ 的耐磨减摩涂层制备及性能研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2018.
Lei Yizhou. Preparation and performance study of wear-resistant antifriction coating containing MoS₂ in hypersonic rocket sled shoes[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [15] 苏静雨, 蔡洪能, 魏志远, 等. 滑靴耐磨减摩涂层制备[J]. 精密成形工程, 2020, 12(1): 138-142.
Su Jingyu, Cai Hongneng, Wei Zhiyuan, et al. Preparation of wear and friction reduction coating for sliding shoes[J]. Precision Forming Engineering, 2020, 12(1): 138-142. (in Chinese)
- [16] 吕涛. 火箭橇滑块表面减摩涂层制备及性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2021.
Lyu Tao. Preparation and performance of antifriction coating on surface of rocket sled slider[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2021. (in Chinese)
- [17] Burton C, Brockman R. Frictional interactions in high speed sliding contact[C]. 50th AIAA/ASME/ASCE/AAS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [18] Huber D A. The use of various failure criteria as applied to high speed wear[D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2011.
- [19] Palazotto A N, Yeo C D, Song J G, et al. Evaluation of thermomechanical damage of a slipper and rail in a rocket sled system[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2015, 44(4): 1443-1453.
- [20] Alban C J, Palazotto A N, Rutledge J L. Thermal considerations with respect to sliding contact at high speed[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2016, 30(1): 54-61.
- [21] 姜萱, 陈林, 郝轩弘, 等. 难熔高熵合金制备及性能研究进展[J]. 材料工程, 2022, 50(3): 33-42.
Jiang Xuan, Chen Lin, Hao Xuanhong, et al. Research progress on the preparation and properties of refractory high entropy alloys[J]. Materials Engineering, 2022, 50(3): 33-42. (in Chinese)
- [22] 赵路路, 林乃明, 邹娟娟, 等. 高熵合金的耐蚀性与耐磨性研究进展[J]. 热加工工艺, 2020, 49(6): 1-7.

- Zhao Lulu, Lin Naiming, Zou Jiaojuan, et al. Research progress on corrosion resistance and wear resistance of high entropy alloys[J]. Thermal Processing Process, 2020, 49(6): 1-7. (in Chinese)
- [23] 丁欣恺, 孙琨, 张猛, 等. 利用第一性原理计算方法对 NbMoTaWVx 高熵合金的研究[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(11): 86-92.
- Ding Xinkai, Sun Kun, Zhang Meng, et al. Research on NbMoTaWVx high-entropy alloy using first-principles calculation methods[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(11): 86-92. (in Chinese)
- [24] 李雪洁, 孙琨, 陈诚, 等. (Ti/Zr/Hf/Sn/W) NbMoTaV 高熵合金性能第一性原理计算分析方法[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(3): 180-186.
- Li Xuejie, Sun Kun, Chen Cheng, et al. (Ti/Zr/Hf/Sn/W) First-principles calculation and analysis method for properties of NbMoTaV high-entropy alloy[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(3): 180-186. (in Chinese)
- [25] 冯瑞雪, 李雪锋, 魏志远, 等. 减摩涂层对滑靴摩擦温升与温度场的影响[J]. 材料保护, 2020, 53(6): 56-61.
- Feng Ruixue, Li Xuefeng, Wei Zhiyuan, et al. Effect of antifriction coating on friction temperature rise and temperature field of sliding shoes[J]. Material Protection, 2020, 53(6): 56-61. (in Chinese)
- [26] 肖虹, 高超, 孙良. 钝头体火箭橇试验地面效应影响的数值模拟[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(4): 102-104.
- Xiao Hong, Gao Chao, Sun Liang. Numerical simulation of the effects of ground effects on blunt-headed rocket sled tests[J]. Journal of Projectiles, Arrows and Guidance, 2011, 31(4): 102-104. (in Chinese)
- [27] Yan Peize, Zhang Lishuang, Wang Wenjie, et al. Numerical simulation of aerodynamic and aero acoustic characteristics of subsonic rocket sled[J]. Applied Acoustics, 2021, 182(11): 108208.
- [28] 王伯阳, 吴向清, 谢发勤. 火箭橇滑块摩擦热-结构耦合场分析[J]. 润滑与密封, 2014, 39(1): 80-83.
- Wang Boyang, Wu Xiangqing, Xie Faqin. Friction heat-structure coupled field analysis on the shoe of rocket sled[J]. Lubrication Engineering, 2014, 39(1): 80-83. (in Chinese)
- [29] 房明, 孙建红, 余元元, 等. 火箭橇系统的摩擦力分析与计算[J]. 航空动力学报, 2017, 32(11): 2769-2776.
- Fang Ming, Sun Jianhong, Yu Yuanyuan, et al. Friction analyses of the rocket sled system[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(11): 2769-2776. (in Chinese)
- [30] 周学文, 赵项伟, 杨珍, 等. 单轨火箭橇在轨动力特性数值分析[J]. 航空动力学报, 2022, 37(6): 1327-1335.
- Zhou Xuewen, Zhao Xiangwei, Yang Zhen, et al. Numerical analysis of on-orbit dynamic characteristics of monorail rockets[J]. Journal of Aerodynamics, 2022, 37(6): 1327-1335. (in Chinese)
- [31] 严凯, 王焕焕, 林乃明, 等. 0Cr18Ni9Ti-U71Mn 摩擦副高速重载磨损行为的数值模拟[J]. 摩擦学学报, 2023, 43(6): 666-681.
- Yan Kai, Wang Huanhuan, Lin Naiming, et al. Numerical simulation of high-speed and heavy-load wear behavior of 0Cr18Ni9Ti-U71Mn friction pair[J]. Journal of Tribology, 2023, 43(6): 666-681. (in Chinese)
- [32] 严凯, 林乃明, 王振霞, 等. 沟槽型结构化火箭橇滑块磨损行为的有限元模拟[J]. 中国表面工程, 2023, 36(5): 190-202.
- Yan Kai, Lin Naiming, Wang Zhenxia, et al. Finite element simulation of wear behavior of grooved textured rocket sled slider[J]. China Surface Engineering, 2023, 36(5): 190-202. (in Chinese)
- [33] Graff K F, Dettloff B B. The gouging phenomenon between metal surfaces at high sliding speeds[J]. Wear, 1969, 14(2): 87-97.
- [34] Cameron G, Palazotto A N. An evaluation of high velocity wear[J]. Wear, 2008, 265(7-8): 1066-1075.
- [35] Chmiel A. Finite element simulation methods for dry sliding wear[D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2008.
- [36] Barker L M, Trucano T G, Munford J W. Surface gouging by hypervelocity sliding contact between metallic materials. [EB/OL]. (1987-09-01). <https://www.osti.gov/biblio/6114190>.
- [37] Cinnomon J D, Palazotto A N. Analysis and simulation of hypervelocity gouging impacts for a high speed sled test[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 36(2): 254-262.
- [38] 饶翼. 高超声速火箭橇运动稳定性若干影响因素分析与数值模拟[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- Rao Yi. Analysis and numerical simulation of several influenc-

- ing factors on the motion stability of hypersonic rocket sled [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019. (in Chinese)
- [39] 杨经纬, 陈科儒, 孙琨, 等. 高超声速火箭橇凿削磨损影响因素及临界条件研究[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(11): 110-117.
- Yang Jingwei, Chen Keru, Sun Kun, et al. Research on influencing factors and critical conditions of hypersonic rocket skid chiseling wear[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(11): 110-117. (in Chinese)

Research Progress on Wear Behavior of Rocket Sled Slider under High Speed and Heavy Load Conditions

Li Xiaokai¹, Yan Kai¹, Wu Lin¹, Lin Naiming¹, Wang Zhenxia¹, Wang Weihua², Zeng Qunfeng³, Wu Yucheng⁴

1. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

2. AVIC Aerospace Life-Support Industries, Co., Ltd., Xiangyang 441003, China

3. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

4. Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

Abstract: The rocket skid test is technical foundation of hyper-sonic technology. Up to now it has been considered as one of the research and development hotspots in the field of high-end equipment around the world. It is particularly important to conduct the study on operation and maintenance, and damage control of the rocket skid system. As link between the rocket sled and the rocket rails, the rocket sled sliders are also the key factor for highly reliable service of rocket sled test under high speed and heavy load. The wear damage of rocket sled slider under certain service conditions not only would threaten the reliable operation and long service life safety of rocket sled system, but also has been considered as the technical bottleneck that restricting the development and application of rocket sled system. Hence, there are important theoretical value and engineering significance to investigate the wear behavior of rocket sled slider under high speed and heavy load conditions. In this review, development history and present situation of rocket sled system at home and abroad was firstly introduced. Research progress on wear behavior of rocket sled slider under high speed and heavy load conditions has been presented on basis of experimentation, simulation and combination of experimentation with simulation. Three feasible strategies of simulation methods, design and preparation of new metallic materials with high performance, surface protective coating have been prospected. This paper is expected to create a database that could offer reference for service damage behavior and control techniques of materials under extreme conditions.

Key Words: rocket sled; slider; high speed and heavy load; wear behavior

Received: 2023-10-15; **Revised:** 2024-01-29; **Accepted:** 2024-02-28

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (20200029029001); Special Project of Science and Technology Cooperation and Exchange of Shanxi Province (202204041101021); Central Government Guides Local Funds Project for Science and Technology Development of Shanxi Province (YDZJSX20231A018); Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China (2022JM-251)