

高超声速火箭橇凿削磨损机理分析

陈科儒¹, 孙琨¹, 陈诚², 齐博毅³, 党峰²

(1. 西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 中国兵器工业试验测试研究院, 714200, 陕西华阴; 3. 西安交通大学航天航空学院, 710049, 西安)

摘要: 针对高超声速下火箭橇运行过程中凿削磨损产生的机理模糊不清问题, 基于有限元-光滑粒子流体动力学法(FEM-SPH法), 利用有限元软件 ABAQUS 构建了三维火箭橇靴-轨模型, FEM-SPH法是一种既能保证计算精度, 又能克服网格畸变的新型模拟方法。在该模型中, 滑靴和轨道所使用的材料分别为 VascoMax 300 钢、AISI 1080 钢, 并赋予各自材料属性, 通过设定航向速度为 2 000 m/s, 竖直速度为 2.5 m/s 以及温度为 673 K, 模拟了高超声速下靴-轨凿削磨损现象的演变过程。模拟结果表明: 凿削磨损是在高温高应力作用下和靴-轨之间形成嵌入式结构后, 经过持续地破坏滑靴底部所产生的, 最终形成泪滴状蚀坑。进一步分析表明, 竖直速度和温度的增加都会提高凿削发生的概率。在航向速度为 2 000 m/s、初始温度为 673 K 时, 竖直速度超过 1.50 m/s 就会发生凿削现象; 在航向速度为 2 000 m/s、竖直速度为 2.5 m/s, 温度超过 293 K 就会发生凿削现象。该研究成果不仅有助于高超声速下靴-轨凿削磨损的产生机理进一步完善, 还为高超声速火箭橇试验的安全发射提供了新的理论支持。

关键词: 火箭橇试验; 凿削现象; 有限元-光滑粒子流体动力学法; 竖直速度; 温度

中图分类号: TG144 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202408014 **文章编号:** 0253-987X(2024)08-0136-09

Analysis of Gouging Wear Mechanism of Hypersonic Rocket Sled

CHEN Keru¹, SUN Kun¹, CHEN Cheng², QI Boyi³, DANG Feng²

(1. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Test and Measuring Academy of Norinco Group, Huayin, Shaanxi 714200, China; 3. School of Aeronautics and Astronautics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to solve the problem that the mechanism of gouging wear of rocket sled is unclear in hypersonic operation, based on the finite element-smoothed particle hydrodynamics (FEM-SPH) method, a three-dimensional rocket sled slipper-rail model is constructed with ABAQUS finite element software. The FEM-SPH method is a new simulation method which can not only ensure the calculation precision, but also overcome the distortion of the mesh. In this model, the slipper and rail are made of Vascomax 300 steel and AISI 1080 steel, respectively, and each has its own material properties. With the heading speed set at 2 000 m/s, the vertical speed at 2.5 m/s and the temperature at 673 K, the evolution of slipper-rail gouging wear at hypersonic speeds is simulated. The simulation results show that the gouging wear is the final teardrop-like corrosion pits due to continuous damage of the slipper bottom caused by the embedded structure

between the slipper and rail under high temperature and high stress. Further analysis shows that the probability of gouging will increase with the increase of vertical velocity and temperature. When the heading velocity is 2 000 m/s and the initial temperature is 673 K, gouging will occur if the vertical velocity exceeds 1.50 m/s. When the heading speed is 2 000m/s and the vertical speed is 2.5 m/s, gouging will occur if the temperature exceeds 293 K. The research results not only help identify the mechanism of slipper-rail gouging wear, but also provide new theoretical support for the safe launch in a hypersonic rocket sled test.

Keywords: rocket sled test; gouging phenomenon; finite element-smoothed particle hydrodynamics method; vertical velocity; temperature

火箭橇试验系统是一种大型且高精度的地面动态模拟试验装置,包含轨道、滑车、制动系统、测试设备及一系列辅助设施等核心组件^[1-2]。此项试验技术能够有效地模拟飞行状态,进而在飞机、导弹、宇航飞行器及其他武器研制过程中,针对可能出现的因高速度、高加速度而引发的技术问题提供解决方案^[3]。在缺乏有效润滑的情况下,靴-轨之间的高速碰撞和接触会导致显著的干滑动摩擦磨损现象^[4-6]。特别是在高超声速状态下,滑靴对轨道的强烈撞击可能在极短的时间内,即几微秒内,从轨道表面剥离部分材料。这种作用结果产生了泪滴状凹坑,其尾部朝向后方,这即是火箭橇试验中典型的凿削磨损现象^[7]。

在超高声速的冲击影响下,靴-轨接触表面的温度会急剧上升,进而导致靴-轨材料软化,产生显著的大变形和塑性流动。由于这种温度的急剧变化以及塑性流动射流的产生,靴-轨材料会发生混合,在巨大冲击力的持续作用下,这种混合材料会进一步形成凿削蚀坑^[8-9]。Ashby 等^[10]绘制了详尽的凿削机理图,深入揭示了磨损机理与速度、试验条件以及压力之间的复杂关系。与此同时,Cinnamon 等^[11-12]基于 Laird 等开发的方程式,成功编写了一个分析程序,用以处理动态数据并精确估计机械和熔融磨损的深度,从而进一步阐释了凿削磨损的部分机理。Burton 等^[13-14]则利用先进的有限元软件 ABAQUS,构建了精细的靴-轨模型,并深入研究了网格细化对两个滑动体界面摩擦系数的影响,为磨损机理的研究提供了有力的数值支持。干聪等^[15]借助物质点法深入探究了靴-轨间摩擦导致滑靴表面温度上升对靴轨间凿削临界速度的影响机制。Chmiel^[16]则运用有限元分析法,比较了 Archard 在宏观尺度上逐步建立的方程与基于材料特性的微观尺度破坏准则两种方法,并发现基于材料特性的失效方法在实际应用中具有更高的可行性。

随着火箭橇试验速度的不断攀升,传统的有限元模拟法在模拟凿削过程中常遭遇收敛性问题,导致凿削机理难以清晰阐述。因此,探索新的模拟方法以深入研究凿削磨损,并全面分析影响其产生的各种因素,显得尤为迫切。基于火箭橇靴-轨的实际结构特点,本文采用有限元-光滑粒子流体动力学法(finite element-smoothed particle hydrodynamics method,FEM-SPH 法),利用 ABAQUS 软件构建了三维火箭橇靴-轨凿削磨损模型。通过该模型,深入探究了凿削磨损的产生机理,并系统研究了温度、竖直速度等多种因素对凿削的影响。这不仅有助于更好地理解凿削磨损的机理,还可为防止凿削发生、提升火箭橇试验的运行速度及保障其运行安全性提供有力的理论支持。

1 材料属性

1.1 Johnson-Cook 本构模型

Johnson-Cook 本构模型适用于描述大应变、高应变率以及高温环境下金属材料的强度极限^[17]。该模型能有效描述材料的应变硬化、应变速率强化以及热软化,本文使用 Johnson-Cook 本构模型描述火箭橇凿削现象,其表达式^[18]为

$$\sigma = [A + B(\epsilon^p)^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \tag{1}$$

式中: ϵ^p 为塑性应变; $\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}$ 为无量纲化应变率,其中 $\dot{\epsilon}_0$ 取 1 s^{-1} ; T 为试验温度; T_r 为初始温度; T_m 为熔点温度; A 、 B 、 n 、 C 、 m 为模型参数。

本研究中滑靴材料为 VascoMax 300 钢(C300 钢),轨道材料为 AISI 1080 钢,滑靴和轨道材料的 Johnson-Cook 模型参数如表 1 所示。

表 1 滑靴和轨道的 Johnson-Cook 模型参数
Table 1 Johnson-Cook model parameters for slipper and rail

材料	A/GPa	B/GPa	C	m	n	T _m /K
Slipper(C300)	2.1	0.124	0.03	0.80	0.373 7	1 685
Rail(AISI1080)	0.7	3.600	0.17	0.25	0.600 0	1 670

1.2 Johnson-Cook 损伤准则

在高超声速环境下,随着应变率的提升,材料的屈服强度和抗拉强度均呈现出持续增强的趋势,同时屈服比也逐渐增大。然而,当应变率达到某一临界值时,材料的塑性会急剧降低,进而触发损伤的累积,最终导致材料的失效^[19]。为了有效描述这一复杂的材料行为,可以采用 Johnson-Cook 损伤准则,其具体表达式如下

$$\epsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] \cdot [1 + D_4 \ln(\frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0})] [1 + D_5 (\frac{T - T_r}{T_m - T_r})] \quad (2)$$

式中: ϵ_f 为断裂应变; $D_1 \sim D_5$ 为损伤参数。

靴-轨材料的 Johnson-Cook 损伤准则参数如表 2 所示。

表 2 滑靴和轨道的损伤准则参数
Table 2 Damage criterion parameters for slipper and rail

材料	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
Slipper(C300)	-0.09	0.27	0.48	0.014	3.87
Rail(AISI1080)	0.70	0.36	0.17	0.250	0.60

1.3 状态方程

靴-轨在发生凿削磨损时会有显著的特征:高温高应力的产生、滑靴底部和轨道表面的材料相互融合以及泪滴状的蚀坑。Johnson-Cook 模型是用于整个干滑动磨损过程,其中在凿削的核心处存在更高的冲击作用,故在该核心处的高应变率和高应力特征可采用状态方程来描述^[20]。因此,本文使用 Mie-Gruneisen 状态方程来描述凿削磨损高温高应力核心区域的本构关系,其表达式为

$$P = \frac{\rho_0 c_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \left(1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right) + \Gamma_0 \rho_0 E \quad (3)$$

式中: ρ_0 为材料密度; c_0 为材料声速; η 为压缩应变; s 为经验参数; Γ_0 为 Gruneisen 系数; E 为内能。

两种材料的状态方程参数如表 3 所示。

表 3 滑靴和轨道的状态方程参数
Table 3 State equation parameters for slipper and rail

材料	$c_0 / (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	s	Γ_0
Slipper(C300)	3.980	1.580	1.60
Rail(AISI1080)	4.605	1.456	1.65

1.4 摩擦系数

在实际工况中靴-轨间存在一定的粗糙度,在运动时就会有摩擦的产生,因此需要建立一个与滑靴动力学相关的摩擦函数。文献 [21-22]研究了集中在高速滑动的摩擦磨损,发现了靴-轨在运动时摩擦系数的变化。摩擦系数方程如下

$$\mu = \begin{cases} 0.269e^{-3.409 \times 10^{-7} P v} + 0.307e^{-6.08 \times 10^{-9} P v}, & 0 < P v < 4.45 \times 10^8 \\ 0.02, & P v \geq 4.45 \times 10^8 \end{cases} \quad (4)$$

式中: P 为载荷; v 为滑靴航向速度。

考虑到火箭橇试验的实际运行状况,设定了 5 MPa 的载荷条件,得到航向速度 2 000 m/s 时摩擦系数为 0.298。

1.5 热分配系数

在初始运动中,摩擦产生的热量在靴-轨之间分布均匀。然而,随着靴-轨之间碰撞的持续进行,滑靴底部的温度逐渐攀升并向周围空间辐射热量,轨道的温度则始终保持接近室温的状态。这种温度差异的不断变化导致了靴-轨间热分配系数的差异,进而影响了整体的热量分布和传递过程^[23-24]。Le 等^[25]对火箭橇运行过程中靴-轨的温度变化进行了深入研究,成功推导出一个与时间紧密相关的靴-轨运行系数方程,即

$$\alpha(t) = 0.4e^{-5t^2} + 0.1 \quad (5)$$

式中: $\alpha(t)$ 为热分配系数; t 为时间。

2 三维凿削磨损模型

2.1 三维凿削模型

通过 ABAQUS 软件创建了特有的三维火箭橇靴-轨模型,由轨道、微凸体和滑靴组成。通过对销-盘试验的微观组织进行深入分析,发现干滑动磨损过程中塑性变形最显著的尺度范围为 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ m,销磨损后底部的扫描电子显微镜图像如图 1 所示。将火箭橇靴-轨模型的尺度设定为微米级别,鉴于磨损率的评估从全局范围缩小至更小尺度,需将轨道和微凸体设置为可变形模型。只有当靴-轨两部分都具备变形能力时,方能准确评估两者间的塑性变形及其相互作用。

本文首先创建了一个长 600 μm 、宽 20 μm 、高 60 μm 的长方体实体作为滑靴;其次创建了一个长 400 μm 、宽 20 μm 、高 60 μm 的长方体实体和半径 6 μm 的半球实体,将两者采用布尔合并连接在一起组成了轨道;然后将滑靴和轨道组装成简化的火箭橇模型,并设置了表面与表面的接触方式,在此基础

上,设定了滑靴的航向速度 $v=2\,000\text{ m/s}$, 竖直速度 $v_2=2.5\text{ m/s}$, 滑靴的初始温度 $T_s=673\text{ K}$, 轨道的温度 $T_R=293\text{ K}$ 。在网格划分方面,滑靴部分采用了 C3D8R 网格单元,而轨道和微凸体则使用了 C3D8T 网格单元。为了确保计算的准确性,对靴-轨接触部分进行了网格细化处理,该部分网格的大小设置为 $0.75\text{ }\mu\text{m}$ 的正方体。至于其他部分,则划分为长 $8\text{ }\mu\text{m}$ 、高 $7\text{ }\mu\text{m}$ 的长方体网格,具体的模型结构如图 2 所示。在此过程中,给轨道施加了一个固定约束,以确保其在模拟过程中的稳定性。

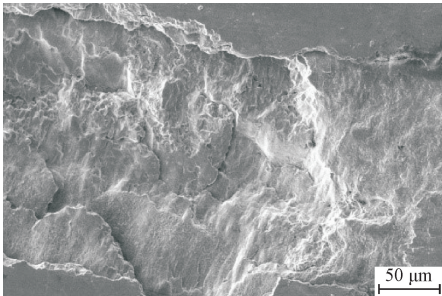


图 1 销磨损后的底部 SEM 图

Fig. 1 Scanning electron microscope of the bottom of the worn pin

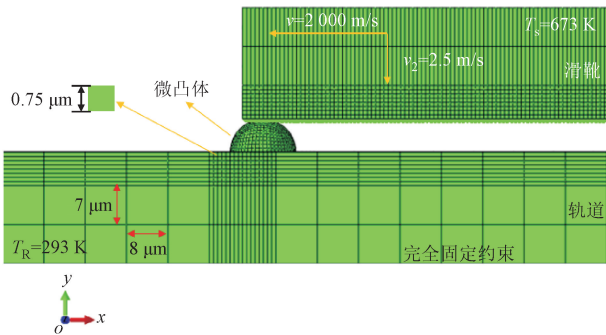


图 2 靴-轨 xy 方向平面剖面

Fig. 2 Slipper-rail xy direction plane section

2.2 FEM-SPH 法

鉴于凿削磨损所产生的“蚀坑”,其具有三维特性,如图 3 所示,而物质点法作为一种二维研究方法,难以全面揭示凿削磨损的机理。随着火箭橇试验运行速度的持续提高,凿削磨损所引发的材料非线性大变形破坏现象也愈发显著,传统有限元法在模拟这类复杂情况时,常常会出现网格畸变、计算精度下降等问题。因此,本文提出了一种新型模拟分析方法,即 FEM-SPH 法,旨在更准确地模拟和分析凿削磨损过程。

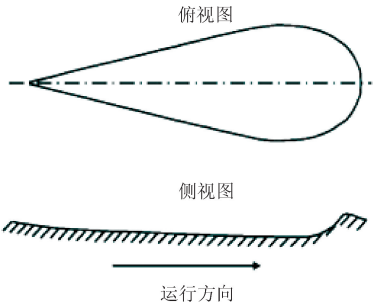


图 3 凿削磨损蚀坑
Fig. 3 Corrosion pits of gouging wear

光滑粒子流体动力学法 (smoothed particle hydrodynamics method, SPH) 作为一种无网格的拉格朗日粒子法,有效地克服了基于网格方法的局限性,与有限元法 (finite element method, FEM) 等拉格朗日网格法相比,SPH 在处理大变形问题时展现出一定的优势。然而,在计算精度和效率方面,SPH 法相较于 FEM 法仍有不足,其在边界条件的处理上也更为复杂。鉴于此,研究者们开发了一种新型方法,将 FEM 与 SPH 相结合,其中有 FEM-SPH 固定和 FEM-SPH 自适应两种算法。在 FEM-SPH 固定耦合算法中,模型中变形较大的部分采用 SPH 算法,其余部分运用 FEM, FEM、SPH 的边界通过接触方式进行连接。与固定耦合算法有所不同,自适应 FEM-SPH 算法能够自动将失效的拉格朗日单元转换为 SPH 粒子,无需额外创建 SPH 单元,于是本文采用自适应 FEM-SPH 法进行模拟分析。

3 有限元法凿削模拟分析

3.1 FEM-SPH 法模拟凿削的验证

在凿削磨损研究领域,国外主要依赖于美国 Sandia 实验室开发的 CTH 代码。CTH 代码作为一种计算求解器,专门用于处理非线性、大变形、高冲击以及流体力学应用,其强大的凿削建模功能尤为突出,能够精准地关联温度与变形、应变。该代码在模拟凿削磨损形成过程表现出色,并且经过多次火箭橇试验的验证,结果高度一致。然而,由于知识产权和保密等方面的限制,CTH 代码目前仅限于相关研究所使用^[26]。因此,本文旨在通过对比 FEM-SPH 法与 CTH 法,验证 FEM-SPH 法在凿削磨损计算中的精度,从而为该领域的研究提供新的视角和思路。

为了验证 FEM-SPH 法模拟凿削的精度,本文针对 Laird 等^[27]使用 CTH 程序模拟凿削的算例进行了对比验证。其中,图 4(a)、(c)为 Laird 等使用 CTH 模型计算的结果,该 CTH 模型设置的航向速度 $v=2\ 000\text{ m/s}$ 、竖直速度 $v_2=50\text{ m/s}$,因模型质量远远小于实际质量而采用动能等效的方法,将竖直速度设置为 50 m/s ,但火箭橇靴-轨在真实碰撞过程中竖直度约为 $2\sim 3\text{ m/s}$ 。因此,为了确保两种方法对比验证的准确性,本次模拟过程中赋予了火箭橇靴-轨相对应的属性,并设置了航向速度 $v=2\ 000\text{ m/s}$ 、竖直速度 $v_2=2.5\text{ m/s}$ 进行模拟对比分析,结果如图 4(b)、(d)所示。

通过对比分析图 4(a)、(b)可以观察到,在凿削形成的过程中,首先会出现红圈所标示的嵌入式结构。在这一阶段,轨道受到一定程度的磨损,导致滑靴底部形成一个小尖,这个小尖随后对轨道表面产生持续的破坏作用。随着火箭橇靴-轨的持续运动,图 4(c)、(d)中均明显展现出凿削蚀坑的特征;图 4(c)显示轨道表面嵌入到滑靴底部,并与滑靴底部相融合,进而导致靴-轨间出现大面积的材料掉落;图 4(d)也呈现了类似的现象。在 Abaqus 软件模拟计算过程中,为了更清晰地观察靴-轨之间的凿削蚀坑,采用单元删除的方法,使得模拟结果直接表现为蚀坑、而非靴-轨融合的现象。这一处理方式有助于更加直观地观察和分析凿削蚀坑的形成与演变过程。

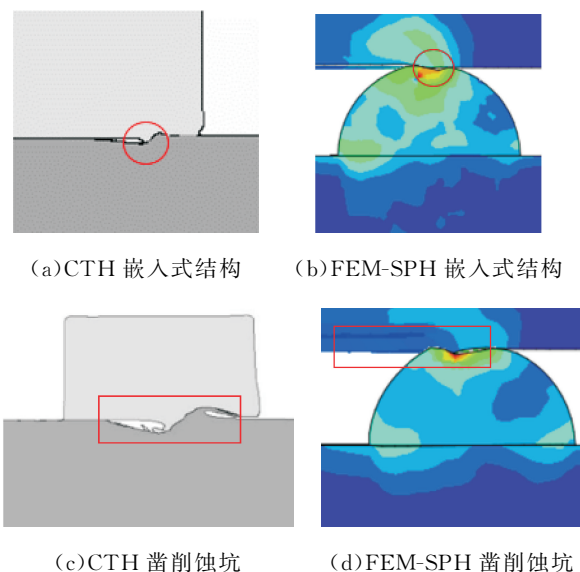


图 4 CTH 与 FEM-SPH 凿削磨损形成过程中的形貌对比
Fig. 4 The contrast figure of CTH and FEM-SPH gouging forming process

同一时刻下,采用 CTH 法和 FEM-SPH 法在模拟凿削磨损过程中应力计算的结果如图 5 所示,可知在凿削磨损发生时,两种方法均形成了显著的高应力核心区域。CTH 法计算出的最大应力为 8 GPa ,FEM-SPH 法模拟的凿削磨损最大应力也在 8 GPa 附近,并且两种方法在描述凿削磨损应力分布上表现出一致性,此刻 CTH 法和 FEM-SPH 法在模拟凿削磨损过程中温度计算的结果如图 6 所示。在靴-轨接触部分,两种方法均形成了一段高温核心区域。CTH 法计算出的最高温度约为 $1\ 500\text{ K}$,FEM-SPH 法计算的最高温度约为 $1\ 400\text{ K}$,并且两种方法在描述凿削磨损的温度分布上呈现出一致性。综上所述,从形貌、应力以及温度等多个方面的结果来看,使用 FEM-SPH 法在计算凿削磨损问题上展现出了较高的精度,能够很好地表现凿削的特性。

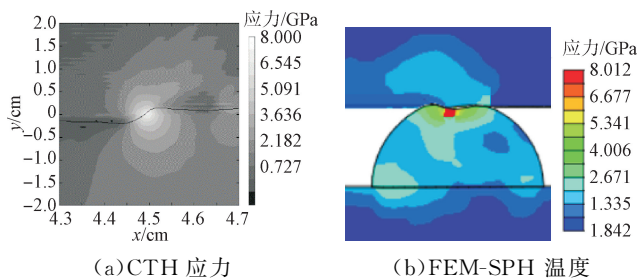


图 5 CTH 与 FEM-SPH 凿削磨损应力

Fig. 5 Gouging wear stress diagram of CTH and FEM-SPH

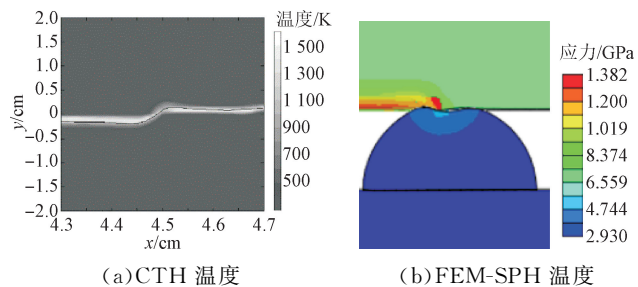


图 6 CTH 与 FEM-SPH 凿削磨损温度

Fig. 6 Gouging wear temperature diagram of CTH and FEM-SPH

3.2 凿削磨损机理分析

根据 $v=2\ 000\text{ m/s}$ 、 $v_2=2.5\text{ m/s}$ 进行模拟分析,计算出来的凿削磨损特点可以划分为凿削磨损形成阶段、凿削磨损发展阶段以及凿削磨损结束阶段 3 个部分。

在凿削磨损形成过程的 $0.148\ 5\ \mu\text{s}$ 时,靴-轨的应力和温度分布以及滑靴底部的形貌如图 7 所示。图 7(a)展示了此刻的应力云图,可以明显观察到接触区域的应力集中现象,大约在 6 GPa 左右,这反映

了在靴-轨不断碰撞过程中,高应力核心区域的逐渐形成。图 7(b)呈现了此刻的温度云图,高温区域主要集中于滑靴底部与微凸体表面的接触部位。这种温度变化主要源于材料的塑性变形、冲击的产生以及高速气流冲刷效应,最高温度达到 1 240 K。由图 7(c)可知,滑靴底部中轴处有一条明显的犁沟,其尾端形成一个月牙形的应力集中区,在月牙形左侧出现了黑色线框,这表示该区域的单元因受到高温高压作用而失效并被移除。这种靴-轨之间的上下碰撞,导致图 7(a)中所示的嵌入型结构开始形成,这一结构会持续对滑靴底部和微凸体表面造成破坏,随着嵌入结构的形成以及滑靴底部与微凸体表面高温高应力集中区域的出现,凿削磨损逐渐开始形成。

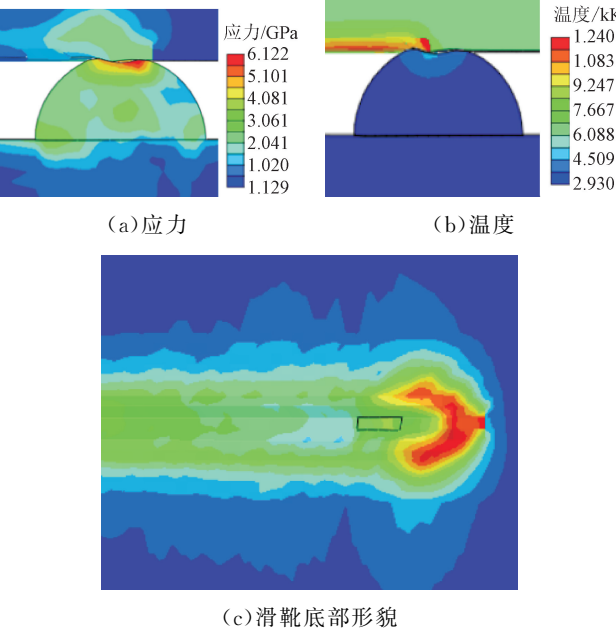


图 7 0.148 5 μs 时凿削磨损形成阶段

Fig. 7 0.148 5 μs time gouging wear formation stage diagram

在凿削磨损的发展过程中,0.165 0 μs 时的靴-轨应力和温度云图分布以及滑靴底部的形貌,如图 8 所示。从图 8(a)、(b)可知:随着靴-轨的运动,嵌入型结构逐渐移动到微凸体的左侧边缘;在竖直冲击力的作用下,靴-轨表面发生了显著的塑性变形,导致大面积的材料脱落,形成了的蚀坑;最高应力达到 8.4 GPa,最高温度升至 1 500 K;该区域的应力持续增大,主要是由于靴-轨表面应力的大量累积,且这些应力无法有效传递至其他区域。图 8(c)清晰展示了滑靴底部因碰撞而产生的泪滴状蚀坑,这些蚀坑在逐渐扩大,后续甚至可能出现更深层次的蚀坑。这表明,滑靴底部的破坏不仅限于表层单元,第二层单元也将受到破坏。这一现象进一步证实了

凿削磨损过程中靴-轨之间的复杂相互作用和材料的渐进破坏。

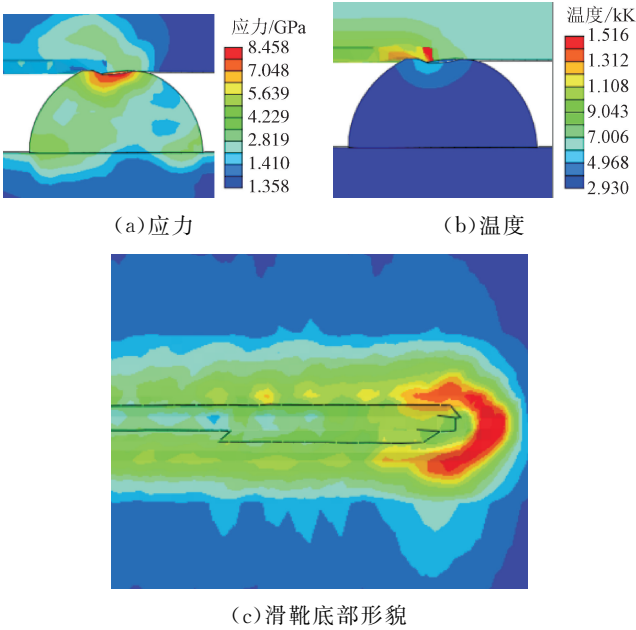
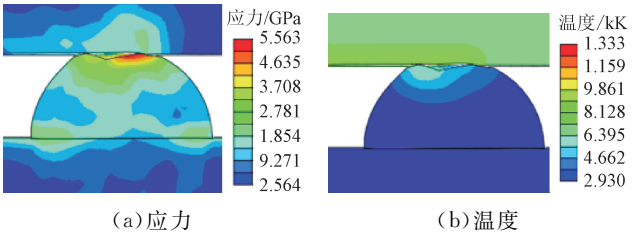
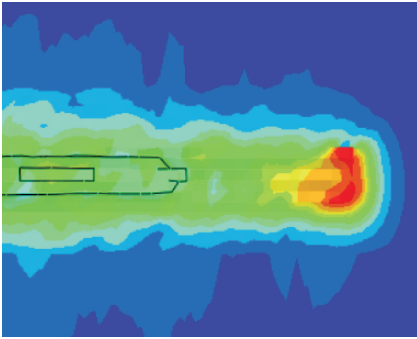


图 8 0.165 0 μs 时凿削发展阶段

Fig. 8 0.165 0 μs time gouging development stage diagram

在凿削磨损的结束阶段,0.187 5 μs 时刻的靴-轨应力和温度分布以及滑靴底部的形貌,如图 9 所示。通过图 9(a)、(b)可以看到,靴-轨接触区域的集中应力和温度均呈现出明显的下降趋势。这是由于滑靴底部与微凸体表面的嵌入式结构消失,导致靴-轨之间无法再进行更深层次的碰撞。同时,随着碰撞的减少,接触部分的摩擦生热也逐渐降低,使得温度在高速气流的冲刷下得到恢复,靴-轨重新进入了平稳运动状态。图 9(c)中滑靴底部的形貌变化反映了凿削磨损的结束过程,原本明显的蚀坑逐渐消失,重新形成了一条犁沟,月牙形应力集中区域也重新显现。这标志着凿削磨损的结束,接下来靴-轨将进入平稳运动阶段,直至下一次嵌入式结构的形成。然而,在图 9(a)微凸体的顶端最右侧可以观察到滑靴底面有再次嵌入微凸体表面的趋势。因此,在未来的运动过程中,可能会再次发生凿削磨损现象,这表明在靴-轨的运动过程中,需要密切关注嵌入式结构的形成和演化,以预防凿削磨损的发生。





(c)滑靴底部形貌

图 9 0.187 5 μs 时凿削磨损结束阶段
Fig. 9 0.187 5 μs time diagram of end stage of gouging wear

从上述整个凿削磨损过程中可以发现,应力和温度的变化起着至关重要的作用,为了进一步弄清凿削磨损的机理,接下来将探究竖直速度和温度对其的影响,找到凿削磨损形成的临界条件。

3.3 不同竖直速度对凿削的影响

在靴-轨的运动过程中,滑靴的偏振作用促使嵌入式结构的形成,这一结构对凿削磨损的形成起到了决定性的作用,而滑靴的偏振作用与滑靴的竖直速度密切相关,因此深入探究竖直速度对凿削磨损的影响显得尤为重要。设定其他条件保持不变,仅对竖直速度进行了调整,模拟了包括 1.50、1.75、2.00、2.25、2.50、3.00 m/s 在内的 6 组数据,并详细记录了每组数据下凿削磨损现象的形成情况,具体结果如表 4 所示。

只有在竖直速度达到或超过 1.50 m/s 时,凿削现象才会发生,这说明竖直速度大于等于 1.50 m/s 是凿削发生的临界条件。在其他条件保持不变的情况下,随着竖直速度的增大,凿削现象的发生概率也将随之增加。

表 4 不同竖直速度凿削产生的状况
Table 4 Different vertical velocity occurs gouging condition

组	$v_z/(m \cdot s^{-1})$	是否凿削
1	1.50	否
2	1.75	是
3	2.00	是
4	2.25	是
5	2.50	是
6	3.00	是

不同竖直速度下凿削磨损过程中的滑靴底部形貌图如图 10 所示。随着竖直速度的不断增大,凿削蚀坑体积也越来越大,甚至当竖直速度为 2.50 m/s

时有二次凿削的发生,这说明竖直速度超过一定程度后靴-轨之间碰撞的会形成多次嵌入式结构,导致凿削的多次发生。竖直速度为 1.75、2.00、2.25、2.50、3.00 m/s 所对应的凿削发生时间依次为 0.243 0、0.184 5、0.177 0、0.148 5、0.072 0 μs,这说明竖直速度越快,凿削磨损形成的时间就会越快。因此,为了防止凿削的发生,当航向速度为 2 000 m/s、温度为 673 K 时,凿削的竖直临界速度为 1.50 m/s。

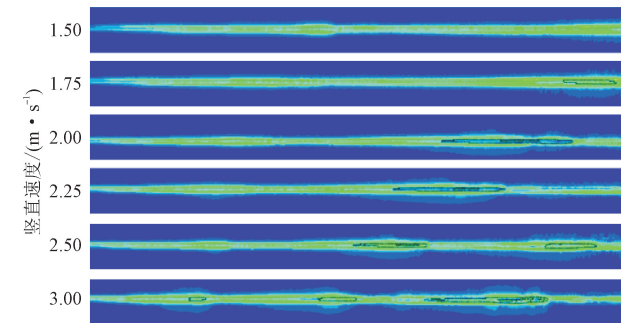


图 10 竖直速度不同而产生凿削的滑靴底部形貌
Fig. 10 The different vertical velocity results in the topography of the bottom of the gouging slipper

3.4 不同滑靴初始温度对凿削的影响

靴-轨在运动过程中会有摩擦生热、气动热等现象出现,因此靴-轨表面会存在一定的温度变化。并且在发生凿削的时候会有高塑性变形,塑性变形功会转化为热量,导致材料受热而发生软化,影响凿削的发生。本次在其他条件设置相同的状况下模拟了 293、473、673、873、1 073 共 5 组数据,数据是否产生凿削的结果如表 5 所示。当滑靴底部设置的初始温度大于等于 293 K 时就会发生凿削,这说明初始温度的升高凿削将越容易发生。

表 5 不同滑靴初始温度凿削产生的状况
Table 5 Different initial temperature of sliding shoe produced by gouging

组	T_m/K	是否凿削
1	293	否
2	473	是
3	673	是
4	873	是
5	1 073	是

不同滑靴初始温度凿削过程中的滑靴底部形貌图如图 11 所示。随着温度的不断升高,凿削蚀坑体积有明显的变大,甚至当温度达到 473 K 时就开始有二次凿削的发生,并且凿削蚀坑非常严重,这可能

是因为滑靴初始温度设置过高以及靴-轨运动过程中摩擦生等热量的产生使靴-轨接触区域的温度急剧上升达到了滑靴的熔点,最终在碰撞与熔融的相互作用发生了更加严重的凿削磨损。温度为 473、673、873、1 073 K 所对应的凿削发生时间依次为 0.163 5、0.148 5、0.084 0、0.082 5 μ s,这说明滑靴初始温度越高,凿削磨损形成的时间会越快。因此,为了防止凿削的发生,当航向速度为 2 000 m/s、竖直速度为 2.5 m/s 时,凿削的临界温度为 293 K。

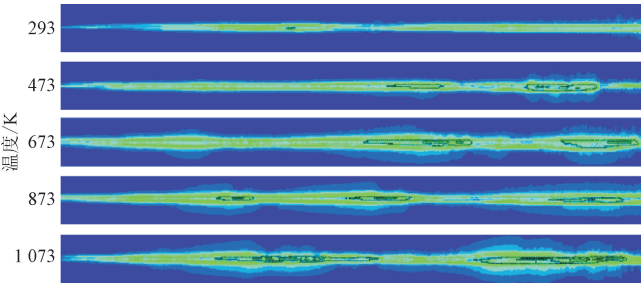


图 11 滑靴初始温度不同而产生凿削的滑靴底部形貌
Fig. 11 The different initial temperature of the slipper results in a gouging of the slipper bottom

4 结 论

本文基于 FEM-SPH 法建立了简化的三维火箭橇模型,从多个方面阐述了凿削磨损产生的机理并找到了凿削磨损产生的临界值,可得如下结论。

(1)本文提出了一种新的方法即 FEM-SPH 法阐述了凿削磨损产生的机理,对比了国外具有一定权威性的 CTH 法,通过凿削磨损的形貌、应力和温度 3 个角度验证了 FEM-SPH 法的凿削计算精度。

(2)竖直速度越大,凿削磨损越容易发生,凿削发生的时间会随着竖直速度的增大而发生的越快,嵌入式结构的形成也会越快,凿削磨损在此条件下形成的竖直临界速度为 1.50 m/s。滑靴初始温度越高凿削越加重,凿削磨损发生的时间会随着滑靴初始温度的增加而发生的越快,凿削磨损在此条件下形成的临界温度为 293 K。

参考文献:

[1] 王云. 火箭橇试验滑轨的发展与展望 [J]. 航空科学技术, 2010(1): 30-32.
WANG Yun. Status and prospect for rocket sled track development in China [J]. Aeronautical Science & Technology, 2010(1): 30-32.

[2] 杨兴邦. XB 高精度火箭橇试验滑轨 [J]. 中国工程科

学, 2000, 2(10): 98-104.

YANG Xingbang. XB high accuracy rocket Sled test track [J]. Engineering Science, 2000, 2(10): 98-104.

[3] 顾凯旋, 龚明生, 王磊, 等. 双轨火箭橇全时程动力学仿真分析研究 [J]. 航空工程进展, 2020, 11(2): 245-250.

GU Kaixuan, GONG Mingsheng, WANG Lei, et al. Study on full time dynamics simulation of two-track rocket Sled [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(2): 245-250.

[4] 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.

[5] 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.

[6] BUENTELLO H R, PALAZOTTO A N, LE K H. 3D finite element modeling of high-speed sliding wear [C]//54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 2013: AIAA 2013-1505.

[7] LAIRD D J, PALAZOTTO A N. Gouge development during hypervelocity sliding impact [J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(2): 205-223.

[8] 夏洪利, 刘振, 闫华东, 等. 高超声速火箭橇削削效应仿真与验证研究 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(4): 71-79.

XIA Hongli, LIU Zhen, YAN Huadong, et al. Simulation and verification study on gouging effect of hypersonic rocket sled [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(4): 71-79.

[9] 汪振兴, 田晓耕, 干聪, 等. 单轴压缩下 U75V 钢动态力学行为及其修正 J-C 本构模型 [J]. 材料热处理学报, 2019, 40(7): 156-164.

WANG Zhenxing, TIAN Xiaogeng, GAN Cong, et al. Dynamic mechanical behavior of U75V steel under uniaxial compression and its modified J-C constitutive model [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2019, 40(7): 156-164.

[10] ASHBY M F, LIM S C. Wear-mechanism maps [J].

- Scripta Metallurgica et Materialia, 1990, 24(5): 805-810.
- [11] CINNAMON J D, PALAZOTTO A N. Analysis and simulation of hypervelocity gouging impacts for a high speed sled test [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(2): 254-262.
- [12] CINNAMON J D, PALAZOTTO A N, SZMEREK-OVSKY A G. Further refinement and validation of material models for hypervelocity gouging impacts [J]. AIAA Journal, 2008, 46(2): 317-332.
- [13] BURTON C A, BROCKMAN R A. Frictional interactions in high speed sliding contact [C]//50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 2009: 2620.
- [14] BURTON C A. A finite element study of sliding friction between rough surfaces [D]. Dayton, USA: University of Dayton, 2009.
- [15] 干聪, 田晓耕, 汪振兴, 等. 摩擦热对靴轨凿削临界条件的影响 [J]. 材料热处理学报, 2020, 41(10): 143-154.
- GAN Cong, TIAN Xiaogeng, WANG Zhenxing, et al. Effect of friction heat on critical condition of slipper and rail surface gouging [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41(10): 143-154.
- [16] CHMIEL A J. Finite element simulation methods for dry sliding wear [D]. Dayton, USA: Air Force Institute of Technology, 2008.
- [17] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1983, 21: 541-548.
- [18] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1): 31-48.
- [19] 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. Study on influencing factors and critical conditions of gouging wear on rocket sled [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(11): 110-117.
- [20] HALE C S, PALAZOTTO A N, BAKER W P. Engineering approach for the evaluation of mechanical wear considering the experimental Holloman high-speed test track [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2012, 138(9): 1127-1140.
- [21] MONTGOMERY R S. Friction and wear at high sliding speeds [J]. Wear, 1976, 36(3): 275-298.
- [22] MEADOR S P. Consideration of wear rates at high velocities [D]. Dayton, USA: Air Force Institute of Technology, 2010.
- [23] LOIZOU A, QI Hongsheng, DAY A J. A fundamental study on the heat partition ratio of vehicle disk brakes [J]. Journal of Heat Transfer, 2013, 135(12): 121302.
- [24] 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.
- [25] LE K H. A study of the thermal environment developed by a traveling slipper at high velocity [D]. Dayton, USA: Air Force Institute of Technology, 2013.
- [26] LAIRD D J. The investigation of hypervelocity gouging [D]. Dayton, USA: Air Force Institute of Technology, 2002.
- [27] LAIRD D J, PALAZOTTO A N. Effect of temperature on the process of hypervelocity gouging [J]. AIAA Journal, 2003, 41(11): 2251-2260.

(编辑 赵炜)