

# 高超声速火箭橇创削效应仿真与验证研究

夏洪利<sup>1,2</sup>, 刘振<sup>1</sup>, 闫华东<sup>2</sup>, 赵项伟<sup>2</sup>, 孟鑫<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学航天航空学院, 710049, 西安;

2. 中国兵器工业试验测试研究院, 714200, 陕西华阴)

**摘要:** 为形成具有高置信度水平的火箭橇试验创削效应分析能力,基于真实的在轨试验创削数据,开展了高超声速火箭橇创削效应仿真与验证研究。首先,通过分析火箭橇在轨试验真实创削数据,获取了典型创削现象的参数描述;通过化学成分和金相显微组织检测,实现了基于绝热剪切理论的创削机理闭环验证。然后,利用静态拉伸试验和高温双同步 Hopkinson 杆试验,获取了 Johnson-Cook 本构模型参数。最后,使用物质点分析方法,开展了火箭橇垂向速度分别为 1.75、2.00 和 2.25 m/s 的 3 种工况创削效应仿真,得到了与真实试验创削形貌基本一致的仿真结果。仿真结果与在轨试验真实数据对比显示,当滑靴垂向速度为 2 m/s 时,创削坑长度、深度实验和仿真偏差分别为 1.8%、-3.9%,均未超过 5%,达到了较高的一致性,验证了物质点方法分析创削的适用性。该方法和参数取值可以作为后续高超声速火箭橇试验试前创削安全性评估的参考。

**关键词:** 火箭橇;创削效应;物质点法;火箭橇在轨试验

**中图分类号:** TJ015 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.7652/xjtubxb202304008 **文章编号:** 0253-987X(2023)04-0071-09

## Simulation and Verification Study on Gouging Effect of Hypersonic Rocket Sled

XIA Hongli<sup>1,2</sup>, LIU Zhen<sup>1</sup>, YAN Huadong<sup>2</sup>, ZHAO Xiangwei<sup>2</sup>, MENG Xin<sup>2</sup>

(1. School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Norinco Group Test and Measuring Academy, Huayin, Shaanxi 714200, China)

**Abstract:** In order to develop the ability to analyze the gouging effect of rocket sled test with high confidence level, a simulation and verification study on gouging effect of hypersonic rocket sled was carried out based on real gouging data in orbit. Firstly, the parameter description of typical gouging phenomenon was obtained by the analysis of real gouging data of rocket sled test in orbit, and the closed-loop verification of gouging mechanism based on adiabatic shear theory is completed through the detection of chemical composition and metallographic microstructure. Secondly, the Johnson-Cook constitutive model parameters were obtained by static tensile test and Hopkinson bar test based on the principle of high temperature double synchronization. Finally, the simulations of gouging effect under three vertical speed conditions of 1.75 m/s 2.00 m/s and 2.25 m/s were carried out using material point method. The simulation results in terms of gouging morphology were basically consistent with the ones obtained by real tests. The comparison between

the results of simulation and real tests shows that the consistency between measurement and simulation is the best when the vertical speed of the slipper is 2 m/s, and the deviations of the length and depth of the gouging pit are 1.8% and -3.9%, which are not more than 5%. The applicability of the material point method in analyzing gouging is verified. The method and parameter value can be used as a reference for the gouging safety evaluation in the design stage of hypersonic rocket sled test.

**Keywords:** rocket sled; gouging effect; material point method; rocket sled test in orbit

火箭橇试验能够为全尺寸、全质量状态被试载荷提供气动、振动、热环境等高超声速动态条件,是高超声速飞行器开展地面高动态试验的有效方法。火箭橇通过滑靴与钢轨约束配合,由于靴轨间存在一定的间隙,火箭橇沿滑轨高速滑行时,会附加产生俯仰、偏航、滚转 3 个自由度的运动,其中任一运动均会导致滑靴以极高速度冲击轨道。当火箭橇速度接近 5Ma 左右时,该冲击作用会引起靴轨接触表面温度急剧升高,致使靴轨材料软化,产生大变形和塑性流动<sup>[1-2]</sup>。塑性流动射流导致靴轨材料发生混合以及伴随着产生空穴,使得滑靴或滑轨表面产生“凹坑”,形成刨削现象<sup>[3]</sup>。刨削会造成靴轨配副环境劣化、稳定性降低,是制约火箭橇试验运行速度提升的重要因素之一<sup>[4]</sup>。

针对高超声速火箭橇试验中极易出现的刨削现象,国外相关机构如美国空军技术研究院、德克萨斯大学、桑迪亚国家实验室很早便开始关注并开展了大量的理论研究工作。20 世纪 60 年代末和 70 年代初, Gerstle 在桑迪亚国家实验室对高超声速单轨火箭橇试验中出现的刨削现象进行了研究<sup>[5-7]</sup>,研究发现,非均匀变形的轨道不平顺度及凸起会形成冲击波,进而产生刨削。典型刨削现象如图 1 所示。

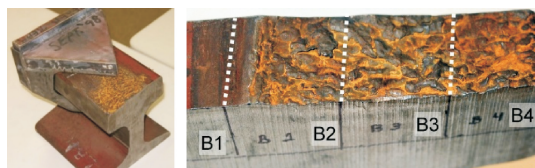


图 1 典型火箭橇刨削现象<sup>[8]</sup>

Fig. 1 Typical gouging phenomenon of rocket sled

Gerstle 进一步对轨道刨削坑处的金相组织进行了研究,发现轨道(1080 钢)的表面生成了一层马氏体组织,马氏体组织上沉积了一层滑靴材料(304 不锈钢),并且在刨削坑内发现了垂直和平行于火箭橇运行方向的绝热剪切带。金相分析表明,刨

削形成过程是一个热力学事件,伴随着材料的相变和急剧温度变化,靴轨接触产生了足够高的温度,使珠光体奥氏体化,然后迅速淬火生成马氏体层;剪切带的形成释放了内部产生的热量,并且在刨削形成的过程中发生了靴轨材料混合。Mixon<sup>[9]</sup>对低质量拦截弹(LMI)、中等质量拦截弹(MMI)和“爱国者”PAC3 导弹火箭橇试验中的刨削的位置、刨削发生时的橇体速度、刨削的数量和大小等进行了归纳统计。根据统计结果推测,影响刨削发生的因素包括动态载荷引起的高应力、火箭橇运行速度、轨道表面粗糙度、摩擦热、滑靴材料劣化、滞留在靴轨间隙的碎片,以及气动热引起的火箭橇材料软化等。

国外关于刨削问题的数值计算主要应用美国 Sandia 国家实验室开发的 CTH 代码<sup>[10-13]</sup>。CTH 程序采用欧拉-拉格朗日方法,求解过程分为两步:第一步是拉格朗日步,即网格随物质运动发生变形;第二步是欧拉步,变形的物质网格被映射回欧拉背景网格。结合由试验得到的滑靴材料和轨道材料的非线性本构关系,CTH 程序可以模拟刨削过程,但其基本算法过程报道的较少。Sulsky 等<sup>[14-15]</sup>修改了应用于流体力学中的物质网格粒子元胞法和隐式粒子流体法,并将其扩展运用到固体力学当中,将其命名为物质点法(MPM)。它采用拉格朗日质点和欧拉网格双重描述,将连续体离散成一系列连续质点。该方法可以避免欧拉法中因非线性对流项产生的数值困难并容易跟踪物质界面,同时能够避免拉格朗日法中因网格畸变而产生的数值困难。物质点法因其独特的特点,对分析刨削问题具有优势。

国内开展高超声速火箭橇刨削现象研究较晚,目前西安交通大学在该领域研究较为深入。张静静<sup>[16]</sup>以物质点算法为研究手段,从滑块运行过程中结构的等效力及轨道表面粗糙度两方面出发,给出了刨削发生时的判断条件。汪振兴<sup>[17]</sup>、干聪等<sup>[18-19]</sup>基于物质点理论,建立了火箭橇系统二维模型和靴轨二维平面应变模型,分别开展了竖向临界速度的

影响规律和滑靴温度变化对创削临界条件的影响研究,但该研究仅停留在数值仿真层面,计算结果的准确性未经试验验证。

鉴于国外对我国的技术封锁,国内创削研究因缺少真实试验数据仅以理论仿真为主的现状,本文以高超声速火箭橇创削效应在轨试验为基础,分析创削试验现象,建立了靴轨材料的热黏塑性 Johnson-Cook 本构模型,基于物质点方法并结合火箭橇试验真实创削数据,开展了创削分析与验证的闭环研究,阐述了创削效应形成的机理。

### 1 高超声速火箭橇创削效应在轨试验

试验在国内某单位火箭橇滑轨上进行。试验采用单轨三橇结构,通过三级动力将载荷加速至高超声速。试验滑轨为 U71Mn 材质的起重机钢轨,第三级火箭橇通过 4 部滑靴与滑轨约束,滑靴材质为 30CrMnSiNi2A,靴轨配合为干摩擦滑配合。创削发生时,火箭橇系统质量约为 600 kg,靴轨上下总间隙约为 4.2 mm,左右总间隙约为 5.5 mm。火箭橇系统示意如图 2 所示。

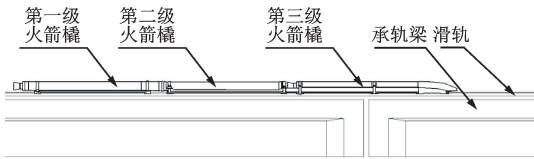


图 2 国内某型火箭橇试验系统示意图  
Fig. 2 Diagram of a domestic rocket sled test system

试验成功验证了创削现象。试验后对滑轨进行细节观察,发现在火箭橇运行高速段,不同位置出现不同程度的创削现象。典型创削如图 3 所示,创削坑位于轨道踏面上,长约 220 mm,宽约 18 mm,深度约 1.8 mm,形貌呈纺锤形,两侧窄中部宽,分内外

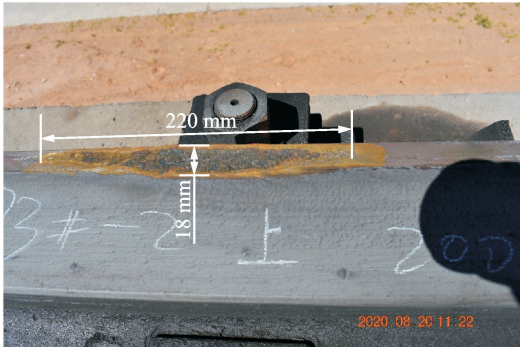


图 3 国内某型火箭橇试验创削现象  
Fig. 3 Gouging phenomenon of a domestic rocket sled test

环,外环表面呈现金属干摩擦样貌,短时间内出现锈蚀;内环表面呈现熔融金属冷却样貌,外表形成黑色氧化层,与外环相比,不易锈蚀。

### 2 高超声速火箭橇创削效应数值研究方法

#### 2.1 靴轨材料热黏塑性 Johnson-Cook 本构模型

基于数值分析方法开展创削问题研究时,首先需要获取滑轨材料在中高温、高应变率、大变形下准确的动态力学模型。基于 U71Mn 滑轨材料流动应力响应对温度和应变率表现出的较强敏感性,选用 Johnson-Cook 本构模型描述材料的热黏塑性力学行为<sup>[20-25]</sup>如下

$$\sigma = (A + B\gamma^n)(1 + C\ln\dot{\gamma}^*)(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

本文基于静态拉伸试验(试验结果如图 4 所示)和高温双同步 Hopkinson 杆试验(试验装置如图 5 所示,试验结果如图 6 所示),开展 Johnson-Cook 本构模型研究。

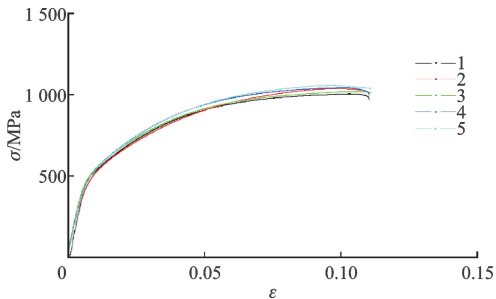


图 4 U71Mn 静态拉伸试验真实应力-应变曲线  
Fig. 4 True stress strain curve of static tensile test for U71Mn

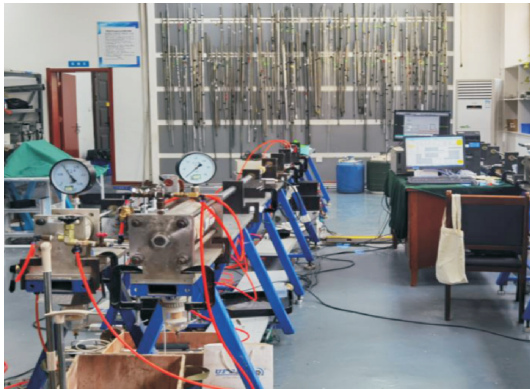


图 5 高温双同步 Hopkinson 杆试验装置  
Fig. 5 A Hopkinson bar experimental device based on the principle of high temperature double synchronization

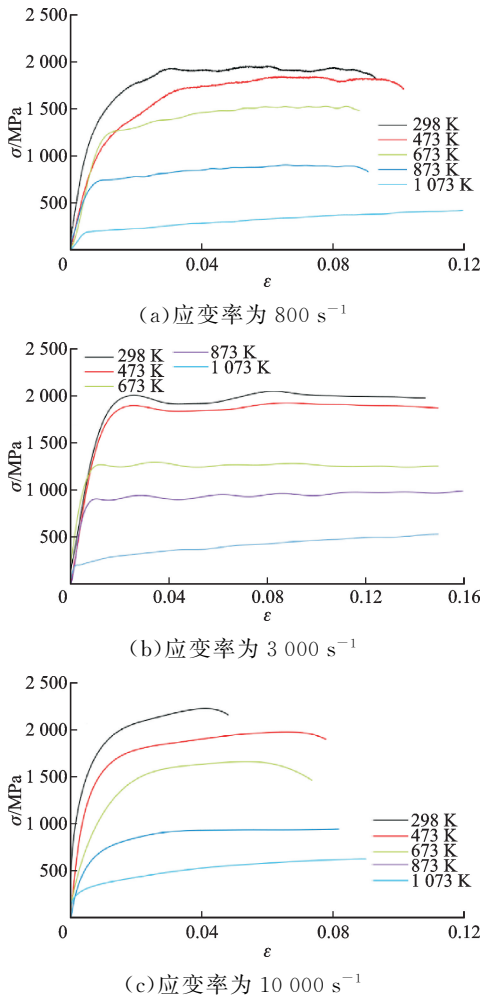


图 6 不同应变率下 30CrMnSiNi2A 的真实应力-应变曲线  
Fig. 6 True stress-strain curve of 30CrMnSiNi2A at different strain rates

通过图 4 所示的 25 °C 和 0.001 s<sup>-1</sup> 应变率下的真实应力-应变曲线拟合确定参数 A、B 和无量纲参数 n,通过图 6 所示的 25 °C 初始温度时不同应变率下的真实应力-应变曲线拟合得到无量纲参数 C.利用恒定应变率不同温度条件下的真实应力-应变曲线拟合得到无量纲参数 m.经过试验分析获取的 Johnson-Cook 模型参数见表 1.

表 1 Johnson-Cook 本构模型参数

| Table 1 Johnson-Cook constitutive model parameters |         |              |
|----------------------------------------------------|---------|--------------|
| 参数                                                 | U71Mn   | 30CrMnSiNi2A |
| A/MPa                                              | 871     | 1 529.65     |
| B/MPa                                              | 329.710 | 471.747      |
| n                                                  | 0.425   | 0.123        |
| C                                                  | 0.018 6 | 0.010 9      |
| m                                                  | 1.260   | 0.758        |

2.2 基于绝热剪切理论的靴轨材料失稳条件

基于绝热剪切理论,国内外学者进行了大量材料失稳研究.包合胜等<sup>[26]</sup>基于 Johnson-Cook 热黏塑性本构模型,认为绝热剪切的临界条件同时取决于应变、应变率和环境温度 3 个因素,推导出了与三因素相关的三变量准则,用此三变量临界准则进行理论预测,验证与试验结果吻合较好. Johnson-Cook 热黏塑性本构方程如下

$$\tau = [A + B (\gamma)^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_\gamma}{T_m - T_\gamma} \right)^m \right]$$
 (2)

假定材料的剪应力  $\tau$  是剪应变  $\gamma$ 、应变率  $\dot{\gamma}$  和温度  $\theta$  的一般函数关系,  $\tau = f(\gamma, \dot{\gamma}, \theta)$ , 则绝热剪切临界条件可以表示为

$$\frac{d\tau}{d\gamma} = \frac{\partial \tau}{\partial \gamma} + \frac{\partial \tau}{\partial \dot{\gamma}} \frac{d\dot{\gamma}}{d\gamma} + \frac{\partial \tau}{\partial T} \frac{dT}{d\gamma} = 0$$
 (3)

以式(2)、(3)为基础,在其中代入相应的假设条件,如滑靴侵彻速度恒定、应变率恒定、功热 1:1 转换等,最终得到靴轨高速撞击形成创削时的材料失稳条件如下

$$\frac{nB (\gamma)^{n-1}}{[A + B (\gamma)^n]} - m [A + B (\gamma)^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right) \right] \left( \frac{T - T_\gamma}{T_m - T_\gamma} \right)^{m-1} / [\rho C_v (T_m - T_\gamma)]^{-1} = 0$$
 (4)

2.3 MPM 物质点分析方法

创削是一个复杂的材料破坏问题,其复杂性体现在:①创削过程涉及材料的大变形和塑性流动,应力、应变关系为强非线性;②靴轨创削接触核心区域应变率可高达 10<sup>7</sup> s<sup>-1</sup>,导致应力激波的产生与传播;③高应变率引起材料的大范围温度变化,导致金属材料的固液态甚至包括气态相变;④塑性流动射流引起滑靴材料与轨道材料的相互混合以及产生空穴.基于拉格朗日的有限元法,无法处理这种混合和空穴,基于欧拉描述方法,由于存在数值扩散问题,无法精确计算对流项.

物质点法采用拉格朗日质点和欧拉网格双重描述,将连续体离散成一系列携带所有信息的连续质点.物质点法示意图如图 7 所示.背景网格仅用于动量方程的求解和空间导数的计算,之后再将运动信息映射回物质点,得到下一时刻物质点所携带的物质信息.在每步中物质点和网格结点一同变形,没有相对运动,因此避免了欧拉法中因非线性对流项产生的数值困难,并容易跟踪物质界面.在下一时间步中,抛弃变形后的背景网格,仍采用未变形的背景网格,

物质信息被映射回网格结点,从而避免了拉格朗日法中因网格畸变而产生的数值困难<sup>[16]</sup>。

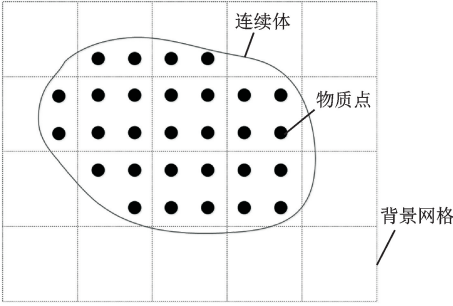


图 7 物质点法示意图

Fig. 7 Diagram of material point method

采用物质点方法,对刨削问题进行数值模拟,遵循质量守恒、动量守恒、能量守恒理论,公式如下

$$\rho(\mathbf{X},t)J(\mathbf{X},t) = \rho_0(\mathbf{X}) \tag{5}$$

$$\rho b_i + \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} = \rho \ddot{u}_i \tag{6}$$

$$\rho \frac{De}{Dt} = \rho s + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \dot{\epsilon}_{ij} \sigma_{ij} \tag{7}$$

3 基于在轨试验结果的刨削仿真分析

3.1 刨削试验现象分析

(1)化学成分分析。选取上述试验中如图 3 所示的滑轨踏面某典型刨削坑(尺寸约 220 mm×18 mm)为样本进行分析,化学成分检测结果见表 2。检测结果表明,钢轨的化学成分符合 YB/T 5055—1993《起重机用钢轨》标准中对 U71Mn 钢轨成分的要求。同时,样本中还检测出了 Cr 的成分,这与滑靴材质 30CrMnSiNi2A 成分是相符的,证明刨削过程中,部分滑靴材料熔融后附着在滑轨上(检测前采用化学试剂对样本进行了清洗,排除滑轨表面因滑动摩擦附着滑靴材料的可能)。

表 2 试验用 U71Mn 钢轨与标准化学成分对比  
Table 2 Chemical composition comparison of U71Mn rail between test and standard

| 化学成分 | 质量分数/% |                    |
|------|--------|--------------------|
|      | 被测钢轨   | YB/T 5055—1993 标准值 |
| C    | 0.735  | 0.65~0.76          |
| Si   | 0.227  | 0.15~0.58          |
| Mn   | 1.296  | 0.75~1.40          |
| P    | 0.017  | ≤0.035             |
| S    | 0.006  | ≤0.030             |
| Cr   | 0.029  |                    |
| V    | 0.005  |                    |

(2)金相显微组织检测。刨削的形成涉及高压、高速和高温的复杂作用,难以找出符合这一现象的力学参量去描述。研究刨削发生后轨道刨削坑周围的微观结构、刨削坑内微观组织的变化是研究刨削过程的重要手段。在钢轨上取金相试样,取样位置和宏观形貌如图 8 所示。

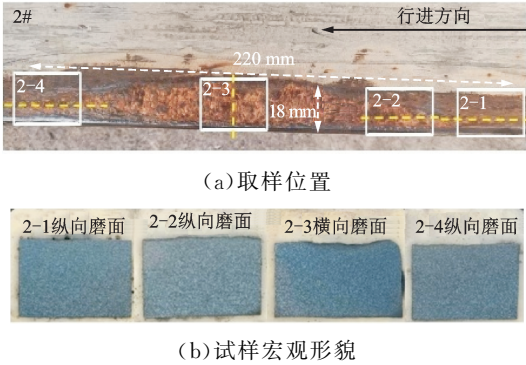


图 8 金相试样取样位置、宏观形貌

Fig. 8 Sampling position and macro morphology of metallographic sample

金相取样微观结构如图 9 所示,其中图 9(a)为 2-2 试样纵向 200 μm 尺度下的磨面金相图。因滑靴对滑轨的冲击和摩擦作用,导致试样表面形成一层白亮组织,这是钢轨局部在冷态下遭受滑靴摩擦热和冲击热温度骤升,珠光体向奥氏体转变,同时因钢轨本体迅速传热令奥氏体极冷淬火形成的马氏体组织。白亮组织层下方可见明显塑性变形,塑性变形厚度约为 338 μm;并且可以观察到与橇体运行反方向成约 45°夹角的绝热剪切带。

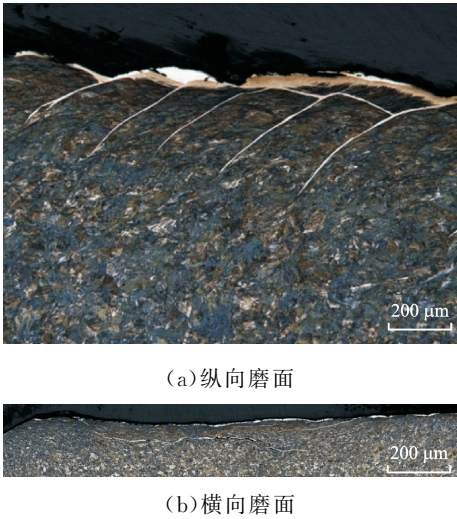


图 9 钢轨试样磨面金相组织

Fig. 9 Metallographic structure diagram of rail sample grind-surface

图 9(b)为 2-3 试样横向磨面金相图,从图中可明显看出沿绝热剪切带处有裂纹形成。这是由于在绝热剪切带内产生了很大的剪应变,而且应变率、温升均很高,周围存在大量相对“较冷”的基体,因剪切带内大、外小的不协调变形,不一致的应变率,急剧变化且不均匀的温度,极易在剪切带的边缘处产生微裂纹。随着剪切带的延伸,这些微裂纹急剧扩展和交叉,最后形成碎块脱落。正是绝热带中形成的裂纹,将滑轨表面分割成若干块,才使滑轨表面材料不断脱落,形成了刨削坑。因此,可使用绝热剪切理论来描述刨削效应。

3.2 刨削效应仿真

(1)仿真模型。基于物质点方法对火箭橇靴轨刨削过程进行数值模拟。为了更好地进行机理研究,需要对火箭橇靴轨进行合理简化。以某型火箭橇试验为研究对象,将发生刨削的火箭橇模型进行简化,建立滑靴与轨道模型如图 10 所示,滑轨材质为 U71Mn,橇体与滑靴按质量分配关系简化为质量块,材质为 30CrMnSiNi2A。

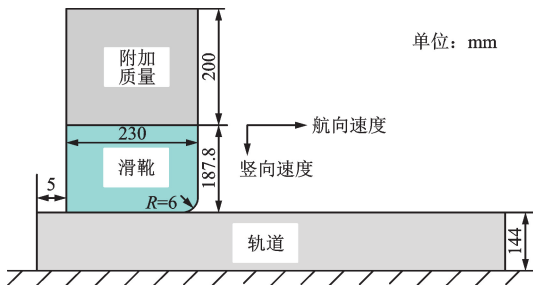


图 10 滑靴与轨道几何模型

Fig. 10 Geometric model of slipper and track

模型中并非平直滑轨,而是根据试验时使用滑轨的真实不平顺特性建模得到的。滑轨不平顺特性如图 11 所示。

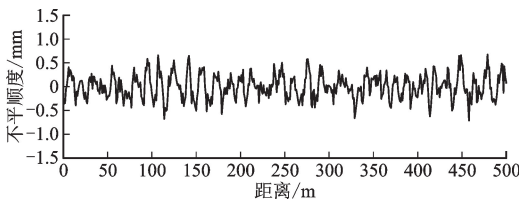


图 11 火箭橇滑轨不平顺特性曲线

Fig. 11 Irregularity characteristic curve of rocket sled track

除此之外,仿真时还需要代入火箭橇航向速度、滑靴垂向速度、滑靴-轨道界面的正压力、气动加热

与摩擦热等影响因素。航向速度取刨削发生处的实测速度,垂向速度分别代入 1.75、2.00 和 2.25 m/s,正压力代入该滑靴承担的载荷分量与垂向振动值的乘积,气动加热与摩擦热代入复算值(气动热复算值通过气动热仿真获得,并经温度、热流测试数据校正;摩擦热复算值利用销盘试验结合有限元仿真获得,并经滑靴内腔梯度安装的温度传感器测试数据校正)。

(2)仿真结果。仿真过程中不考虑靴轨材料熔融现象,轨道下端固支,其余方向自由。轨道及滑靴离散的物质点间距为 0.5 mm,背景网格间距为 1 mm。仿真过程如图 12 所示。

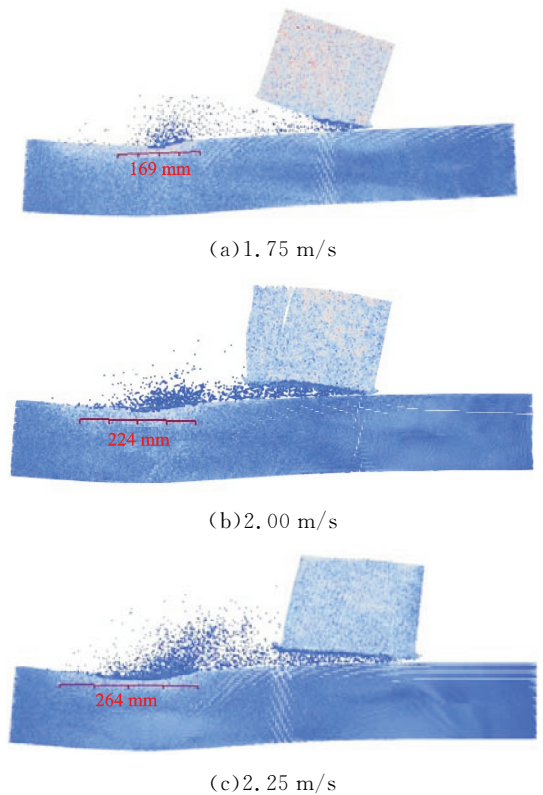


图 12 火箭橇试验刨削仿真过程

Fig. 12 Gouging simulation process of rocket sled test

在二维刨削数值分析中,通常以刨削坑的深度作为试验与仿真一致性对比指标<sup>[16]</sup>。不同垂向速度刨削仿真结果如下:

(1)当侧向速度为 1.75 m/s 时,刨削坑的长度为 169 mm,深度为 1.51 mm;

(2)当侧向速度为 2.00 m/s 时,刨削坑的长度为 224 mm,深度为 1.73 mm;

(3)当侧向速度为 2.25 m/s 时,刨削坑的长度为 264 mm,深度为 2.05 mm。

垂向速度为 2.00 m/s 时刨削温度分析结果如图 13 所示。

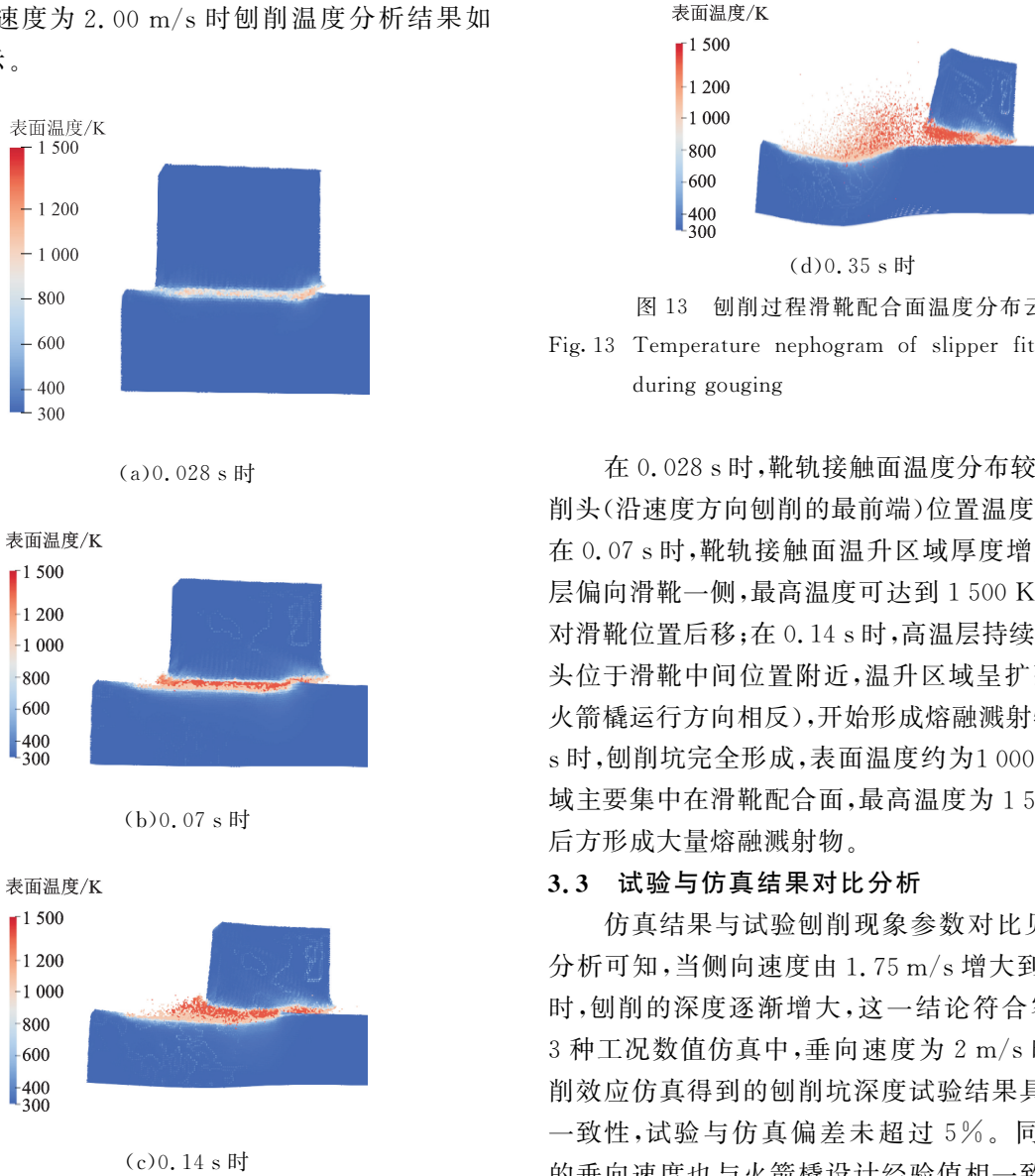


图 13 刨削过程滑靴配合面温度分布云图  
Fig. 13 Temperature nephogram of slipper fitting surface during gouging

在 0.028 s 时,靴轨接触面温度分布较为均匀,刨削头(沿速度方向刨削的最前端)位置温度相对偏高;在 0.07 s 时,靴轨接触面温升区域厚度增加,且高温层偏向滑靴一侧,最高温度可达到 1 500 K,刨削头相对滑靴位置后移;在 0.14 s 时,高温层持续增厚,刨削头位于滑靴中间位置附近,温升区域呈扩张状态(与火箭橇运行方向相反),开始形成熔融溅射物;在 0.35 s 时,刨削坑完全形成,表面温度约为 1 000 K,高温区域主要集中在滑靴配合面,最高温度为 1 500 K,滑靴后方形成大量熔融溅射物。

3.3 试验与仿真结果对比分析

仿真结果与试验刨削现象参数对比见表 3。由分析可知,当侧向速度由 1.75 m/s 增大到 2.25 m/s 时,刨削的深度逐渐增大,这一结论符合客观认知。3 种工况数值仿真中,垂向速度为 2 m/s 时,偏差刨削效应仿真得到的刨削坑深度试验结果具有较好的一致性,试验与仿真偏差未超过 5%。同时,2 m/s 的垂向速度也与火箭橇设计经验值相一致。

表 3 火箭橇刨削试验与仿真的对比

Table 3 Gougingcomparison between measurement and simulation in rocket sled test

| 垂向速度<br>/(m·s <sup>-1</sup> ) | 长度/mm |     | 长度偏差/% | 深度/mm |      | 深度偏差/% |
|-------------------------------|-------|-----|--------|-------|------|--------|
|                               | 试验值   | 仿真值 |        | 试验值   | 仿真值  |        |
| 1.75                          | 220   | 169 | −23.2  | 1.8   | 1.51 | −16.1  |
| 2.00                          | 220   | 224 | 1.8    | 1.8   | 1.73 | −3.9   |
| 2.25                          | 220   | 264 | 20.0   | 1.8   | 2.05 | 13.9   |

4 结 论

刨削效应是高超声速火箭橇试验的一种伴生现象,发生规律与靴轨材料属性、运行速度、滑靴间隙、滑轨表面质量等诸多因素相关<sup>[25-27]</sup>,具有一定的随机性。本文通过研究试验中出现的刨削现象,得到以下结论。

(1)对真实试验刨削坑开展化学成分分析和金相显微组织检测,实现了闭环验证,验证了基于绝热剪切理论的刨削形成机理。

(2)选用了目前普遍使用的物质点方法进行刨削效应仿真,仿真加载参数全部来源于实测数据或有理论支撑的仿真数据,数据可溯源,验证了物质点法对刨削分析的适用性。

(3)分析复现了刨削形貌,得到了滑靴重要部件承力位置的温度分布(可用于滑靴结构安全性校核)。试验和仿真对比结果显示,当滑靴垂向速度为2 m/s时,刨削坑长度、深度偏差分别为1.8%、-3.9%,均未超过5%,具有较高的一致性,分析数据可以为后续高超声速火箭橇试验前刨削评估提供参考与指导。

未来随着国内高超声速火箭橇试验量增加、试验数据的不断丰富,上述仿真模型和参数将持续得到优化,并最终形成标准规范、具有高置信水平的刨削效应分析方法。

## 参考文献:

- [1] 魏兵辉,孙琨,王云鹏,等. 高速干滑动摩擦系数的有限元仿真计算研究[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(6): 82-89.  
WEI Binghui, SUN Kun, WANG Yunpeng, et al. Finite element prediction for friction coefficient of high speed dry sliding[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(6): 82-89.
- [2] 李雪洁,孙琨,陈诚,等. (Ti/Zr/Hf/Sn/W)NbMo-TaV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. Investigation on properties of (Ti/Zr/Hf/Sn/W)NbMo-TaV high-entropy alloys using first-principles calculation and analysis method[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(3): 180-186.
- [3] 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): 317-327.
- [4] MIXON L C. Assessment of rocket sled slipper gouging phenomena[R]. [S. l.]: Applied Research Associates Report, 1997: 33-47.
- [5] GERSTLE F P. The Sandia rocket sled rail and slipper study[R]. Albuquerque, NM, USA: Sandia National Labs, 1968.
- [6] GERSTLE F P. Deformation of dry steel surfaces during high-velocity sliding contact[D]. Durham, NC, USA: Duke University, 1972.
- [7] GERSTLE F P, FOLLANSBEE P S, PEARSALL G W, et al. Thermoplastic shear and fracture of steel during high-velocity sliding[J]. Wear, 1973, 24(1): 97-106.
- [8] CINNAMON J D. Analysis and simulation of hypervelocity gouging impacts show affiliations[D]. Dayton, OH, USA: Air Force Institute of Technology, 2006.
- [9] MIXON L C. Assessment of rocket sled slipper wear/gouging phenomena: F08635-97-C-0041[R]. [S. l.]: Applied Research Associates, Inc, 1997.
- [10] BARKER L M, TRUCANO T G, MUNFORD J W. Surface gouging by hypervelocity sliding contact between metallic materials[EB/OL]. (1987-09-01)[2022-06-11]. <https://www.osti.gov/biblio/6114190>.
- [11] TACHAU R D M. An investigation of gouge initiation in high-velocity sliding contact[EB/OL]. (1991-11-01)[2022-06-11]. <https://www.osti.gov/biblio/6078985>.
- [12] TACHAU R D M, YEW C H, TRUCANO T G. Gouge initiation in high-velocity rocket sled testing[J]. International Journal of Impact Engineering, 1995, 17(4/5/6): 825-836.
- [13] SCHMITZ C, SCHMITZ R. Slipper wear/gouging analytical tool[R]. [S. l.]: SBIR, 1998.
- [14] SULSKY D, CHEN Z, SCHREYER H L. A particle method for history-dependent materials[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1994, 118(1/2): 179-196.
- [15] SULSKY D, ZHOU Shijian, SCHREYER H L. Application of a particle-in-cell method to solid mechanics[J]. Computer Physics Communications, 1995, 87(1/2): 236-252.
- [16] 张静静. 高超声速火箭橇-轨道系统刨削机理研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2018.
- [17] 汪振兴. 高超声速火箭橇靴轨刨削研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2019.
- [18] 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.
- [19] 干聪. 摩擦热对靴轨刨削临界条件的影响[D]. 西安: 西安交通大学, 2020.
- [20] 孟凡刚,巫世晶,贾俊峰,等. 考虑间隙的弹塑性断路器弹簧操动机构动力学特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(7): 75-82.  
MENG Fangang, WU Shijing, JIA Junfeng, et al. Dynamic characteristic analysis on the elastoplastic spring operating mechanism of high voltage circuit breaker with clearance[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(7): 75-82.
- [21] 杨珍,范坤,胡兵,等. 超声速单轨火箭橇动态载荷预示技术研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(3): 247-251.

- YANG Zhen, FAN Kun, HU Bing, et al. Study on dynamic load prediction of the supersonic monorail rocket sled [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(3): 247-251.
- [22] 冯瑞雪, 蔡洪能, 李雪峰, 等. 高速滑靴瞬态摩擦升温研究 [J]. 精密成形工程, 2020, 12(1): 143-149.
- FENG Ruixue, CAI Hongneng, LI Xuefeng, et al. Transient friction temperature rise of high speed sliding shoe [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(1): 143-149.
- [23] 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 fulltime dynamics simulation of two-track rocket sled [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(2): 245-250.
- [24] 刘丽娟, 吕明, 武文革. Ti-6Al-4V 合金的修正本构模型及其有限元仿真 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(7): 73-79.
- LIU Lijuan, LÜ Ming, WU Wenge. An improved constitutive model and finite element simulation for machining Ti-6Al-4V alloy [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(7): 73-79.
- [25] 王健. 高速火箭橇-轨道系统耦合动力学研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [26] 包合胜, 王礼立, 卢维娴. 钛合金在低温下的高速变形特性和绝热剪切 [J]. 爆炸与冲击, 1989, 9(2): 109-119.
- BAO Hesheng, WANG Lili, LU Weixian. The high velocity deformation and adiabatic shearing of a titanium alloy at low temperature [J]. Explosion and Shock Waves, 1989, 9(2): 109-119.
- [27] 范坤, 杨珍, 薛晓敏, 等. 单轨火箭橇靴-轨冲击响应传递特性研究 [J]. 应用力学学报, 2020, 37(5): 1887-1893.
- FAN Kun, YANG Zhen, XUE Xiaomin, et al. Transmission characteristics of impact response of monorail rocket sled [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(5): 1887-1893.

(编辑 杜秀杰)