DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0307-08

基于物质点法的轨道炮刨削机理三维数值研究*

吴金国,林庆华,弯 港,金 涌,李海元,栗保明
(南京理工大学瞬态物理国家重点实验室,江苏 南京 210094)

摘要:基于轨道炮结构特点以及冲击热力学理论,采用物质点法建立了轨道微颗粒诱发刨削的三维模型,模拟了轨道刨削的形成过程,并对其产生机理与影响因素进行了分析。结果表明:电枢与轨道的局域高速冲击产生瞬时的能量交换,形成的高热高压金属流对轨道表面的斜侵彻作用形成了刨坑;刨削的产生存在速度阈值,超过速度阈值,随着电枢速度增加,刨削越严重;低于速度阈值,可产生轨道擦伤;减小轨道表面微颗粒尺寸、增加电枢头部倾角均可降低刨削损伤。

关键词:冲击动力学;物质点法;轨道炮;刨削;超高速
中图分类号:O347 **国标学科代码**:1303599 **文献标志码**:A

电磁轨道炮是一种利用高功率脉冲电流产生的巨大电磁推力把弹丸加速到超高速的动能武器,在军事上有着广泛应用前景。电磁轨道炮走向应用必须要攻克发射器的使用寿命这项关键技术,延长发射器寿命则需要解决电弧烧蚀和刨削等问题[1]。刨削是材料在高速滑动接触下出现的一种损伤现象,在火箭橇、轻气炮及电磁轨道炮的实验中均有出现[2-3]。轨道炮中的刨削主要带来以下危害:降低能量利用率,缩短轨道寿命,影响射弹精度等。轨道炮实验中观察到的典型刨坑形貌多为泪滴状,如图 1 所示[4],刨坑尖部朝炮尾、弧部指向炮口。刨坑的生长,从一个起始点开始,沿电枢的运动方向逐渐变宽变深,坑内表面凹凸不平,呈现熔融的表面状态,刨坑最终收敛于弧形的尾边,尾边上常有熔融物堆积成的凸缘。C. Persad[5]在轨道炮实验中测量出发生刨削位置的轨道背面表面高度差达到 50 μm,而未发生刨削位置的高度差不超过 5 μm,说明刨削的产生过程伴随着很强的冲击。T. J. Watt[6]通过实验研究对比了平整轨道和表面带凹缝的轨道对刨削临界速度的影响,发现轨道表面宏观不平度对产生刨削的临界速度影响不大,而对刨坑的形貌影响较大。F. Stefani[4]对不同材料的刨削临界速度进行了实验,认为枢轨中较硬材料的维氏硬度与刨削临界速度下的冲击压强近似满足线性关系。

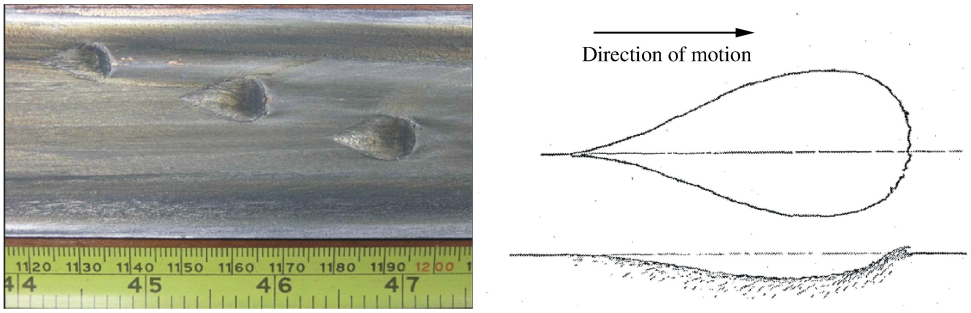

图 1 轨道炮实验中典型的泪滴状刨坑形貌[4]

Fig. 1 Typical tear-drop gouging morphology in railgun[4]

电枢与轨道超高速滑动接触界面上刨削现象的形成是一个瞬态过程,持续时间通常只有几十微秒,加之该过程处于极端工况下,以目前的实验水平对轨道炮刨削的产生过程进行实时测量基本不可能。

* **收稿日期**:2015-07-07;**修回日期**:2016-02-29
基金项目:国家自然科学基金(11402266);中央高校基本科研业务费专项资金项目(1151210420)
第一作者:吴金国(1989—),男,博士研究生,wujg8848@163.com。

因此，若能对轨道刨削现象的演变过程进行合理的复现，刨削的形成机理及相关规律的研究便可迎刃而解。本文中基于轨道炮结构特点及冲击热力学理论，通过物质点法以三维数值模拟的方式研究轨道刨削的产生机理，展现刨削的演化与形成过程，分析刨削产生的极端物理环境，并在此基础上，进一步计算和分析颗粒大小、冲击速度等因素对刨削产生的影响。

1 轨道刨削机理及数值研究方法分析

J. P. Barber[7]首次分析了轨道炮的刨削产生机理，参照前人在火箭橇中的研究成果，把轨道炮刨削的产生归因于轨道微颗粒的冲击作用，认为刨削是在超高速滑动接触时碰撞产生的冲击应力超过材料的极限强度后产生的。T. J. Watt[6]的实验也表明，磨损以及刨削，均起因于轨道表面的缺陷，这些缺陷通常是机械加工或打磨时留下的痕迹。L. M. Barker[8]首次将轨道炮刨削机理用平行冲击热力学理论加以解释，电枢相对轨道平行滑动，由于轨道表面的不平度或细小颗粒，引起电枢与轨道间的微小冲击，并超过材料的应力屈服强度，枢轨材料发生塑性变形，最终在轨道上形成刨坑。实际上，轨道表面微颗粒除机械加工因素外，还可来自以下方面：电枢运动过程中发生折断等破坏，产生的碎片或残渣附着于轨道表面；电枢局部积聚热量过高，使得电枢材料熔化掉落于轨道表面，凝固成细小颗粒[9]；由于风沙等环境因素，也可导致轨道表面附有细小沙粒。

数值模拟方面，L. M. Barker[10]与 D. L. Bourell[11]基于微颗粒诱发的刨削模型，分别用 CTH 和 EPIC 等流体动力学程序对轨道炮刨削过程进行了二维数值模拟，对刨削受材料、速度等变量的影响进行了计算，但结果中并未给出完整的刨坑形貌。金龙文等[9]、Zhu Rengui 等[12]、刘峰等[13]利用 LS-DYNA 和 ABAQUS 等商业有限元软件，也对轨道炮刨削的影响因素进行了数值研究，分析得出刨坑的形貌受电枢冲击前角、颗粒尺寸、冲击速度及温度等变量影响较大，枢轨界面载荷对刨削影响较小。

目前的数值模拟多为二维，而轨道刨削是一个三维扩展问题，二维计算结果不能完整反映出刨坑形貌的扩展过程以及受计算参量变化的影响。此外，枢轨高速滑动界面上的刨削现象是局域化的，变形主要集中在接触界面附近薄层内。使用有限元法时，若想得到枢轨界面的碰撞作用和刨坑的形成过程，一是需要在界面附近划分细密的网格，势必会导致计算量增大，计算时长增加；二是超高速刨削现象涉及材料的非线性大变形破坏，有限元法计算时容易因网格畸变过大从而大幅缩短时间步长，为保证计算效率，需要进行网格重分或删除失效单元。物质点法[14-15]是粒子类无网格方法的一种，兼具拉格朗日法与欧拉法的优点。将物质区域离散为物质点，在规则的背景网格上进行动量积分，从而避免了网格畸变问题，计算时间步长也基本固定，适合于超高速刨削这类极端现象的模拟。

2 计算模型及物质点法程序实现

2.1 计算模型及材料参数

根据上述刨削产生机理的分析，采用物质点法建立了轨道微颗粒诱发的刨削模型(图 2)。由于结构的对称性，沿电枢的对称面建立 1/2 计算模型。电枢对称面上施加对称约束条件，模型中略去绝缘支撑材料，改为在电枢侧面施加 z 向位移约束。U 形电枢长 30 mm，轨道宽 30 mm，厚 10 mm，轨道表面有一半径 0.5 mm 的半球形颗粒。整个模型物质域以 627 792 个质点进行离散，其中电枢 171 280 个质点，轨道 454 400 个质点，颗粒 2 112 个质点。

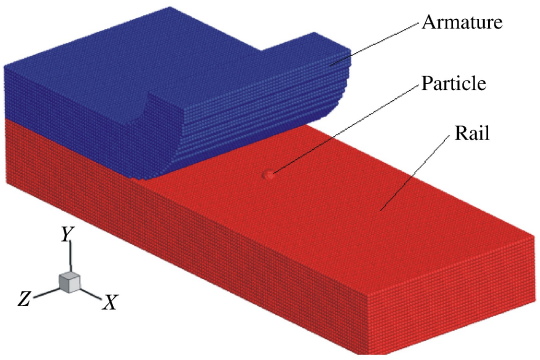

图 2 轨道刨削物质点法计算模型

Fig. 2 A simulation model of railgun gouging constructed with material point method

电枢材料为 7075 铝，轨道材料为无氧铜，材料本构为 Johnson-Cook 模型。J-C 模型中考虑到应变硬化、应变率硬化及温度软化效应，流动应力表示为

$$\sigma_y=(A+B\varepsilon_p^{\ n})\left(1+C\ln\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\right)[1-T^{*m}] \tag{1}$$

式中：A 是参考温度与参考应变率下的屈服强度，B、n 是材料应变硬化参数；C 是应变率强化参数，ε_p 是等效塑性应变，ε_0 是参考应变；$T^*=(T-T_r)/(T_m-T_r)$，m 是热软化参数，T_r 是参考温度，T_m 是材料熔化温度。

考虑损伤的破坏应变 $\varepsilon_{p,f}$ 表示为

$$\varepsilon_{p,f}=(D_1+D_2\mathrm{e}^{D_3\sigma^*})\left(1+D_4\ln\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\right)(1+D_5T^*) \tag{2}$$

式中：$\sigma^*=\sigma_m/\sigma_{eq}$ 为应力三轴度，σ_m 是静水应力，σ_{eq} 是 von Mises 等效应力。$D_1\sim D_5$ 是材料断裂失效参数。当质点损伤量 $D=\sum(\Delta\varepsilon_p/\varepsilon_{p,f})$ 达到 1 时，材料断裂失效，已失效的质点偏应力置为零，且不能受拉。

刨削的形成时间通常只有几十微秒，可视为绝热过程。绝热过程塑性变形引起的温升为

$$\Delta T=\int_0^{\varepsilon_p}\frac{\chi\sigma_{eq}}{\rho c_p}\mathrm{d}\varepsilon_p \tag{3}$$

式中：ρ 为密度；c_p 为定压比热；χ 表示塑性功转化为热量的比例，一般取 0.85～0.9。

由于刨削涉及到材料在冲击高压下的热力学行为，因此还须用相应的状态方程进行描述，本文采用 Mie-Grüneisen 状态方程。该状态方程定义材料所受压力为

$$p=\begin{cases}\dfrac{\rho_0c_0^2\mu[1+(1-\gamma_0/2)\mu]}{[1-(s-1)\mu]^2}+\gamma_0\rho_0e & \mu\geqslant0\\ \rho_0c_0^2\mu+\gamma_0\rho_0e & \mu<0\end{cases} \tag{4}$$

式中：c_0 是压力为零时的材料声速，s 是冲击波速 u_s 和粒子速度 u_p 关系曲线的斜率系数，γ_0 是压力为零时的 Grüneisen 参数，ρ_0 为材料初始密度，e 为比内能，体积变化率 $\mu=\rho/\rho_0-1$。电枢与轨道的材料参数见表 1，其中：E 为杨氏模量，ν 为泊松比。

表 1　电枢与轨道材料参数

Table 1　Material parameters of armature and rail

材料	ρ/(kg·m^{-3})	E/GPa	ν	c_p/(J·kg^{-1}·K^{-1})	A/MPa	B/MPa	n
7075 铝	2 810	71	0.33	960	369	684	0.73
无氧铜	8 960	124	0.34	383	90	292	0.31
材料	C	m	T_m/K	T_r/K	$\dot{\varepsilon}_0$/s^{-1}	χ	D_1
7075 铝	0.008 3	1.7	933	293	1	0.9	0.13
无氧铜	0.025	1.09	1 356	293	1	0.9	0.54
材料	D_2	D_3	D_4	D_5	c_0/(m·s^{-1})	s	γ_0
7075 铝	0.13	−1.5	0.011	0	5 350	1.34	2
无氧铜	4	2	0.014	1.12	3 940	1.49	2

2.2　物质点法程序实现

冲击爆炸等问题中常使用更新拉格朗日格式，其考虑热量交换的控制方程为

质量方程　　$$\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}t}+\rho\frac{\partial v_k}{\partial x_k}=0 \tag{5}$$

动量方程　　$$\frac{\partial\sigma_{ij}}{\partial x_j}+\rho b_i=\rho\ddot{u}_i \tag{6}$$

能量方程　　$$\rho\dot{e}=\rho q_s+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(k\frac{\partial T}{\partial x_i}\right)+s_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}-(p+q)\dot{\varepsilon}_{kk} \tag{7}$$

边界条件　　$$(n_j\sigma_{ij})\big|_{\Gamma_t}=\bar{t}_i,\qquad \dot{u}_i\big|_{\Gamma_u}=\bar{\dot{u}}_i \tag{8}$$

式中：$i,j,k=1,2,3$ 分别代表直角坐标系中的三个方向；ρ 是密度，b_i 是物体所受单位体积力，$\ddot{u}$ 是加速度，σ_{ij} 是 Cauchy 应力，偏应力张量 $s_{ij}=\sigma_{ij}+p\delta_{ij}$，$p$ 是压力，e 是系统的比内能，q_s 是单位质量热源，T 为温度，Γ_t 和 Γ_u 分别是给定面力边界和位移边界，n_j 是边界 A_t 的外法线单位矢量，q 是人工体积黏性力。

物质点法求解格式也是从微分方程的弱形式出发，取虚位移 δu_i 作为权函数，式(6)和式(8)的等效积分弱形式即为

$$\int_{\Omega}\rho\ddot{u}_i\delta u_i\mathrm{d}V+\int_{\Omega}\rho\sigma_{ij}^{*}\delta\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\mathrm{d}V-\int_{\Omega}\rho b_i\delta u_i\mathrm{d}V-\int_{\Gamma_t}\rho\bar{t}_i^{*}\delta u_i\mathrm{d}A=0 \tag{9}$$

式中：$\sigma_{ij}^{*}=\sigma_{ij}/\rho$ 是比应力，$\bar{t}_i^{*}=\bar{t}_i/\rho$ 是比边界力，Ω 为求解空间。

物质点法将连续体离散为一系列质点，因此连续体的密度可近似为

$$\rho(x_i)=\sum_{w=1}^{W}m_w\delta(x_i-x_{i,w}) \tag{10}$$

式中：W 是质点总数，m_w 是质点 w 的质量，δ 是 Dirac Delta 函数，$x_{i,w}$ 是质点 w 的坐标。将式(10)代入虚功方程(9)中，可将其转化为求和的形式

$$\sum_{w=1}^{n_w}(m_w\ddot{u}_{i,w}\delta u_{i,w})+\sum_{w=1}^{n_w}\left(m_w\sigma_{ij,w}^{*}\delta\frac{\partial u_{i,w}}{\partial x_j}\right)-\sum_{w=1}^{W}(m_w b_{i,w}\delta u_{i,w})-\sum_{w=1}^{W}(m_p\bar{t}_{i,w}^{*}h^{-1}\delta u_{i,w})=0 \tag{11}$$

式中：下角标 w 表示物理量描述质点 w，h 是为了将式(9)等号左边最后一项边界积分转化为体积分而引入的假想边界层厚度。

物质点法中物体的信息均由各质点携带，为了在背景网格上求解 t_n 时刻的动量方程，需要将质点在 t_n 时刻的质量、动量、应力、体力和面力等信息映射到背景网格，利用背景网格结点上的有限元形函数 $N_I(x_i)$ 实现质点和背景网格结点之间信息的映射，第 I 个网格结点在 i 方向的动量为

$$P_{i,I}=\sum_{w=1}^{W}(m_w N_{I,w}\dot{u}_{i,I}) \tag{12}$$

结点内力和结点外力分别为

$$f_{i,I}^{\mathrm{int}}=-\sum_{w=1}^{W}\left(\frac{\partial N_{I,w}}{\partial x_j}\sigma_{ij,w}\frac{m_w}{\rho_w}\right) \tag{13}$$

$$f_{i,I}^{\mathrm{ext}}=\sum_{w=1}^{W}(m_w N_{I,w}b_{i,w})+\sum_{w=1}^{W}\left(N_{I,w}\bar{t}_{i,w}h^{-1}\frac{m_w}{\rho_w}\right) \tag{14}$$

式中：$\sigma_{ij,w}$ 为质点 w 的应力，可以利用本构方程由质点 w 的应变增量和旋量增量得到。

背景网格结点的动量方程可表示为

$$\dot{P}_{i,I}=f_{i,I}^{\mathrm{int}}+f_{i,I}^{\mathrm{ext}},\qquad x_I\notin\Gamma_u \tag{15}$$

在背景网格上利用时间积分求解各结点的动量方程后，再将网格结点的速度变化量和位置变化量映射回质点，以更新质点的速度和位置。

3 结果与讨论

3.1 刨削过程模拟

以一个典型算例进行分析，给电枢赋予 1.5 km/s 的初始速度，与轨道上的半径为 0.5 mm 半球形颗粒发生平行冲击，整个作用时间约 30 μs。图 3 为刨坑形成过程中 Mises 等效应力变化云图(x 为电枢运动方向，y 为枢轨接触面法向，截取模型中间对称面观测，为便于查看刨坑形成过程，后处理时已破坏的质点未予显示)，应力波从电枢与颗粒的碰撞点开始向周围迅速扩散，冲击核心区内应变梯度很大，材料产生大变形流动，应变率最高时可达 $10^5\ \mathrm{s}^{-1}$。电枢和轨道材料上的 Mises 等效应力分别达到了 900 和 450 MPa，冲击瞬间轨道微颗粒受到的压力可至几十吉帕，远高于材料静态屈服强度，材料在急剧压缩下表现近似流体状态。冲击塑性功产生的热量来不及扩散，使得电枢和轨道局部温度升高了 300 K 以上，进一步加剧了冲击核心区枢轨材料的热软化及流动变形。图 4 是冲击过程中枢轨接触面

上的作用力随时间的变化曲线，在电枢与微颗粒发生冲击作用的时间内，接触力发生跃变。x 及 y 方向力较大，峰值可达 15 kN。y 方向的力使得轨道表面材料被急剧压缩，刨坑内部的材料密度升高，即轨道材料被硬化。文献[4]对轨道刨坑区域的材料硬度测量也显示，刨坑内材料硬度增加明显，表明刨削发生时在枢轨接触面法向的轨道材料塑性压缩变形效应显著。

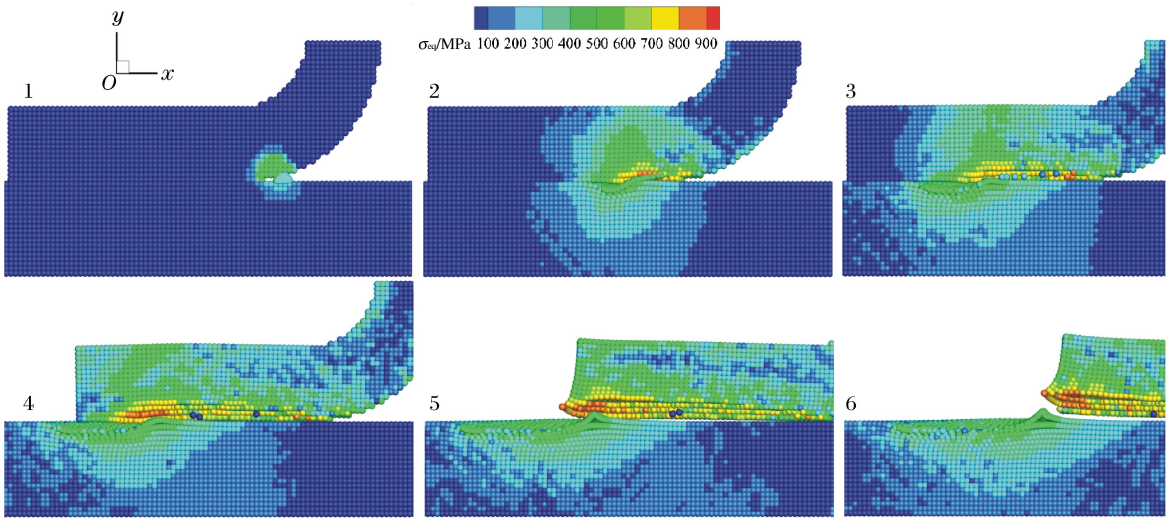

图 3　轨道刨坑形成过程 Mises 应力云图

Fig. 3　Mises stress distribution during the formation process of gouging

图 5 是轨道微颗粒内选取的 2 个质点 w_1、w_2 在冲击发生后的速度(v_x、v_y)变化曲线，质点在 x 和 y 方向的动量均迅速增长(负号表示 y 轴反向)，说明轨道表面被斜角度侵彻，引起该处材料的流动与扩散，这 2 个质点在 17 μs 后均发生了破坏。图 6 是冲击结束后，轨道表面形成的泪滴状刨坑，尖端指向轨道尾部，弧端指向炮口，刨坑长 12 mm，宽 8 mm，深 1.2 mm。计算模拟的结果与轨道炮实验中的泪滴状刨坑形貌(图 1)符合较好。与二维计算[10-12]相比，三维模拟能比较清晰地反映出材料塑性波从冲击核心区域向空间三维的扩展过程及最终形成的泪滴状刨坑形貌。

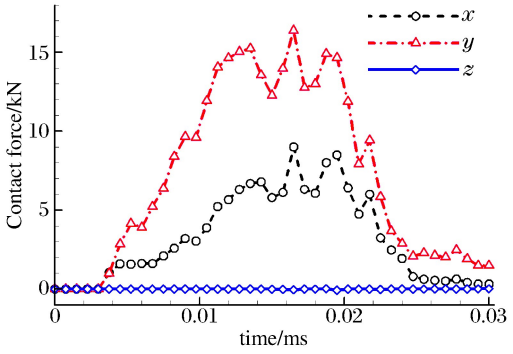

图 4　枢轨接触面三个方向接触力变化曲线

Fig. 4　Contact forces in three directions varying with time

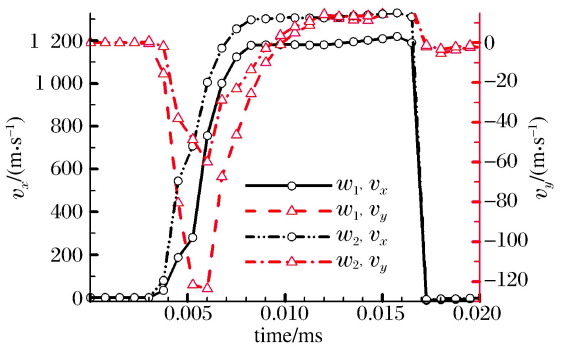

图 5　2 个质点受冲击时的速度变化曲线

Fig. 5　Velocities of two particles varying with time during impacting

对刨削形成过程的数值模拟表明，轨道刨削是在一个瞬态的局域高压扰动下产生的。轨道微颗粒诱发的瞬态局域冲击使得枢轨界面材料发生高应变率的塑性流动和强化等热力学行为。从上游而来的电枢与轨道表面的局域高速冲击产生了瞬时的能量交换，使得受冲击的轨道材料变成了高热高压的金属流，并以斜角度侵彻下游的轨道表面，轨道材料发生塑性流动。塑性变形从冲击扰动点开始，向下游沿 3 个方向逐渐扩展，最终形成了泪滴状的刨坑。

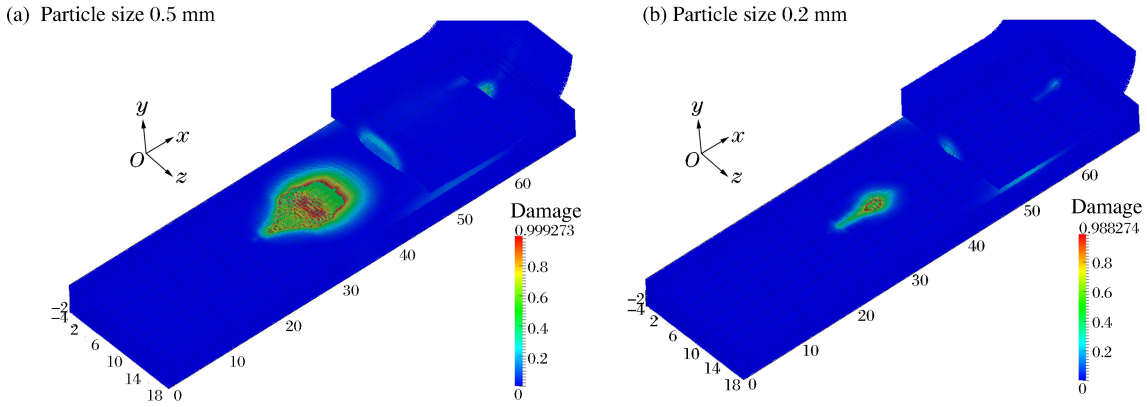

图 6 1.5 km/s 冲击速度下数值模拟出的泪滴状刨坑

Fig. 6 Tear-drop gouge craters from numerical simulation at 1.5 km/s

3.2 影响因素分析

保持枢轨结构及材料不变,电枢仍赋予 1.5 km/s 的初始速度,逐渐减小微颗粒的半径尺寸,分析其对刨削的影响。结果显示,随着颗粒尺寸的减小,冲击形成的刨坑尺寸也逐渐减小,颗粒半径为 0.2 mm 时形成的泪滴状刨坑如图 6(b)所示。计算结果随颗粒半径的进一步减小呈现出收敛特征,当颗粒半径减小到 0.1 mm 以下后,轨道表面泪滴状刨坑逐渐消失,相应的,电枢的损伤破坏也逐渐减轻。

改变电枢与轨道颗粒发生冲击的速度,分析轨道刨削受冲击速度的影响。结果显示,随着冲击速度的提高,形成的刨坑变深变宽,电枢的损伤面积也变大,如图 7 所示。计算得到的 7075 铝电枢与无氧铜轨道发生刨削的临界速度约为 1.4 km/s,冲击速度低于 1.4 km/s 后,轨道上不再形成泪滴状刨坑,而是出现了磨损擦伤,如图 8 所示,与刨坑不同,磨损形成的沟槽较浅,且沿生长方向基本保持恒定的宽度和深度。随着电枢冲击速度的减小,磨损也逐渐减轻,直至消失。这是由于刨削的形成是轨道表面受电枢高速冲击扰动产生的高压金属流斜侵彻轨道的结果;随着速度的减小,冲击维持时间内峰值压力下降明显,如图 9 所示,形成的金属流的动能也随之减小,对轨道的侵彻效果也变弱。

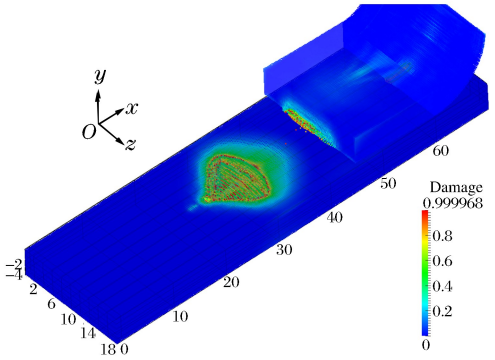

图 7 2.0 km/s 速度下数值模拟出的泪滴状刨坑

Fig. 7 Gouging morphology from simulation at 2.0 km/s

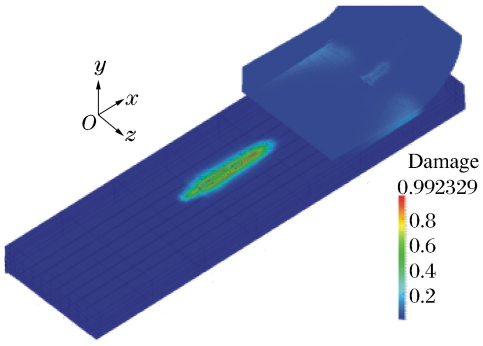

图 8 1.0 km/s 速度下模拟出的轨道擦伤沟槽

Fig. 8 A galling track from simulation at 1.0 km/s

文献[6]中的实验也发现,在到达刨削临界速度之前,轨道上有磨损擦伤产生,如图 10 所示,当速度超过 0.8 km/s 后比较明显,由磨损至产生刨削是一个逐渐演变的过程。文献[4-5]的轨道炮刨削实验,分别得出 7075 铝电枢和 T2 纯铜轨道的刨削临界速度为 1.35 和 1.30 km/s,本文数值模拟的结果与之接近。由于刨削易发生在高速段,因此实际工程应用中,可通过提高高速段轨道的加工平整度或提高高速段轨道材料的强度来削弱及抑制刨削损伤的出现。

另外,本文中还计算分析了电枢头部倾角对刨削的影响,电枢速度及颗粒尺寸保持不变,改变电枢的头部倾角进行计算。结果显示,随着电枢倾角的增大,冲击形成的刨坑也变小变浅。这是因为,改变

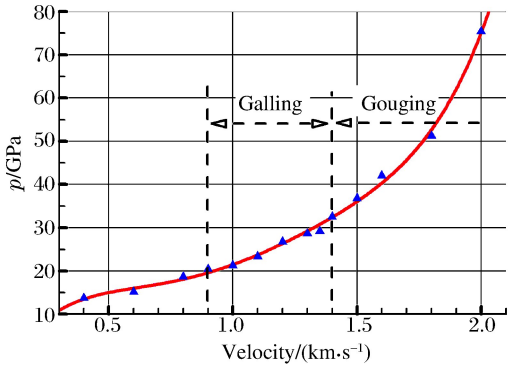

图 9　冲击峰值压强随速度的变化

Fig. 9　The peak impact pressure at different velocities

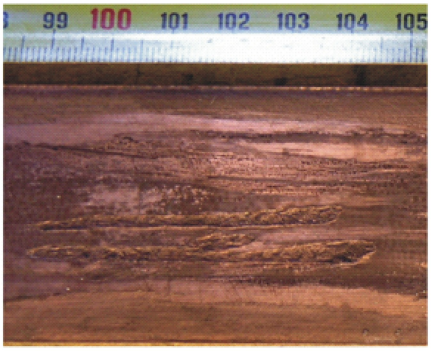

图 10　实验中轨道上出现的磨损擦伤沟槽[6]

Fig. 10　Galling tracks on the rail from an experiment[6]

电枢头部倾角，相当于改变了电枢与微颗粒发生碰撞的角度，导致冲击碰撞所形成的高压金属流对轨道的侵彻角度发生变化，侵彻效果也自然受到影响。因此在工程实际应用中，设计合适的电枢头部倾角对削弱轨道的刨削损伤也很重要。

4　结　论

基于轨道炮结构特点及冲击热力学理论，采用物质点法构建了微颗粒诱发的刨削三维模型，对轨道刨削的形成过程进行了数值模拟，分析了刨削产生机理以及一些影响因素，得到以下主要结论：

（1）刨削是在瞬态的局域高压扰动下产生的，电枢与轨道表面的局域高速冲击产生了瞬时的能量交换，使得受冲击的轨道材料变成高热高压的金属流斜角度侵彻下游轨道表面，塑性变形从冲击点开始迅速扩展，形成了泪滴状刨坑；

（2）对于特定的枢轨材料和结构形式，刨削的产生存在速度阈值；超过该阈值，随着速度增加，刨削越严重；低于该阈值，轨道出现磨损擦伤，并随着冲击速度的进一步减小而减轻。另外，减小颗粒尺寸以及增大电枢头部倾角，均可降低刨削损伤；

（3）基于本文中对轨道炮刨削的数值模拟结果，表明物质点法用于轨道刨削这类冲击动力学问题的计算具有突出的优点，一是便于处理高速滑移界面上的材料塑性流动大变形破坏问题，避免了有限元计算容易出现的网格畸变；二是在应变梯度很大的局域内不必划分很细密的网格也可以较方便地模拟出断裂失效等问题，有着较高的计算效率。

本文中，采用数值方法模拟了轨道刨削的形成过程并分析了颗粒大小、冲击速度、电枢倾角的影响，下一步的研究将更多地考虑枢轨材料与结构的影响。

参考文献：

[1]　李军，严萍，袁伟群. 电磁轨道炮发射技术的发展与现状[J]. 高电压技术，2014，40(4)：1052-1064.
Li Jun, Yan Ping, Yuan Weiqun. Electromagnetic gun technology and it's development[J]. High Votage Engineering, 2014，40(4)：1052-1064.

[2]　Graff K F, Dettloff B B. The gouging phenomenon between metal surfaces at very high sliding speeds[J]. Wear, 1969，14(2)：87-97.

[3]　Cinnamon J D, Palazotto A N, Szmerekovsky A G. Further refinement and validation of material models for hypervelocity gouging impacts[J]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2008，46(2)：317-327.

[4]　Stefani F, Parker J V. Experiments to measure gouging threshold velocity for various metals against copper[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999，35(1)：312-316.

[5]　Persad C, Prabhu G, White G, et al. Characterization of hypervelocity gouge craters in rail conductors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997，33(1)：401-405.

[6]　Watt T J, Clay C E, Bassett P M, et al. The effect of surface indentations on gouging in railguns[J]. Wear, 2014，

310(1/2):41-50.

[7] Barber J P, Bauer D P, Ahmadi R. Contact phenomena at hypervelocities[J]. Wear, 1982,78(1/2):163-169.

[8] Barker L M, Trucano T G, Susoeff A R. Railgun rail gouging by hypervelocity sliding contact[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1989,25(1):83-87.

[9] 金龙文,雷彬,李治源,等.轨道炮刨削形成机理分析及数值模拟[J].爆炸与冲击,2013,33(5):537-543.
Jin Longwen, Lei Bin, Li Zhiyuan, et al. Formation mechanism analysis and numerical simulation of railgun gouging[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(5):537-543.

[10] Barker L M, Trucano T G, Susoeff A R. Gun barrel gouging by sliding metal contact at very high velocities[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1989,1(25):83-87.

[11] Bourell D L, Persad C. Simulation of railgun gouging[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999,35(1):274-276.

[12] Zhu Rengui, Zhang Qian, Li Zhiyuan, et al. Impact physics model and influencing factors of gouging for electromagnetic rail launcher[C]//17th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology. La Jolla, California, USA, 2014.

[13] 刘峰,赵丽曼,张晖辉,等.电磁轨道炮刨削的形成机理及仿真分析[J].高压物理学报,2015,29(3):199-205.
Liu Feng, Zhao Liman, Zhang Huihui, et al. Formation mechanism and simulation analysis of railgun gouging [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2015,29(3):199-205.

[14] 廉艳平,张帆,刘岩,等.物质点法的理论和应用[J].力学进展,2013,43(2):237-264.
Lian Yanping, Zhang Xiong, Liu Yan, et al. Material point method and its applications[J]. Advances in Mechanics, 2013,43(2):237-264.

[15] 张雄,廉艳平,刘岩,等.物质点法[M].北京:清华大学出版社,2013:7-13.
Zhang Xiong, Lian Yanping, Liu Yan, et al. Material point method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013:7-13.

3D numerical research of railgun gouging mechanism based on material point method

Wu Jinguo, Lin Qinghua, Wan Gang, Jin Yong, Li Haiyuan, Li Baoming

(*National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*)

Abstract: Based on the structural features of the railgun and the theories of impact thermodynamics, a 3D gouging model containing a micro particle was established using the material point method to simulate the formation process of the rail gouging, and the gouging mechanism and some influencing factors were also analyzed. The results show that the local impact between the armature and the rails at a high velocity produces transient energy exchanges, thus simultaneously forming metal flows with high energy and high pressure that penetrate obliquely into the rail and cause the formation of gouging, for which there is a threshold velocity to produce. As the armature velocity increases, the gouging damage gets more serious. On the other hand, the galling damage occurs when the armature velocity is below the threshold velocity. Both controlling the particle size within a certain range and increasing the head angle of the armature will help to suppress the formation of gouging.

Keywords: impact dynamics; material point method; railgun; gouging; hypervelocity

(责任编辑 王小飞)