

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20171673

纤维增强塑料注射充模过程中纤维对模具的冲蚀磨损模拟

蒋奔, 翟明, 任建行, 马世恒, 申长雨

(郑州大学力学与工程科学学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对塑料模具在玻璃纤维冲蚀下造成的表面磨损问题, 运用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立了模具材料多颗粒冲蚀有限元模型, 进行三维显式冲击动力学计算, 研究纤维在不同冲蚀速度和冲蚀角度下对模具的冲蚀规律, 分析冲蚀机理。结果表明, 玻璃纤维对模具的冲蚀过程以微切削为主; 玻璃纤维对模具的冲蚀磨损率随着冲蚀速度的增加而增加, 随着冲蚀角度的增加而呈现先增加后减小的趋势。

关键词: 纤维增强塑料; 注射成型; 充模; 模具冲蚀; 模拟

中图分类号: TQ 320.66

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2018) 07—3174—07

Simulation of fiber erosion on mold during filling process of fiber reinforced plastic injection molding

JIANG Ben, ZHAI Ming, REN Jianxing, MA Shiheng, SHEN Changyu

(College of Mechanics and Engineering Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China)

Abstract: The surface erosion wear of plastic mold caused by the impact of glass fibers was studied. The finite element software ANSYS/LS-DYNA was employed to study the erosion process. A multi-particle erosion finite element model was established and a three-dimensional explicit impact dynamic scheme was carried out to analyze the erosion of the mold under different impacting velocities and incident angles to clarify the erosion mechanism. The results showed that the erosion of glass fibers to the mold was dominated by micro-cutting, and the erosion rate increased with the rising of impacting velocity and tended to rise and decline with the increasing of incident angle.

Key words: fiber reinforced plastics; injection molding; filling process; mold erosion wear; simulation

引言

玻璃纤维增强塑料是以合成树脂和玻璃纤维为原料制作而成的具有优异力学性能的功能材料, 在汽车、飞机、高铁等行业得到了广泛应用^[1-2]。但在玻璃纤维增强塑料制品的成型加工过程中, 塑料中含有的玻璃纤维随着基体的流动, 以一定的速度和角度对模具表面进行冲击, 造成材料损耗, 使模具产生磨损, 高速注射时, 磨损尤为严重。模具的表面磨损, 不仅缩短了模具的服役寿命, 也严重影

响了成型制品的质量, 造成产品不合格。研究塑料成型加工中纤维对模具材料的磨损情况, 掌握磨损规律, 对提高模具的抗磨损性和服役寿命, 具有重要意义。

在控制和减少玻璃纤维对模具的磨损方面, 专家学者进行了较多研究。如, Martinez-Mateo 等^[3]研究了玻璃纤维对模具及塑料制品表面粗糙度的影响; Vite-Torres 等^[4]和 Laguna-Camacho 等^[5]针对不同的加工材料, 研究了其磨损状况; Silva 等^[6]研究了持续冲蚀作用下玻璃纤维对模具表面磨损的影

2017-12-20 收到初稿, 2018-03-20 收到修改稿。

联系人: 翟明。第一作者: 蒋奔 (1993—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1304107); 大学生创新创业训练计划项目 (2017cxcy091)。

Received date: 2017-12-20.

Corresponding author: Prof. ZHAI Ming, mzhai@zzu.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (U1304107) and College Students Innovation and Entrepreneurship Training Program(2017cxcy091).

响,并分析了冲蚀磨损机理; Bull 等^[7-8]通过磨损试验机研究了玻璃纤维填充尼龙材料对靶材的冲蚀磨损,给出了冲蚀磨损率,并利用扫描电镜观察靶材磨损后的形貌,比较了几种靶材的抗冲蚀能力。这些研究都是采用试验手段,探索玻璃纤维对模具的冲蚀机理及影响因素,但是,玻璃纤维与模具的动态碰撞接触过程复杂,磨损过程与冲蚀条件(如冲蚀速度、冲蚀角度)、纤维特征(如硬度、形状等)、模具性能(如硬度等)密切相关,影响因素较多,试验研究存在较大的局限。数值模拟方法可以模拟试验技术无法或很难实现的复杂问题,是研究冲蚀磨损的有效手段。

本文利用有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA,建立了纤维对模具冲蚀过程的有限元模型,通过显式动力学分析,研究了纤维在不同冲蚀速度和冲蚀角度下对模具的冲蚀规律,探讨了模具的冲蚀磨损机理。

1 显式动力学方法

冲蚀磨损问题的动力学方程为

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = F \quad (1)$$

其中, M 为质量阵, C 为阻尼阵, K 为刚度阵。

对于上述方程 LS-DYNA 采用显式中心差分算法求解,显式中心差分算法对速度和加速度进行中心差分,即^[9]

$$\begin{cases} \ddot{U}_t = \frac{1}{\Delta t^2}(U_{t-\Delta t} - 2U_t + U_{t+\Delta t}) \\ \dot{U}_t = \frac{1}{2\Delta t}(U_{t+\Delta t} - U_{t-\Delta t}) \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)得

$$\widehat{M}U_{t+\Delta t} = \widehat{R}_t \quad (3)$$

其中, $\widehat{M} = \frac{1}{\Delta t^2}M + \frac{1}{2\Delta t}C$, $\widehat{R}_t = F_t - \left(K - \frac{2}{\Delta t^2}M\right)U_t - \left(\frac{1}{\Delta t^2}M - \frac{1}{2\Delta t}C\right)U_{t-\Delta t}$, F_t 为载荷向量。

假设在 $0, t^1, t^2, \dots, t^n$ 时刻节点的加速度、速度、位移都为已知量,求解式(3)可以得出 $(t+\Delta t)$ 时刻的节点位移,然后根据几何方程和物理方程可以算出 $(t+\Delta t)$ 时刻的单元的应力和应变。中心差分算法是有条件稳定的,时间步长必须小于求解临界步长,即

$$\Delta t \leq \Delta t_{cr} = \frac{2}{\omega_{\max}} \quad (4)$$

其中, Δt_{cr} 为临界时间步长, $\omega_{\max}$ 为系统最高固有

频率。

显示动力分析中,临界时间步长依赖于最小的单元长度。在计算过程中,如果结构的变形比较大,临界步长就会变得非常小,有些情况下会无法计算,这时候要采用质量缩放来避免结构中的最小单元对计算步长的影响。

2 计算模型

2.1 材料模型

模具材料选用 45 号模具钢。45 钢具有良好的韧性,可采用各向同性的黏塑性 Johnson-Cook 本构模型来表征其强度随应变、应变率和温度的变化。Johnson-Cook 模型结构简单,使用方便,是冲击动力学领域广泛应用的一种模型,表达式为^[10]

$$\sigma = \left[A + B(\bar{\epsilon}^p)^n \right] \left[1 + c \ln(\dot{\epsilon}^p / \dot{\epsilon}_0) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (5)$$

式中, A 、 B 、 c 、 m 、 n 为材料参数,由实验确定 σ 为 von Mises 应力; $\bar{\epsilon}^p$ 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率; $\dot{\epsilon}^p$ 为应变率; T_r 为参考温度,一般取室内温度; T_m 为材料的熔点; T 为模具温度。

为了模拟模具表面的磨损情况并定量计算冲蚀率,还需要定义模具材料的失效准则。假定模具材料的塑性应变累积达到一定的程度后发生断裂失效,定义失效参数

$$D = \sum \frac{\Delta \bar{\epsilon}^p}{\epsilon_f} \quad (6)$$

式中, D 为失效参数, $\Delta \bar{\epsilon}^p$ 为等效塑性应变增量, ϵ_f 为失效应变。 ϵ_f 可表示为^[11]

$$\epsilon_f = \left[d_1 + d_2 \exp(d_3 \delta^*) \right] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 + d_5 \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right) \right] \quad (7)$$

式中, d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 、 d_5 为材料参数, $\delta^* = p / \sigma_e$, 为压力与 Mises 等效应力的比值。在冲蚀模拟过程中,靶材被离散为一系列有限单元,通过计算各个单元的累积塑性应变,来确定失效参数 D 的值。当某一单元的失效参数 $D=1$ 时,该单元发生断裂失效,这是可将其从模型中删除,以模拟材料的磨损情况。材料的冲蚀率由最终失效单元的数量来确定。45 钢的相关材料参数如表 1 所示, ρ 、 G 、 ν 、 c_p 分别表示密度、剪切模量、泊松比和比热容^[12]。

玻璃纤维碰撞后变形比较小,实际生产中并不关注其变形和应力变化情况,因此,为了减少计算分析时间,加快计算速度,将玻璃纤维简化为刚体。表 2 给出了玻璃纤维相关的材料参数。

表 1 45 钢的材料参数

Table 1 45 steel material parameters

Parameter	Value
$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7850
G/GPa	80.7
ν	0.3
A	507
B	320
N	0.28
C	0.064
M	1.06
T_m/K	1773
$C_p/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	480
d_1	0.1
d_2	0.76
d_3	1.57
d_4	0.005
d_5	-0.84

表 2 玻璃纤维的物理参数

Table 2 Physical parameters of glass fiber

Parameter	Value
E/GPa	80
$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2.7
ν	0.22

2.2 有限元模型

以压痕断裂理论为基础的冲蚀磨损研究都是针对单粒子冲蚀过程,但是实际冲蚀过程常常是多个粒子的重复冲击,因此,采用一个粒子对冲蚀过程进行模拟不够准确,3个或者3个以上粒子重复冲击才可以得出较为准确的冲蚀率。经过前期模拟,本文建立了四粒子冲蚀模型,选取4个纤维颗粒对靶材进行冲蚀来模拟模具的冲蚀磨损过程。使用 ANSYS/LSDYNA14.0 软件建模,单位制采用 $\text{g} \cdot \mu\text{m} \cdot \mu\text{s}$ 制。玻璃纤维被模拟为底面半径为 $6 \mu\text{m}$ 的圆柱,采用 solid168 单元离散。靶材为长方体,尺寸为 $60 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$,采用 solid164 单元离散。玻璃纤维和靶材之间采用面面侵蚀接触算法,库仑摩擦因数取为 0.2。纤维的外表面设置为主面,靶材被冲击点及其临近区域被设置为从面,以保证靶材上的失效单元被删除后,剩下的单元仍然能够保持接触。不考虑玻璃纤维的旋转自由度,对靶材底面施加固定约束,并对靶材的四周及底面施加非反射边界条件,来减少冲击的影响^[13]。划分网格时,在接触区域进行网格细化,以减少单元删除对计算结果的影响,提高计算结果的精度,便于分析冲蚀磨损情况。有限元模型图 1 所示。

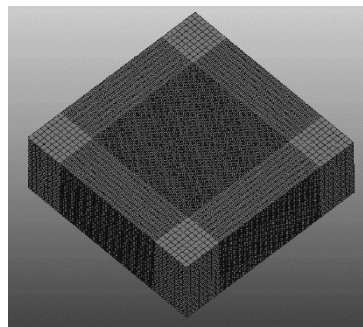


图 1 有限元模型

Fig.1 Finite element model

3 结果与讨论

3.1 冲蚀过程分析

模拟分析 4 个纤维颗粒冲击靶材时的冲蚀磨损情况。图 2 给出了靶材的冲蚀体积与冲蚀颗粒数目之间的关系,可以看出,随着冲蚀颗粒数目的增加,靶材被冲蚀掉的体积也在增加,但是,每个颗粒冲蚀掉的体积基本保持不变。这说明玻璃纤维冲蚀模具的过程是以微切削磨损为主,每一次冲蚀都是在靶材表面犁削出一个新的表面,当第二个粒子再冲击时,就会在新的表面再次发生犁削,每次颗粒冲击对靶材的影响基本相同。

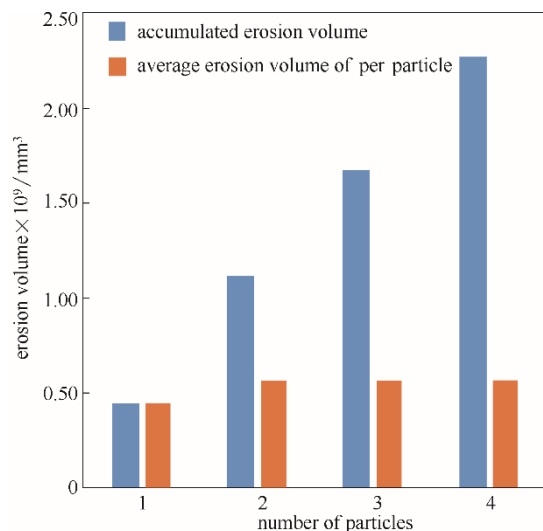


图 2 靶材冲蚀体积随冲蚀颗粒数目的变化

Fig.2 Erosion volume varies with number of eroded particles

图 3 给出了每次纤维颗粒冲击靶材后靶材的体积损失情况。根据冲蚀磨损的微切削理论,玻璃纤维冲击靶材时,圆柱形磨粒像一把刀子与靶材发生刮擦,将材料切除而发生磨损。从靶材被冲击后的冲蚀形貌可以看出,随着冲蚀次数的增加,冲蚀坑的面积扩大,靶材损失的体积增加。另外,因为韧

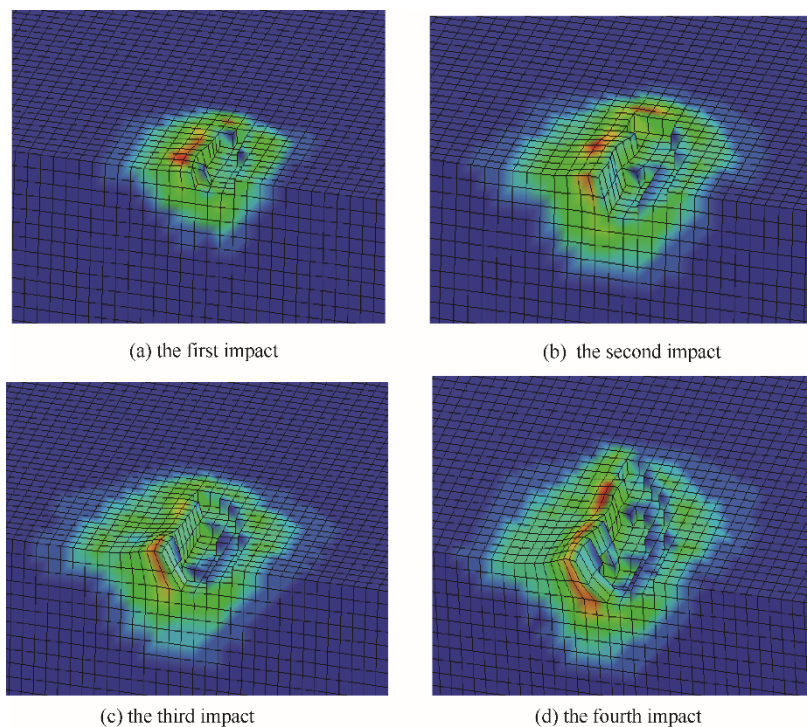


图3 靶材的体积损失情况

Fig.3 Target volume loss

性材料的延展性比较好,在纤维冲击作用下冲蚀坑周围形成了材料的堆积,于是,靶材在磨粒冲击的方向产生了凸唇^[14-16]。随着冲击次数的增多,冲蚀坑周围堆积的材料也越来越多,凸唇的高度变大,造成模具表面粗糙度增加,这和 Liu 等^[17-19]的实验结果一致。

3.2 冲蚀角度对冲蚀磨损的影响

保持纤维颗粒大小与冲蚀速度不变,只改变纤维的冲蚀角度,研究冲蚀角度变化对靶材冲蚀磨损过程的影响,结果如图4所示。可以看出,随着玻璃纤维入射轨迹与靶材被冲蚀表面夹角的增加,靶材的冲蚀磨损率先增加后减小,在冲蚀角度为 10° 时冲蚀磨损率达到最大。这是因为纤维对靶材进行的小角度冲击过程类似磨粒磨损,磨损的主要原因是纤维对靶材的冲击破碎与切削。冲击过程中纤维的运动可以分解为两个部分:垂直于靶材的法向运动和沿靶材表面的切向运动,法向运动使得纤维射入靶材,切向运动则使纤维剔除部分靶材材料而造成靶材磨损。当冲蚀角较小时,纤维的法向速度比较小,不能射入靶材或者射入很浅,因此,其切削作用较弱,对靶材的磨损较小^[20-21]。随着冲蚀角的增大,纤维的法向速度增加,射入靶材的深度较大,进入靶材后对靶材的微切削作用较强,冲蚀磨损量

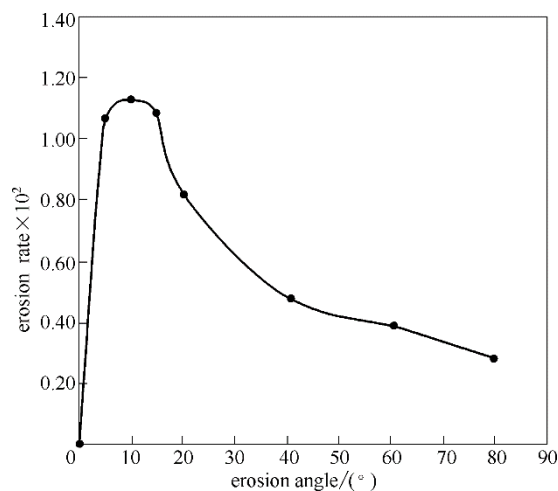


图4 冲蚀率随冲蚀角度的变化

Fig.4 Erosion rate changes with erosion angle

也相应增加。但随着冲蚀角的进一步增大,纤维的切向速度减少,切削作用减弱,靶材的冲蚀磨损量减小。冲蚀磨损量随冲蚀角度的变化规律与实验结果^[22-25]相一致。

纤维的冲蚀角度除了影响对靶材的切削作用外,也影响了纤维冲击靶材时与靶材的接触时间。从图5可以看出,冲蚀角度越大,纤维与靶材的接触时间越短。纤维与靶材接触时间的长短也一定程

度上影响了靶材的冲蚀磨损量。冲蚀接触时间越长,纤维在模具表面的犁削距离越大,造成冲蚀面积增大,纤维对靶材的磨损增大。因此,低角度冲蚀时,纤维与靶材的较长接触时间也是造成低角度冲蚀靶材磨损率高的一个原因。

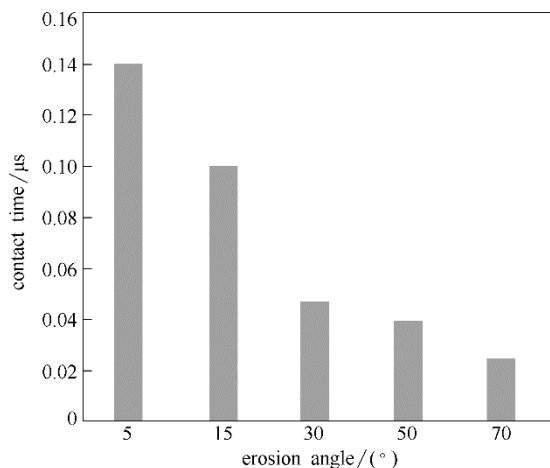


图 5 接触时间随冲蚀角度的变化

Fig.5 Contact time changes with erosion angle

3.3 冲蚀速度对冲蚀磨损的影响

纤维对靶材的冲蚀磨损不仅与冲蚀角度有关,还与冲蚀速度有关。图 6 给出了冲蚀角度为 30°时靶材的冲蚀率随纤维冲蚀速度的变化。可以看出,随着纤维冲蚀速度的提高,靶材的冲蚀磨损率不断增加。这是因为,在纤维对靶材的冲击过程中,纤维的一部分能量传递给靶材,靶材冲蚀磨损率的大小与纤维转移到靶材的能量有关。粒子的速度越高,冲击时传递到靶材的能量越大,靶材的冲蚀磨损量就越大^[26-27]。从图 6 还可以看出,纤维对靶材的冲蚀率随冲蚀速度的增加而呈指数增加,即

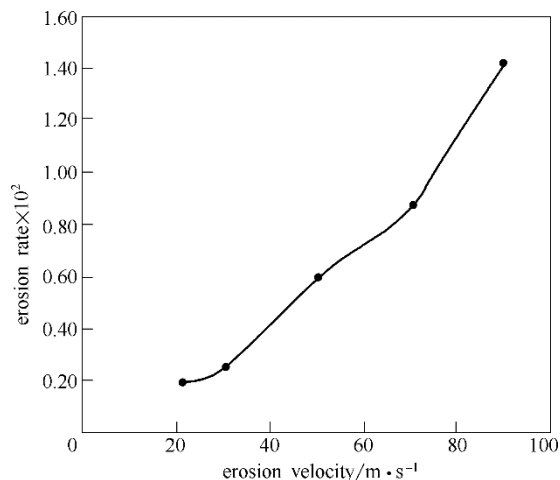


图 6 冲蚀率随速度的变化

Fig.6 Variation of erosion rate with erosion velocity

$$w \propto v^n \quad (8)$$

这与庞佑霞等^[28]用沙粒冲蚀 45 钢的实验结果相符合。利用模拟数据,经过拟合,可得 $n=1.54$ 。

3.4 冲蚀角度对表面粗糙度的影响

在塑料成型过程中,模具表面粗糙度对产品表面质量有较大影响,较大的表面粗糙度往往造成产品质量不合格^[29]。在纤维冲蚀模具的过程中,纤维在靶材上形成压痕,部分靶材材料被挤压到压痕四周形成凸唇^[30],压痕的深度和凸唇的高度决定了靶材的粗糙度。模具表面粗糙度 R 可以表征为

$$R=R_1-R_2 \quad (9)$$

式中, R_1 为靶材基面到靶材最高点的距离, R_2 为靶材基面到冲蚀最深处的距离。根据模拟数据,可以计算得到不同冲蚀角度下靶材的表面粗糙度,如图 7 所示。可以看出,随着纤维冲蚀角度的增加,靶材的表面粗糙度先增加后减小,在冲蚀角度为 20° 时表面粗糙度达到最大。由于粗糙度的最大值发生在低冲蚀角度,说明玻璃纤维磨粒的犁削作用是影响粗糙度的重要因素。

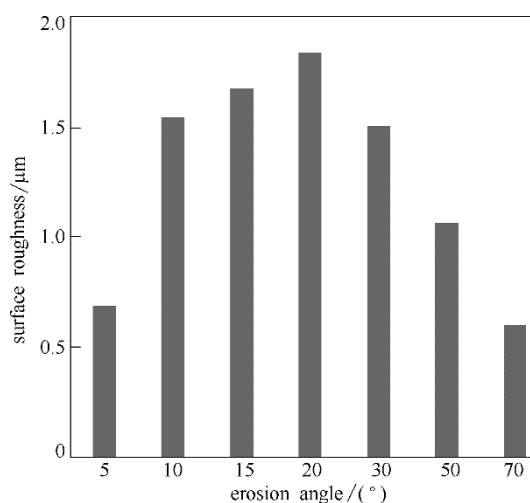


图 7 不同角度下靶材的表面粗糙度

Fig.7 Variation of surface roughness with erosion angle

4 结 论

(1) 玻璃纤维磨粒冲蚀靶材的主要方式为微切削磨损,靶材表面出现了犁削,冲击方向出现了堆积物。

(2) 纤维的冲蚀速度和冲蚀角度对靶材的冲蚀率有较大影响。靶材的冲蚀率随着纤维冲击速度的增加而呈指数的形式增加,随着冲蚀角度的增加则呈现先增加后减小的趋势。

(3) 靶材表面粗糙度随着冲击角的增加呈现先

增加后减小的趋势,在冲蚀角为 20° 时达到最大。玻璃纤维磨粒的犁削作用是影响靶材粗糙度的重要因素。

符 号 说 明

- A —— J-C 屈服应力, GPa
 B —— 硬化系数
 c —— 应变率常数
 c_p —— 比热容, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
 D —— 失效参数
 d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 —— J-C 实验参数
 E —— 弹性模量, GPa
 G —— 切变模量, GPa
 m —— 软化指数
 n —— 应变硬化指数
 p —— 压力, Pa
 R, R_1, R_2 —— 分别表示粗糙度、靶材基面到靶材最高点的距离、靶材基面到冲蚀最深处的距离, μm
 T, T_i, T_m —— 分别表示试件温度、室温、融化温度, K
 v —— 速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
 w —— 冲蚀率
 δ, δ^* —— 分别为等效应力、压力与等效应力的比值, Pa
 $\dot{\varepsilon}, \dot{\varepsilon}_0, \dot{\varepsilon}^*, \dot{\varepsilon}_f, \Delta \varepsilon^p$ —— 分别为应变率、参考应变率、等效塑性应变、失效应变、累积塑性应变
 ρ —— 密度, $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
 ν —— 泊松比

References

- [1] 宋传江, 王虎. 玻璃纤维增强复合材料工程化应用进展[J]. 中国塑料, 2015, **29**(3): 9-15.
SONG C J, WANG H. Engineering application research of glass fiber reinforces composite materials[J]. China Plastics, 2015, **29**(3): 9-15.
- [2] 薛忠民. 中国玻璃钢/复合材料的发展回顾与展望[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015, (1): 5-12.
XUE Z M. Retrospect and prospect of development of development of FPR/CM in China[J]. FPR/CM, 2015, (1): 5-12.
- [3] MARTINEZ-MATEO I, CARRION-VILCHES F J, SANES J. Surface damage of mold steel and its influence on surface roughness of injection molded plastic parts[J]. Wear, 2011, **271**: 2512-2523.
- [4] VITE-TORRES M, LAGUNA-CAMACHO J R, BALDENBRO-CASTILLO R E, *et al.* Study of solid particle erosion on AISI 420 stainless steel using angular silicon carbide and steel round grit particles[J]. Wear, 2013, **301**: 383-389.
- [5] LAGUNA-CAMACHO J R, MARQUINA-CHAVEZ A, MENDEZ-MENDEZ J V, *et al.* Solid particle erosion of AISI 304, 316 and 420 stainless steels[J]. Wear, 2013, **301**: 398-405.
- [6] SILVA F J G, MARTINHO R P, ALEXANDRE R J D, *et al.* Increasing the wear resistance of molds for injection of glass fiber reinforced plastics[J]. Wear, 2011, **271**: 2494-2499.
- [7] BULL S J, ZHOU Q S. A simulation test for wear in injection moulding machines[J]. Wear, 2001, **249**: 372-378.
- [8] BULL S J, DABIDSON R I, FISHER E H, *et al.* A simulation test for the selection of coatings and surface treatments for plastics injection moulding machines[J]. Surface & Coatings Technology, 2000, **130**: 257-265.
- [9] 白金泽. LS-DYNA 理论基础与应用分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 33-36.
BAI J Z. The Theoretical Basis and Application Analysis of LS-DYNA[M]. Beijing: Science Press, 2005: 33-36.
- [10] BITTER J G. A study of erosion phenomena[J]. Wear, 1963, **6**(1): 5-21.
- [11] JOHNSON G R. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, **21**(1): 31-48.
- [12] 陈刚, 陈小伟, 陈忠富. A3 钢钝头弹撞击 45 钢板破坏模式的数值分析[J]. 爆炸与冲击, 2007, **27**(5): 390-397.
CHEN G, CHEN X W, CHEN Z F. Simulations of A3 steel blunt projectiles impacting 45 steel plates[J]. Explosion and Shock Waves, 2007, **27**(5): 390-397.
- [13] WANG Y F, YANG Z G. Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials[J]. Wear, 2009, **265**: 871-888.
- [14] TALAFFOLI M, PAPINI M. Material deformation and removal due to single particle impacts on ductile materials using smoothed particle hydrodynamics[J]. Wear, 2015, **322/323**: 41-50.
- [15] AZIMIAN M, SCHMITT P, BART H J. Numerical investigation of single and multi impacts of angular particles on ductile surfaces[J]. Wear, 2015, **342/343**: 252-261.
- [16] TAKAFFOLI M, PAPINI M. Numerical simulation of solid particle impacts AL6061-T6 (I): Three-dimensional representation of angular particles[J]. Wear, 2012, **292/293**: 100-110.
- [17] LIU Z G, WAN S, NGUYEN V B, *et al.* A numerical study on the effect of particle shape on the erosion of ductile materials[J]. Wear, 2014, **313**: 135-142.
- [18] RODRIGUEZ R, MARTINEZ D, PEREZ A, *et al.* Erosion wear in heat treated tool steels used in core boxes at automotive foundries[J]. Wear, 2007, **263**: 301-308.
- [19] OJALA N, VALTONEN K, ANTIKAINEN A, *et al.* Wear performance of quenched wear resistant steels in abrasive slurry erosion[J]. Wear, 2016, **354/355**: 21-31.
- [20] RODRIGUEZ E, FLORES M, PEREZ A, *et al.* Erosive wear silica sand on AISI H13 and 4140 steels[J]. Wear, 2009, **267**: 2109-2115.
- [21] LIU R, YAO J H, ZHANG Q L, *et al.* Sliding wear and solid-particle erosion resistance of a novel high-tungsten stellite alloy[J]. Wear, 2015, **322/323**: 41-50.
- [22] OKONKWO P C, MOHAMED A M A, AHMED E. Influence of particle velocities and impact angles on the erosion mechanisms of AISI 1018 steel[J]. Advanced Materials Letters, 2015, **6**(7): 653-659.
- [23] TALAFFOLI M, PAPINI M. Finite element analysis of single impacts of angular particles on ductile targets[J]. Wear, 2009, **267**: 144-151.
- [24] RIGAUD E, LEBOT A. Influence of incidence angle on wear induced by sliding impacts[J]. Wear, 2013, **307**: 68-74.
- [25] LAGUNA-CAMACHO J R, HERNANDEZ-ROMORO I,

- ESCALANTE-MARTINEZ J E, *et al.* Erosion wear of AISI 420 stainless steel caused by walnut shell particles[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2015, **68**(4): 633-647.
- [26] EITOBGY M S, NG E, ELBESTAWI M A. Finite element modeling of erosive wear[J]. Machine Tools & Manufacture, 2005, **45**: 1337-1346.
- [27] LINDROOS M. RATIA V, APOSTOL M. The effect of impact conditions on the wear and deformation behavior of wear resistant steels[J]. Wear, 2015, **328**: 197-205.
- [28] 庞佑霞, 陆由南, 朱宗明. 冲蚀速度对 40Cr 材料抗冲蚀性能影响的研究[J]. 润滑与密封, 2007, **32**(4): 112-113.
- PANG Y X, LU Y N, ZHU Z M. Study on effect of impacting speed on erosion wear resistance of 40Cr[J]. Lubrication Engineering, 2007, **32**(4): 112-113.
- [29] SILVA F, MARTINHO R, ANDRADE M, *et al.* Improving the wear resistance of moulds for the injection of glass fiber-reinforced plastics using PVD coating: comparative study[J]. Coating, 2017, **7**(2): 1-11.
- [30] NGUYEN Q B, NGUYEN V B, LIM C Y H, *et al.* Effect of impact angle and testing time on erosion of stainless steel at higher velocities[J]. Wear, 2014, **321**: 87-93.