

# 反向挤压 7075/SiC<sub>p</sub> 复合材料中 SiC 颗粒 断裂失效的数值模拟研究

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2020.04.004

陈爽<sup>1,2</sup> 陈义<sup>1,2</sup>  
吴红丹<sup>3</sup> 张辉<sup>3</sup>

1. 湖南工程学院  
机械工程学院  
湖南 湘潭 411104
2. 湖南工程学院  
湖南省汽车动力与  
传动系统重点实验室  
湖南 湘潭 411104
3. 湖南大学  
材料科学与工程学院  
湖南 长沙 410082

**摘要:**应用 Deform-2D 有限元软件,在挤压温度为 300~450 °C,挤压比为 4~64,挤压速度为 2~30 mm/s 时,对喷射沉积 7075/SiC<sub>p</sub> 复合材料反向挤压过程中, SiC 颗粒的转动与断裂失效进行了数值模拟。研究表明:在反向挤压过程中, SiC 颗粒的转动是由基体合金的不均匀流动造成的;离中心轴线越远,流动不均匀性及 SiC 颗粒的转动倾向越大;基体的流动不均匀程度随挤压速度的增大和挤压比的升高而增大。在反向挤压过程中, SiC 颗粒随基体运动不协调时,在较大应力作用下易发生断裂失效,且坯料外侧断裂失效分数大;当挤压比为 4~25,挤压温度为 400~450 °C 时, SiC 颗粒断裂失效分数较小。当挤压比为 16 时,不同挤压温度下合理的挤压速度范围控制在  $t=400\text{ °C}$ 、 $v<30\text{ mm/s}$ ,  $t=425\text{ °C}$ 、 $v<20\text{ mm/s}$ ,  $t=450\text{ °C}$ 、 $v<5\text{ mm/s}$ 。

**关键词:** 7075/SiC<sub>p</sub> 复合材料; SiC 颗粒; 反向挤压; 数值模拟; 断裂失效

**中图分类号:** TG376.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2020)04-0022-08

**引文格式:** 陈爽, 陈义, 吴红丹, 等. 反向挤压 7075/SiC<sub>p</sub> 复合材料中 SiC 颗粒断裂失效的数值模拟研究 [J]. 包装学报, 2020, 12(4): 22-29.

## 0 引言

颗粒增强铝基复合材料具有比强度高、比弹性模量大、耐磨、热稳定性好和质轻等良好的综合性能,在国防、航空航天、汽车等领域得到了广泛应用<sup>[1-4]</sup>。其中, SiC 颗粒具有高强度、低密度、低膨胀系数以及价格便宜等优点,常被选作增强相<sup>[5-6]</sup>。硬而脆的 SiC 的含量、尺寸、大小、分布及运动情况,对复合材料的性能有很大影响。如肖伯律等<sup>[6]</sup>研究了 SiC 尺寸对铝基复合材料拉伸性能和断裂机制的影响,

结果表明:小尺寸 SiC ( $< 7\ \mu\text{m}$ ) 增强的铝基复合材料断裂时,以界面处基体撕裂为主,强度较高;当 SiC 体积分数为 17%,尺寸为  $7\ \mu\text{m}$  时,复合材料拉伸性能最好。孙有平等<sup>[7]</sup>的研究表明, SiC 在热挤压喷射沉积 SiC/Al 复合材料棒材中呈条带状流线分布,增大挤压比, SiC 趋于均匀分布。与基体合金相比, Yuan W. H. 等<sup>[8]</sup>采用喷射沉积与挤压共同制备的 7075/SiC<sub>p</sub> 复合材料的屈服强度、模量及耐磨性得到了较大改善。上述研究多数借助实验完成,周期长、耗费大。近年来,随着计算机技术的发展,越来越多

收稿日期: 2020-06-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51574118), 湖南省教育厅科研基金资助项目 (16C0899)

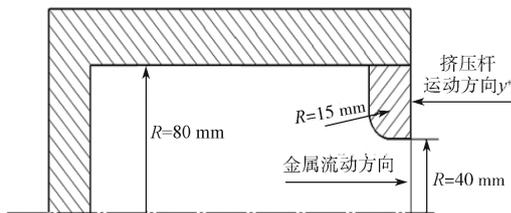
作者简介: 陈爽 (1982-), 女, 辽宁锦州人, 湖南工程学院讲师, 博士, 主要研究方向为铝基复合材料的制备与应用, 材料表面改性, E-mail: 65422713@qq.com

的研究人员利用有限元分析法模拟实验过程, 辅助分析实验结果, 可达到减小实验工作量、缩短实验周期, 降低研究成本的目的<sup>[9-10]</sup>。

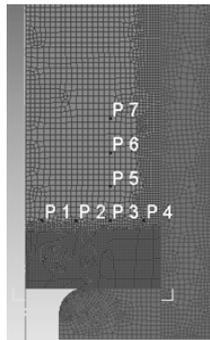
目前, 尚未见到运用有限元数值模拟法, 分析反向挤压时 SiC 颗粒的断裂情况与铝基复合材料性能之间关系的文献。本文利用 Deform-2D 有限元软件, 对喷射沉积 7075/SiC<sub>p</sub> 复合材料反向挤压过程进行数值模拟, 分析不同的挤压参数对 SiC 颗粒断裂失效的影响, 从而得到合理的反向挤压参数, 并以此指导生产实践。

## 1 模拟条件

反向挤压数值模拟所用实验材料为喷射沉积 7075/SiC<sub>p</sub> 复合材料, 其中 SiC 的体积分数为 15%, 平均尺寸为 15 μm。模拟时, 材料初始致密度为 0.9, 模具模角为 90°, 模口为倒圆角, 圆柱试样尺寸为 Φ160 × 200 mm。因试样对称故采用 1/2 轴对称模型进行模拟, 其简图如图 1a 所示, 挤压时沿 y<sup>+</sup> 轴运动。SiC 颗粒的转动与破坏与基体合金的流动情况相关, 取反向挤压过程中材料的点为研究对象, 取点情况如图 1b 所示。



a) 模型简图



b) 取点分布图

图 1 反向挤压模拟示意图

Fig. 1 Schematic diagram of backward extrusion model

反向挤压为大塑性变形, 故采用剪切摩擦模型, 其表达式<sup>[11]</sup>为

$$\tau = \mu \times k, \quad (1)$$

式中:  $\tau$  为摩擦切应力, MPa;

$\mu$  为摩擦因子,  $0 < \mu < 1$ ;

$k$  为临界切应力, MPa。

本文取  $\mu=0.3$ ,  $k=0.5\sigma_T$ , 其中  $\sigma_T$  为真应力。模拟时, 挤压温度  $t$  分别为 300, 350, 400, 450 °C, 挤压前需对模具、坯料进行预热, 模具预热温度比坯料的低 30 °C。挤压杆速度  $v$  分别为 2, 5, 10, 20, 25, 30 mm/s, 挤压比  $\lambda$  分别为 4, 10, 16, 25, 64, 其他材料参数从 Deform-2D 软件中直接调用。另外, 模拟时采用课题组已建立的 7075/SiC<sub>p</sub> 复合材料的本构方程<sup>[12]</sup>为

$$\dot{\epsilon} = 3.431 \times 10^{19} [\sinh(0.019 \ 69\sigma)]^{5.652} \exp\left(-\frac{280 \ 000}{8.31T}\right), \quad (2)$$

式中:  $\dot{\epsilon}$  为应变速率, s<sup>-1</sup>;

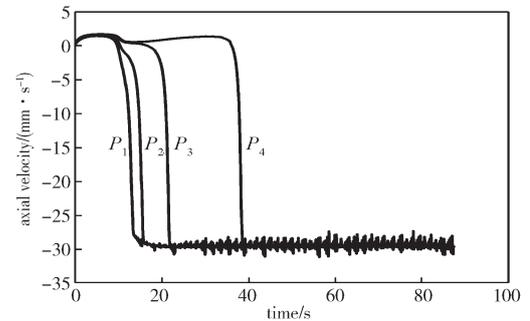
$\sigma$  为流变应力, MPa;

$T$  为热力学温度, K。

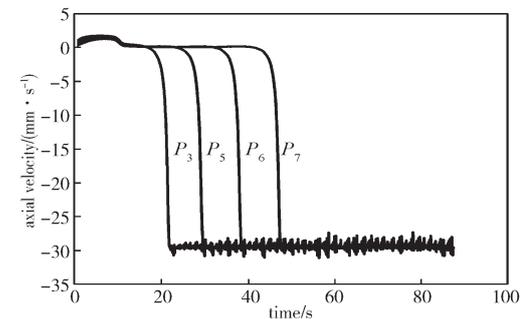
## 2 结果与讨论

### 2.1 颗粒的断裂失效情况分析

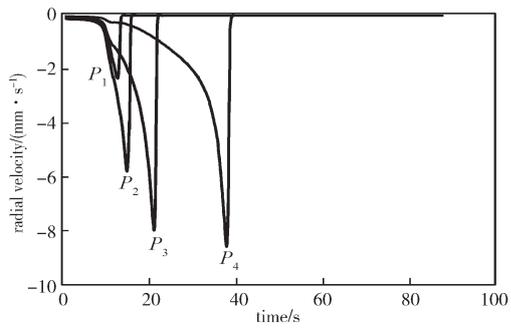
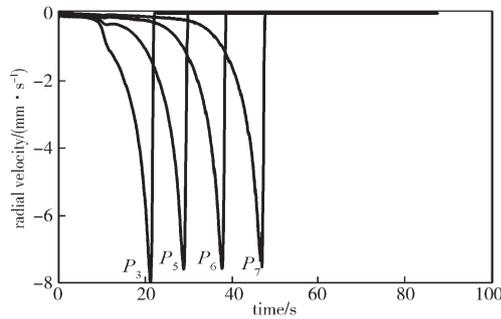
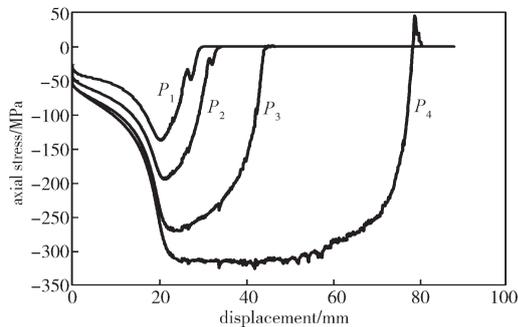
图 2 为  $t=400$  °C、 $\lambda=16$ 、 $v=2$  mm/s 时,  $P_1$ - $P_7$  点的轴向速度与径向速度随挤压时间的变化情况。图 3 为同等条件下,  $P_1$ - $P_4$  点的轴向应力与径向应力随挤压行程的变化情况。



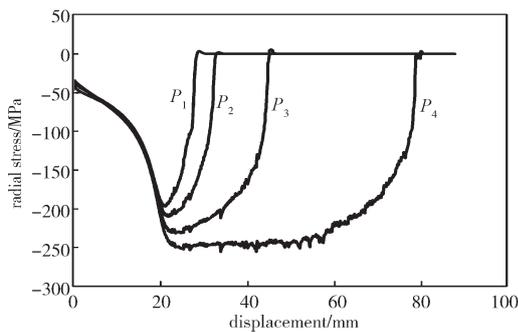
a)  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  点的轴向速度



b)  $P_3$ 、 $P_5$ 、 $P_6$ 、 $P_7$  点的轴向速度

c)  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 点的径向速度d)  $P_3$ 、 $P_5$ 、 $P_6$ 、 $P_7$ 点的径向速度图2  $P_1$ - $P_7$ 点的轴向速度与径向速度随挤压时间的变化Fig. 2 Axial velocity and radial velocity vs. extrusion time curves for  $P_1$ - $P_7$  points

a) 轴向应力



b) 径向应力

图3  $P_1$ - $P_4$ 点的轴向应力与径向应力随挤压行程的变化Fig. 3 Axial stress and radial stress vs. extrusion displacement curves for  $P_1$ - $P_4$  points

由图 2a 可知：对于径向复合材料坯料来说，靠近轴线的点被优先挤出模孔。 $P_1$ - $P_4$  点的轴向速度变化趋势相同，先随挤压杆以 2 mm/s 的速度沿轴向向远离模孔方向运动，之后转向模孔方向运动，挤出模孔时速度达到 30 mm/s。但  $P_1$ - $P_4$  点挤出模孔的时间间隔不同，离轴线越远，挤出模孔的时间间隔越长，说明径向流动时，基体沿轴向不均匀流动，离轴线越远，基体不均匀流动性越大，这要归因于最小阻力。离轴线越近，基体阻力越小，所以内层基体容易变形而优先流动，且流动速度大。对于径向基体来说，当存在径向运动时，基体的径向流动速度大于其轴向流动速度。离轴线越远，两个速度差值越大，基体沿径向流动不均匀，容易带动 SiC 颗粒发生转动。离轴线越远，基体流动越不均匀，SiC 颗粒转动倾向越大。

由图 2c 可知：离轴线越远，基体的径向速度越大，运动时间越长。

由图 2b 和图 2d 可知：靠近模孔的基体优先具有靠近轴线的径向速度，导致基体流动不均匀，从而带动 SiC 颗粒发生转动。基体被挤出模孔的时间间隔与其轴向方向的距离成正比，基体沿轴向的不均匀流动程度远低于径向方向且远离轴线，所以在整个反向挤压过程中，轴向方向上 SiC 颗粒的转动仅在外层坯料发生且转动幅度小。随着挤压的进行，外层坯料逐渐向内层流动并靠近模孔，此时 SiC 颗粒又会由于径向方向上的不均匀流动而发生转动。

综上所述可知，靠近挤压筒中心部位的 SiC 颗粒受到的应力小，转动倾向小，容易随基体合金一起运动；靠近挤压筒外侧的 SiC 颗粒受到的应力大，转动倾向大，在较大的应力作用下，一旦不能朝着合力的方向转动便会发生断裂，所以外侧复合材料中 SiC 颗粒断裂破碎更加剧烈，形成的孔洞等缺陷更多。

由图 3a 可以看出， $P_4$  点的轴向应力在出模孔后（即拉应力阶段）出现一个大于零的峰值，且只在挤出模孔后坯料外侧表现为拉应力，方向为轴向方向（即挤压方向），其余挤压筒内的坯料（即压余）受力均为压应力。拉应力对挤压过程中材料的裂纹扩展起主要作用，容易造成材料的微观损伤和断裂失效。SiC 断裂处孔洞等缺陷多，在拉应力作用下更易形成裂纹造成材料失效。分析不同挤压条件下 SiC 颗粒引起的铝基复合材料断裂分数，可通过优化反挤压参数来提高材料的力学性能。SiC 颗粒的大小、在

基体中的分布状态、断裂强度以及作用在 SiC 颗粒上的载荷等, 都会对颗粒的断裂产生影响。颗粒断裂的概率表达式, 在数学关系上应该是上述因素的函数。本文利用陈康华等<sup>[13]</sup>提出的颗粒断裂概率模型, 计算复合材料中 SiC 颗粒的断裂分数, 其表达式为

$$F_{\text{SiC}} = 1 - \exp \left[ -\frac{V}{V_0} \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_0} \right)^m \right], \quad (3)$$

式中:  $V$ 、 $\sigma_p$  分别为增强颗粒的体积和所受应力, 当 SiC 平均粒径为  $15 \mu\text{m}$  时,  $V$  值为  $1.8 \times 10^{-15} \text{m}^3$ ,  $\sigma_p$  与基体的流变应力  $\sigma_F$  有关<sup>[14]</sup>,  $\sigma_p$  取最大值  $3\sigma_F$ ;

$V_0$ 、 $\sigma_0$  为材料常数, 此处分别取  $1.5 \times 10^{-14} \text{m}^3$ , 和  $1800 \text{MPa}$ ;

$m$  为 Weibull 常数, 取值为 3。

图 4 为  $t=400 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $\lambda=16$ 、 $v=2 \text{ mm/s}$  时,  $P_1$ - $P_4$  点处的 SiC 颗粒断裂分数与至挤压轴线距离变化的关系。由图 4 可知, 靠近轴线的 SiC 颗粒断裂分数小, 远离轴线的颗粒断裂分数急剧增大。靠近轴线处基体合金流动快, SiC 颗粒断裂以及与铝合金基体脱粘形成的孔洞容易被受压的基体填充; 远离轴线的颗粒断裂分数大且受到拉应力作用, 容易产生裂纹而失效。所以本文只讨论外侧坯料质量。由图 3 可知外侧坯料其轴向应力大于径向应力, 故  $\sigma_F$  取最大的轴向应力值。

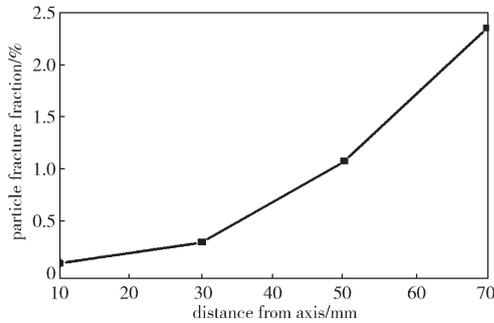


图 4 SiC 颗粒断裂分数与至轴线距离的关系

Fig. 4 The relationship between the SiC particle fracture fraction and the distance from the axis

## 2.2 挤压比对颗粒断裂失效的影响

当  $t=400 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $v=2 \text{ mm/s}$ , 不同挤压比 ( $\lambda$ ) 时,  $P_4$  点轴向应力随挤压行程的变化、颗粒断裂分数随挤压比的变化、径向速度随挤压时间的变化情况, 分别如图 5~7 所示。

由图 5 可知, 随着挤压比  $\lambda$  的增大, 基体的轴向应力和拉应力增大, 随挤压的进行轴向应力波动逐渐

增大, 挤压过程向不稳定状态发展。

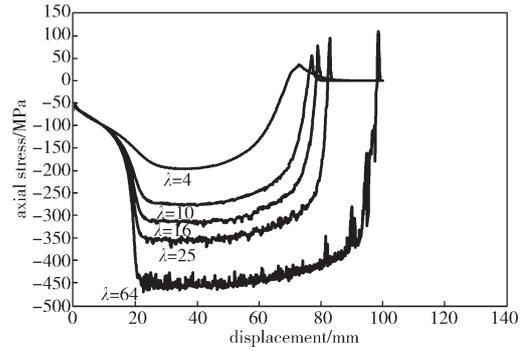


图 5 不同挤压比时  $P_4$  点轴向应力随挤压行程的变化  
Fig. 5 Axial stress of  $P_4$  point vs extrusion displacement curves under varied extrusion ratio

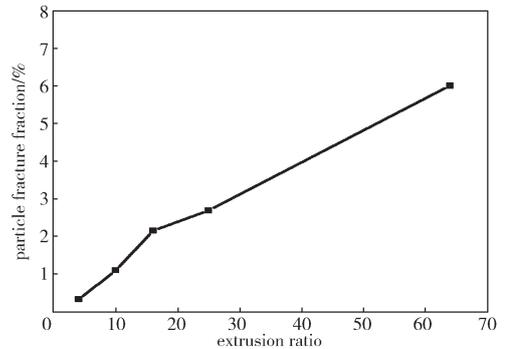


图 6  $P_4$  点颗粒断裂分数随挤压比的变化  
Fig. 6 Particle fracture fraction vs extrusion ratio curve of  $P_4$  point

由图 6 可知, 外侧坯料中 SiC 颗粒断裂分数随挤压比  $\lambda$  的增大而增大, 当  $\lambda=64$  时,  $P_4$  点的颗粒断裂分数可达 6%。

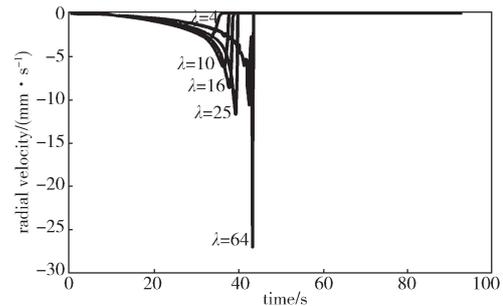


图 7 不同挤压比时  $P_4$  点径向速度随挤压时间的变化  
Fig. 7 Radial velocity vs extrusion time curve of  $P_4$  point under varied extrusion ratio

由图 5 和图 7 分析可知, 挤压比  $\lambda$  越大, 基体轴向应力、径向速度和变形程度越大, 基体流动越不均匀且更加复杂, 从而导致 SiC 颗粒转动更剧烈, 当 SiC 颗粒转动与基体变形不协调时就会发生断裂, 断

裂分数和断裂程度也就越大。而且,随着 $\lambda$ 的增大,外层坯料所受的拉应力值也随之增大,导致断裂分数和断裂程度较大的颗粒处产生更多的裂纹而使材料失效。但 $\lambda$ 增大,颗粒破碎程度增大,颗粒倾向于向细小颗粒发展,材料组织更加细小均匀,所以挤压比选择要适中。

### 2.3 挤压速度对颗粒断裂失效的影响

当 $\lambda=16$ 、 $t=400\text{ }^\circ\text{C}$ ,不同挤压速度( $v$ )时, $P_4$ 点的轴向应力随挤压行程的变化、颗粒断裂分数随挤压速度的变化、径向速度随挤压时间的变化情况,分别如图8~10所示。

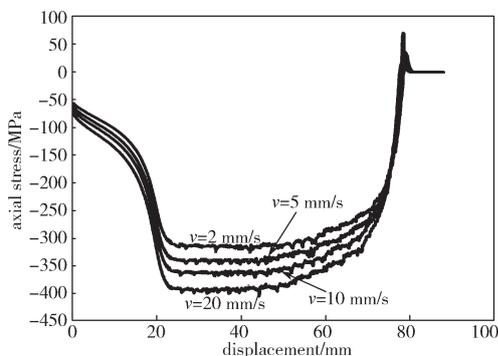


图8 不同挤压速度时 $P_4$ 点轴向应力随挤压行程的变化  
Fig. 8 Axial stress vs extrusion displacement curves of  $P_4$  point under various extrusion speed

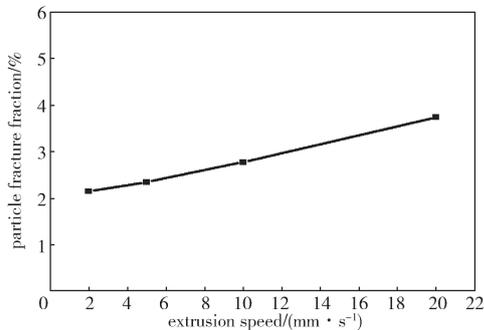


图9  $P_4$ 点颗粒断裂分数随挤压速度的变化  
Fig. 9 Particle fracture fraction vs extrusion speed curves of  $P_4$  point

由图8~10可知, $v$ 越大,基体轴向应力、拉应力、颗粒断裂分数和基体径向速度越大,基体径向运动时间越小。这是因为随 $v$ 的增大,基体流动更快,径向速度更大,基体流动越发不均匀,迫使SiC颗粒发生运动和转动。随着 $v$ 的增大,径向运动时间缩短,这就使得更多的SiC颗粒来不及运动和转动进而发生断裂,断裂分数也随之增大。当 $v$ 由2 mm/s增大至20

mm/s时, SiC颗粒断裂分数由2.15%增大至3.75%,其变化幅度不大,拉应力增大幅度也比较小,所以挤压速度 $v$ 对颗粒断裂失效的影响较小,但 $v$ 过小会影响加工效率。

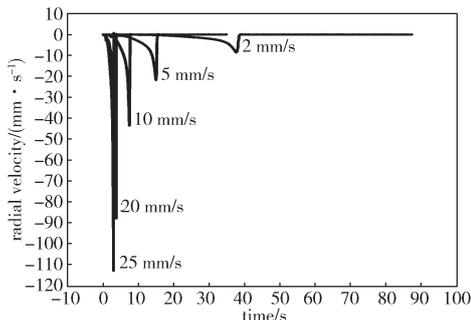


图10 不同挤压速度时 $P_4$ 点径向速度随挤压时间的变化  
Fig. 10 Radial velocity vs extrusion time curve of  $P_4$  point under various extrusion speeds

### 2.4 挤压温度对颗粒断裂失效的影响

当 $\lambda=16$ 、 $v=2\text{ mm/s}$ 时,不同挤压温度( $t$ )时 $P_4$ 点的轴向应力随挤压行程的变化、颗粒断裂分数随挤压温度的变化、径向速度随挤压时间的变化情况,分别如图11~13所示。

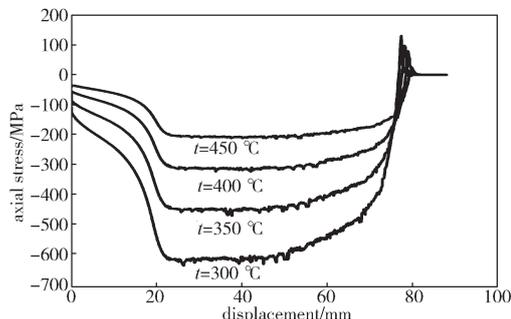


图11 不同挤压温度时 $P_4$ 点轴向应力随挤压行程的变化  
Fig. 11 Axial stress vs extrusion displacement curves of  $P_4$  point under various extrusion temperatures

由图11~13可知,随着挤压温度 $t$ 的升高,拉应力逐渐减小,基体径向速度几乎没有变化,轴向应力和颗粒断裂分数急剧减小。 $t$ 为300 $^\circ\text{C}$ 时,最大轴向应力远高于其他温度的轴向应力,达到了648 MPa,颗粒断裂分数达到了16%;但当 $t$ 升高至450 $^\circ\text{C}$ 时,最大轴向应力降到了200 MPa左右,颗粒断裂分数仅为0.32%。这是因为随着 $t$ 的升高,原子的热激活能量增加, SiC更容易跟随基体合金一起运动和转动。 $t$ 对基体合金流动不均匀性影响较小,但对应力水平和颗粒断裂分数影响较大。随着 $t$ 的升

高, 拉应力减小, 形成裂纹的倾向减小, 颗粒断裂失效分数减小, 从而得到挤压温度  $t$  的合理范围为 400~450 °C。

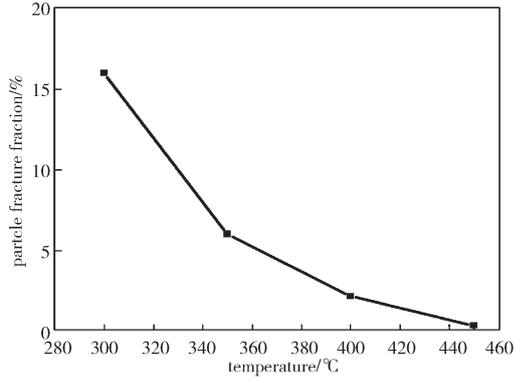


图 12  $P_4$  点颗粒断裂分数随挤温度的变化

Fig. 12 Particle fracture fraction of  $P_4$  point vs extrusion temperature curves

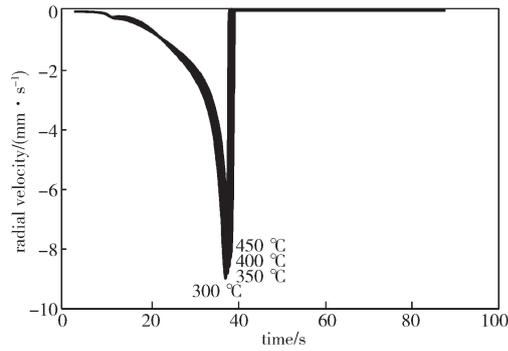
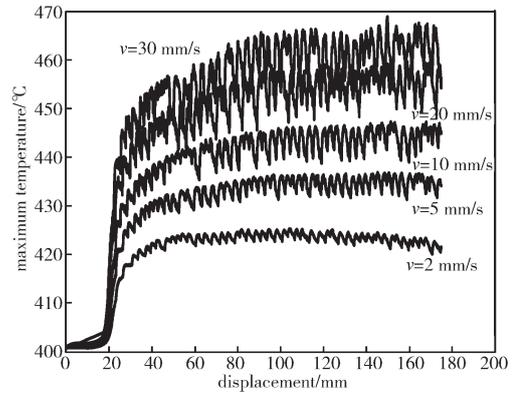


图 13 不同挤压温度时  $P_4$  径向速度随挤压时间的变化

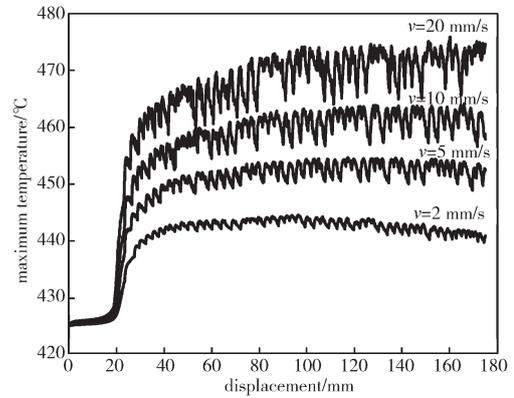
Fig. 13 Radial velocity vs extrusion time curve of  $P_4$  point under various extrusion temperatures

在材料变形过程中, 大量变形能以热能的形式释放, 从而引起材料温度升高, 一旦局部温度超过固相线温度, 材料会发生局部熔化, 继而形成肉眼可见的宏观裂纹, 造成材料的严重破坏。7075 的固相线温度为 477 °C, 所以挤压过程中的最高温度必须控制在 477 °C 以下。

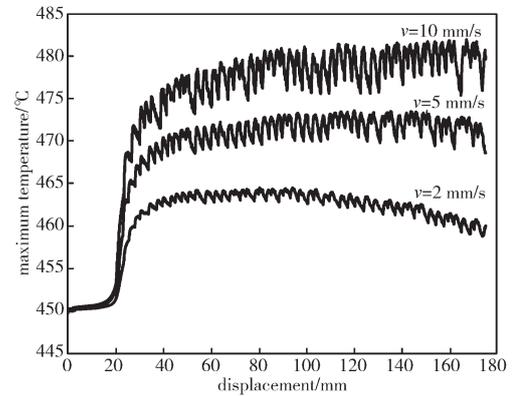
当  $\lambda=16$ ,  $t$  分别为 400, 425, 450 °C, 不同  $v$  时坯料温度随挤压行程的变化情况如图 14 所示。由图 14 可知, 坯料最高温度随着  $v$  的增大而增大。当  $t=400$  °C、 $v=30$  mm/s,  $t=425$  °C、 $v=20$  mm/s 和  $t=450$  °C、 $v=5$  mm/s 时, 挤压过程中坯料最大温度已经达到或接近 473 °C, 接近 7075 的固相线温度。因此, 当  $\lambda=16$  时, 不同挤压温度下合理的挤压速度范围为  $t=400$  °C、 $v < 30$  mm/s,  $t=425$  °C、 $v < 20$  mm/s,  $t=450$  °C、 $v < 5$  mm/s。



a)  $t=400$  °C



b)  $t=425$  °C



c)  $t=450$  °C

图 14 不同挤压温度和挤压速度时坯料温度随挤压行程的变化

Fig. 14 Billet temperature vs. extrusion displacement curves under different extrusion temperatures and extrusion speeds

### 3 结论

应用 Deform-2D 有限元软件, 对喷射沉积 7075/SiC<sub>p</sub> 复合材料反向挤压过程进行了数值模拟研究, 可得以下结论:

1) 在反向挤压过程中, 基体合金的流动不均匀性造成 SiC 颗粒转动。离中心轴线越远, 流动不均匀性及 SiC 颗粒转动倾向和程度越大。基体的流动不均匀性程度随着挤压速度和挤压比的增大而增大。

2) 在反向挤压过程中, SiC 颗粒随基体运动不协调时, 在较大应力作用下会发生断裂, 外侧坯料中 SiC 断裂分数大于内侧, 当挤压比为 4~25, 挤压温度为 400~450 °C 时, SiC 断裂失效分数较小。

3) 当挤压比为 16 时, 得到不同挤压温度下合理的挤压速度范围为:  $t=400\text{ °C}$ 、 $v<30\text{ mm/s}$ ,  $t=425\text{ °C}$ 、 $v<20\text{ mm/s}$ ,  $t=450\text{ °C}$ 、 $v<5\text{ mm/s}$ 。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG L, XU H Q, WANG Z, et al. Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Al/SiC Composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 678: 23-30.
- [2] 韩辉辉, 王爱琴, 谢敬佩. SiC 和 Si 混合颗粒增强铝基复合材料的研究现状[J]. 粉末冶金工业, 2015, 25(6): 66-71.  
HAN Huihui, WANG Aiqin, XIE Jingpei. Research Status on SiC and Si Hybrid Particle Reinforced Al Matrix Composites[J]. Powder Metallurgy Industry, 2015, 25(6): 66-71.
- [3] 高红霞, 王蒙, 樊江磊, 等. 混杂颗粒增强铝基复合材料的研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2019, 29(3): 1-7.  
GAO Hongxia, WANG Meng, FAN Jianglei, et al. Research Progress of Hybrid Particles Reinforced Aluminum Matrix Composites[J]. Powder Metallurgy Industry, 2019, 29(3): 1-7.
- [4] 郝世明, 毛建伟, 谢敬佩. 陶瓷颗粒增强铝基复合材料的研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2018, 28(1): 56-62.  
HAO Shiming, MAO Jianwei, XIE Jingpei. Research and Development of Ceramic Particle Reinforced Aluminum Matrix Composites[J]. Powder Metallurgy Industry, 2018, 28(1): 56-62.
- [5] 王春伟, 袁战伟, 张晓峰, 等. SiC 颗粒增强铝基复合材料制备技术研究进展[J]. 热加工工艺, 2017, 46(12): 6-9, 13.  
WANG Chunwei, YUAN Zhanwei, ZHANG Xiaofeng, et al. Review on Fabrication Technology of SiC Particle Reinforced Aluminum Matrix Composites[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(12): 6-9, 13.
- [6] 肖伯律, 毕敬, 赵明久, 等. SiC<sub>p</sub> 尺寸对铝基复合材料拉伸性能和断裂机制的影响[J]. 金属学报, 2002, 38(9): 1006-1008.  
XIAO Bolü, BI Jing, ZHAO Mingjiu, et al. Effects of SiC<sub>p</sub> Size on Tensile Property of Aluminum Matrix Composites Fabricated by Powder Metallurgical Method [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(9): 1006-1008.
- [7] 孙有平, 严红革, 苏斌, 等. 热挤压喷射沉积 Al-SiC<sub>p</sub> 复合材料中 SiC 分布特征研究[J]. 铸造技术, 2012, 33(10): 1145-1148.  
SUN Youping, YAN Hongge, SU Bin, et al. Distribution Feature of SiC in Spray Deposition Al-SiC<sub>p</sub> Composite After Hot Extrusion[J]. Foundry Technology, 2012, 33(10): 1145-1148.
- [8] YUAN W H, CHEN Z H, XU H Y, et al. Properties and Microstructures of 7075/SiC<sub>p</sub> Composites Prepared by Spray Deposition[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13(5): 1160-1163.
- [9] 尹成波, 衣淑丽, 孙学进. 基于 Deform 的筒形件冷挤压数值模拟分析[J]. 热加工工艺, 2020, 49(3): 116-118.  
YIN Chengbo, YI Shuli, SUN Xuejin. Numerical Simulation Analysis of Cold Extrusion of Tube Workpieces Based on Deform[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(3): 116-118.
- [10] 昌江郁, 陈送义, 陈康华, 等. 7056 铝合金厚板轧制变形不均匀性的实验研究与数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(8): 1914-1921.  
CHANG Jiangyu, CHEN Songyi, CHEN Kanghua, et al. Numerical Simulation and Experimental Investigation of Rolling Deformation Inhomogeneity of 7056 Aluminum Alloy Thick Plate[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(8): 1914-1921.
- [11] 刘克威, 胡开元, 曹凤红, 等. 7075 铝合金热压缩过程中最大损伤值的数值模拟[J]. 热加工工艺, 2012, 41(8): 19-21.  
LIU Kewei, HU Kaiyuan, CAO Fenghong, et al. Numerical Simulation on Maximum Damage Value During Hot Compression of 7075 Al Alloy[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(8): 19-21.
- [12] 李红章. SiC<sub>p</sub>/7075Al 铝基复合材料热变形行为研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.  
LI Hongzhang. Behavior of SiC<sub>p</sub>/7075Al Composites During Hot Deformation[D]. Changsha: Hunan University, 2005.
- [13] 陈康华, 方玲, 李侠, 等. 颗粒失效对 SiC<sub>p</sub>/Al 复

合材料强度的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008, 39(3): 493-499.

CHEN Kanghua, FANG Ling, LI Xia, et al. Influence of Particle Failure on Strength of SiC<sub>p</sub>/Al Composites[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2008, 39(3): 493-499

[14] WANG X J, WU K, ZHANG H F, et al. Effect of Hot Extrusion on the Microstructure of a Particulate Reinforced Magnesium Matrix Composite[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 465(1/2): 78-84.

(责任编辑: 邓光辉)

## Numerical Simulation of Fracture Failure of SiC Particles During Backward Extrusion Process of 7075/SiC<sub>p</sub> Composites

CHEN Shuang<sup>1,2</sup>, CHEN Yi<sup>1,2</sup>, WU Hongdan<sup>3</sup>, ZHANG Hui<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan Hunan 411104, China; 2. Key Laboratory for Vehicle and Transmission System of Hunan Province, Hunan Institute of Engineering, Xiangtan Hunan 411104, China; 3. College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** In order to study the rotation and the fracture failure of SiC particles during backward extrusion process of 7075/SiC<sub>p</sub> composites prepared by spray deposition, the Deform-2D finite element simulation was applied in the extrusion temperature range of 300~450 °C, extrusion ratio range of 4~64 and extrusion speed range of 2~30 mm/s. The results showed that the rotation of SiC particles was caused by the uneven flow of the matrix alloy in the process of backward extrusion. The farther away from the central axis, the greater the flow inhomogeneity and the rotation tendency of SiC particles, and the degree of flow inhomogeneity increased with the increase of extrusion speed and extrusion ratio. During the process of backward extrusion, the fracture failure might occur under large stress if the SiC particles were not coordinated with the matrix movement, and higher fracture failure fraction occurred in the outerlayer. The fracture failure of SiC particles could be avoided to the utmost extent at extrusion ratio of 4~25 and extrusion temperature of 400~450 °C. Under the extrusion ratio of 16, the advisable extruding speed should be controlled in the range of  $t=400$  °C、 $v<30$  mm/s,  $t=425$  °C、 $v<20$  mm/s and  $t=450$  °C、 $v<5$  mm/s..

**Keywords:** 7075/SiC<sub>p</sub> composite; SiC particle; backward extrusion; numerical simulation; fracture failure