

基于 FEM 的 PEEK 热成型温度对力学性能影响分析

杨倩

DOI:10.12238/acair.v3i2.13527

[摘要] PEEK材质凭借其刚度大、比模量高等优异的力学性能,已广泛应用于各个工程领域,其力学性能差异将会直接影响结构抗冲击、抗疲劳等性能,故深入了解PEEK材料的力学性能意义重大。本文选取Johnson-Cook塑性本构模型对不同成型温度下PEEK力学性能的影响进行分析,并通过Abaqus有限元软件进行仿真模拟。结果表明:温度是影响PEEK高温力学特性的重要因素之一。可为试样拉伸试验的仿真建模及PEEK成型工艺的改善等提供参考。

[关键词] Johnson-Cook本构; 塑性失效; Abaqus; 力学性能

中图分类号: TV **文献标识码:** A

Analysis of influence of temperature on mechanical properties of PEEK thermoforming based on FEM

Qian Yang

[Abstract] PEEK material has been widely used in various engineering fields due to its excellent mechanical properties such as high strength and high specific modulus. The differences in its mechanical properties will directly affect the performance of the structure such as impact resistance and fatigue resistance, so in-depth understanding of the mechanical properties of PEEK material is of great significance. In this paper, Johnson-Cook plastic constitutive model was selected to analyze the influence of mechanical properties of PEEK at different molding temperatures, and Abaqus finite element software was used to simulate. The results show that temperature is one of the important factors affecting the high temperature mechanical properties of PEEK. It provides reference for simulation modeling of tensile test of other samples and improvement of PEEK molding process.

[Key words] Johnson-Cook constitutive; plastic failure; Abaqus; mechanical properties

1 概述

PEEK材料的成型过程是影响其力学性能表现的关键因素,不同成型条件,其力学性能差异明显,特别对其塑性力学性能具有重要影响。而材料塑性问题是工程中最常见的问题之一,也是需要重点考虑的。材料本构模型是表达变形体应变、应变速率与应力、应力变化率之间关系的数学方程。其表达式如下:

$\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, T)$, 可以看出随着温度及应变率等加载情况的变化,材料的响应(屈服强度、强度、延展性等)将发生变化,因此建立材料本构模型是合理预测材料变形行为的关键。当前材料本构模型的建立主要通过理论分析、经验总结及半经验修正理论3种方法来实现。其中Johnson-Cook模型适用于许多材料,包括绝大部分金属的高应变率变形, Mises应力塑性模型等。可以在Abaqus/Explicit中与拉伸失效模型联合使用,来模拟拉伸破碎或者压力截止。

2015年,庄靖东对PEEK的不同温度段力学行为进行了详细探究,通过对标准试样进行不同加载速度、不同环境温度进行拉伸实验测试,发现在热成型温度段PEEK呈现出典型的应变硬化、应变率相关和温度软化等特征。此外也推导了PEEK的Johnson-Cook塑性本构相关参数^[1]。文献^[2-4]利用Johnson-Cook模型建立相关金属件的有限元分析模型,从而为结构的承载与优化提供理论支撑。2024年,夏天等人对塑性材料经验型本构模型、物理型本构模型等进行了系统介绍,其中常用的塑性本构模型有Johnson-Cook、Zerilli-Armstrong,其形式简洁,通用性好,各模型参数物理意义明确,易于通过实验数据进行拟合,被广泛应用到各类模拟软件中^[5]。

本文将针对PEEK材料的塑性本质特性进行仿真分析。根据文献^[1]中PEEK在高温下所呈现的力学特征,选取Johnson-Cook塑性本构作为描述模拟PEEK热成型温度下应力应变曲线的分析方法。首先对Johnson-Cook本构模型各物理参数进行详细分析,

进而参考文献^[1]中获得的Johnson-Cook本构参数,采用Abaqus有限元软件平台进行拉伸试样仿真建模。并验证温度对其承载能力、屈服强度等塑性力学性能影响。

2 Johnson-Cook塑性本构

2.1 Johnson-Cook硬化

Johnson-Cook硬化是各向同性硬化的特殊种类,其中假定静态屈服应力 σ^0 的表达式为:

$$\sigma^0 = (A + B\varepsilon^n) \left(1 - \hat{\theta}^m \right) \quad (1)$$

式中, ε 是等效塑性应变;A,B,n和m是在转变温度 $\theta_{transition}$ 或以下测量的材料参数; $\hat{\theta}$ 是无量纲温度,其公式为:

$$\hat{\theta} = \begin{cases} 0, & \theta < \theta_{transition} \\ (\theta - \theta_{transition}) / (\theta_{melt} - \theta_{transition}), & \theta_{transition} \leq \theta \leq \theta_{melt} \\ 1, & \theta \geq \theta_{melt} \end{cases} \quad (2)$$

式中, θ 是当前温度, θ_{melt} 是熔化温度, $\theta_{transition}$ 为定义的转变温度,在转变温度或者之下,屈服应力的表达式没有温度相关性。必须在转变温度或以下测量材料参数。

当 $\theta \geq \theta_{melt}$ 时,材料将熔化并表现得像流体,因为 σ^0 不存在有剪切阻力。硬化记忆可以通过设置等效塑性应变为零去除,如果为模型指定了背应力,则这些背应力也设置为0。如果材料定义中包含了退火行为,并且将退火温度定义成比金属塑性模型所指定的熔化温度低,则硬化记忆将在退火温度去除,并严格使用熔化温度来定义硬化函数。否则,将在熔化温度自动去除硬化记忆。如果材料点温度在后续时间内低于退火温度,则材料点能再次硬化。

2.2 Johnson-Cook应变率相关性

Johnson-Cook应变率相关性假设:

$$\bar{\sigma} = \sigma^0(\varepsilon, \theta) R \left(\dot{\varepsilon} \right), \quad \dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_0 \exp \left[\frac{1}{C} (R - 1) \right], \text{ 对}$$

于 $\bar{\sigma} \geq \sigma^0$ (3)

式中, $\bar{\sigma}$ 是非零应变率时的屈服应力, $\dot{\varepsilon}$ 为等效塑性应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 和C为在转变温度 $\theta_{transition}$ 或者以下测得的材料参数;

$\sigma^0(\varepsilon, \theta)$ 为静态屈服应力, $R \left(\dot{\varepsilon} \right)$ 为非零应变率时的屈服

应力与静态屈服应力的比值。

屈服应力表达式为:

$$\bar{\sigma} = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left(1 - \hat{\theta}^m \right) \quad (4)$$

在定义Johnson-Cook率相关时,需要定义 $\dot{\varepsilon}_0$ 和C。在进行

Johnson-Cook硬化定义时,应变率相关性非必须定义项。

3 PEEK的Johnson-Cook本构参数

本文分析所采用的Johnson-Cook塑性本构参数如下表格所示^[1]。

表1 PEEK的Johnson-Cook本构参数

参数	A	B	n	C	m
值	24.5	3.1	2.32	0.078	0.462

选用以上本构参数,利用Abaqus有限元软件对PEEK热成型温度段(160℃-280℃)的拉伸试验进行仿真模拟。

4 Abaqus仿真建模基本步骤

4.1 模型搭建

依据标准试样尺寸,在Abaqus中建立试样模型。试样标识及重要尺寸分别如下图1及表2所示。

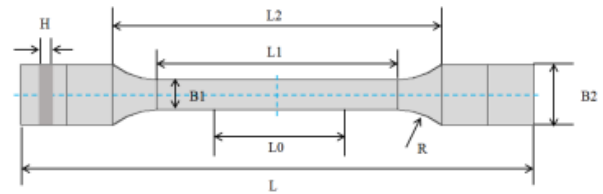


图1 试样模型示意图

另结果后处理中,将会提取标距区域(L0)应力应变数据进行绘制分析。

表2 试样尺寸参数

标识	总长	标距长度	中间平行段长度	夹具间距离	中间平行段宽度	端头宽度	厚度	半径
符号	L	L0	L1	L2	B1	B2	H	R
参数 (mm)	170	75	10	109.3	10	20	4	24

4.2 分析说明

因Johnson-Cook塑性本构只适用于Explicit求解,为了模拟测试时的稳态过程,本文选择采用准静态模拟方法对试样进行拉伸分析,并控制加载速度,确保分析过程中系统能量的平衡,以避免不必要的惯性力对仿真结果的影响。

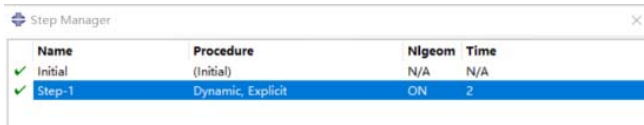


图2 求解设置说明

4.3材料设置

在塑性力学行为中选择Johnson-Cook硬化类型,即塑性本构选取Johnson-Cook,并进行参数设置,如下图3所示。此外仍需定义弹性阶段的相关参数。

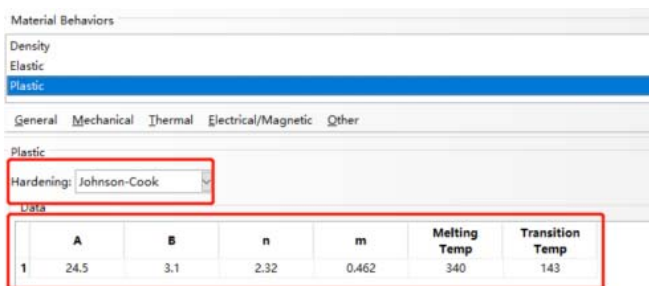


图3 塑性本构参数设置

4.4边界条件设定

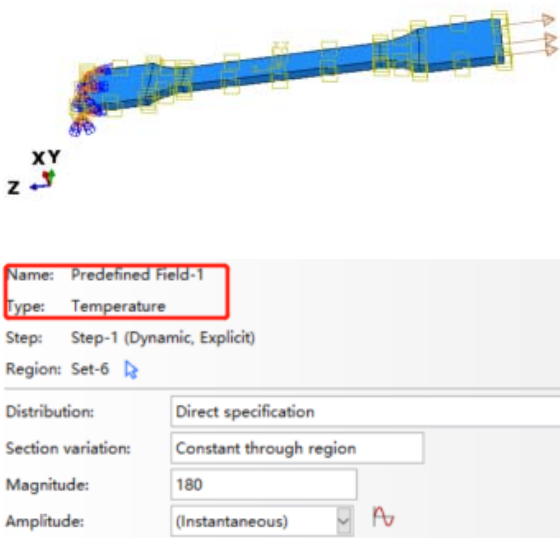


图4 边界条件定义

为了模拟万能试验机测试样条时的真实工况,对仿真模型进行如下边界条件设置:将试样的一端固定,另一端施加-Z方向的速度载荷。同时,为了考虑温度参数对PEEK力学性能的影响,

在预定义场中进行温度设置,相关设置如图4所示。

4.5网格划分

为提高仿真精度,采用扫略网格划分方法对模型进行六面体网格划分,如下图5所示为网格划分后的模型。单元类型选择C3D8R,同时选择缩减积分以及默认沙漏控制方法,以避免单元刚度过大以及零能沙漏的问题。

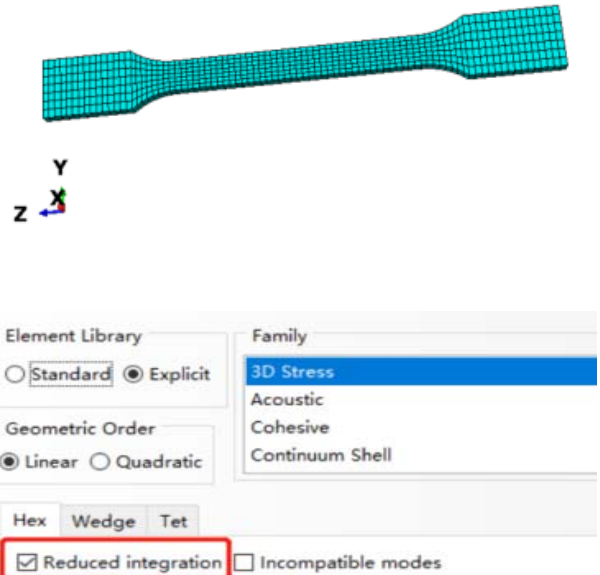


图5 网格划分及单元选择

4.6结果分析

求解完成后提取不同参数下PEEK力学性能相关量的变化曲线,对结果进行如下分析。

4.6.1温度对承载能力的影响

分别提取不同温度下,试样加载端的载荷-位移曲线,分析试样承载能力的变化。结果如下图6所示,分析表明,相同温度下,试样的承载能力随位移的变化趋势为先增大后减小,其原因为当材料到达塑性阶段后,单元承载能力不再增加,随着颈缩现象的出现,试样承载能力开始降低。不同温度下,试样的承载能力随着温度升高而降低。

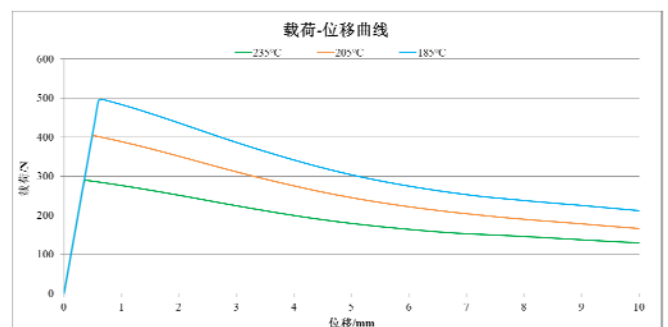


图6 不同成型温度下载荷位移曲线

4.6.2 温度对应力应变的影响

进一步验证温度对力学性能的影响,在加载速度为5mm/s条件下,仿真对比环境温度分别为185℃、205℃、235℃下的应力应变曲线,结果如图7所示,结果表明:相同温度下,试样应力变化趋势为初始变化速率较快,随着应变的进一步增大,应力的变化速率变缓。此现象是源于弹性阶段应力变化速率由弹性模量决定,而塑性阶段材料发生屈服,但此时材料发生硬化,故应力仍表现出增大的趋势,速率相对变缓。不同温度下,弹性阶段应力变化速率一致,是由于此阶段由弹性模量决定;材料发生屈服后,其应力随着温度的升高而降低,且变化趋势也基本保持一致,其原因在于Johnson-Cook本构模型主要描述的是材料的塑性阶段,本文所采用的本构模型参数中硬化参数相同,导致材料硬化程度也相同,因此塑性阶段应力变化趋势也保持一致。进一步地,随着温度的升高,材料软化程度增强,导致材料应力降低。

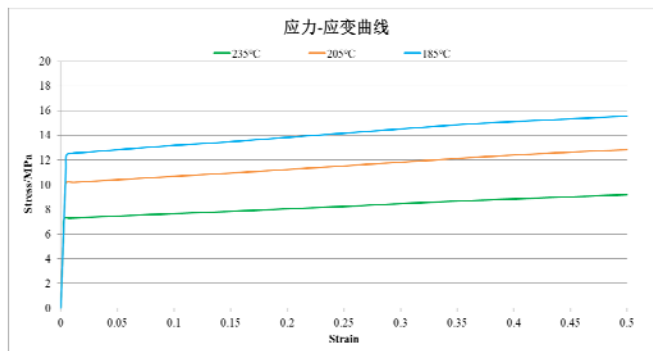
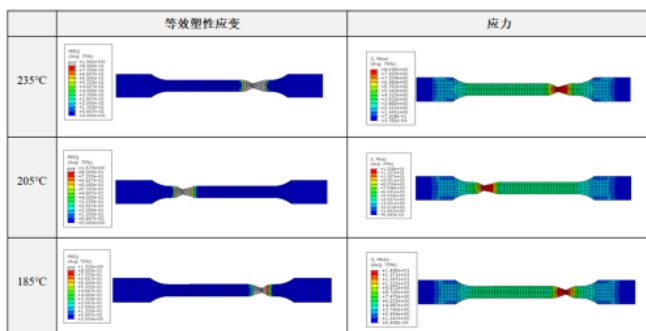


图7 不同成型温度下应力应变曲线

分别提取计算完成后试样等效塑性应变和应力分布云图,其结果如下表3所示。结果表明,随着温度的升高,试样发生塑性屈服的区域增大,屈服应力减小,其结果与图6一致。

表3 不同成型温度下试样等效塑性应变及应力分布图



4.6.3 动能随时间的变化

为了验证仿真模型及结果的可靠性,提取试样分析过程中的动能及总能量曲线进行评估,结果如图8所示,动能波动较小。

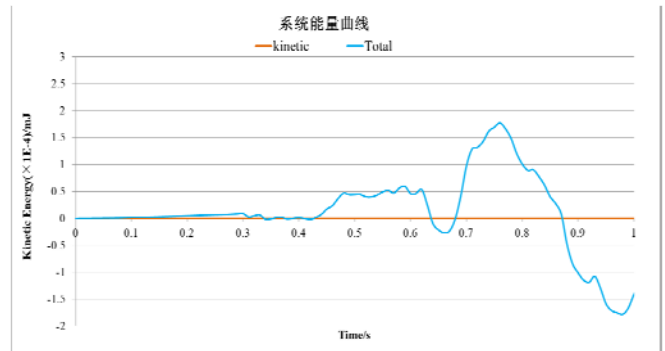


图8 动能随时间变化曲线

进一步计算动能与总能量之间的占比,其结果如图9所示,整个分析过程中,动能与总能量的比值未超过5%,满足准静态加载过程。表明以上分析结果有效。

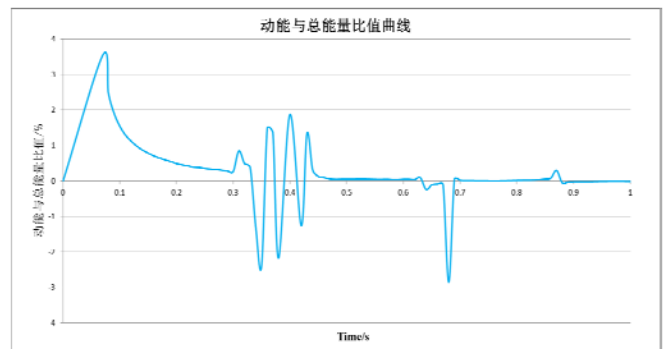


图9 动能与总能量比值随时间变化曲线

综上,在准静态拉伸的情况下,分析仿真结果可知温度是影响PEEK力学行为的关键因素之一。因此在实际的工艺开发中,应合理控制成型温度的大小。

5 总结

本文借助Abaqus有限元软件,选取Johnson-Cook塑性本构针对PEEK在不同成型温度下的力学性能进行仿真探究,并对其关键步骤进行了阐述。通过分析不同载荷条件下的模拟数据,对PEEK的高温力学性能有了初步地了解,同时为其它产品拉伸试验的仿真建模提供参考。分析结果如下:

- (1) 不同温度下,PEEK材料的承载能力随温度的升高而降低。
- (2) 相同温度下,PEEK材料的承载能力随位移的增加先增大后减小。
- (3) 不同温度下,PEEK材料的屈服强度随温度的升高而降低;屈服区域随温度的升高而增大。
- (4) 相同温度下,PEEK材料的应力变化速率随应变的增加先增大后减小。

故PEEK在制备成型过程中,应合理控制好成型温度,以免影响材料的力学性能。

[参考文献]

- [1]庄靖东.聚醚醚酮板材热成型性能研究[D].2015,5.
- [2]曹银萍,康钊飞,李国亮,等.基于Johnson-Cook模型的剪切带性能仿真[J].石油机械,2023,51(7):68-74.
- [3]王爽,徐志坤,石海军,等.基于JohnsonCook模型的Q235角钢矫直仿真[J].冶金设备,2024,291(3):89-92.
- [4]王子骏,王子文.基于J-C本构模型的金属拉伸实验模拟

研究[J].新疆钢铁,2024,170(2):31-33.

- [5]夏天,高志玉,赵斐,等.金属材料塑性本构模型建立研究进展[J].塑性工程学报,2024,31(9):23-35.

作者简介：

杨倩(1992—),女,汉族,河南洛阳人,硕士,从事CAE结构仿真计算。