



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116312902 A

(43) 申请公布日 2023.06.23

(21) 申请号 202310594115.7

(22) 申请日 2023.05.25

(71) 申请人 中国科学院力学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72) 发明人 戴兰宏 张洵菡 李统 乔禹

陈艳 汪海英

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理

事务所(普通合伙) 11390

专利代理师 胡剑辉

(51) Int. Cl.

G16C 60/00 (2019.01)

G06F 30/20 (2020.01)

G06F 119/14 (2020.01)

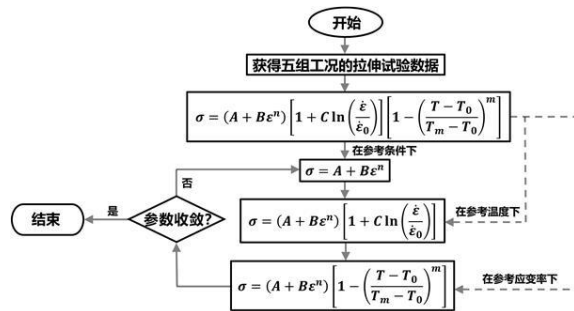
权利要求书2页 说明书7页 附图4页

(54) 发明名称

一种确定材料Johnson-Cook动态本构模型的方法

(57) 摘要

本发明提供了一种确定材料Johnson-Cook动态本构模型的方法,首先获得待测材料在每组工况下的拉伸试验数据,然后读取待测材料在对应工况下的真实塑形段曲线,确定Johnson-Cook动态本构模型中的参数,设置收敛阈值并迭代,直至Johnson-Cook动态本构模型中的参数与上一代参数相比小于等于设定的收敛阈值时判定迭代结束,输出结果,完成拟合,最后对得出的Johnson-Cook动态本构模型参数进行评估,得出可准确预测该材料的力学行为。本发明构思合理,基于多种高低应变率和温度的五组拉伸试验数据,能够低成本、高效、准确的预测出材料在高应变率的力学行为。



1. 一种确定材料Johnson-Cook动态本构模型的方法,其特征在于,首先获得待测材料在每组工况下的拉伸试验数据,然后读取待测材料在对应工况下的真实塑形段曲线,确定Johnson-Cook动态本构模型中的参数,设置收敛阈值并迭代,直至Johnson-Cook动态本构模型中的参数与上一代参数相比小于等于设定的收敛阈值时判定迭代结束,输出结果,完成拟合,最后对得出的Johnson-Cook动态本构模型参数进行评估,得出可准确预测该材料的力学行为。

2. 如权利要求1所述的确定材料Johnson-Cook动态本构模型的方法,其特征在于,所述方法具体包括以下步骤:

1) 获得待测材料在六组试验工况下的应力-应变曲线,且六组试验工况分别为:第一组试验工况为应变率 $1.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 、温度 25°C ,第二组试验工况为应变率 $1.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 、温度 $0.15T_m$,第三组试验工况为应变率 $1.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 、温度 $0.30T_m$,第四组试验工况为应变率 $5.0 \times 10^2 \text{s}^{-1}$ 、温度 25°C ,第五组试验工况为应变率 $4.0 \times 10^3 \text{s}^{-1}$ 、温度 25°C ,来标定Johnson-Cook动态本构参数,第六组试验工况为应变率 $1.5 \times 10^2 \text{s}^{-1}$ 、温度 25°C ;

2) 设定第一组试验工况为参考试验工况,在参考试验工况下将下式(1)中的Johnson-Cook动态本构模型简化为式(2),读取待测材料在参考试验工况下的真实屈服应力,确定式(2)中Johnson-Cook动态本构模型中的参数 A ;读取参考试验工况中的塑形段,通过最小二乘法拟合出Johnson-Cook动态本构模型中的应变硬化系数 B 和应变硬化指数 n ,记为 B_1 和 n_1 ;

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (1);$$

$$\sigma = A + B\varepsilon^n \quad (2);$$

其中上式(1)中 σ 为等效流动应力, ε 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$ 为无量纲塑性应变率,

其中 $\dot{\varepsilon}$ 为塑性应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; $T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}$ 为无量纲温度,其中 T 为当前工况中的温度, T_m 为材料熔化温度, T_0 为参考试验工况中的温度, A 为参考试验工况下的屈服应力;

3) 在参考试验工况的参考温度 25°C 下,上式(1)中的Johnson-Cook动态本构模型简化为下式(3);读取待测材料在第四组试验工况和第五组试验工况下的真实应力-应变曲线,对第四组试验工况和第五组试验工况中的两条塑形段采用最小二乘法拟合出Johnson-Cook动态本构模型中的应变率硬化系数 C ,记为 C_1 ;

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \quad (3);$$

4) 在参考试验工况的参考应变率 $1.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 下,将上式(1)中的Johnson-Cook动态本构模型简化为下式(4);读取待测材料在第二组试验工况和第三组试验工况下的真实应力-应变曲线,对第二组试验工况和第三组试验工况中的两条塑形段采用最小二乘法拟合出Johnson-Cook动态本构模型中的热软化系数 m ,记为 m_1 ;

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (4);$$

5) 读取待测材料在第一组至第五组试验工况下的整条塑形段以及应变率硬化系数 C_1 和热软化系数 m_1 , 通过最小二乘法重新对上式(2)中Johnson-Cook动态本构模型中的应变硬化系数 B 和应变硬化指数 n 进行拟合, 记为 B_2 、 n_2 , 并替换上述步骤2) 所得到的 B_1 、 n_1 ;

6) 重复以上步骤3) 至步骤5), 设置收敛阈值为 1.0×10^{-6} ; 当上式(1)中Johnson-Cook动态本构模型参数 A 、 B 、 n 、 C 、 m 迭代至第 i 代得到此时的五个参数值 A_i 、 B_i 、 n_i 、 C_i 、 m_i 与第 $i-1$ 代的参数值 A_{i-1} 、 B_{i-1} 、 n_{i-1} 、 C_{i-1} 、 m_{i-1} 相比均相差小于等于 1.0×10^{-6} , 判定迭代结束, 参数 A_i 、 B_i 、 n_i 、 C_i 、 m_i 作为Johnson-Cook动态本构模型参数 A 、 B 、 n 、 C 、 m 的输出结果, 完成拟合, 得到待测材料的Johnson-Cook动态本构参数;

7) 通过第六组试验工况的试验数据对上述步骤1) -6) 得出的Johnson-Cook动态本构模型在参考试验工况下的真实屈服应力 A 、应变硬化系数 B 、应变硬化指数 n 、应变率硬化系数 C 和热软化系数 m 进行评估, 得到可以准确预测待测材料的力学行为。

3. 如权利要求2所述的确定材料Johnson-Cook动态本构模型的方法, 其特征在于, 所述步骤1) 具体步骤为: 通过所述第一组至第五组试验工况来标定Johnson-Cook动态本构参数, 通过所述第六组试验工况来评判所标定的Johnson-Cook动态本构参数, 以获得待测材料在六组试验工况下的应力-应变曲线。

4. 如权利要求2所述的确定材料Johnson-Cook动态本构模型的方法, 其特征在于: 所述步骤7) 在进行评估过程中当平均误差处于15%以内, 认为可准确预测该待测材料的力学行为。

一种确定材料Johnson-Cook动态本构模型的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及材料力学行为的模拟仿真技术领域,具体涉及一种确定材料Johnson-Cook动态本构模型的方法。

背景技术

[0002] 在汽车、航空航天、军事国防等许多重要领域都涉及材料动态力学行为,其中的关键部件在冲击变形下常常伴随高温、高压等瞬态过程。然而,选取的材料在这一极端条件下是否满足要求是一个亟待解决的问题。相对于传统实验方法的成本高、周期长,通过模拟仿真技术可以快速高效的得到答案,其中的基础和前提是找到一个能够准确描述材料在高应变率和宽温度范围内力学行为的本构关系。

[0003] Johnson-Cook (J-C) 动态本构模型是Johnson和Cook于1983年建立的一种经验模型。J-C动态本构关系由于形式简单、参数容易标定而被广泛应用,并被嵌入ABAQUS、ANSYS等商用有限元软件中。J-C动态本构关系认为金属的等效流动应力可表示为等效应变函数、等效应变率函数和温度函数的乘积,具体形式为:

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

式(1)中: σ 为等效流动应力; ε 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$ 为无量纲塑性应变率,

其中 $\dot{\varepsilon}$ 为塑性应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; $T^* = \frac{T-T_0}{T_m-T_0}$ 为无量纲温度,其中 T 为当前温度,

T_m 为熔化温度, T_0 为参考温度; A 、 B 、 n 、 C 和 m 为材料常数,其中, A 为参考温度和参考应变率下的真实屈服应力, B 为应变硬化系数, n 为应变硬化指数, C 和 m 分别代表应变率硬化系数和热软化系数的材料常数。该本构关系具有明确的物理意义,等号右边第一个括号内表达式为应变对材料的强化作用,第二个括号内表达式为应变率对材料的强化作用,第三个括号内的表达式为温度对材料的软化作用。

[0004] 目前,在已发表的文献中可以找到许多改进方法,其中广泛用于标定Johnson-Cook动态本构模型参数的方法可以概括为如下的“三步走”:

1) 第一步在参考条件下,式(1)简化为:

$$\sigma = A + B\varepsilon^n \quad (2);$$

根据材料在参考试验工况下的真实屈服应力,确定参数 A ;然后对塑性段曲线采用最小二乘法拟合确定 B 、 n 。

[0005] 2) 第二步在参考温度下,式(1)简化为:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \quad (3);$$

其中参数 A 、 B 、 n 已知,对参考温度下的高应变率真实塑性段曲线采用最小二乘

法拟合确定参数 C 。

[0006] 3) 第三步在参考应变率下, 式(1)简化为:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 - \left(\frac{T-T_0}{T_m-T_0} \right)^m \right] \quad (4);$$

与第二步相类似, 对参考应变率下的高温真实塑性段曲线采用最小二乘法拟合确定参数 m 。

[0007] 然而, 实践证明这一方法确定的参数能够很好的描述材料准静态力学行为, 但是并不能准确预测材料的动态力学行为。分析后可以发现有两方面原因:

①一方面, 在“第二步”确定应变率硬化系数 C 中有时只采用一组动态工况, 有时采用的多组动态工况中所涉及应变率范围较小, 据此所得到的参数往往不能准确预测材料在大应变率范围下的力学行为;

②另一方面, 材料在高应变率或者高温环境下的应力-应变曲线和在室温准静态下的应力-应变曲线往往不是一个常数关系, 但是在以上标定过程中的“单向”默认了这一关系。例如在“第二步”中, 应变硬化系数 B 和应变硬化指数 n 已由第一步的参考试验工况确定, 再通过动态工况标定应变率硬化系数 C 中自然更倾向于能够拟合上低应变率, 而不能很准确的拟合高应变率。

[0008] Johnson-Cook动态本构模型是材料爆炸与冲击动力学及相关工程应用领域使用最广泛的本构模型之一。然而, 经典的Johnson-Cook动态本构模型参数确定方法是依据一组高应变率和多组准静态应变率实验数据拟合确定的, 导致本构理论预测与实验偏差较大。

[0009] 综上所述, 有必要对现有技术做进一步创新。

发明内容

[0010] 针对上述背景技术中存在的问题, 本发明提出了一种确定材料Johnson-Cook动态本构模型的方法, 其构思合理, 基于多种高低应变率和温度的六组拉伸试验数据, 通过在传统“三步走”基础上搭建了反馈通道的方法标定出材料的Johnson-Cook动态本构模型参数, 能够低成本、高效、准确的预测出材料在高应变率的力学行为。

[0011] 为解决上述技术问题, 本发明提供的一种确定材料Johnson-Cook动态本构模型的方法, 首先获得待测材料在每组工况下的拉伸试验数据, 然后读取待测材料在对应工况下的真实塑形段曲线, 确定Johnson-Cook动态本构模型中的参数, 设置收敛阈值并迭代, 直至Johnson-Cook动态本构模型中的参数与上一代参数相比小于等于设定的收敛阈值时判定迭代结束, 输出结果, 完成拟合, 最后对得出的Johnson-Cook动态本构模型参数进行评估, 得出可准确预测该材料的力学行为。

[0012] 所述确定材料Johnson-Cook动态本构模型的方法, 其中, 所述方法具体包括以下步骤:

1) 获得待测材料在六组试验工况下的应力-应变曲线, 且六组试验工况分别为: 第一组试验工况为应变率 $1.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 、温度 25°C , 第二组试验工况为应变率 $1.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 、温度 $0.15T_m$, 第三组试验工况为应变率 $1.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 、温度 $0.30T_m$, 第四组试验工况为应变率

$5.0 \times 10^2 \text{s}^{-1}$ 、温度 25°C ，第五组试验工况为应变率 $4.0 \times 10^3 \text{s}^{-1}$ 、温度 25°C ，来标定 Johnson-Cook 动态本构参数，第六组试验工况为应变率 $1.5 \times 10^2 \text{s}^{-1}$ 、温度 25°C ；

2) 设定第一组试验工况为参考试验工况，在参考试验工况下将下式 (1) 中的 Johnson-Cook 动态本构模型简化为式 (2)，读取待测材料在参考试验工况下的真实屈服应力，确定式 (2) 中 Johnson-Cook 动态本构模型中的参数 A ；读取参考试验工况中的塑形段，通过最小二乘法拟合出 Johnson-Cook 动态本构模型中的应变硬化系数 B 和应变硬化指数 n ，记为 B_1 和 n_1 ；

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (1);$$

$$\sigma = A + B\varepsilon^n \quad (2);$$

其中上式 (1) 中 σ 为等效流动应力， ε 为等效塑性应变； $\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$ 为无量纲塑性应变率，其中 $\dot{\varepsilon}$ 为塑性应变率， $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率； $T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}$ 为无量纲温度，其中 T 为当前工况中的温度， T_m 为材料熔化温度， T_0 为参考试验工况中的温度， A 为参考试验工况下的屈服应力；

3) 在参考试验工况的参考温度 25°C 下，上式 (1) 中的 Johnson-Cook 动态本构模型简化为下式 (3)；读取待测材料在第四组试验工况和第五组试验工况下的真实应力-应变曲线，对第四组试验工况和第五组试验工况中的两条塑形段采用最小二乘法拟合出 Johnson-Cook 动态本构模型中的应变率硬化系数 C ，记为 C_1 ；

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \quad (3);$$

4) 在参考试验工况的参考应变率 $1.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 下，将上式 (1) 中的 Johnson-Cook 动态本构模型简化为下式 (4)；读取待测材料在第二组试验工况和第三组试验工况下的真实应力-应变曲线，对第二组试验工况和第三组试验工况中的两条塑形段采用最小二乘法拟合出 Johnson-Cook 动态本构模型中的热软化系数 m ，记为 m_1 ；

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (4);$$

5) 读取待测材料在第一组至第五组试验工况下的整条塑形段以及应变率硬化系数 C_1 和热软化系数 m_1 ，通过最小二乘法重新对上式 (2) 中 Johnson-Cook 动态本构模型中的应变硬化系数 B 和应变硬化指数 n 进行拟合，记为 B_2 、 n_2 ，并替换上述步骤 2) 所得到的 B_1 、 n_1 ；

6) 重复以上步骤 3) 至步骤 5)，设置收敛阈值为 1.0×10^{-6} ；当上式 (1) 中 Johnson-Cook 动态本构模型参数 A 、 B 、 n 、 C 、 m 迭代至第 i 代得到此时的五个参数值 A_i 、 B_i 、 n_i 、 C_i 、 m_i 与第 $i-1$ 代的参数值 A_{i-1} 、 B_{i-1} 、 n_{i-1} 、 C_{i-1} 、 m_{i-1} 相比均相差小于等于 1.0

$\times 10^{-6}$, 判定迭代结束, 参数 A_i 、 B_i 、 n_i 、 C_i 、 m_i 作为 Johnson-Cook 动态本构模型参数 A 、 B 、 n 、 C 、 m 的输出结果, 完成拟合, 得到待测材料的 Johnson-Cook 动态本构参数;

7) 通过第六组试验工况的试验数据对上述步骤 1) - 6) 得出的 Johnson-Cook 动态本构模型在参考试验工况下的真实屈服应力 A 、应变硬化系数 B 、应变硬化指数 n 、应变率硬化系数 C 和热软化系数 m 进行评估, 得到可以准确预测待测材料的力学行为。

[0013] 所述确定材料 Johnson-Cook 动态本构模型的方法, 其中, 所述步骤 1) 具体步骤为: 通过所述第一组至第五组试验工况来标定 Johnson-Cook 动态本构参数, 通过所述第六组试验工况来评判所标定的 Johnson-Cook 动态本构参数, 以获得待测材料在六组试验工况下的应力-应变曲线。

[0014] 所述确定材料 Johnson-Cook 动态本构模型的方法, 其中: 所述步骤 7) 在进行评估过程中当平均误差处于 15% 以内, 认为可准确预测该待测材料的力学行为。

[0015] 采用上述技术方案, 本发明具有如下有益效果:

本发明确定材料 Johnson-Cook 动态本构模型的方法构思合理, 其作为一套标准的标定材料 Johnson-Cook 动态本构模型参数方案, 基于多种高低应变率和温度的六组拉伸试验数据, 通过传统“三步走”基础上搭建了反馈通道的方法标定出材料的 Johnson-Cook 动态本构参数, 可以实现准确预测材料在高应变率下的力学行为, 且具有低成本、高效、准确特点。

[0016] 本发明综合利用第二、三组试验工况和第一、四、五组试验工况的实验数据, 同时构建一种依据高低应变率实验数据融合且具有反馈机制的整体优化策略, 依据新策确定的 Johnson-Cook 动态本构模型预测与实与实验数据符合令人满意, 并获多种材料检验证实。

附图说明

[0017] 为了更清楚地说明本发明具体实施方式或现有技术中的技术方案下面将对具体实施方式或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍, 显而易见地, 下面描述中的附图是本发明的一些实施方式, 对于本领域普通技术人员来讲, 在不付出创造性劳动的前提下, 还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0018] 图 1 为本发明确定材料 Johnson-Cook 动态本构模型的方法中在标定 Johnson-Cook 动态本构模型参数的传统“三步走”基础上增加迭代的流程图;

图 2 为本发明确定材料 Johnson-Cook 动态本构模型的方法中锻造的 TC4 材料在六组试验工况下的工程应力-应变曲线图;

图 3 为本发明确定材料 Johnson-Cook 动态本构模型的方法中 3D 打印的 TC4 材料在六组试验工况下的工程应力-应变曲线图;

图 4 为本发明确定材料 Johnson-Cook 动态本构模型的方法中锻造的 TC4 材料的 J-C 动态本构方程曲线与试验数据曲线对比图;

图 5 为本发明确定材料 Johnson-Cook 动态本构模型的方法中 3D 打印的 TC4 材料的 J-C 动态本构方程曲线与试验数据曲线对比图;

图 6 为本发明确定材料 Johnson-Cook 动态本构模型的方法中锻造的 TC4 材料的预测曲线与试验数据曲线对比图;

图7为本发明确定材料Johnson-Cook动态本构模型的方法中3D打印的TC4材料的预测曲线与试验数据曲线对比图。

具体实施方式

[0019] 下面将结合附图对本发明的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0020] 下面结合具体的实施方式对本发明做进一步的解释说明。

[0021] 具有双相结构的TC4材料具有高强度、低密度和耐腐蚀等特点,并广泛应用于航空航天、汽车、生物医学等领域。此外,与传统的加工相比,增材制造技术因其制造和修复具有复杂几何形状的产品能力而受到越来越多的关注。然而,目前尚缺乏对增材制造得到的TC4材料在高应变率和宽温度范围内力学行为的研究。本发明可以低成本、高效、准确的解决这一问题,其中分别对锻造和3D打印得到的TC4材料进行了Johnson-Cook动态本构模型参数标定。

[0022] 如图1所示,本实施例提供的确定材料Johnson-Cook动态本构模型的方法,首先获得待测材料在每组工况下的拉伸试验数据,然后读取待测材料在对应工况下的真实塑形段曲线,确定Johnson-Cook动态本构模型中的参数,设置收敛阈值并迭代,直至Johnson-Cook动态本构模型中的参数与上一代参数相比小于等于设定的收敛阈值时判定迭代结束,输出结果,完成拟合,最后对得出的Johnson-Cook动态本构模型参数进行评估,得出可准确预测该材料的力学行为。

[0023] 本发明确定材料Johnson-Cook动态本构模型的方法,具体包括以下步骤:

S100、分别获得锻造和3D打印得到的TC4材料在表1所示的六组试验工况下的应力-应变曲线。其中通过表1中的前五组试验工况即第一组试验工况为应变率 $1.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 、温度 25°C ,第二组试验工况为应变率 $1.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 、温度 $0.15T_m$,第三组试验工况为应变率 $1.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 、温度 $0.30T_m$,第四组试验工况为应变率 $5.0 \times 10^2 \text{s}^{-1}$ 、温度 25°C ,第五组试验工况为应变率 $4.0 \times 10^3 \text{s}^{-1}$ 、温度 25°C ,来标定Johnson-Cook动态本构参数;第六组试验工况为应变率 $1.5 \times 10^2 \text{s}^{-1}$ 、温度 25°C ,用于评判所标定的Johnson-Cook动态本构参数;两种状态材料的熔点相近均为 1665°C ;得到的两种状态材料在六组试验工况下的工程应力-应变曲线如图2和图3所示。

[0024] 表1用于标定并评判Johnson-Cook动态本构参数的六组试验

试验设备 试验工况	材料试验机		试验设备 试验工况	分离式霍普金森拉杆	
工况一	应变率	$1.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$	工况四	应变率	$5.0 \times 10^2 \text{s}^{-1}$
	温度	25°C		温度	25°C
工况二	应变率	$1.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$	工况五	应变率	$4.0 \times 10^3 \text{s}^{-1}$
	温度	$0.15 T_m (^\circ\text{C})$		温度	25°C
工况三	应变率	$1.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$	工况六	应变率	$1.5 \times 10^2 \text{s}^{-1}$
	温度	$0.30 T_m (^\circ\text{C})$		温度	25°C

[0025] S200、设定第一组试验工况为参考试验工况,在参考试验工况下将下式(1)中的

Johnson-Cook动态本构模型简化为下式(2),读取待测材料在参考试验工况下的真实屈服应力,确定式(2)中Johnson-Cook动态本构模型中的参数**A**;读取参考试验工况中的塑形段,通过最小二乘法拟合出Johnson-Cook动态本构模型中的应变硬化系数**B**和应变硬化指数**n**,记为**B₁**和**n₁**;

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (1);$$

$$\sigma = A + B\varepsilon^n \quad (2);$$

其中上式(1)中 σ 为等效流动应力; ε 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}^* = \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$ 为无量纲塑性应变率,其中 $\dot{\varepsilon}$ 为塑性应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; $T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}$ 为无量纲温度,其中**T**为当前工

况中的温度, T_m 为材料熔化温度, T_0 为参考试验工况中的温度,**A**为参考试验工况下的屈服应力。

[0026] S300、在参考试验工况的参考温度25℃下,将上式(1)中的Johnson-Cook动态本构模型简化为下式(3);读取待测材料在第四组试验工况和第五组试验工况下的真实应力-应变曲线,对第四组试验工况和第五组试验工况中的两条塑形段采用最小二乘法拟合出Johnson-Cook动态本构模型中的应变率硬化系数**C**,记为**C₁**;

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \quad (3)。$$

[0027] S400、在参考试验工况的参考应变率 $1.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 下,将上式(1)中的Johnson-Cook动态本构模型简化为下式(4);读取待测材料在第二组试验工况和第三组试验工况下的真实应力-应变曲线,对第二组试验工况和第三组试验工况中的两条塑形段采用最小二乘法拟合出Johnson-Cook动态本构模型中的热软化系数**m**,记为**m₁**;

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \quad (4)。$$

[0028] S500、读取待测材料在表1所示的前五组即第一组至第五组试验工况下的整条塑形段以及应变率硬化系数**C₁**和热软化系数**m₁**,通过最小二乘法重新对式(2)中Johnson-Cook动态本构模型中的应变硬化系数**B**和应变硬化指数**n**进行拟合,记为**B₂**、**n₂**,并替换上述步骤S200所得到的**B₁**、**n₁**。

[0029] S600、重复以上步骤S300至步骤S500,设置收敛阈值为 1.0×10^{-6} ;当式(1)中Johnson-Cook动态本构模型参数**A**、**B**、**n**、**C**、**m**迭代至第*i*代,得到此时的五个参数值**A_i**、**B_i**、**n_i**、**C_i**、**m_i**与第*i*-1代的参数值**A_{i-1}**、**B_{i-1}**、**n_{i-1}**、**C_{i-1}**、**m_{i-1}**相比均相差小于等于 1.0×10^{-6} ,判定迭代结束,参数**A_i**、**B_i**、**n_i**、**C_i**、**m_i**为作为Johnson-Cook动态本构模型参数**A**、**B**、**n**、**C**、**m**的输出结果,J-C动态本构方程曲线与试验数据曲线如图4、5

所示,表2为完成拟合后锻造和3D打印得到TC4材料的Johnson-Cook动态本构参数。

[0030] 表2标定出两种材料的JOHNSON-COOK动态本构参数取值

材料 \ 参数	A (MPa)	B ($\times 10^5$ MPa)	n	C	m
锻造TC4	906	-4804	7.0539	0.0260	0.7696
3D打印TC4	982	-342	5.3978	0.0297	0.8063

[0031] S700、通过第六组试验工况的试验数据对步骤S100-S600得出的Johnson-Cook动态本构模型在参考试验工况下的真实屈服应力 A 、应变硬化系数 B 、应变硬化指数 n 、应变率硬化系数 C 和热软化系数 m 进行评估,预测曲线与试验数据曲线如图6、7所示,表3为计算得到的平均误差,均处于15%以内,认为所得到的Johnson-Cook动态本构参数可以准确预测该待测材料的力学行为。

[0032] 表3两种材料的J-C动态本构方程预测曲线与试验数据曲线的平均误差。

材料	平均误差
锻造TC4	4.66%
3D打印TC4	6.94%

[0033]

[0034] 本发明构思合理,基于多种高低应变率和温度的六组拉伸试验数据,通过在传统“三步走”基础上搭建了反馈通道的方法标定出材料的Johnson-Cook动态本构参数,能够低成本、高效、准确的预测出材料在高应变率的力学行为。

[0035] 本发明包括但不限于以上的工程问题,凡是在本发明的精神和原则之下,进行的任何局部改进、修改,都将视为在本发明的保护范围之内。

[0036] 最后应说明的是:以上各实施例仅用以说明本发明的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述各实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分或者全部技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的范围。

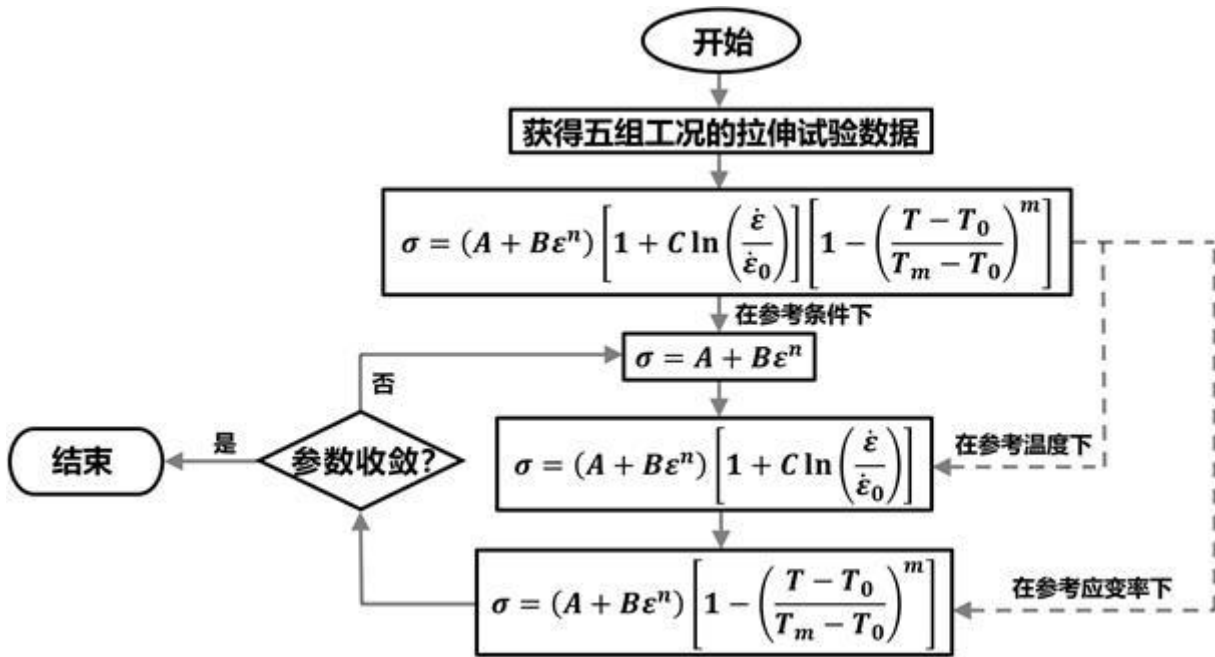


图 1

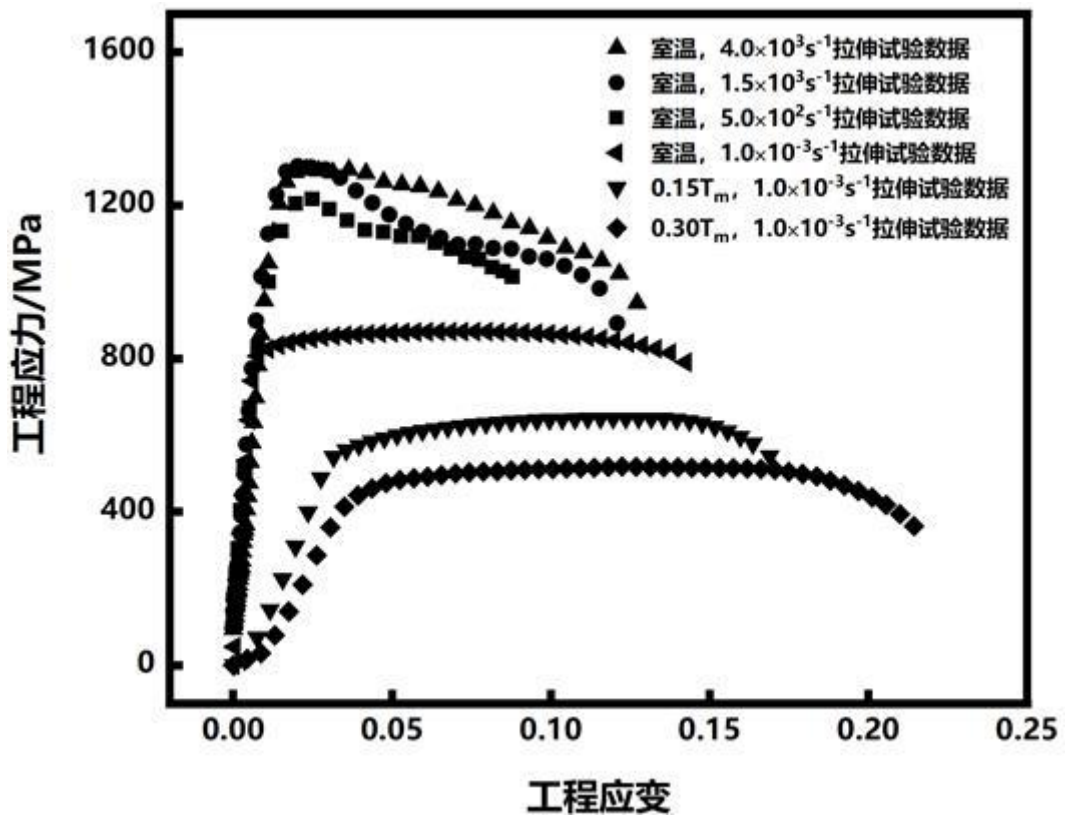


图 2

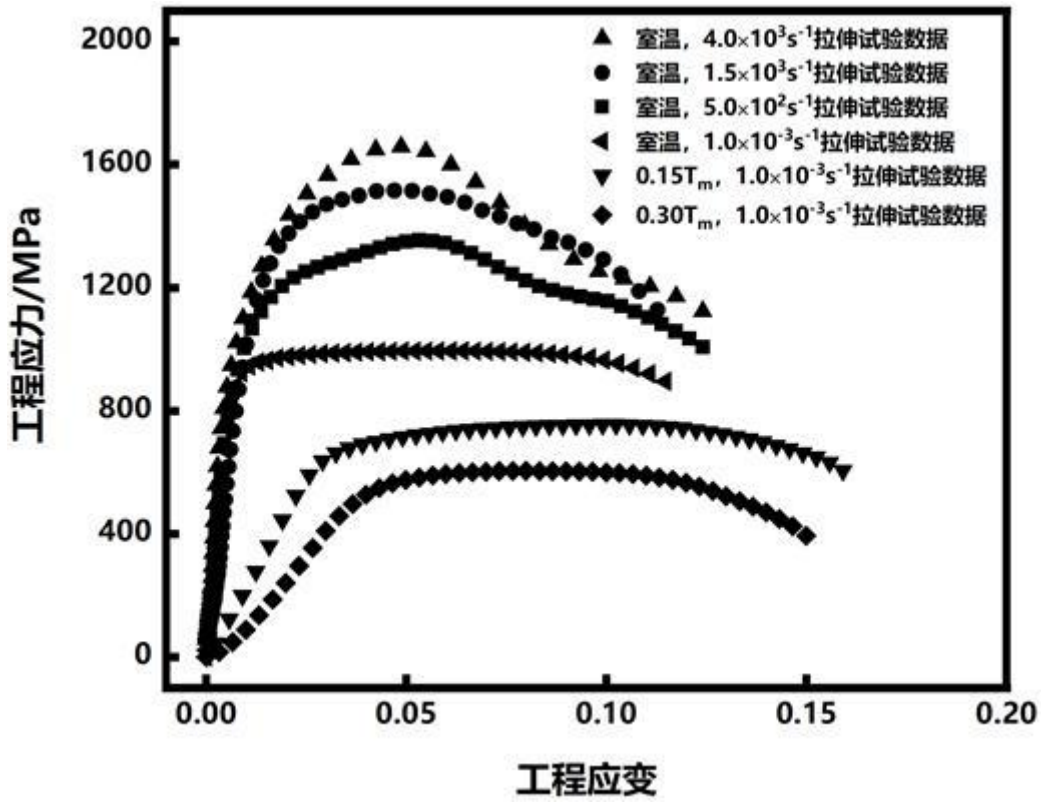


图 3

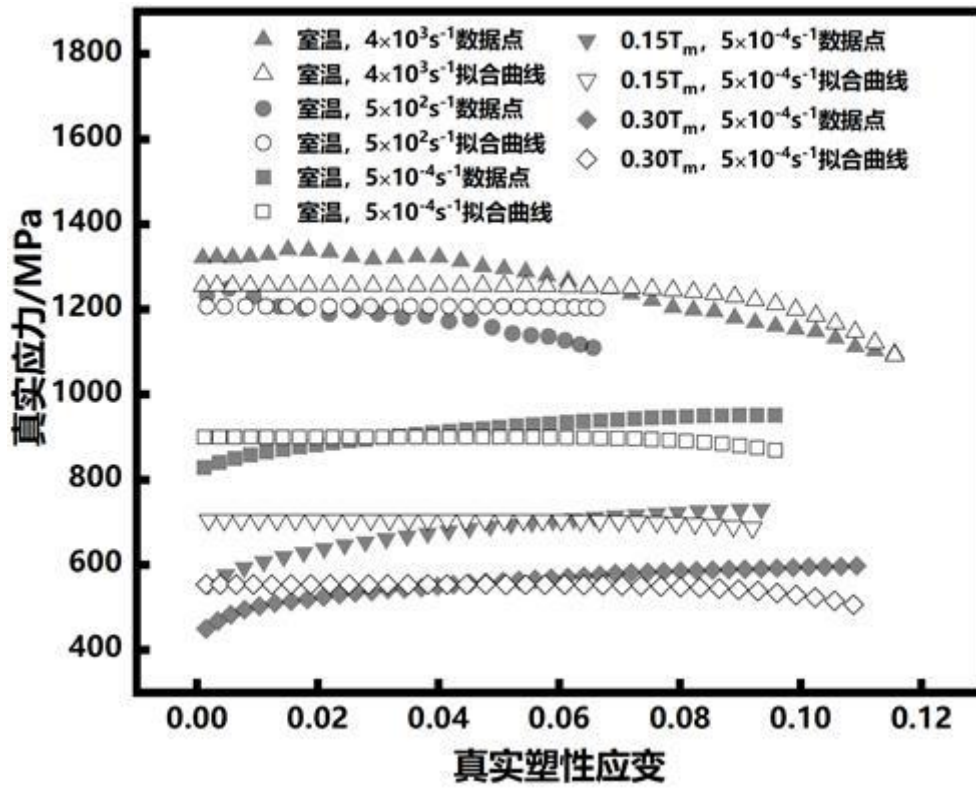


图 4

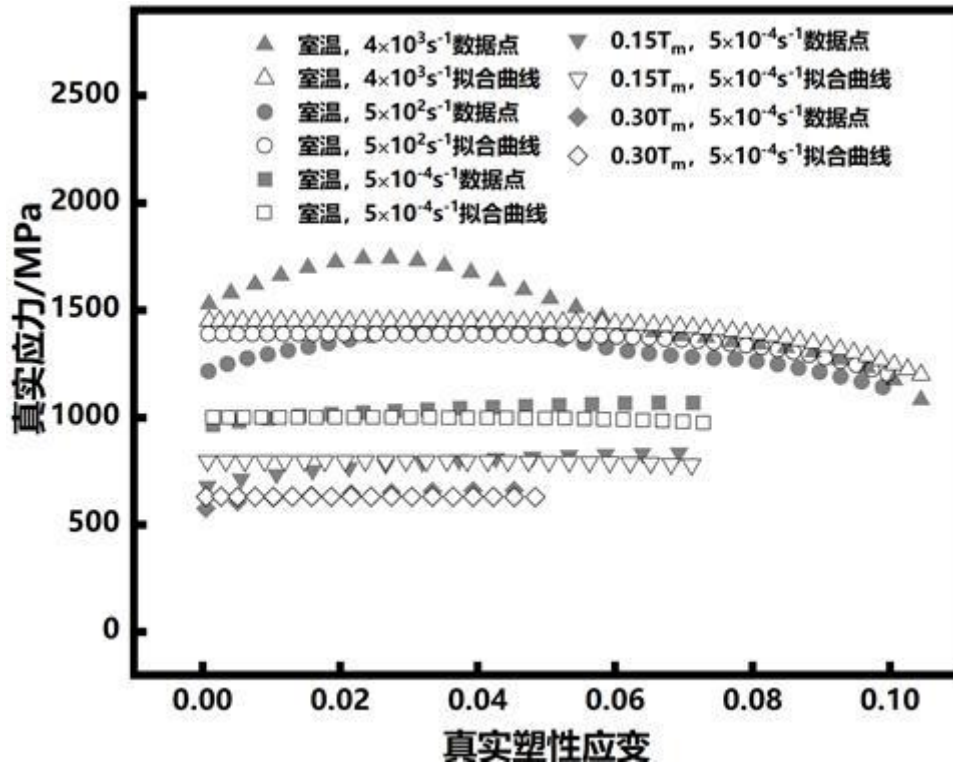


图 5

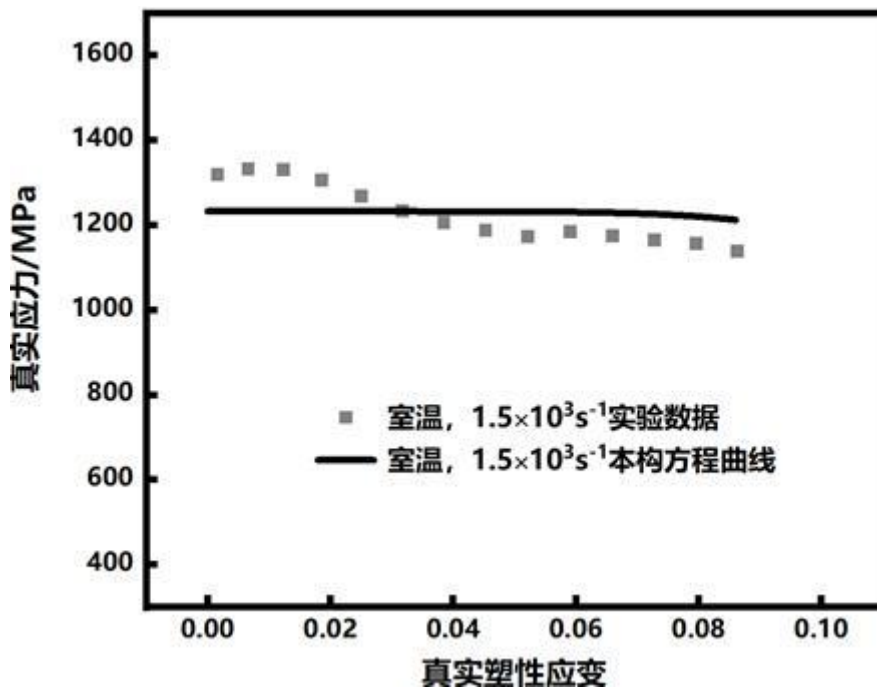


图 6

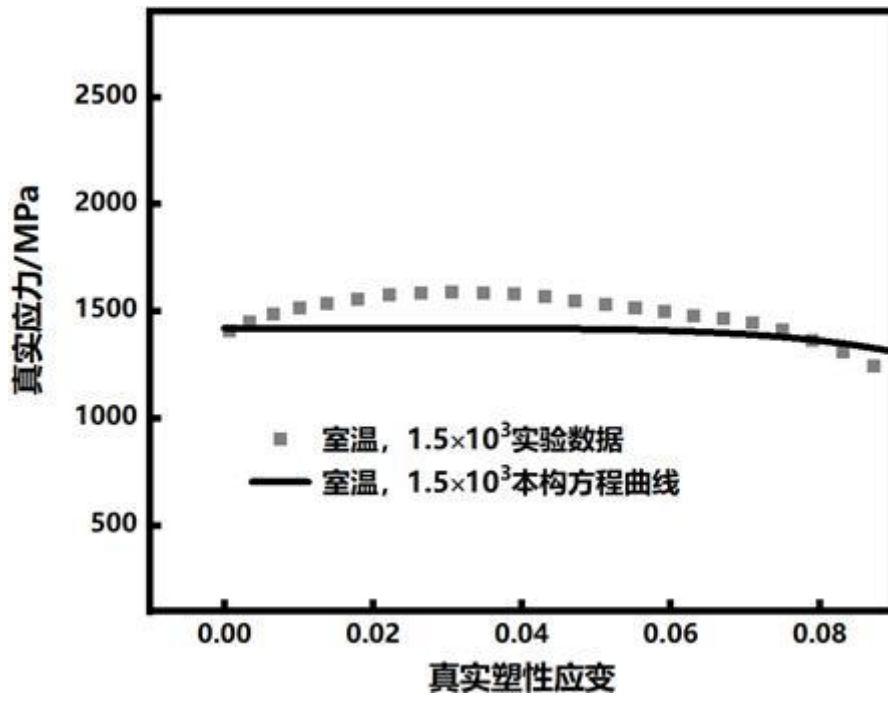


图 7