



## (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113761669 A

(43) 申请公布日 2021.12.07

(21) 申请号 202111206499.8

(22) 申请日 2021.10.16

(71) 申请人 西北工业大学

地址 710072 陕西省西安市友谊西路127号

(72) 发明人 常新哲 徐绯 王帅 杨磊峰

刘小川 惠旭龙

(74) 专利代理机构 西北工业大学专利中心

61204

代理人 云燕春

(51) Int. Cl.

G06F 30/15 (2020.01)

G06F 30/17 (2020.01)

G06F 30/20 (2020.01)

G06F 111/10 (2020.01)

G06F 119/14 (2020.01)

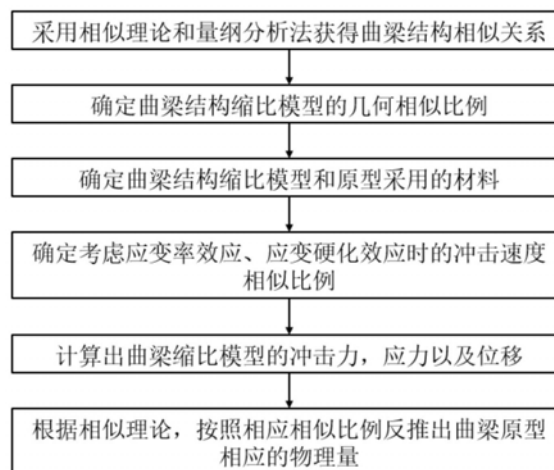
权利要求书3页 说明书7页 附图4页

(54) 发明名称

一种飞机曲梁结构缩比设计方法

(57) 摘要

本发明一种飞机曲梁结构缩比设计方法,属于飞机结构/强度试验技术领域;所述方法的主要步骤为采用相似理论和量纲分析方法获得曲梁结构相似关系,确定曲梁结构缩比模型的集合相似比例,确定曲梁结构缩比模型和原型采用的材料,确定考虑应变率效应、应变硬化效应时的冲击速度相似比例,计算出曲梁缩比模型的冲击力、应力以及位移,最后根据相似理论,按照相应相似比例反推出曲梁原型相应的物理量。对于飞机曲梁结构试验,本发明利用缩比模型试验来代替原型试验,缩短试验周期,同时当原型的材料费用较贵或者较为稀有时,缩比模型可以使用与原型不同的材料来降低试验成本,为飞机曲梁结构缩比设计提供了有用的指导。



1. 一种飞机曲梁结构缩比设计方法,其特征在于具体步骤如下:

步骤1:飞机曲梁顶端受质量冲击,曲梁的厚度为 $h$ ,圆心角为 $\varphi$ ,截面形心处的曲率半径为 $R$ ,宽度为 $W$ ;

步骤2:曲梁动态响应的独立物理量有: $h, \varphi, R, W$ ,冲击质量 $M$ ,冲击速度 $v$ ,材料的参数包括弹性模量 $E$ 、动态屈服应力 $\sigma_d$ 和密度 $\rho$ ;以曲梁顶端变形 $U$ 为因变量,则:

$$U = f(h, \varphi, R, W, M, v, \sigma_d, \rho);$$

步骤3:选取曲梁截面形心处的曲率半径 $R$ 、初始冲击速度 $v$ 和密度 $\rho$ 作为基本量,则能够将曲梁顶端变形化为无量纲形式:

$$\frac{U}{R} = f\left(\frac{h}{R}, \varphi, \frac{W}{R}, \frac{M}{\rho R^3}, \frac{\rho v^2}{\sigma_d}\right);$$

由此得到5个无量纲相似参数,  $\Pi_1 = \frac{h}{R}$ 、 $\Pi_2 = \varphi$ 、 $\Pi_3 = \frac{W}{R}$ 、 $\Pi_4 = \frac{M}{\rho R^3}$ 、 $\Pi_5 = \frac{\rho v^2}{\sigma_d}$ ;

缩比模型与飞机曲梁原型之间的相似性为:  $\left(\frac{U}{R}\right)_m = \left(\frac{U}{R}\right)_p$ ;

其中,下标 $m$ 表示缩比模型、下标 $p$ 表示曲梁原型;

同时根据白金汉 $\Pi$ 定理,保证缩比模型的无量纲相似参数和原型的无量纲相似参数相等,结构受冲击载荷作用下的响应才会完全相似;

步骤4:定义曲梁结构缩比模型与原型各物理参数的相似比例,即缩比模型与原型的取值之比分别为:曲梁半径相似比例 $\beta_R = R_m/R_p$ 、曲梁厚度相似比例 $\beta_h = h_m/h_p$ 、曲梁宽度相似比例 $\beta_W = W_m/W_p$ 、弹性模量相似比例 $\beta_E = E_m/E_p$ 、时间相似比例 $\beta_t = t_m/t_p$ 、密度相似比例 $\beta_\rho = \rho_m/\rho_p$ 、质量相似比例 $\beta_M = M_m/M_p$ 、冲击速度相似比例 $\beta_v = v_m/v_p$ 、应力相似比例 $\beta_\sigma = \sigma_m/\sigma_p$ 、位移相似比例 $\beta_U = U_m/U_p$ 、冲击力相似比例 $\beta_F = F_m/F_p$ 、应变相似比例 $\beta_\varepsilon = \varepsilon_m/\varepsilon_p$ 、应变率相似比例 $\beta_{\dot{\varepsilon}} = \dot{\varepsilon}_m/\dot{\varepsilon}_p$ ;

基于缩比模型和原型几何相似的条件下,  $\Pi_1$ 、 $\Pi_2$ 和 $\Pi_3$ 满足:  $\frac{\Pi_{1m}}{\Pi_{1p}} = 1$ 、 $\frac{\Pi_{2m}}{\Pi_{2p}} = 1$ 和

$$\frac{\Pi_{3m}}{\Pi_{3p}} = 1, \text{ 进而有 } \beta_h = \beta_W = \beta_R = \beta_L, \beta_\varphi = 1;$$

再由  $\frac{\Pi_{4m}}{\Pi_{4p}} = 1$ 和  $\frac{\Pi_{5m}}{\Pi_{5p}} = 1$ 得出,  $\beta_M = \beta_\rho \beta_L^3$ 、 $\beta_\sigma = \beta_\rho \beta_v^2$ ;

步骤5:当缩比模型和原型的自变量满足上述比例关系时,得出缩比模型和原型的最终动态响应满足的相似关系为:

$$\beta_U = \beta_L;$$

$$\beta_t = \beta_L/\beta_v;$$

$$\beta_\varepsilon = 1;$$

$$\beta_{\dot{\varepsilon}} = \beta_v/\beta_L;$$

$$\beta_F = \beta_\rho \beta_L^2 \beta_v^2;$$

步骤6:设定曲梁缩比模型与原型之间几何长度的相似比例,由此得出曲梁缩比模型的

几何尺寸；

步骤7:选择制作缩比模型的材料,由材料属性推算出曲梁缩比模型与原型介质相似比例;

密度相似比例: $\beta_\rho = \rho_m / \rho_p$ ;

弹性模量相似比例: $\beta_E = E_m / E_p$ ;

步骤8:对于步骤7曲梁原型和缩比模型所选取的材料,曲梁原型和缩比模型的材料应变率应变硬化模型,即本构方程分别写为:

$$(\sigma_d)_p = (A_p + B_p \varepsilon_p^{n_p}) \left[ 1 + C_p \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{(\dot{\varepsilon}_0)_p} \right) \right];$$

$$(\sigma_d)_m = (A_m + B_m \varepsilon_m^{n_m}) \left[ 1 + C_m \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_m}{(\dot{\varepsilon}_0)_m} \right) \right];$$

式中A、B为参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0$ 下材料的屈服强度和应变硬化模量,n为参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0$ 下材料应变硬化指数,C为应变率敏感系数;

步骤9:将步骤4和5得出的相似比例关系 $\beta_\sigma = \beta_\rho \beta_v^2$ 、 $\beta_\varepsilon = 1$ 和 $\beta_{\dot{\varepsilon}} = \beta_v / \beta_L$ 代入步骤8缩比模型的本构方程中,得出由缩比模型所预测的结构原型的动态屈服应力:

$$(\sigma'_d)_p = (A_m + B_m \varepsilon_p^{n_m}) \left[ 1 + C_m \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p \beta_v}{(\dot{\varepsilon}_0)_m \beta_L} \right) \right] \frac{1}{\beta_\rho \beta_v^2};$$

考虑应变率效应、应变硬化效应时,材料的动态屈服应力随应变和应变率的改变而变化;对于理想的相似性,在整个冲击过程中,缩比模型的预测的动态屈服应力须与原型始终相似,即 $(\sigma'_d)_p = (\sigma_d)_p$ ,也就是:

$$(A_m + B_m \varepsilon_p^{n_m}) \left[ 1 + C_m \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p \beta_v}{(\dot{\varepsilon}_0)_m \beta_L} \right) \right] \frac{1}{\beta_\rho \beta_v^2} = (A_p + B_p \varepsilon_p^{n_p}) \left[ 1 + C_p \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{(\dot{\varepsilon}_0)_p} \right) \right];$$

步骤10:假定在曲梁结构冲击问题中,原型响应的应变 $\varepsilon$ 在区间 $[\varepsilon_a, \varepsilon_b]$ 变化,应变率 $\dot{\varepsilon}$ 在区间 $[\dot{\varepsilon}_c, \dot{\varepsilon}_d]$ 变化,那么 $(\sigma'_d)_p$ 和 $(\sigma_d)_p$ 存在一个最小误差,表达公式如下:

$$\left\| (A_m + B_m \varepsilon_p^{n_m}) \left[ 1 + C_m \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p \beta_v^*}{(\dot{\varepsilon}_0)_m \beta_L} \right) \right] \frac{1}{\beta_\rho \beta_v^{*2}} - (A_p + B_p \varepsilon_p^{n_p}) \left[ 1 + C_p \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{(\dot{\varepsilon}_0)_p} \right) \right] \right\|_2 =$$

$$\min_{\beta_v \in R} \left\| (A_m + B_m \varepsilon_p^{n_m}) \left[ 1 + C_m \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p \beta_v}{(\dot{\varepsilon}_0)_m \beta_L} \right) \right] \frac{1}{\beta_\rho \beta_v^2} - (A_p + B_p \varepsilon_p^{n_p}) \left[ 1 + C_p \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{(\dot{\varepsilon}_0)_p} \right) \right] \right\|_2;$$

求解 $\beta_v^*$ ,  $\beta_v^*$ 是使得 $(\sigma'_d)_p^*$ 和 $(\sigma_d)_p$ 之间误差最小时的速度相似比例,即修正后的速度因子;

步骤11:根据步骤6设定的原型与模型之间几何长度的相似比例,以及步骤7所选取模型的材料计算出缩比模型所受的冲击质量 $M_m = M_p \beta_\rho \beta_L^3$ 和冲击速度 $v_m = v_p \beta_v^*$ ;通过数值模拟或者实验,计算出曲梁结构缩比模型的冲击力 $F_m$ ,应力 $\sigma_m$ 以及位移 $U_m$ ;

步骤12:利用曲梁缩比模型计算得出的冲击力,应力以及位移,根据相似理论,按照如下关系式反推出曲梁原型相应的冲击力 $F'_p$ ,应力 $\sigma'_p$ 以及位移 $U'_p$ :

$$F'_p = F_m / \beta_F;$$

$$\sigma'_p = \sigma_m / \beta_\sigma;$$

$$U'_p = U_m / \beta_U。$$

2. 根据权利要求1所述飞机曲梁结构缩比设计方法, 其特征在于: 所述步骤8中, 材料应变率应变硬化模型为Johnson-Cook本构模型, 具体形式为 $\sigma_d = (A + B\varepsilon^n) [1 + C \ln \varepsilon \varepsilon_0]$ 。

3. 根据权利要求2所述飞机曲梁结构缩比设计方法, 其特征在于: 所述步骤8中材料应变率应变硬化模型能够由Norton-Hoff本构模型或Cowper-Symonds本构模型替代。

## 一种飞机曲梁结构缩比设计方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于飞机结构/强度试验技术领域,具体涉及一种飞机曲梁结构缩比设计方法。

### 背景技术

[0002] 相似理论作为结构缩比模型试验的理论基础,在缩比模型试验中起到了极其重要的作用。从实验条件的限制和降低实验成本方面考虑,在相似理论的基础上,利用满足一定相似关系的缩比模型来代替原型实验,研究预测原型实验结果是一种行之有效的方法。当前缩比模型设计方法主要运用在桥梁、大型飞艇、列车等研究中,中国专利公开号CN110926995A提供了一种并线桥墩局部冲刷物理模型试验方法、中国专利公开号CN111680361A提供了基于相似理论的飞艇缩比模型设计方法、中国专利公开号CN109657377B提供了一种列车等效缩模构建方法及列车等效缩模,这些方法都能很好地基于相似理论对其静力学响应和动力学特性的缩比模型进行设计,通过缩比模型预测原模型的实验结果。但是对于飞机曲梁结构缩比设计过程中,在冲击载荷作用下材料会表现出不同程度的应变率效应、应变硬化效应,这种效应会引起缩比模型和原型之间的相似畸变,即缩比模型和原型不相似。而这些方法都没有考虑这种效应带来的影响,直接采用这些方法难以精确模拟飞机曲梁结构冲击动力学响应,无法真实还原曲梁结构冲击过程。

[0003] 因此运用相似理论设计飞机曲梁结构缩比模型,进行缩比模型试验,缩短试验周期,同时提高缩比模型与全尺寸结构相似关系的准确性,降低模型误差是本领域技术人员亟需解决的问题。

### 发明内容

[0004] 要解决的技术问题:

[0005] 为了运用相似理论进行飞机曲梁结构缩比模型设计进行缩比模型试验,本发明提供了一种飞机曲梁结构缩比设计方法。并且采用速度修正方法来解决由于考虑应变率效应、应变硬化效应和缩比模型使用与原型不同材料时引起的畸变问题。根据相似理论和量纲分析法,设计出能够反映原型真实的应力位移等特征的缩比模型,可制作出此缩比模型放在实验室内进行模型试验,从而缩短试验周期与规模,节约成本。

[0006] 本发明的技术方案是:一种飞机曲梁结构缩比设计方法,其特征在于具体步骤如下:

[0007] 步骤1:飞机曲梁顶端受质量冲击,曲梁的厚度为 $h$ ,圆心角为 $\varphi$ ,截面形心处的曲率半径为 $R$ ,宽度为 $W$ ;

[0008] 步骤2:曲梁动态响应的独立物理量有: $h, \varphi, R, W$ ,冲击质量 $M$ ,冲击速度 $v$ ,材料的参数包括弹性模量 $E$ 、动态屈服应力 $\sigma_d$ 和密度 $\rho$ ;以曲梁顶端变形 $U$ 为因变量,则:

[0009]  $U = f(h, \varphi, R, W, M, v, \sigma_d, \rho)$ ;

[0010] 步骤3:选取曲梁截面形心处的曲率半径 $R$ 、初始冲击速度 $v$ 和密度 $\rho$ 作为基本量,则

能够将曲梁顶端变形化为无量纲形式:

$$[0011] \quad \frac{U}{R} = f\left(\frac{h}{R}, \varphi, \frac{W}{R}, \frac{M}{\rho R^3}, \frac{\rho v^2}{\sigma_d}\right);$$

[0012] 由此得到5个无量纲相似参数,

$$\Pi_1 = \frac{h}{R}, \Pi_2 = \varphi, \Pi_3 = \frac{W}{R}, \Pi_4 = \frac{M}{\rho R^3}, \Pi_5 = \frac{\rho v^2}{\sigma_d};$$

[0013] 缩比模型与飞机曲梁原型之间的相似性为:

$$[0014] \quad \left(\frac{U}{R}\right)_m = \left(\frac{U}{R}\right)_p;$$

[0015] 其中,下标m表示缩比模型、下标p表示曲梁原型;

[0016] 同时根据白金汉 $\Pi$ 定理,保证缩比模型的无量纲相似参数和原型的无量纲相似参数相等,结构受冲击载荷作用下的响应才会完全相似;

[0017] 步骤4:定义曲梁结构缩比模型与原型各物理参数的相似比例,即缩比模型与原型的取值之比分别为:曲梁半径相似比例 $\beta_R = R_m/R_p$ 、曲梁厚度相似比例 $\beta_h = h_m/h_p$ 、曲梁宽度相似比例 $\beta_W = W_m/W_p$ 、弹性模量相似比例 $\beta_E = E_m/E_p$ 、时间相似比例 $\beta_t = t_m/t_p$ 、密度相似比例 $\beta_\rho = \rho_m/\rho_p$ 、质量相似比例 $\beta_M = M_m/M_p$ 、冲击速度相似比例 $\beta_v = v_m/v_p$ 、应力相似比例 $\beta_\sigma = \sigma_m/\sigma_p$ 、位移相似比例 $\beta_U = U_m/U_p$ 、冲击力相似比例 $\beta_F = F_m/F_p$ 、应变相似比例 $\beta_\varepsilon = \varepsilon_m/\varepsilon_p$ 、应变率相似比例 $\beta_{\dot{\varepsilon}} = \dot{\varepsilon}_m/\dot{\varepsilon}_p$ ;

[0018] 基于缩比模型和原型几何相似的条件下, $\Pi_1$ 、 $\Pi_2$ 和 $\Pi_3$ 满足: $\frac{\Pi_{1m}}{\Pi_{1p}} = 1$ 、 $\frac{\Pi_{2m}}{\Pi_{2p}} = 1$ 和 $\frac{\Pi_{3m}}{\Pi_{3p}} = 1$ ,进而有 $\beta_h = \beta_W = \beta_R = \beta_L$ , $\beta_\varphi = 1$ ;

[0019] 再由 $\frac{\Pi_{4m}}{\Pi_{4p}} = 1$ 和 $\frac{\Pi_{5m}}{\Pi_{5p}} = 1$ 得出, $\beta_M = \beta_\rho \beta_L^3$ 、 $\beta_\sigma = \beta_\rho \beta_v^2$ ;

[0020] 步骤5:当缩比模型和原型的自变量满足上述比例关系时,得出缩比模型和原型的最终动态响应满足的相似关系为:

$$[0021] \quad \beta_U = \beta_L;$$

$$[0022] \quad \beta_t = \beta_L/\beta_v;$$

$$[0023] \quad \beta_\varepsilon = 1;$$

$$[0024] \quad \beta_{\dot{\varepsilon}} = \beta_v/\beta_L;$$

$$[0025] \quad \beta_F = \beta_\rho \beta_L^2 \beta_v^2;$$

[0026] 步骤6:设定曲梁缩比模型与原型之间几何长度的相似比例,由此得出曲梁缩比模型的几何尺寸;

[0027] 步骤7:选择制作缩比模型的材料,由材料属性推算出曲梁缩比模型与原型的介质相似比例;

$$[0028] \quad \text{密度相似比例: } \beta_\rho = \rho_m/\rho_p;$$

$$[0029] \quad \text{弹性模量相似比例: } \beta_E = E_m/E_p;$$

[0030] 步骤8:对于步骤7曲梁原型和缩比模型所选取的材料,曲梁原型和缩比模型的材

料应变率应变硬化模型,即本构方程分别写为:

$$[0031] \quad (\sigma_d)_p = (A_p + B_p \varepsilon_p^{n_p}) \left[ 1 + C_p \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{(\dot{\varepsilon}_0)_p} \right) \right];$$

$$[0032] \quad (\sigma_d)_m = (A_m + B_m \varepsilon_m^{n_m}) \left[ 1 + C_m \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_m}{(\dot{\varepsilon}_0)_m} \right) \right];$$

[0033] 式中A、B为参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0$ 下材料的屈服强度和应变硬化模量,n为参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0$ 下材料应变硬化指数,C为应变率敏感系数;

[0034] 步骤9:将步骤4和5得出的相似比例关系 $\beta_\sigma = \beta_\rho \beta_v^2$ 、 $\beta_\varepsilon = 1$ 和 $\beta_{\dot{\varepsilon}} = \beta_v / \beta_L$ 代入步骤8缩比模型的本构方程中,得出由缩比模型所预测的结构原型的动态屈服应力:

$$[0035] \quad (\sigma'_d)_p = (A_m + B_m \varepsilon_p^{n_m}) \left[ 1 + C_m \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p \beta_v}{(\dot{\varepsilon}_0)_m \beta_L} \right) \right] \frac{1}{\beta_\rho \beta_v^2};$$

[0036] 考虑应变率效应、应变硬化效应时,材料的动态屈服应力随应变和应变率的改变而变化;对于理想的相似性,在整个冲击过程中,缩比模型的预测的动态屈服应力须与原型始终相似,即 $(\sigma'_d)_p = (\sigma_d)_p$ ,也就是:

$$[0037] \quad (A_m + B_m \varepsilon_p^{n_m}) \left[ 1 + C_m \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p \beta_v}{(\dot{\varepsilon}_0)_m \beta_L} \right) \right] \frac{1}{\beta_\rho \beta_v^2} = (A_p + B_p \varepsilon_p^{n_p}) \left[ 1 + C_p \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{(\dot{\varepsilon}_0)_p} \right) \right];$$

[0038] 步骤10:假定在曲梁结构冲击问题中,原型响应的应变 $\varepsilon$ 在区间 $[\varepsilon_a, \varepsilon_b]$ 变化,应变率 $\dot{\varepsilon}$ 在区间 $[\dot{\varepsilon}_c, \dot{\varepsilon}_d]$ 变化,那么 $(\sigma'_d)_p$ 和 $(\sigma_d)_p$ 存在一个最小误差,表达公式如下:

$$\min_{\beta_v \in \mathbb{R}} \left\| (A_m + B_m \varepsilon_p^{n_m}) \left[ 1 + C_m \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p \beta_v^*}{(\dot{\varepsilon}_0)_m \beta_L} \right) \right] \frac{1}{\beta_\rho \beta_v^{*2}} - (A_p + B_p \varepsilon_p^{n_p}) \left[ 1 + C_p \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{(\dot{\varepsilon}_0)_p} \right) \right] \right\|_2 =$$

$$\min_{\beta_v \in \mathbb{R}} \left\| (A_m + B_m \varepsilon_p^{n_m}) \left[ 1 + C_m \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p \beta_v}{(\dot{\varepsilon}_0)_m \beta_L} \right) \right] \frac{1}{\beta_\rho \beta_v^2} - (A_p + B_p \varepsilon_p^{n_p}) \left[ 1 + C_p \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{(\dot{\varepsilon}_0)_p} \right) \right] \right\|_2;$$

[0039] 求解 $\beta_v^*$ ,  $\beta_v^*$ 是使得 $(\sigma'_d)_p$ 和 $(\sigma_d)_p$ 之间误差最小时的速度相似比例,即修正后的速度因子;

[0040] 步骤11:根据步骤6设定的原型与模型之间几何长度的相似比例,以及步骤7所选取模型的材料计算出缩比模型所受的冲击质量 $M_m = M_p \beta_\rho \beta_L^3$ 和冲击速度 $v_m = v_p \beta_v^*$ ;通过数值模拟或者实验,计算出曲梁结构缩比模型的冲击力 $F_m$ ,应力 $\sigma_m$ 以及位移 $U_m$ ;

[0041] 步骤12:利用曲梁缩比模型计算得出的冲击力,应力以及位移,根据相似理论,按照如下关系式反推出曲梁原型相应的冲击力 $F'_p$ ,应力 $\sigma'_p$ 以及位移 $U'_p$ :

$$[0042] \quad F'_p = F_m / \beta_F;$$

$$[0043] \quad \sigma'_p = \sigma_m / \beta_\sigma;$$

$$[0044] \quad U'_p = U_m / \beta_U.$$

[0045] 本发明的进一步技术方案是:所述步骤8中,材料应变率应变硬化模型为Johnson-Cook本构模型,具体形式为 $\sigma_d = (A + B \varepsilon^n) \left[ 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right]$ 。

[0046] 本发明的进一步技术方案是:所述步骤8中材料应变率应变硬化模型能够由Norton-Hoff本构模型或Cowper-Symonds本构模型替代。

[0047] 有益效果

[0048] 本发明的有益效果在于：本发明将相似理论和量纲分析法相结合，提出一种飞机曲梁结构缩比设计方法，通过修正速度因子 $\beta_v^*$ 合理地修正缩比模型的冲击速度，补偿因应变率效应、不同材料引起的畸变问题，从而使缩比模型能够准确预测原型试验结果。该方法设计缩比模型时，主要考虑曲梁结构受冲击时的三个重要特性的相似，即冲击力，应力以及位移与原型的相似，这样可以通过缩比模型的冲击响应真实地反映出原型在受冲击时的动态响应。对于飞机曲梁结构试验，本发明利用缩比模型试验来代替原型试验，缩短试验周期，同时当原型的材料费用较贵或者较为稀有时，缩比模型可以使用与原型不同的材料来降低试验成本，为飞机曲梁结构缩比设计提供了有用的指导。

## 附图说明

[0049] 图1附图为本发明提供的一种飞机曲梁结构缩比设计方法流程图；

[0050] 图2附图为本发明提供的曲梁结构的示意图；

[0051] 图3附图为本发明提供的曲梁结构的二维尺寸标注示意图；

[0052] 图4附图为曲梁原型仿真结果与还原后的缩比模型仿真结果对比分析图；其中(a)图为曲梁顶端位移-时间曲线图，(b)图为变形最大时刻曲梁表面位移分布曲线图，(c)图为曲梁所受的冲击力-时间曲线图，(d)图为曲梁顶端应力-时间曲线图。

## 具体实施方式

[0053] 下面通过参考附图描述的实施例是示例性的，旨在用于解释本发明，而不能理解为对本发明的限制。

[0054] 参照图1所示，本发明实施例公开了一种飞机曲梁结构缩比设计方法，包括以下步骤：

[0055] 步骤1：飞机曲梁顶端受质量冲击，曲梁的厚度为 $h$ ，圆心角为 $\varphi$ ，截面形心处的曲率半径为 $R$ ，宽度为 $W$ ；

[0056] 步骤2：曲梁动态响应的独立物理量有： $h, \varphi, R, W$ ，冲击质量 $M$ ，冲击速度 $v$ ，材料的参数包括弹性模量 $E$ 、动态屈服应力 $\sigma_d$ 和密度 $\rho$ 。以曲梁顶端变形 $U$ 为因变量，则：

$$[0057] \quad U = f(h, \varphi, R, W, M, v, \sigma_d, \rho);$$

[0058] 步骤3：选取曲梁截面形心处的曲率半径 $R$ 、初始冲击速度 $v$ 和密度 $\rho$ 作为基本量，则可以将曲梁顶端变形化为无量纲形式：

$$[0059] \quad \frac{U}{R} = f\left(\frac{h}{R}, \varphi, \frac{W}{R}, \frac{M}{\rho R^3}, \frac{\rho v^2}{\sigma_d}\right);$$

[0060] 由此得到5个无量纲相似参数，

$\Pi_1 = \frac{h}{R}$ 、 $\Pi_2 = \varphi$ 、 $\Pi_3 = \frac{W}{R}$ 、 $\Pi_4 = \frac{M}{\rho R^3}$ 、 $\Pi_5 = \frac{\rho v^2}{\sigma_d}$ 。缩比模型与飞机曲梁原型（下标 $m$ 表示缩比模型、下标 $p$ 表示曲梁原型）之间的相似性即为：

$$[0061] \quad \left(\frac{U}{R}\right)_m = \left(\frac{U}{R}\right)_p;$$

[0062] 同时根据白金汉 $\Pi$ 定理，保证缩比模型的无量纲相似参数和原型的无量纲相似参



数相等,结构受冲击载荷作用下的响应才会完全相似;

[0063] 步骤4:定义曲梁结构缩比模型与原型各物理参数的相似比例(模型与原型的取值之比)分别为:曲梁半径相似比例 $\beta_R=R_m/R_p$ 、曲梁厚度相似比例 $\beta_h=h_m/h_p$ 、曲梁宽度相似比例 $\beta_w=W_m/W_p$ 、弹性模量相似比例 $\beta_E=E_m/E_p$ 、时间相似比例 $\beta_t=t_m/t_p$ 、密度相似比例 $\beta_\rho=\rho_m/\rho_p$ 、质量相似比例 $\beta_M=M_m/M_p$ 、冲击速度相似比例 $\beta_v=v_m/v_p$ 、应力相似比例 $\beta_\sigma=\sigma_m/\sigma_p$ 、位移相似比例 $\beta_U=U_m/U_p$ 、冲击力相似比例 $\beta_F=F_m/F_p$ 、应变相似比例 $\beta_\varepsilon=\varepsilon_m/\varepsilon_p$ 、应变率相似比例 $\beta_{\dot{\varepsilon}}=\dot{\varepsilon}_m/\dot{\varepsilon}_p$ 。基于模型和原型几何相似的条件下, $\Pi_1$ 、 $\Pi_2$ 和 $\Pi_3$ 满足: $\frac{\Pi_{1m}}{\Pi_{1p}}=1$ 、 $\frac{\Pi_{2m}}{\Pi_{2p}}=1$ 和

$\frac{\Pi_{3m}}{\Pi_{3p}}=1$ ,进而有 $\beta_h=\beta_w=\beta_R=\beta_L$ , $\beta_\varphi=1$ 。再由 $\frac{\Pi_{4m}}{\Pi_{4p}}=1$ 和 $\frac{\Pi_{5m}}{\Pi_{5p}}=1$ 可得,

$$\beta_M=\beta_\rho\beta_L^3, \beta_\sigma=\beta_\rho\beta_v^2;$$

[0064] 步骤5:当原型和模型的自变量满足上述比例关系时,可得模型和原型的最终动态响应满足的相似关系为:

$$[0065] \quad \beta_U=\beta_L;$$

$$[0066] \quad \beta_t=\beta_L/\beta_v;$$

$$[0067] \quad \beta_\varepsilon=1;$$

$$[0068] \quad \beta_{\dot{\varepsilon}}=\beta_v/\beta_L;$$

$$[0069] \quad \beta_F=\beta_\rho\beta_L^2\beta_v^2;$$

[0070] 步骤6:设定曲梁缩比模型与原型之间几何长度的相似比例,由此得出曲梁缩比模型的几何尺寸。本实施例中假定 $\beta_L=L_m/L_p=1/4$ ,即按照几何尺寸1:4的关系设计曲梁缩比模型的几何尺寸。缩比模型的尺寸 $h=2\text{mm}$ , $\varphi=98^\circ$ , $R=52\text{mm}$ , $W=40\text{mm}$ ;

[0071] 步骤7:选择制作缩比模型的材料,由材料属性可以推算出曲梁缩比模型与原型的介质相似比例。当模型与原型采用同样的材料,即2024-T351铝合金,则原型与模型的材料参数是相同的,即 $\beta_E=E_m/E_p=1$ ;  $\beta_\rho=\rho_m/\rho_p=1$ ;当缩比模型与原型采用不同的材料,即原型采用2024-T351铝合金,缩比模型采用Q235钢,则 $\beta_E=E_m/E_p=2.76$ ;  $\beta_\rho=\rho_m/\rho_p=2.92$ ;

[0072] 步骤8:对于步骤7曲梁原型和缩比模型所选取的材料,考虑大变形时塑性为主导性因素,常用的材料应变率应变硬化模型有Johnson-Cook本构模型(或者选用Norton-Hoff本构模型,Cowper-Symonds本构模型)。Johnson-Cook本构模型具体形式为

$$\sigma_d=(A+B\varepsilon^n)\left[1+C\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right], \text{式中} A、B \text{为参考应变率} \dot{\varepsilon}_0 \text{下材料的屈服强度和应变硬化模}$$

量, $n$ 为参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0$ 下材料应变硬化指数, $C$ 为应变率敏感系数。曲梁原型和缩比模型Johnson-Cook本构模型的方程分别写为:

$$[0073] \quad (\sigma_d)_p=(A_p+B_p\varepsilon_p^{n_p})\left[1+C_p\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{(\dot{\varepsilon}_0)_p}\right)\right];$$

$$[0074] \quad (\sigma_d)_m=(A_m+B_m\varepsilon_m^{n_m})\left[1+C_m\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}_m}{(\dot{\varepsilon}_0)_m}\right)\right];$$

[0075] 本实例选取2024-T351铝合金和Q235钢这两种材料,其Johnson-Cook本构方程分

别为:  $\sigma_d = (265 + 426\varepsilon^{0.34})(1 + 0.015 \ln \dot{\varepsilon})$  和  $\sigma_d = (244.8 + 400E^{0.36})(1 + 0.039 \ln \dot{\varepsilon})$ ;

[0076] 步骤9: 将步骤4和5得出的相似比例关系  $\beta_\sigma = \beta_\rho \beta_v^2$ 、 $\beta_\varepsilon = 1$  和  $\beta_{\dot{\varepsilon}} = \beta_v / \beta_L$  代入步骤8缩比模型的本构方程中, 可得由缩比模型所预测的结构原型的动态屈服应力:

$$[0077] \quad (\sigma'_d)_p = (A_m + B_m \varepsilon_p^{n_m}) \left[ 1 + C_m \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{(\dot{\varepsilon}_0)_m} \frac{\beta_v}{\beta_L} \right) \right] \frac{1}{\beta_\rho \beta_v^2};$$

[0078] 考虑应变率效应、应变硬化效应时, 材料的动态屈服应力随应变和应变率的改变而变化。对于理想的相似性, 在整个冲击过程中, 缩比模型的预测的动态屈服应力须与原型始终相似, 即  $(\sigma'_d)_p = (\sigma_d)_p$ , 也就是

$$[0079] \quad (A_m + B_m \varepsilon_p^{n_m}) \left[ 1 + C_m \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{(\dot{\varepsilon}_0)_m} \frac{\beta_v}{\beta_L} \right) \right] \frac{1}{\beta_\rho \beta_v^2} = (A_p + B_p \varepsilon_p^{n_p}) \left[ 1 + C_p \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{(\dot{\varepsilon}_0)_p} \right) \right];$$

[0080] 步骤10: 假定在曲梁结构冲击问题中, 原型响应的应变  $\varepsilon$  在区间  $[\varepsilon_a, \varepsilon_b]$  变化, 应变率  $\dot{\varepsilon}$  在区间  $[\dot{\varepsilon}_c, \dot{\varepsilon}_d]$  变化, 那么  $(\sigma'_d)_p$  和  $(\sigma_d)_p$  存在一个最小误差, 表达式如下:

$$[0081] \quad \min_{\beta_v \in \mathbb{R}} \left\| (A_m + B_m \varepsilon_p^{n_m}) \left[ 1 + C_m \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{(\dot{\varepsilon}_0)_m} \frac{\beta_v^*}{\beta_L} \right) \right] \frac{1}{\beta_\rho \beta_v^{*2}} - (A_p + B_p \varepsilon_p^{n_p}) \left[ 1 + C_p \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{(\dot{\varepsilon}_0)_p} \right) \right] \right\|_2 =$$

$$\min_{\beta_v \in \mathbb{R}} \left\| (A_m + B_m \varepsilon_p^{n_m}) \left[ 1 + C_m \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{(\dot{\varepsilon}_0)_m} \frac{\beta_v}{\beta_L} \right) \right] \frac{1}{\beta_\rho \beta_v^2} - (A_p + B_p \varepsilon_p^{n_p}) \left[ 1 + C_p \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_p}{(\dot{\varepsilon}_0)_p} \right) \right] \right\|_2;$$

[0082] 其中,  $\beta_v^*$  是使得  $(\sigma'_d)_p$  和  $(\sigma_d)_p$  之间误差最小时的速度相似比例, 即修正后的速度因子。当缩比模型与原型采用同样的材料, 即2024-T351铝合金, 则  $\beta_v^* = 1.0097$ ; 当缩比模型与原型采用不同的材料, 即原型采用2024-T351铝合金, 缩比模型采用Q235钢, 则  $\beta_v^* = 0.5997$ ;

[0083] 步骤11: 根据步骤6设定的原型与模型之间几何长度的相似比例, 以及步骤7所选取模型的材料, 假定曲梁原型所受的冲击质量  $M_p = 128\text{kg}$ , 冲击速度  $v_p = 3\text{m/s}$ , 当缩比模型与原型采用同样的材料, 即2024-T351铝合金, 可得曲梁缩比模型所受的冲击质量  $M_p = 2\text{kg}$ , 冲击速度  $v_p = 3.0291\text{m/s}$ ; 当缩比模型与原型采用不同的材料, 即原型采用2024-T351铝合金, 缩比模型采用Q235钢, 曲梁缩比模型所受的冲击质量  $M_p = 5.84\text{kg}$ , 冲击速度  $v_p = 1.7991\text{m/s}$ 。通过数值模拟或者实验, 计算出曲梁结构缩比模型的冲击力  $F_m$ , 应力  $\sigma_m$  以及位移  $U_m$ ;

[0084] 步骤12: 利用曲梁缩比模型计算得出的冲击力, 应力以及位移, 根据相似理论, 按照如下关系式反推出曲梁原型相应的冲击力  $F'_p$ , 应力  $\sigma'_p$  以及位移  $U'_p$ :

$$[0085] \quad F'_p = F_m / \beta_F;$$

$$[0086] \quad \sigma'_p = \sigma_m / \beta_\sigma;$$

$$[0087] \quad U'_p = U_m / \beta_U;$$

[0088] 表1 1/4缩比模型的相似比例

	物理量	几何尺寸	位移	时间	速度	冲击力	应力
[0089]	相同材料	0.25	0.25	0.2476	1.0097	0.0637	1.0195
	不同材料	0.25	0.25	0.4169	0.5997	0.0657	1.0509

[0090] 有效性验证。

[0091] 对全尺寸曲梁及曲梁等效缩比模型受冲击工况进行数值仿真计算,选择冲击力,应力以及位移作为主要对比物理量,根据缩比模型设计准则,分析缩比模型预测结果相对于真实结果的有效性。根据图4结果所示,冲击过程中曲梁的冲击力-时间曲线,曲梁顶端位移-时间曲线及曲梁顶端应力-时间曲线吻合较好,这些结果表明,曲梁还原后的缩比模型仿真结果与原型仿真结果相似度较高,进而说明该方法设计的飞机曲梁结构缩比模型试验结果能够很好的预测原型的试验结果。

[0092] 尽管上面已经示出和描述了本发明的实施例,可以理解的是,上述实施例是示例性的,不能理解为对本发明的限制,本领域的普通技术人员在不脱离本发明的原理和宗旨的情况下在本发明的范围内可以对上述实施例进行变化、修改、替换和变型。

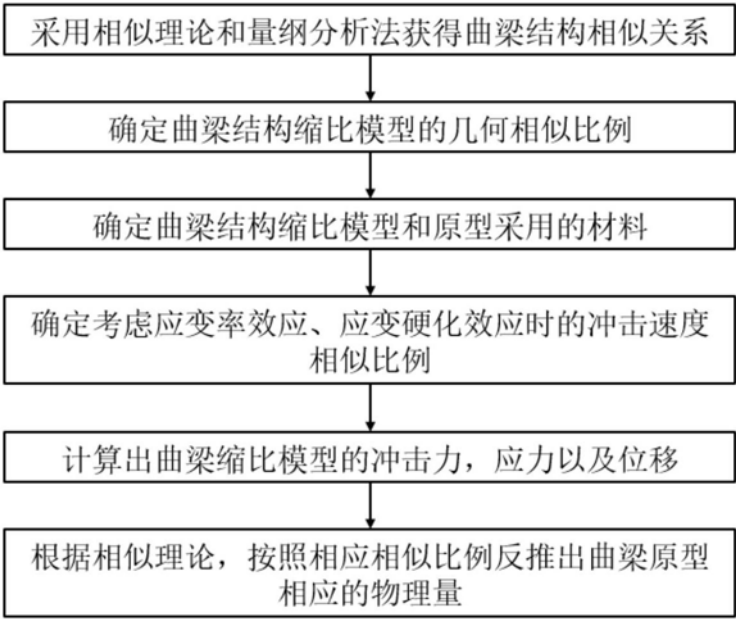


图1

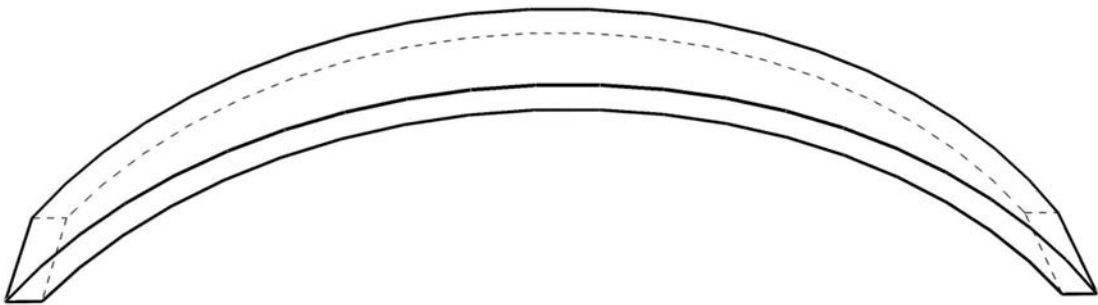


图2

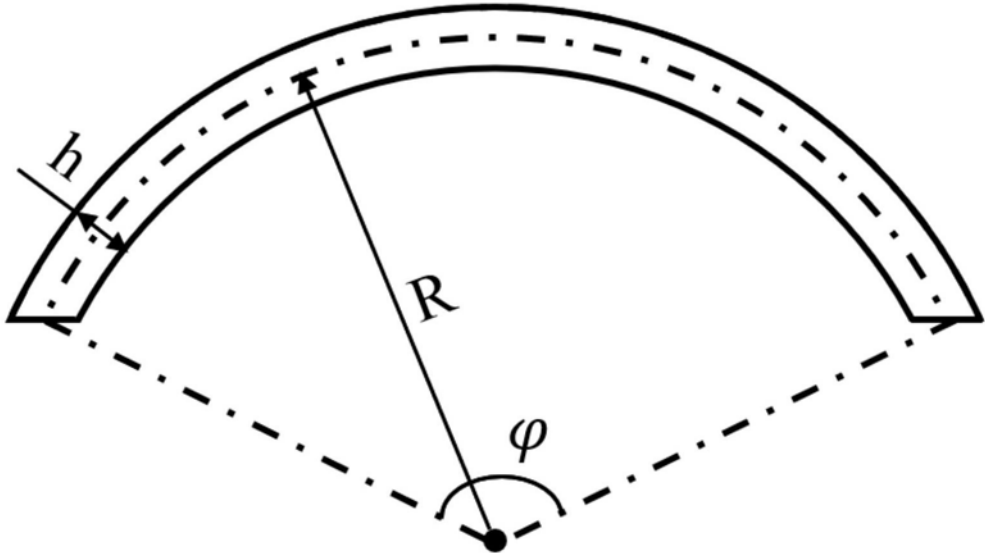
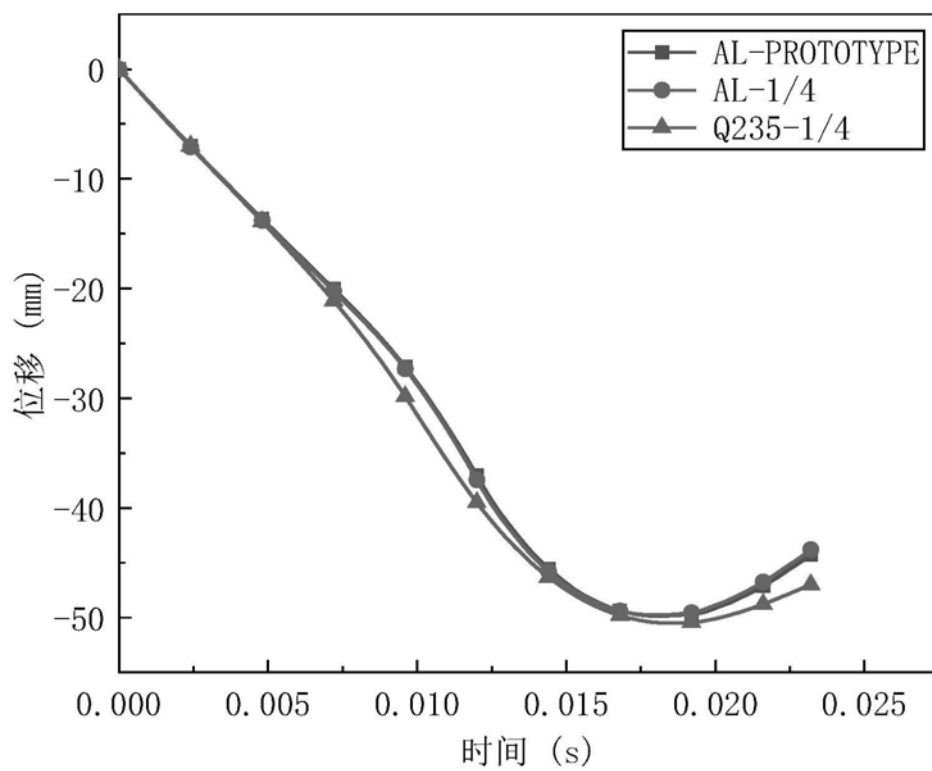
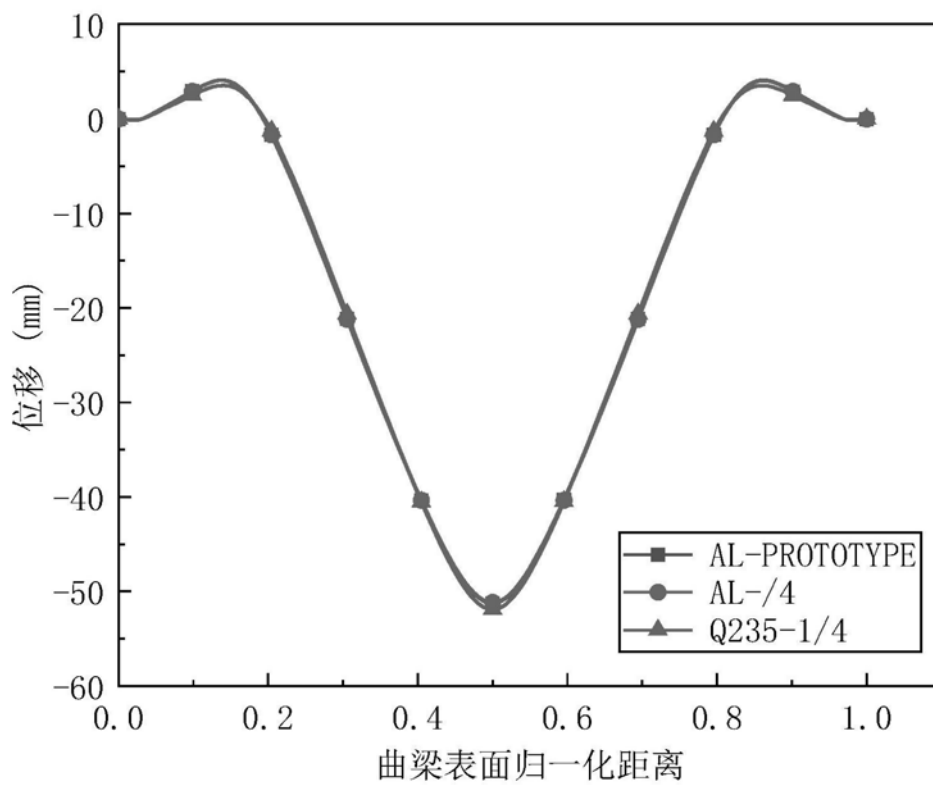


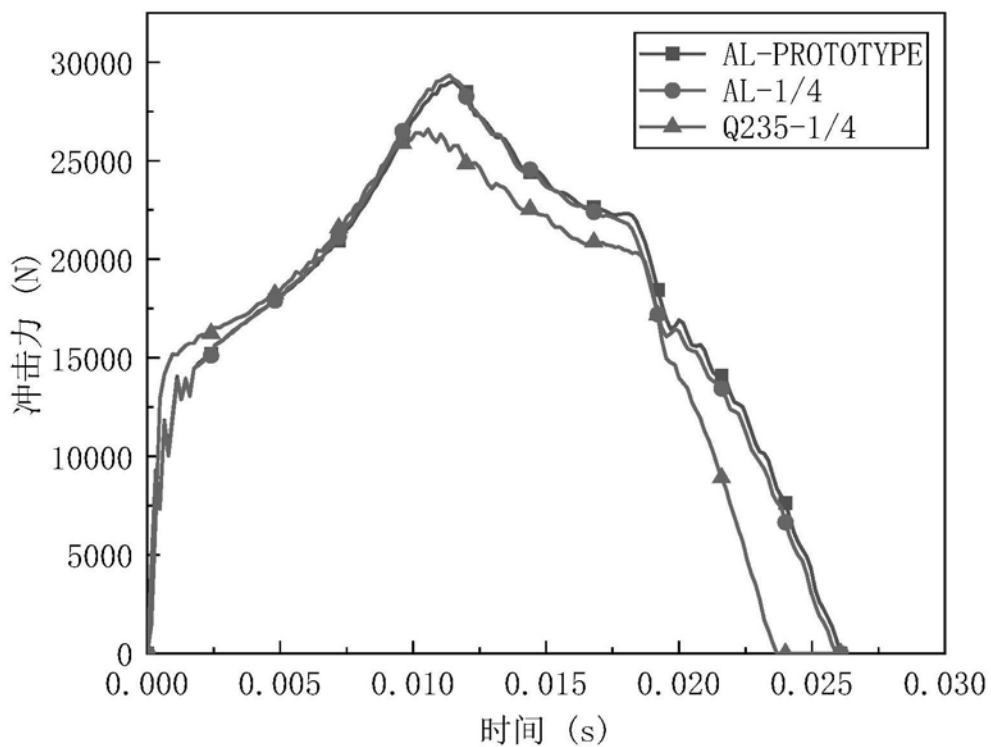
图3



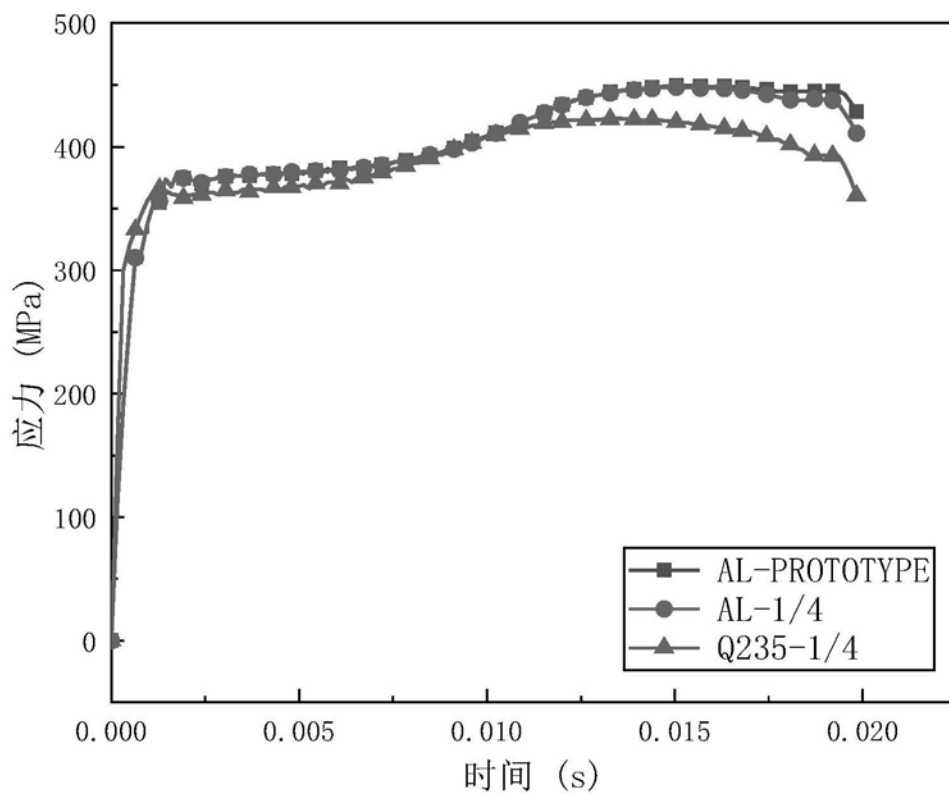
(a)



(b)



(c)



(d)

图4