

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2019.02.007

45 钢冷滚打成形 Johnson-Cook 本构模型 参数标定及修正方法

黄 赓, 李 言, 李 龙, 杨明顺, 李嘉伟, 陈 鑫, 崔莅沐

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要:冷滚打成形技术是在金属材料冷态下,使用具有一定形状的滚打轮不断击打工件表面,迫使金属局部产生塑性变形并逐渐累积的一种增量冷塑性成形方法。为了建立更为精准可靠的冷滚打成形的有限元模型,本文分析了冷滚打成形原理及其成形特点,采用下山单纯形法建立了以材料 J-C 本构模型参数为对象的多元函数修正方法,并以 45 钢为例,结合冷滚打实验和有限元仿真,修正了通过分离式 Hopkinson 压杆实验测定的 J-C 本构模型中的 4 个参数。结果表明相比于修正前,采用修正后的 J-C 本构模型参数得到的仿真结果能够准确描述不同加工参数下的冷滚打成形力,与实验结果的最大误差为 9.8%。

关键词:冷滚打;分离式 Hopkinson 压杆实验;J-C 本构模型;参数修正

中图分类号: TG331

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2019)02-0179-07

Parameter calibration and correction of Johnson-Cook constitutive model for 45 steel cold roll-beating

HUANG Geng, LI Yan, LI Long, YANG Mingshun, LI Jiawei, CHEN Xin, CUI Limu
(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Cold roll-beating technology is the use of metal materials in the cold at a certain degree of elastic-plastic deformation capacity, and the use of a certain shape of the roller and high-speed rotation constantly hits the surface of the workpiece, forcing the surface of the local flow of plastic deformation by a plastic near net forming method. In order to establish a finite element model for more accurate and reliable cold roll-beating, this paper analyzes the principle of cold roll-beating and proposes the correction of J-C constitutive model parameters by using the downhill simplex method of multivariate function. 45 parameters of J-C constitutive model are calibrated by separating the Hopkinson pressure bar experiment. The cold roll-beating experiment is carried out under the condition of different processing parameters, with the simulation model established by the finite element software ABAQUS. The J-C constitutive model parameters are modified by the simplex method and the finite element method. The results show that the simulation results obtained by using the modified J-C constitutive model parameters can accurately reflect the cold roll-beating force under the condition of different processing parameters, with the maximum error of the experimental results 9.8%.

Key words: cold roll-beating; split Hopkinson pressure bar experiment; J-C constitutive model; parameter correction

冷滚打是利用金属在冷态下具有一定的塑性变形能力,使用具有一定形状的滚打轮使工件局部累

积变形形成最终所需功能表面的一种近净成形方法^[1]。目前主要用于传动零件的外齿成形^[2],有別

收稿日期: 2018-01-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475146,51475366);高等学校博士点基金资助项目(20116118110005);西安理工大学博士学位论文创新基金资助项目(310-252071601)

作者简介: 黄赓,男,硕士生,研究方向为冷滚打成形技术。E-mail:hg18710324027@sina.com

通讯作者: 李言,男,教授,博导,博士,研究方向为加工工艺、难加工材料及深孔加工新型加工原理与技术。E-mail:jyx-yp-ly@xaut.edu.cn

于传统模锻、模压等^[3]静态加载成形,冷滚打成形过程的特点是局部冲击加载,增量渐进成形,成形区材料应变速率大,冲击硬化明显,描述材料本构关系时要考虑应变速率效应和硬化效应。

目前对塑性成形的研究方法主要有理论分析、有限元仿真和实验。其中,有限元仿真方法可以直观地获得相关数据,因此得到广泛应用^[4-6]。在进行有限元仿真时需要表述金属变形行为的本构模型,常用的模型有 Copwer-Symonds (C-S)模型、Zerilli-Amstrong (Z-A)模型、Steinberg-Guinan 模型等基于物理本构模型,以及 Johnson-Cook (J-C)模型、Cmap-Beel 模型、Bonder-Parton (B-P)模型等经验本构模型。其中,J-C 本构模型模型结构简单,使用方便,能够较好的描述金属材料的加工硬化效应、应变率效应,相比于其他模型更适用于冷滚打成形过程仿真。张璐^[7]利用 ABAQUS 软件建立了板料、齿条以及齿形的冷滚打有限元模型,并通过 ABAQUS 软件分析得到了冷滚打成形力并进行了修正;梁小明^[8]基于有限元分析理论,对齿条冷滚打成形过程中的回弹问题进行了探究,并分析了残余应力的分布与回弹产生的原因。袁启龙^[9]利用 ABAQUS 软件分析了材料、滚打方式以及滚打公转速度对滚打力的影响。这些研究中所采用的本构模型参数多引用其它加工方法的研究文献或直接通过分离式 Hopkinson 压杆实验法获取^[10],均针对冷滚打成形过程特点对模型参数进行修正,这直接影响了仿真结果的准确性和可靠性,因此获得针对冷滚打成形过程材料变形特点的 J-C 本构模型参数是十分必要的。

针对 J-C 模型参数的修正方法有反演法和有限元法。董菲^[11]基于剪切试验和有限元模拟确定马氏体不锈钢 410 的 J-C 本构方程的系数;叶玉刚^[12]通过与切削试验作对比,修正了钛合金 TC4 的 J-C 本构方程系数;Short^[13]基于 Levenberg-Marquardt 算法修正 J-C 模型系数 A 、 B 、 n 来求得 HY100 钢的 J-C 本构方程系数。目前,涉及冷滚打成形过程中 J-C 本构模型参数的标定与修正研究尚未见报道。

综上所述,本文以 45 钢为例,针对冷滚打成形技术的加工特点,通过对静态和动态压缩力学实验,初步拟合出材料 J-C 本构模型参数^[14-15]。以此为基础建立了冷滚打成形的简化有限元仿真模型,利用冷滚打加工实验和有限元仿真结果,采用下山单纯法修正材料 J-C 本构模型系数,获得修正后的 45 钢 J-C 本构模型参数,并将修正前后不同工艺参数下 45 钢冷滚打的数值模拟结果与实验结果进行对比

论证,为建立更为精确可靠的冷滚打成形有限元模型提供了材料参数的确定和修正方法。

1 冷滚打的成形原理及 J-C 本构模型参数的修正方法

1.1 冷滚打的成形原理

冷滚打成形基本原理见图 1,滚打轮通过中心轴安装在支撑轴上,并可绕自身的轴线转动。当支撑轴在中心主轴的带动下高速旋转时,该运动实现滚打轮的公转,主轴每转一转,滚打轮对工件击打一次,击打工件时,在摩擦力的作用下滚打轮挤压并碾磨工件表面,工件不断进给的过程中使每次击打造成塑性变形量逐步积累,最终在工件表面形成所需廓形。

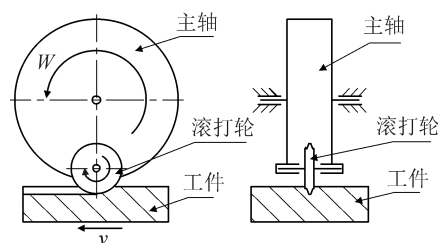


图 1 冷滚打成形原理示意图

Fig. 1 Schematic of cold roll-beating

由冷滚打成形原理可知,冷滚打成形过程材料的变形特点是局部冲击加载,多次加工硬化。考虑到材料在成形时变形主要为挤压变形,因此现有研究中采用的 J-C 本构模型参数多直接通过分离式 Hopkinson 压杆实验法获取,但冷滚打成形过程中工件材料的实际受力情况复杂,不仅有压应力,齿壁两侧还受有拉应力作用,变形区和待变形区还存在切应力,因此直接通过分离式 Hopkinson 压杆实验法获取 J-C 模型参数,必须进一步的修正才能保证仿真结果的准确性。

标准 J-C 模型如下:

$$\sigma = [A + B\epsilon^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{t - t_r}{t_m - t_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中: A 为屈服应力; B 为应变硬化常数; n 为应变硬化系数; C 为应变速率强化系数; m 为热软化系数; ϵ , $\dot{\epsilon}$ 和 $\dot{\epsilon}_0$ 分别为应变,应变率和参考应变率; t , t_r 和 t_m 分别为实验温度,环境温度和试样熔点。第一项描述材料的应变硬化效应;第二项反映应变速率效应;第三项反映温度软化效应。

由冷滚打成形原理可知,滚打轮与工件间歇接触,且接触时间很短,摩擦方式又主要为滚动摩擦,因此单次成形区域小,变形和摩擦所产生热量少且

很快传至于工件未变形区。因此成形过程引起的温度效应可以忽略,取参数 m 为常数 1,得到简化后的 J-C 模型形式为:

$$\sigma = [A + B\epsilon^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0} \right) \right] \quad (2)$$

1.2 J-C 本构模型参数的修正方法

本文采用多元函数的下山单纯形法对 J-C 本构模型参数进行修正。该方法由 Nelder 和 Mead 提出,是一种适用于优化多维无约束问题的数值方法。其优点是稳定性好,适用范围广,搜索阶段效率高^[16]。采用此算法优化 J-C 本构模型参数的流程图见图 2。

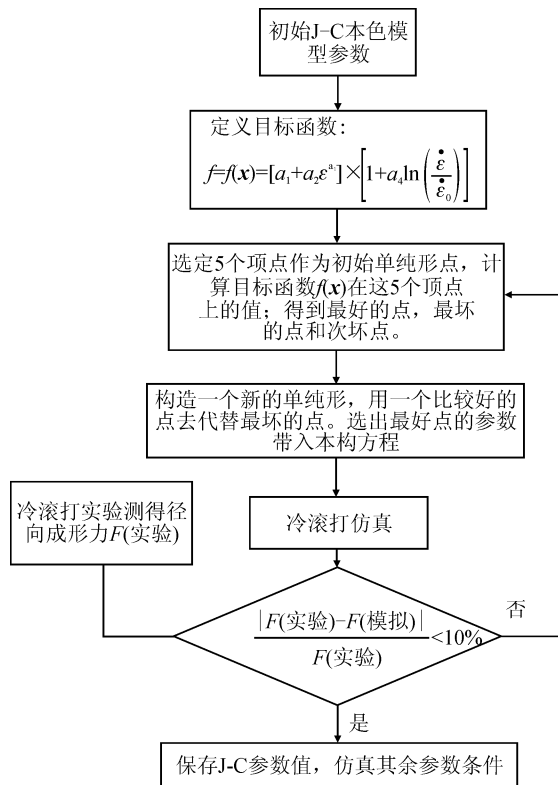


图 2 J-C 本构方程参数修正流程图

Fig. 2 Flow chart of parameter correction of J-C constitutive equation

以 J-C 本构模型中的 4 个参数 A, B, C, n 为自变量,分别对应向量 \mathbf{x} 中的 (a_1, a_2, a_3, a_4) ,定义目标函数为:

$$f = f(\mathbf{x}) = [a_1 + a_2\epsilon^n] \times \left[1 + a_3 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0} \right) \right] \quad (3)$$

选定 5 个顶点作为初始单纯形点;首先以通过分离式 Hopkinson 压杆实验所获得的参数作为初始顶点,然后初始顶点向量中的每个分量分别乘以一个系数 r 来得到剩余 4 个顶点。

计算目标函数 $f(\mathbf{x})$ 在这 5 个顶点上的值; $f_i = f(\mathbf{x}^{(i)}), i = 0, \dots, 4$:

$$\begin{cases} f_L = f(\mathbf{x}^{(L)}) = \min_{0 \leq j \leq 5} \{f_j\} \\ f_H = f(\mathbf{x}^{(H)}) = \max_{0 \leq j \leq 5} \{f_j\} \\ f_G = f(\mathbf{x}^{(G)}) = \max_{\substack{0 \leq j \leq 5 \\ j \neq H}} \{f_j\} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{x}^{(L)}$ 是最好的点, $\mathbf{x}^{(H)}$ 是最坏点, $\mathbf{x}^{(G)}$ 是次坏点。

新的一个单纯形中应保留初始单纯形点中的最好点 $\mathbf{x}^{(L)}$,并通过引入的一个新点 $\mathbf{x}^{(N)}$ 去代替最坏点 $\mathbf{x}^{(H)}$ 来构造新的单纯形或收缩初始单纯形中除最好点 $\mathbf{x}^{(L)}$ 外的其余 4 个点来构造新的单纯形。

下面是新单纯形构造的具体方法,首先应引入新点 $\mathbf{x}^{(N)}$,由式(5)求得除去初始单纯形中最坏点 $\mathbf{x}^{(H)}$ 以后的 4 个点的重心点 $\mathbf{x}^{(C)}$,再根据式(6)求 $\mathbf{x}^{(H)}$ 关于 $\mathbf{x}^{(C)}$ 的反射点 $\mathbf{x}^{(R)}$ 。

$$\mathbf{x}^{(C)} = \frac{1}{4} \left(\sum_{i=0}^4 \mathbf{x}^{(i)} - \mathbf{x}^{(H)} \right) \quad (5)$$

$$\mathbf{x}^{(R)} = (1+a)\mathbf{x}^{(C)} - a\mathbf{x}^{(H)} \quad (6)$$

式中 a 为给定的反射系数, $a > 0$ 。

计算 $f_R = f(\mathbf{x}^{(R)})$ 并与 f_L 进行比较,根据两者大小分两种情况分别处理。

1) 若 $f_R \leq f_L$,表明反射成功,先按式(7)进行扩展,求得 $\mathbf{x}^{(E)}$ 。

$$\mathbf{x}^{(E)} = \gamma \mathbf{x}^{(R)} + (1-\gamma)\mathbf{x}^{(C)} \quad (7)$$

式中 γ 为给定的扩展系数且 $\gamma > 1$ 。此时若 $f_E < f_L$,取 $\mathbf{x}^{(N)} = \mathbf{x}^{(E)}$,否则取 $\mathbf{x}^{(N)} = \mathbf{x}^{(R)}$ 。

2) 若 $f_R > f_L$,此时如果 $f_R < f_G$,则取 $\mathbf{x}^{(N)} = \mathbf{x}^{(R)}$;如果 $f_R \geq f_G$,则由式(8)求得点 $\mathbf{x}^{(N)}$ 。

$$\mathbf{x}^{(N)} = \beta \mathbf{x}^{(R)} + (1-\beta)\mathbf{x}^{(C)} \quad (8)$$

式中 β 为收缩系数, $0 < \beta < 1$ 。

此时我们对新点 $\mathbf{x}^{(N)}$ 进行有效性判断,若 $f_N < f_H$,则新构造的 $\mathbf{x}^{(N)}$ 有效,可以代替初始单纯形中的 $\mathbf{x}^{(H)}$ 来构成新的单纯形;如果 $f_N \geq f_H$,表明所取单纯形太大,则按照式(9)缩小初始单纯形,得到新的 5 个单纯形点。

$$\mathbf{x}^{(i)} = \frac{1}{2} (\mathbf{x}^{(i)} + \mathbf{x}^{(L)}), i = 0, \dots, 4 \quad (9)$$

将生成后的最好点的参数,带入仿真软件 ABAQUS 中计算。当实验所测滚打力和仿真计算滚打力的误差小于 10% 时停止迭代,此时所得参数即为最终修正参数。

2 冷滚打仿真模型建立和实验

2.1 J-C 本构模型参数初始值确定

45 钢为优质碳素结构用钢,广泛应用于各种传动零件。因此本文以 45 钢为例,进行了 J-C 本构模型参数的修正。本文中 45 钢经过调制处理。

首先对材料本构模型参数进行初始标定。通过静态压缩实验和分离式 Hopkinson 压杆实验可获得材料 J-C 本构模型的各个参数^[17]。所用设备为电脑式伺服控制材料试验机(MTS 机)和分离式 Hopkinson 压杆,分别见图 3 和图 4。



图 3 电脑式伺服控制材料试验机
Fig. 3 Computer servo control material testing machine



图 4 分离式 Hopkinson 压杆
Fig. 4 Split Hopkinson pressure bar

通过静态试验和分离式 Hopkinson 压杆实验得到 45 钢的静态应力-应变曲线和动态压缩试验应力-应变曲线,见图 5 和图 6。

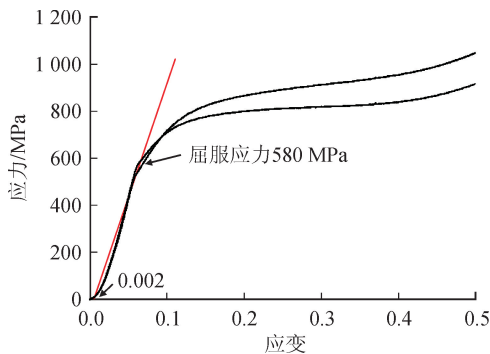


图 5 45 钢静态压缩试验应力-应变曲线
Fig. 5 Stress-strain curve of 45 steel under static compression test

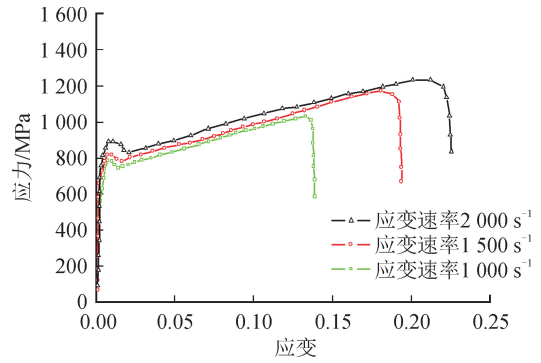


图 6 45 钢动态压缩试验应力-应变曲线
Fig. 6 Stress-strain curve of 45 steel under dynamic compression test

由静态和动态应力-应变曲线可得简化后 J-C 本构模型为:

$$\sigma = [580 + 541.585\epsilon^{0.3963}] \left[1 + 0.021 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{0.008} \right) \right] \quad (10)$$

2.2 冷滚打仿真模型的建立

在 ABAQUS 中构建了如下简化的冷滚打数值计算物理模型,见图 7。

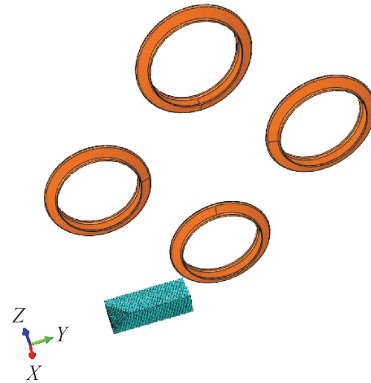


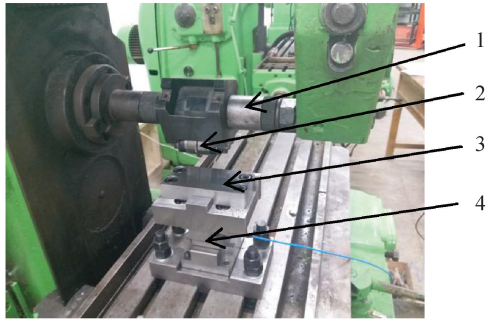
图 7 数值计算物理模型
Fig. 7 Physical model for numerical calculation

为提高仿真效率,该模型将实验中的单滚打轮增加为 4 个并均匀分布在主轴周围。在实际成形过程中滚打轮的强度远大于工件,所以在数值计算物理模型中设滚打轮为解析刚体,滚打轮半径为 25 mm,公转半径为 74 mm。计算模型工件的长宽高分别为 40 mm×14 mm×10 mm,在工件侧壁施加限制滚打轮轴向自由度的边界条件,底部施加限制滚打轮径向自由度边界,采用 C3D8R 单元进行结构化网格划分,单元边长为 0.2 mm。

2.3 冷滚打实验

通过对卧式铣床进行改造以实现冷滚打成形实验。图 8 即为改造后的冷滚打成形实验设备,其中滚打轮采用 20CrMnTi,通过调制渗碳处理,半径和

公转半径分别为 25 mm 和 74 mm,冷滚打过程中的滚打力通过三向力传感器(PCB261A03)测量出。图 9 为冷滚打成形后的工件。



1-主轴; 2-滚打轮; 3-工件; 4-三向力传感器(PCB261A03)

图 8 冷滚打实验平台

Fig. 8 Experimental platform for cold roll-beating

为了得到能够更加稳定可靠进行冷滚打成形仿真的材料本构模型参数,需进行大量实验结果作参

考和对比,因此,选取了如表 1 所示加工参数进行实验,以此为修正 45 钢 J-C 本构模型参数提供对比值。取稳定滚打阶段滚打力峰值的均值为实验滚打力。表 1 给出了不同冷滚打实验工艺参数下的滚打力实验结果(其中滚打密度为转速与进给的比值,表述了单位长度下击打的次数)。



图 9 冷滚打成品

Fig. 9 Cold roll-beating finished product

表 1 冷滚打 45 钢的实验参数

Tab. 1 Experimental parameters of cold roll-beating 45 steel

实验序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
进给/(mm·min ⁻¹)	30	60	120	240	480	960	30	60	120
转速/(r·min ⁻¹)	475	475	475	475	475	475	950	950	950
滚打密度/(r·mm ⁻¹)	15.8	7.9	4.0	2.0	1.0	0.5	31.7	15.8	8.0
滚打力/N	15 630	17 756	19 552	21 088	23 782	27 170	17 102	19 343	21 275
实验序号	10	11	12	13	14	15	16	17	18
进给/(mm·min ⁻¹)	240	480	960	30	60	120	240	480	960
转速/(r·min ⁻¹)	950	950	950	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500
滚打密度/(r·mm ⁻¹)	4.0	2.0	1.0	50.0	25.0	12.7	6.4	3.2	1.6
滚打力/N	22 717	25 228	29 272	14 643	16 878	19 014	21 280	23 866	26 795

3 J-C 本构模型参数修正及结果

3.1 有限元迭代计算

采用未修正的本构模型参数,对表 1 所列工艺参数的冷滚打成形过程进行有限元计算,图 10 给出了成形力实验值与仿真值的相对误差。

选取第 5、6、12、13、14、15、16、17 组这 8 组误差较大的加工参数下的仿真模型,采用多元函数的下山单纯形法对 J-C 本构模型的 4 个参数进行优化后再进行有限元计算,如此迭代计算直到滚打力的有限元计算值和实验值在所规定的容差范围之内,将迭代计算后 8 组参数下所得 J-C 本构模型的各个参数分别进行平均即可得到最终 J-C 本构模型参数。8 组成形参数分别迭代计算后所得 J-C 本构模型参

数和最终 J-C 本构模型参数见表 2 和式(11)。

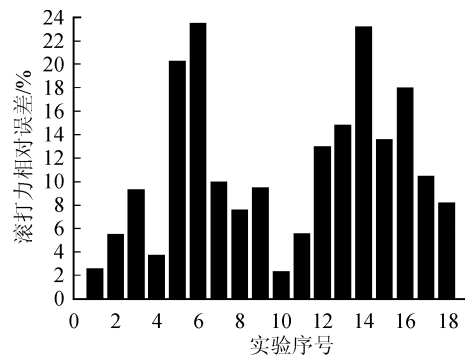


图 10 未修正仿真滚打力与实验滚打力相对误差
Fig. 10 Relative error between the simulated roll-beating force and the experimental roll-beating force

表 2 实验修正结果

Tab. 2 Experimental correction results

实验序号	A	B	n	C
5	503.88	544.82	0.443 7	0.021 2
6	465.82	546.44	0.467 4	0.021 6
12	514.75	544.31	0.435 3	0.020 2
13	522.00	562.06	0.411 2	0.021 2
14	551.00	524.74	0.413 7	0.021 9
15	580.00	541.58	0.416 1	0.021 3
16	551.00	524.74	0.413 7	0.021 9
17	514.75	544.31	0.435 3	0.020 2
平均值	525.40	541.625	0.429 6	0.021 2

$$\sigma = [525.4 + 541.625e^{0.4296}] \left[1 + 0.0212 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{0.008} \right) \right] \quad (11)$$

3.2 结果分析

采用迭代修正后的 J-C 本构模型参数再次对表 1 中 18 个工艺参数条件下的冷轧打成形过程进行模拟仿真得到成形过程的成形力,图 11,图 12,图 13 分别为转速 475 r · min⁻¹, 950 r · min⁻¹, 1 500 r · min⁻¹, 不同滚打密度下实验值与修正前和修正后的本构模型参数的成形力仿真值。

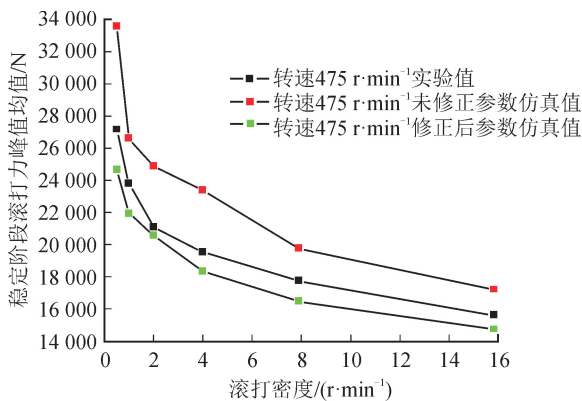


图 11 转速 475 r · min⁻¹ 实验值与未修正和修正后仿真值
Fig. 11 Experimental values of speed 475 r · min⁻¹ and uncorrected and corrected simulation values

从图 11~12 中可以看出,滚打密度较低时,未修正 J-C 本构模型参数所计算的仿真力与实验值的相对误差会偏大且未修正 J-C 本构模型参数所计算的仿真力总体上大于实验所测滚打力。

从图 13 中可以看出,未修正 J-C 本构模型参数所计算的仿真力与实验值的相对误差整体偏大且未修正 J-C 本构模型参数所计算的仿真力全部小于实验所测滚打力。综上可知,未修正 J-C 本构模型参数在计算低转速,低进给滚打力仿真时优于高转速,

高进给加工条件,计算准确性不稳定。

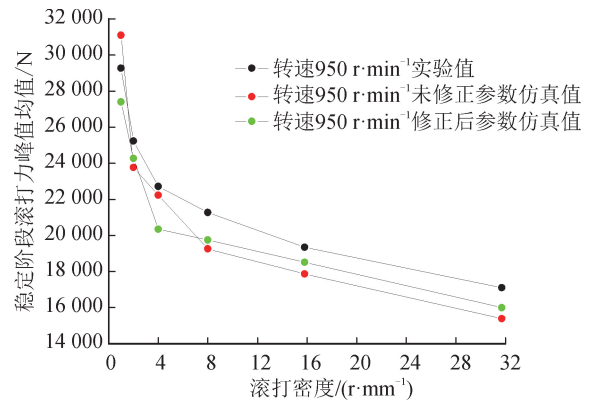


图 12 转速 950 r · min⁻¹ 实验值与未修正和修正后仿真值
Fig. 12 Experimental values of speed 950 r · min⁻¹ and uncorrected and corrected simulation values

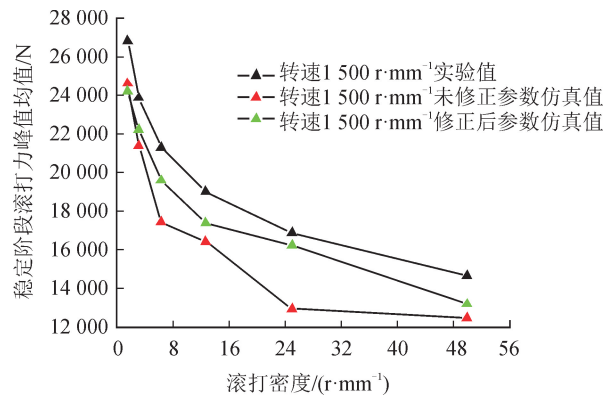


图 13 转速 1 500 r · min⁻¹ 实验值与未修正和修正后仿真值
Fig. 13 Experimental values of speed 1 500 r · min⁻¹ and uncorrected and corrected simulation values

图 14 为修正前与修正后本构模型参数仿真滚打力与实验滚打力的相对误差对比。

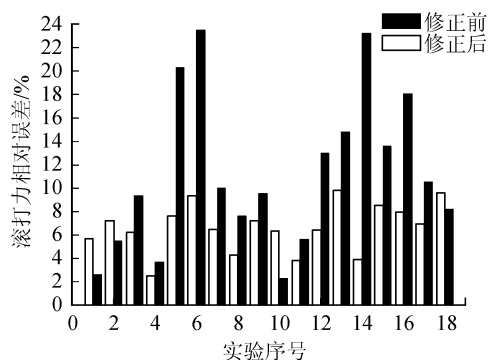


图 14 修正前、后仿真滚打力与实验的相对误差
Fig. 14 Relative error between simulated roll-beating force and experimental roll-beating force before and after correction

从图 14 可看出,采用未修正的 J-C 本构模型参数,最大相对误差为 23%,采用下山单纯形法修正后的 J-C 本构模型,最大相对误差下降到 9.8%。

通过计算修正前与修正后参数仿真滚打力的平均相对误差可知,未修正前的平均相对误差值为 12.7%,修正后的平均相对误差值为 6.64%。为了确定两组参数的稳定性,计算修正前与修正后参数仿真滚打力相对误差值的方差,可得修正前仿真滚打力相对误差值方差为 6.44%,修正后仿真滚打力相对误差值方差为 1.9%。综上可知修正后的本构模型参数在仿真中更加稳定与准确,大大提高了仿真的精度。

4 结 论

1) 本文以 45 钢为例,根据准静态实验 MTS 和动态 SHPB 压杆实验数据标定了 45 钢 Johnson-Cook 本构模型中的 A 、 B 、 C 、 n 等参数。

2) 通过实验与仿真验证得到根据准静态实验 MTS 和动态 SHPB 压杆实验得到的 J-C 本构模型参数在进行仿真时,稳定性较差且不适于描述高进给,高转速的加工参数,必须进行适当修正。

3) 用多元函数下山单纯形法结合 ABAQUS 软件进行有限元迭代分析对冷滚打实验仿真中的 J-C 本构模型参数进行修正,得到了较高精度的冷滚打加工本构方程参数,经验证,该本构方程有效改善了模拟计算的精度。

参考文献:

- [1] 崔凤奎,朱文娟,王晓强,等. 高速冷滚打成形技术研究现状与发展趋势[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2012, 31(2):191-195.
CUI Fengkui, ZHU Wenjuan, WANG Xiaoqiang, et al. Current research and development trends of high-speed cold rolling technology[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science Edition), 2012, 31(2):191-195.
- [2] 张璐,杨明顺,李言,等. 高速冷滚打过程变形力解析方法及其修正[J]. 塑性工程学报, 2011, 18(5):1-7.
ZHANG Lu, YANG Mingshun, LI Yan, et al. Analytic method and its modification for deformation force of high-speed cold roll-beating forming [J]. Journal of Plastic Engineering, 2011, 18(5):1-7.
- [3] 张利军,常辉,薛祥义. 等温锻造技术及其在航空工业中的应用[J]. 热加工工艺, 2010, 39(21):21-24.
ZHANG Lijun, CHANG Hui, XUE Xiangyi. Isothermal forging technology and its application in aviation industry[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(21): 21-24.
- [4] ANDRIETTIS, CHENOT J L, BERNACKI M, et al. Recent and future developments in finite element metal forming simulation[J]. Computer Methods in Materials Science, 2015, 15(2): 265-293.
- [5] SAFDARIAN R, MOSLEMI NAEINI H. The effects of forming parameters on the cold roll forming of channel section[J]. Thin-Walled Structures, 2015, 92: 130-136.
- [6] TEKKAYAA E, ALLWOOD J M, BARIANI P F, et al. Metal forming beyond shaping: predicting and setting product properties[J]. CIRP Annals, 2015, 64(2): 629-653.
- [7] 张璐,李言,杨明顺,等. 高速冷滚打成形过程有限元数值模拟[J]. 机械工程材料, 2012, 36(8):86-88.
ZHANG Lu, LI Yan, YANG Mingshun, et al. Finite element numerical simulation for high-speed cold roll-beating forming process[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2012, 36(8):86-88.
- [8] 梁小明,李言,魏凡智,等. 冷滚打成形中滚打深度与回弹规律的仿真[J]. 中国机械工程, 2016, 27(22): 3054-3060.
LIANG Xiaoming, LI Yan, WEI Fanzhi, et al. Simulation on depths of roll-beating and springback rules of cold roll-beating forming[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(22):3054-3060.
- [9] 袁启龙,李言,杨明顺,等. 块体材料冷滚打成形变形力研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(2):251-256.
YUAN Qilong, LI Yan, YANG Mingshun, et al. Research on deforming force of slab cold roll-beating[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(2):251-256.
- [10] 崔凤奎,郭超,李玉玺. 40Cr 钢的塑性流动应力特征及本构关系[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2012, 33(6):1-5.
CUI Fengkui, GUO Chao, LI Yuxi. Flow stress characteristics and dynamic constitutive model for 40Cr steel[J]. Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2012, 33(6): 1-5.
- [11] 董菲, GERMAIN G, LEBRUN J L, 等. 有限元分析法确定 Johnson-Cook 本构方程材料参数[J]. 上海交通大学学报, 2011, 45(11):1657-1660
DONG Fei, GERMAIN G, LEBRUN J L, et al. Identification of Johnson-Cook constitutive model by finite element analysis[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2011, 45(11):1657-1660.
- [12] 叶玉刚,尹燕. TC4 合金切削有限元模拟动态本构模型的建立[J]. 兵器材料科学与工程, 2009, 32(6):35-39.
YE Yugang, YIN Yan. Establishing dynamic constitutive model of finite element simulation for TC4 alloy cutting[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2009, 32(6):35-39.

- 21-28.
- [6] 施刚,邓椿森,班慧勇,等. 高强度钢材箱形柱滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2012,33(3):1-7.
SHI Gang, DENG Chunsen, BAN Huiyong, et al. Experimental study on hysteretic behavior of high strength steel box-section columns[J]. Journal of Building Structures, 2012,33(3):1-7.
- [7] 王飞,施刚,戴国欣,等. 屈强比对钢框架抗震性能影响研究进展[J]. 建筑结构学报,2010,31(增刊1):18-22.
WANG Fei, SHI Gang, DAI Guoxin, et al. Research advance of influence of yield-to-tensile strength ratio on seismic behavior of steel frames[J]. Journal of Building Structures, 2010,31(S1):18-22.
- [8] 崔巍. Q460 高强钢柱的滞回模型[D]. 上海:同济大学,2011.
CUI Wei. Hysteresis model of Q460 high strength steel column [D]. Shanghai: Tongji University, 2011.
- [9] 胡方鑫,施刚,石永久. 基于断裂力学的高强度钢材梁柱节点受力性能分析[J]. 工程力学,2015,32(4):41-46.
HU Fangxin, SHI Gang, SHI Yongjiu. Fracture behavior of beam-column connections using high strength steel based on fracture mechanics[J]. Engineering Mechanics, 2015,32(4):41-46.
- [10] 周锋,陈以一,童乐为,等. 高强度钢材焊接 H 形构件受力性能的试验研究[J]. 工业建筑,2012,42(1):32-36.
ZHOU Feng, CHEN Yiyi, TONG Lewei, et al. Experimental investigation on mechanical behavior of high-strength steel welded H-section members[J]. Industrial Construction, 2012,42(1):32-36.
- [11] 卢小松,陈向荣. 外伸式端板连接 $M-\theta$ 关系曲线控制参数的研究[J]. 兰州交通大学学报,2004,23(6):19-22.
LU Xiaosong, CHEN Xiangrong. Curve model control parameter analysis of extended end plate connection [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2004,23(6):19-22.
- [12] 李兆凡,石永久,陈宏,等. 改进型钢结构梁柱节点非线性有限元分析,建筑结构,2002,32(9):15-18.
LI Zhaofan, SHI Yongjiu, CHEN Hong, et al. Nonlinear finite element analysis of improved steel structure beam-column joints, Building Structure, 2002, 32(9):15-18.
- [13] BAN Huiying, SHI Gang, SHI Yongjiu, et al. Research progress on the mechanical property of high strength structural steels [J]. Advanced Materials Research, 2011,250/251/252/253:640-648.
- [14] 祁璟璇. Q690 高强钢端板连接节点抗震性能研究[D]. 西安:西安理工大学,2017.
QI Jingxuan. Study on seismic performance of Q690 high-strength steel end plate connection joints [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [15] BURSI O S, JASPART J P. Calibration of a finite element model for isolated bolted end-plate steel connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 1997,44(3),225-262.

(责任编辑 王绪迪)

(上接第 185 页)

- [13] SHORT A, BÄKER M. How to identify Johnson-Cook parameters from machining simulations [C]// The 14th International Esaform conference on Material Forming: Esaform 2011. AIP Publishing, 2011, 1353(1):29-34.
- [14] 柳爱群,黄西成. 高应变率变形的 Johnson-Cook 动态本构模型参数识别方法[J]. 应用数学和力学,2014,35(2):219-225.
LIU Aiqun, HUANG Xicheng. Identification of high-strain-rate material parameters in dynamic Johnson-Cook constitutive model [J]. Applied Mathematics and Mechanics 2014,35(2):219-225.
- [15] 左健民,胡艳艳,汪木兰,等. 基于 J-C 模型的 Ti6Al4V 切屑成形有限元模拟与分析[J]. 机床与液压,2009,37(11):7-10.
ZUO Jianmin, HU Yanyan, WANG Mulan, et al. Finite element simulation and analysis of the chip formation of Ti6Al4V based on J-C model [J]. Machinetool & Hydraulics, 2009,37(11):7-10.
- [16] 翟越,赵均海. 基于自适应混合遗传算法的岩石类材料动态参数反演[J]. 地球科学与环境学报,2008,30(3):286-291.
ZHAI Yue, ZHAO Junhai. Inverse analysis of dynamic parameters of rock materials based on adaptive hybrid genetic algorithms [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2008, 30(3):286-291.
- [17] 李建光,施琪,曹结东. Johnson-Cook 本构方程的参数标定[J]. 兰州理工大学学报,2012,38(2):164-167.
LI Janguang, SHI Qi, CAO Jiedong. Parameters calibration for Johnson-Cook constitutive equation [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2012,38(2):164-167.

(责任编辑 王绪迪)