

切削加工中 7B04 铝合金本构模型*

丁悦^{1,2,3}, 刘畅^{1,2,3}

- (1. 中国航空制造技术研究院数字化与柔性装配研究室, 北京 100024;
- 2. 数字化制造技术航空科技重点实验室, 北京 100024;
- 3. 复杂构件数控加工工艺及装备北京市重点实验室, 北京 100024)

[摘要] 为建立切削加工中 7B04 铝合金 Johnson-Cook 本构模型, 进行了准静态压缩试验和直角自由切削试验, 根据大变形、高应变率和高温度下的材料应力-应变关系对本构模型的参数进行识别, 提出了应变软化修正项和应变率硬化系数的形式, 最后进行了试验验证, 结果表明该模型能够准确模拟出 7B04 铝合金在切削过程中的应力。

关键词: 铝合金; 本构模型; 应变软化; 应变率硬化; 切削

Constitutive Model of Aluminium Alloy in Metal Cutting

DING Yue^{1,2,3}, LIU Chang^{1,2,3}

- (1. Division for Digital and Flexible Assembly, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;
- 2. Aeronautical Key Laboratory for Digital Manufacturing Technology, Beijing 100024, China;
- 3. Beijing Key Laboratory of NC Machining Technology and Equipment of Aero-Component, Beijing 100024, China)

[ABSTRACT] In order to establish the Johnson-Cook constitutive model of 7B04 aluminium alloy, a series of quasi-static compression tests and orthogonal cutting tests were conducted to fit the model parameters. Based on the tests data, it was presented a strain softening term and a equation of strain rate parameter. At last, the constitutive model was proved to be reasonable and accurate via test verification.

Keywords: Aluminum alloy; Constitutive model; Strain softening; Strain rate hardening; Cutting

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2019.07.068

7B04 铝合金是我国在 7A04 铝合金基础上开发的一种新型高强铝合金, 因其良好的强度-韧性综合性能, 广泛应用于飞机框、梁和壁板等结构件^[1]。这些结构件的切削加工工艺方案常根据经验或者试切来制定, 其过程往往存在一定的盲目性, 造成结构件制造成本高、加工精度难以控制等问题。随着数值仿真技术的发展, 有限元方法逐渐应用到结构件的切削加工中, 如对加工过程的切削力、切削温度以及零件的加工变形进行预测^[2]。由于有限元计算的准确性在很大程度上取决于材料本构模型的准确性, 因此如何建立适合描述材料切削过程的本构模型以及识别模型参数成为有限元仿真的关键^[3]。

材料切削过程是一个高度非线性的热黏塑性变形过程, 包含大变形、高应变率和高温度等特点, 使得材料切削本构模型十分复杂, 其参数也难以通过传统的

材料试验方法识别^[4]。目前用于材料切削的本构模型主要包括 Zerilli-Armstrong 本构模型、Usui 本构模型、Johnson-Cook 本构模型等^[5-6]。在诸多本构模型中, Johnson-Cook 本构模型在材料切削方面应用最为广泛, 其形式为:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_{\text{room}}}{T_{\text{melt}} - T_{\text{room}}} \right)^m \right) \quad (1)$$

式中, σ 为流动应力; ε 为应变; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; T 为温度; T_{room} 为室温; T_{melt} 为材料融化温度; A 、 B 、 C 、 n 、 m 分别为模型系数。

针对切削 Johnson-Cook 本构模型的参数识别, 国内外学者进行了大量研究工作。鲁世红等^[7]基于 SHPB 试验采用自适应遗传算法建立了 TC4 钛合金 Johnson-Cook 本构模型, 其应变率范围为 $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$, 与实际的切削应变率尚有数量级的差距。Guo^[8]采用准静态压缩试验和直角自由切削试验, 建立了 6061 铝合金 Johnson-

* 基金项目: 国防基础科研计划(JCKY2017201A001); 北京市科技专项(Z161100005016025)。

Cook 本构模型,但该模型基于热软化系数 $m=1$ 建立,同时没有对应变硬化系数 C 进行深入解析。由此可见,由于缺乏模拟材料高应变率下变形的试验手段和材料切削机理解析,使得目前的切削 Johnson-Cook 本构模型均存在一定的欠缺。

针对上述问题,本研究对切削过程的应变率计算方法进行解析,通过 7B04 铝合金准静态压缩试验和直角自由切削试验,获得不同应变率和温度下的应力-应变关系,基于此建立适合描述材料切削过程的修正 Johnson-Cook 本构模型,通过试验验证模型的准确性。

1 试验步骤

工件材料为 7B04 铝合金,热处理状态为 T7451,元素含量如表 1 所示。试验分为两部分,准静态压缩试验和直角自由切削试验。压缩试样尺寸为 $\phi 20\text{mm} \times 10\text{mm}$,取样方向为预拉伸板轧制方向,环境温度分别选取 25°C 、 100°C 、 150°C 、 200°C 、 250°C 和 300°C ,其中 25°C 为室温,参考应变率为 0.001s^{-1} ,压缩试验在 Gleeble-1500 型模拟试验机上进行。

直角自由切削试验试样如图 1 所示,槽宽 3mm。试验在 Cincinnati HAWK TC150 数控车床上进行,采用 Kistler 9121 型压电测力仪测量切削稳定状态下的进给力 and 主切削力。试验刀具为硬质合金车刀片,前角和刃倾角分别为 6° 和 0° 。试验切削参数如表 2 所示,在完成切削试验后,收集切屑并测量其厚度,并根据下文提出的方法计算应力、应变、应变率和温度。

2 模型建立

图 2 所示为 7B04 铝合金准静态压缩试验的真实塑性应力-应变曲线。可以看到,室温环境下(25°C),7B04 铝合金出现了典型的应变硬化现象,在屈服点附

近没有出现平台现象。在室温环境下将试验应变率设定为参考应变率,此时 Johnson-Cook 模型的应变率硬化项和热软化项数值均为 1,按照工程中屈服极限的计算方法,取 $A=\sigma_{0.2}$,参数 B 和 n 采用线性拟合的方法计算,根据试验结果可得: $A=436.21\text{MPa}$ 、 $B=184.5\text{MPa}$ 、 $n=0.345$ 。

由图 2 看出,7B04 铝合金的应力随着环境温度的提高而降低,这说明材料发生了热软化现象。Johnson-Cook 模型热软化项参数 m 可根据不同环境温度下的屈服应力拟合得到。忽略应变率硬化项的影响,参数 m 由式(1)计算。根据高温压缩试验结果,绘制等效温度 ΔT 和参数 m 的曲线,如图 3 所示。从图 3 中可以看到,曲线符合指数函数,对试验数据进行拟合可得:

$$m = 2.444\exp(-4.05\Delta T) \quad (R^2=0.989) \quad (2)$$

值得注意的是,图 2 所示的 7B04 铝合金高温真实应力-应变曲线中出现了应变软化现象,由于 Johnson-Cook 模型不含有应变软化项,因此需要对模型进行修正。大量文献表明^[9-11]材料在高温下出现应变软化的原因为晶粒发生动态回复和再结晶。通过观察和对比

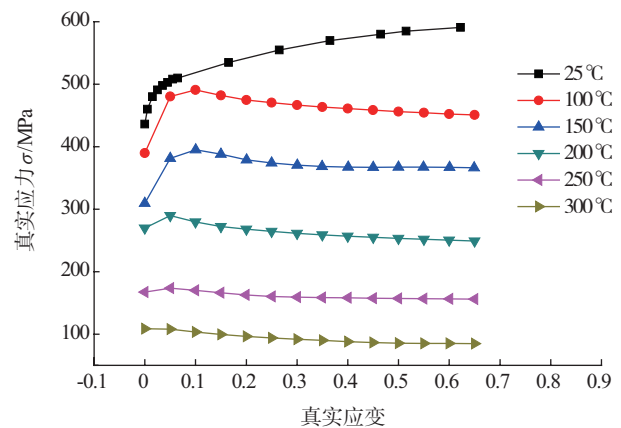


图2 准静态压缩试验真实应力-应变曲线

Fig.2 True stress-strain curve under quasi-static compression test

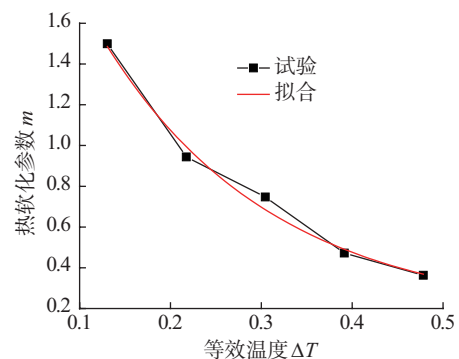


图3 等效温度 ΔT 和参数 m 的对应关系

Fig.3 Relationship between equivalent temperature and thermal softening parameter

表1 7B04铝合金元素质量分数

Table 1 Nominal chemical compositions of 7B04 %

Zn	Mg	Cu	Mn	Fe	Si	Ti	Al
5.0~6.5	1.8~2.8	1.4~2.0	0.2~0.6	0.05~0.25	<0.1	<0.05	余量

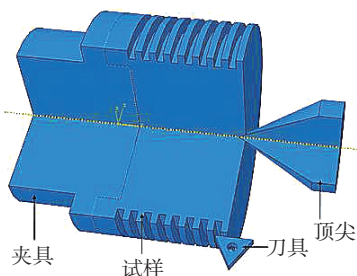


图1 直角自由切削试样

Fig.1 Schematic diagram of orthogonal cutting

表2 试验切削参数和结果
Table 2 Cutting tests data

序号	切削速度 $v_c/(mm \cdot min^{-1})$	切削厚度 t_p/mm	切屑厚度 t_f/mm	进给力 F_f/N	主切削力 F_c/N	应力 σ/MPa	应变 ε	应变率 $\dot{\varepsilon}/s^{-1}$	温度 $T/^\circ C$	应变率硬化系数 C
1	166.7	0.05	0.1124	131.10	231.00	750.21	1.44	1848.40	68.55	0.03438
2	166.7	0.10	0.2074	179.80	356.90	618.18	1.36	950.88	98.54	0.03118
3	166.7	0.15	0.3396	276.80	475.00	508.23	1.45	587.00	103.27	0.01618
4	166.7	0.20	0.3645	244.30	583.30	553.08	1.26	394.12	120.45	0.03445
5	166.7	0.25	0.4723	319.10	709.80	522.40	1.28	315.00	124.63	0.03202
6	166.7	0.30	0.5419	371.90	890.60	564.43	1.25	243.19	139.59	0.05472
7	333.3	0.05	0.1117	130.40	226.50	733.13	1.44	3341.75	111.88	0.05620
8	333.3	0.10	0.2128	193.40	355.20	594.57	1.39	1595.19	130.19	0.04765
9	333.3	0.15	0.3239	268.10	469.40	512.63	1.40	921.20	133.58	0.03544
10	333.3	0.20	0.4127	342.40	638.00	540.86	1.36	668.30	150.93	0.05809
11	333.3	0.25	0.4870	389.70	793.30	562.67	1.31	516.12	163.78	0.07913
12	333.3	0.30	0.5279	355.20	880.00	566.33	1.23	432.25	168.63	0.08588
13	500	0.05	0.1288	166.90	240.70	693.98	1.60	4606.32	133.87	0.06936
14	500	0.10	0.2019	180.90	349.00	602.33	1.34	1997.56	150.31	0.06661
15	500	0.15	0.2769	216.30	489.40	606.45	1.26	1346.85	167.44	0.08884
16	500	0.20	0.3924	315.40	630.90	555.01	1.31	934.63	170.23	0.08215
17	500	0.25	0.4804	376.20	787.40	565.58	1.30	794.24	181.92	0.10313
18	500	0.30	0.5720	445.70	937.50	562.99	1.29	624.77	188.82	0.11572
19	666.7	0.05	0.1294	161.10	225.40	641.13	1.61	5305.28	143.57	0.06819
20	666.7	0.10	0.1905	169.70	353.30	634.25	1.29	2278.80	169.39	0.09607
21	666.7	0.15	0.2975	258.30	498.10	575.12	1.32	1439.96	176.02	0.09348
22	666.7	0.20	0.4087	340.70	630.30	534.02	1.35	1141.32	179.18	0.08830
23	666.7	0.25	0.4966	408.80	782.00	539.94	1.32	828.14	188.94	0.10702
24	666.7	0.30	0.5564	437.10	937.20	569.42	1.27	653.68	201.76	0.14192
25	833.3	0.05	0.1091	118.50	200.50	646.56	1.41	5928.26	152.29	0.07477
26	833.3	0.10	0.2102	204.70	362.00	599.11	1.38	2774.31	176.41	0.09790
27	833.3	0.15	0.2819	241.50	510.90	616.47	1.28	1782.08	194.82	0.13496
28	833.3	0.20	0.3797	307.20	634.70	568.48	1.29	1286.82	194.83	0.12211
29	833.3	0.25	0.4607	373.40	803.90	587.57	1.26	909.09	208.82	0.16079
30	833.3	0.30	0.6177	526.40	945.20	526.88	1.36	812.17	204.71	0.13313
31	1000.0	0.05	0.1273	155.00	215.40	614.26	1.58	6674.71	162.01	0.08199
32	1000.0	0.10	0.2186	225.30	374.90	600.21	1.41	3186.43	188.14	0.11729
33	1000.0	0.15	0.2923	264.30	520.90	608.43	1.31	2016.51	203.38	0.14973
34	1000.0	0.20	0.3818	310.70	629.90	559.72	1.29	1424.73	200.50	0.12908
35	1000.0	0.25	0.4824	379.90	756.40	533.08	1.30	1150.32	202.16	0.12489
36	1000.0	0.30	0.5851	474.40	922.20	535.69	1.31	905.69	211.49	0.14803
37	1166.7	0.05	0.1261	154.80	216.90	622.48	1.57	7645.35	172.53	0.09724
38	1166.7	0.10	0.2074	202.10	359.20	597.37	1.36	3404.89	191.86	0.12073
39	1166.7	0.15	0.3121	280.50	490.90	540.55	1.37	2051.39	194.27	0.11071
40	1166.7	0.20	0.4335	375.00	624.70	501.28	1.40	1706.83	196.90	0.10456
41	1166.7	0.25	0.4640	373.50	799.80	582.79	1.27	1371.04	222.82	0.18910
42	1166.7	0.30	0.5899	483.20	935.30	541.61	1.32	1155.60	220.81	0.17022
43	1333.3	0.05	0.1166	136.10	209.50	639.35	1.48	8929.33	180.04	0.10961
44	1333.3	0.10	0.2232	211.50	343.60	542.06	1.43	4434.73	187.05	0.09625
45	1333.3	0.15	0.2740	215.40	476.60	587.09	1.26	2665.05	206.31	0.14329
46	1333.3	0.20	0.3424	238.70	598.90	582.80	1.21	1841.58	213.73	0.15972
47	1333.3	0.25	0.4644	353.10	750.30	545.12	1.27	1489.06	215.68	0.15419

应变软化曲线及相对常温曲线变化幅值,可以确定应变软化项同时受到应变和温度影响,应变软化项为:

$$\Theta = \exp(-1.1081\varepsilon^{0.629}\Delta T^{0.6852}) \quad (R^2=0.856) \quad (3)$$

Johnson-Cook 模型中参数 C 的确定依赖高应变率下的应力-应变关系。对于切削过程,其剪切区内的应变率在 $10^3 \sim 10^6 \text{s}^{-1}$ 之间,远高于常规试验能够达到的应变率,因此可根据经典切削力学得到材料在高应变率下的应力-应变关系。根据 Oxley 直角自由切削理论,塑性金属在切削过程中的剪切区可简化为从刀尖到自由表面的平面,因此剪切区内的剪切角 ϕ 、应力 σ 、应变 ε 、应变率 $\dot{\varepsilon}$ 分别为:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{(t_u/t_c) \cos \alpha}{1 - (t_u/t_c) \sin \alpha} \right) \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{(F_c \cos \phi - F_t \sin \phi) \sin \phi}{t_u t_w} \quad (5)$$

$$\varepsilon = \frac{\cos \alpha}{\sin \phi \cos(\phi - \alpha)} \quad (6)$$

$$\dot{\varepsilon} = C_0 \frac{v_c \cos \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (7)$$

式中, t_u 为切削厚度; t_c 为切屑厚度; α 为刀具前角; F_c 为主切削力; F_t 为进给切削力; t_w 为切削宽度; v_c 为切削速度; C_0 为材料系数。

材料系数 C_0 可根据 Lee-Shaffer 提出的剪切区滑移线场理论得到^[7]。记剪切区自由表面处静水压力为 p_A , 刀尖处静水压力为 p_B , 则有:

$$C_0 = \frac{(p_A - p_B)(A\varepsilon^n + B)}{Bn\sigma}$$

$$p_A = \sigma \left(1 + 2 \left(\frac{\pi}{4} - \phi \right) \right) \quad (8)$$

$$p_B = \frac{2(F_c \sin \phi + F_t \cos \phi) \sin \phi}{t_u} - p_A$$

剪切区内的平均温度 T 可由 Loewen-Shaw 模型获得:

$$T = T_{\text{room}} + \frac{(1 - \beta)(F_c \cos \phi - F_t \sin \phi) \cos \alpha}{\rho c t_u \cos(\phi - \alpha)} \quad (9)$$

式中, ρ 为材料密度; c 为材料比热; β 为从剪切区流入切屑的热量分数:

$$\beta = \begin{cases} 0.5 - 0.35 \lg \left(\frac{\rho c v_c t_u}{K} \tan \phi \right) & \left(0.04 \leq \frac{\rho c v_c t_u}{K} \tan \phi \leq 10.0 \right) \\ 0.3 - 0.15 \lg \left(\frac{\rho c v_c t_u}{K} \tan \phi \right) & \left(\frac{\rho c v_c t_u}{K} \tan \phi > 10.0 \right) \end{cases} \quad (10)$$

式中, K 为导热系数决定的非空间热力学参数。

参数 C 的确定需要结合准静态压缩试验和直角自由切削试验:

$$C = \frac{\sigma_{\text{cut}} \left(1 - (A + B\varepsilon_{\text{cut}}^n)(1 - \Delta T_{\text{cut}}^m) \right)}{(A + B\varepsilon_{\text{cut}}^n)(1 - \Delta T_{\text{cut}}^m) \ln(\dot{\varepsilon}_{\text{cut}} / \dot{\varepsilon}_0)} \quad (11)$$

式中, 下标 cut 表示切削试验数据。

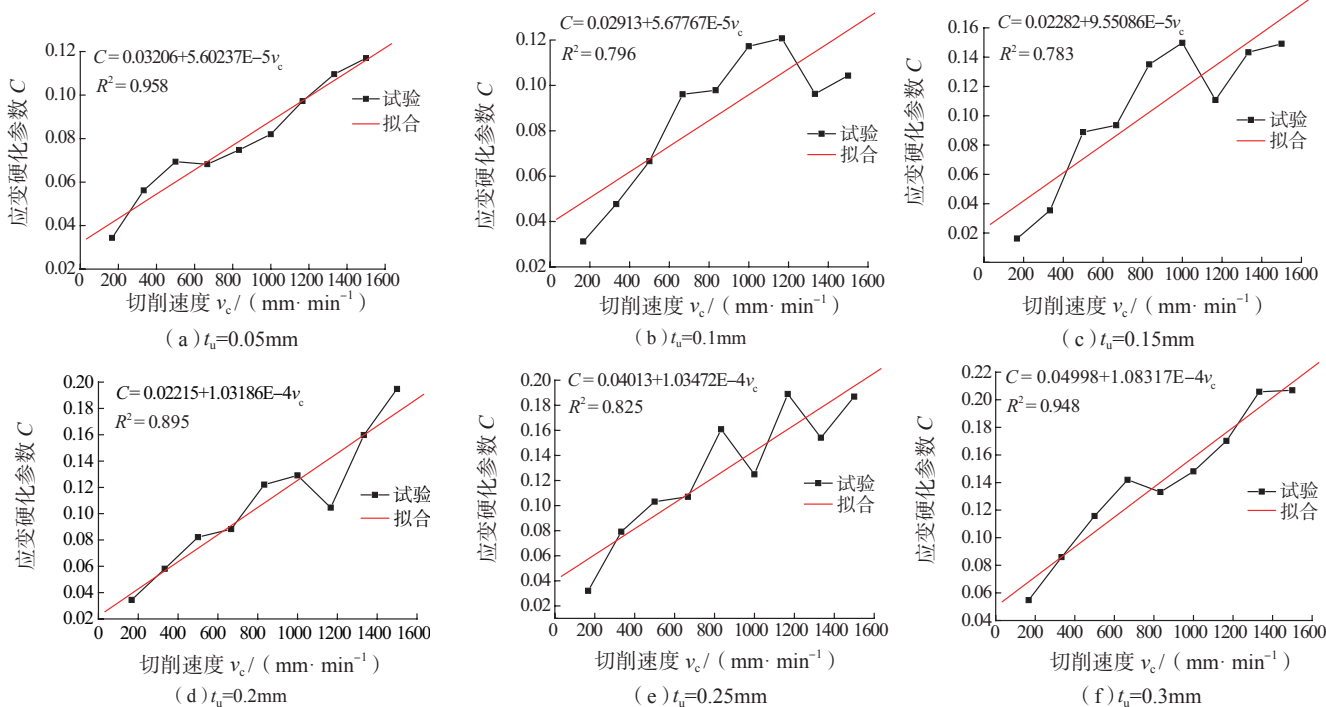


图4 参数 C 随切削厚度 t_u 的变化

Fig.4 Relationship between strain hardening parameter and uncut chip thickness

将直角自由切削试验的切削参数和试验结果带入到式(4)~(11)中,得到计算结果如表2所示。将计算结果绘制成随切削速度和切削厚度的曲线,如图4所示。从图4中可以看到,参数C与切削厚度 t_u 基本上呈现线性关系,可通过拟合得到不同切削速度下的斜率和截距。

提取不同切削速度下参数C的斜率和截距,绘制其对切削厚度 t_u 的曲线,如图5所示。从图5中可以看到,斜率a呈现出 Boltzman 函数形态,截距b则可用二次函数拟合:

$$\begin{cases} a = \frac{-0.00005}{1 + \exp\left(\frac{v_c - 0.137}{0.00393}\right)} + 0.00011 \quad (R^2=0.994) \\ b = 0.04736 - 0.33298v_c + v_c^2 \quad (R^2=0.905) \end{cases} \quad (12)$$

至此,建立了7B04铝合金修正 Johnson-Cook 模型:

$$\begin{cases} \sigma = (436.21 + 184.5\varepsilon^{0.345}) \left(1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{0.0001}\right) \right) (1 - \Delta T^m) \Theta \\ C = \left(\frac{-0.00005}{1 + \exp\left(\frac{v_c - 0.137}{0.00393}\right)} + 0.00011 \right) t_u + (0.04736 - 0.33298v_c + v_c^2) \\ m = 2.444 \exp(-4.05\Delta T) \\ \Theta = \exp(-1.1081\varepsilon^{0.629} \Delta T^{0.6852}) \end{cases} \quad (13)$$

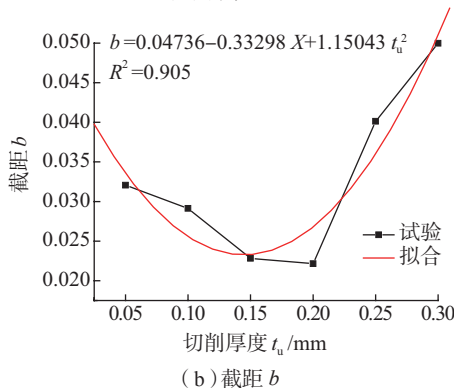
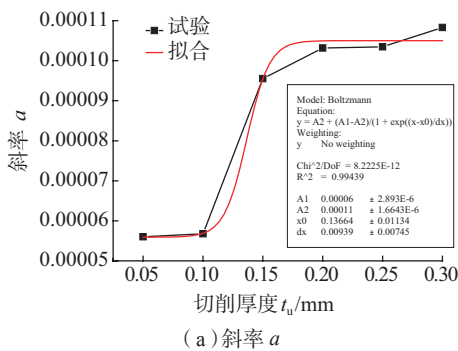


图5 斜率和截距随切削厚度 t_u 的变化

Fig.5 Relationship between strain rate hardening parameter and uncut chip thickness

3 模型验证

在建立7B04铝合金修正 Johnson-Cook 模型后,对模型进行了验证。图6所示为准静态压缩试验值与仿真值对比图。从图6(a)中可以看到,准静态压缩条件下的应力仿真值和试验值之间具有良好的重合度,误差在10%之内;图6(b)表明建立的修正本构模型能够对7B04铝合金的应变硬化效应、热软化效应和应变软化效应进行描述。

图7所示为直角自由切削试验值与仿真值对比,在高应变率条件下的仿真值较为符合试验值,但相比低应

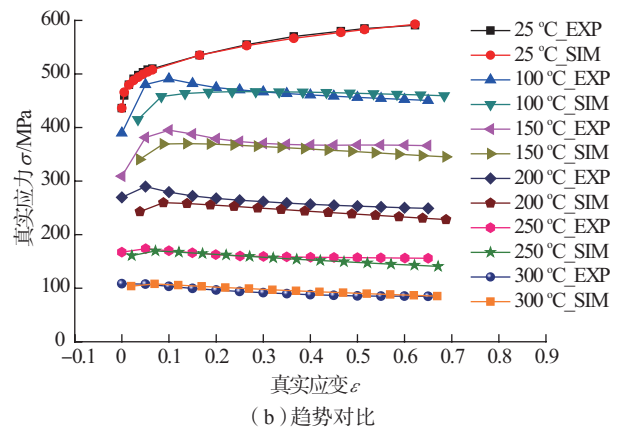
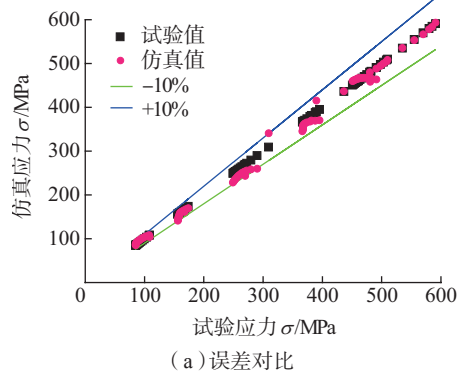


图6 准静态压缩试验值与仿真值

Fig.6 Comparison of simulated flow stress to compression data

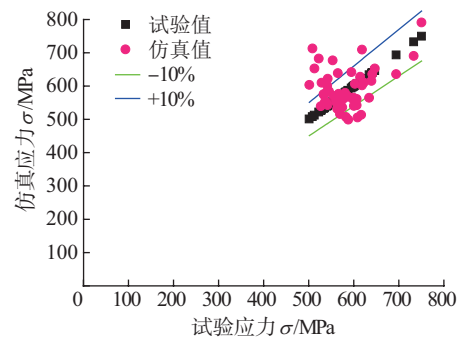


图7 直角自由切削试验值与仿真值

Fig.7 Comparison of simulated flow stress to orthogonal cutting data

变率条件下的误差发散性明显提高。

4 结论

(1) 通过进行准静态压缩试验,对 7B04 铝合金 Johnson-Cook 本构模型应变硬化项和热软化项的系数进行了辨识,并建立了本构模型的应变软化项。

(2) 根据经典切削理论,结合直角自由切削试验,建立了 7B04 铝合金 Johnson-Cook 本构模型应变率硬化项系数的经验公式。

(3) 经过验证发现,Johnson-Cook 本构模型能够较为准确地对 7B04 铝合金切削过程中的应力进行仿真。

参考文献

[1] 张宁,王耀奇,侯红亮,等. 7B04 铝合金超塑变形行为[J]. 材料工程,2017,45(3): 27-33.

ZHANG Ning, WANG Yaoqi, HOU Hongliang, et al. Super plastic deformation behavior of 7B04 Al alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(3): 27-33.

[2] 毕运波,柯映林,董辉跃. 航空铝合金薄壁件加工变形有限元仿真与分析[J]. 浙江大学学报(工学版),2008,42(3): 397-402.

BI Yunbo, KE Yinglin, DONG Yuehui. Finite element simulation and analysis of deformation in machining of aeronautical aluminum alloy thin-walled workpiece[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2008, 42(3): 397-402.

[3] 李琳,解丽静,王西彬,等. 金属切削加工中难加工材料 2Cr13 的本构模型[J]. 中国机械工程,2009,20(20): 2466-2496.

LI Lin, XIE Lijing, WANG Xibin, et al. Constitutive model of 2Cr13 for finite element analysis of chip formation process[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(20): 2466-2496.

[4] 杨勇,柯映林,董跃辉. 金属切削加工中航空铝合金板材的本构模型[J]. 中国有色金属学报,2005,15(6): 854-859.

YANG Yong, KE Yinglin, DONG Yuehui. Constitutive model of aviation aluminum-alloy material in metal machining[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(6): 854-859.

[5] 赵娜,刘二亮,张慧萍,等. 金属切削变形常用本构模型研究进展[J]. 工具技术,2016,50(1): 3-7.

ZHAO Na, LIU Erliang, ZHANG Huiping, et al. Recent advances of constitutive model used in metal cutting[J]. Tool Engineering, 2016, 50(1): 3-7.

[6] 刘占强,吴继华,史振宇,等. 金属切削本构方程的研究[J]. 工具技术,2008,42(3): 3-9.

LIU Zhanqiang, WU Jihua, SHI Zhenyu, et al. State-of-the-art of constitutive equations in metal cutting operations[J]. Tool Engineering, 2008, 42(3): 3-9.

[7] 鲁世红,何宁. TC4 钛合金动态本构模型与高速切削有限元模拟[J]. 兵器材料科学与工程,2009,32(1): 5-9.

LU Shihong, HE Ning. Dynamic constitutive model of TC4

alloy material and finite element simulation of orthogonal high-speed cutting[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2009, 32(1): 5-9.

[8] GUO Y B. An integral method to determine the mechanical behavior of materials in metal cutting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142: 52-81.

[9] 徐文臣,单德彬,李春峰,等. TA15 钛合金的动态热压缩行为及其机理研究[J]. 航空材料学报,2005,25(4): 10-19.

XU Wenchen, SHAN Debin, LI Chunfeng, et al. Study on the dynamic hot compression behavior and deformation mechanism of TA15 titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2005, 25(4): 10-19.

[10] 何宜柱,陈大宏,雷廷权,等. 热变形动态软化本构模型[J]. 钢铁,1999,34(9): 29-33.

HE Yizhu, CHEN Dahong, LEI Tingquan, et al. Constitutive models of dynamic restoration of steel during hot deformation[J]. Iron and Steel, 1999, 34(9): 29-33.

[11] 蔡春波. 1050 铝合金变形和再结晶过程中的织构演变研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学,2009.

CAI Chunbo. Study on the evolution of texture of 1050 aluminum alloy during process of deformation and recrystallization[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2009.

通讯作者: 丁悦,博士、高工,研究方向为数控加工技术, E-mail: dingyue105@163.com。

(责编 大漠)

(上接第67页)

ZHANG Dinghua, LI Shan. Key technology of aero engine digitalized collaborative platform[J]. Manufacture Information Engineering of China, 2009, 38(17): 35-39.

[15] 王睿,陶剑. 航空发动机数字化协同平台建设[J]. 航空制造技术,2013,56(3): 40-43.

WANG Rui, TAO Jian. Construction of aeroengine digital collaboration platform[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(3): 40-43.

[16] 王震,战强,朱丽君. 航空发动机协同设计平台建设[J]. 航空制造技术,2015,58(12): 51-54.

WANG Zhen, ZHAN Qiang, ZHU Lijun. Construction of aeroengine collaborative development platform[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 58(12): 51-54.

[17] 韩福金,陆佳圆,王震,等. 航空发动机协同研制平台的建设与应用[J]. 航空发动机,2015,41(1): 89-93.

HAN Fujin, LU Jiayuan, WANG Zhen, et al. Construction and application of aeroengine collaborative product development platform[J]. Aeroengine, 2015, 41(1): 89-93.

通讯作者: 李伦未,硕士,工程师,主要从事航空发动机系统工程技术管理相关研究工作, E-mail: leolenwis@163.com。

(责编 大漠)