2015年11月 November 2015

文章编号: 1004-0609(2015)-11-2982-08

# 7050-T7451 铝合金铣削加工表面材料特性与 本构关系模型的建立



于鑫1,孙杰1,熊青春2,韩雄2

(1. 山东大学 机械工程学院 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 济南 250061; 2. 中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司,成都 610092)

摘 要:为研究 7050-T7451 铝合金材料铣削后表面应力应变特征,并建立表面材料本构关系模型,采用 SSM-B4000<sup>TM</sup>型应力应变显微探针测试系统对铝合金 7050-T7451 材料表面进行自动球压痕(ABI)实验测试,获得 载荷-深度曲线,据此估算本构关系模型中应变硬化指数(n)与屈服强度(σ<sub>v</sub>)等未知参数。进而基于有限元建模(FEM) 进行压痕过程的有限元仿真分析,研究本构关系模型中参数  $n = \sigma$ ,的变化对载荷-深度曲线的影响规律,获得仿 真载荷-深度曲线与实验曲线误差最小时的参数 n 与 σ<sub>v</sub>应满足的函数关系,验证了基于实验本构关系模型参数的 准确性。采用该材料本构关系模型仿真的载荷-深度曲线与实验曲线相比,平均误差为 5.2%。 关键词: 7050-T7451 铝合金; 压痕实验; 有限元仿真; 本构关系模型 中图分类号: TG115; TG146.2 文献标志码:A

# Milling surface properties of 7050-T7451 aluminum alloy and establishment of constitutive model

YU Xin<sup>1</sup>, SUN Jie<sup>1</sup>, XIONG Qing-chun<sup>2</sup>, HAN Xiong<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture, Ministry of Education,

School of Mechanical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China;

2. AVIC Chengdu Aircraft Industrial (Group)Co., Ltd., Chengdu 610092, China)

Abstract: In order to investigate the stress-strain properties of milling surface for 7050-T7451 aluminum alloy, and also to establish the constitutive model, automated ball indentation (ABI) test was carried out on the SSM-B4000<sup>TM</sup> stress-strain microprobe system. The load-depth curve was obtained. Unknown parameters such as strain hardening exponent n and yield strength  $\sigma_v$  were obtained based on this curve. Furthermore, indentation processes were simulated based on finite element method (FEM). Accordingly, the influence rules of the changes of parameters n and  $\sigma_v$  on load-depth curve were studied. The functional relationship between parameters n and  $\sigma_v$  was obtained when the error of load-depth curve between the simulation result and experimental value is the lowest. At last, the validity of parameters nand  $\sigma_v$  in constitutive model obtained from ABI test was proved. Under this constitutive model, the average error between simulation load-depth curve and the test one is 5.2%.

Key words: 7050-T7451 aluminum alloy; indentation test; finite element simulation; constitutive model

7050 铝合金属于 Al-Zn-Mg-Cu 系合金, 具有比强 度高、耐腐蚀性好、加工性能优良以及断裂韧性较好 等显著优点[1-2],在航空航天工业中得到了广泛应用, 如用于制作飞机机身框架、桁条和壁板等整体结构

件[3-4]。航空整体结构件大都采用铣削的方式进行加 工,在切削力、切削热等作用下,加工表面浅表层材 料物理力学性能发生变化,与基体材料存在差异<sup>[5-6]</sup>。 在航空整体结构件数控加工过程中,由于加工应力与

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51275277)

收稿日期: 2015-05-06; 修订日期: 2015-08-03

通信作者: 孙 杰, 教授, 博士; 电话: 0531-88394593; E-mail: sunjie@sdu.edu.cn

毛坯原有残余应力耦合作用,导致工件变形<sup>[7]</sup>。变形 预测、控制与校正是航空整体结构件加工需要解决的 主要工艺难题之一<sup>[8]</sup>。通过滚压引入局部应力实现航 空整体结构件变形校正是一种新的校正理论和工艺手 段<sup>[9]</sup>。为了建立航空整体结构件滚压变形校正模型,必 须准确获得工件已加工表面浅表层材料物理力学特性。

材料本构关系模型是反映材料物理力学行为的数 学模型,描述了材料流动应力与应变、应变率和温度 等变量之间的关系。材料本构关系模型建立的准确与 否是决定有限元仿真分析精度关键因素之一。许多学 者对 7050 铝合金材料的本构关系展开了深入的研究。 WU 等<sup>[10]</sup>研究了 7050 铝合金在应变速率 0.01~20 s<sup>-1</sup>、 温度 593~743 K 范围内的流动应力应变行为特征,通 过等温压缩实验结果与动力学分析得到了 7050 铝合 金本构方程,并可用来预测材料更高温度的流动应力 应变关系。LI 等<sup>[11]</sup>通过一系列等温压缩实验研究了 7050 铝合金在温度 573~723 K、应变率 0.001~1 s<sup>-1</sup>范 围内的热变形行为,建立了考虑应变补偿的本构关系 方程。滑勇之等<sup>[12]</sup>通过分离式霍普金森压杆(SHPB) 实验获得了室温下不同应变率(400~2500 s<sup>-1</sup>)的应变 率强化参数以及应变率为 2500 s<sup>-1</sup> 不同温度下 (250~600℃)的热软化参数,并用五次多项式作为热软 化项修正了本构关系。付秀丽等[13]研究了航空 7050-T7451 铝合金在温度范围 200~550 ℃及应变率范 围 1400~2800 s<sup>-1</sup>内压缩变形时的流动应力变化特征, 用修正的 Johnson-Cook 模型建立了 7050-T7451 铝合 金的本构关系模型。王虹入等<sup>[14]</sup>基于 Oxley 滑移线理 论,采用正交切削实验的反求方法构建了能够描述 7050-T7451 铝合金切削加工过程的 Johnson-Cook 流 动应力本构关系模型。以上研究通过分离式霍普金森 压杆(SHPB)实验、准静态压缩实验及切削实验反求法 研究了不同温度不同应变率条件下材料的本构关系,

反映了材料整体的力学行为。而在实际铝合金铣削加 工中,由于材料表层力学属性与内部存在差异,会对 残余应力分布及变形产生影响。因此,建立考虑材料 表层属性与内部不同但更接近实际的仿真模型,对减 小有限元仿真误差,提高变形预测和应力分布规律的 准确性有重要意义。铣削加工表面存在沿深度方向变 化的物理力学特性,存在一定的梯度性,其总体影响 深度约为 0.1 mm,而自动球压痕试验中压痕的最大深 度恰好也约为 0.1 mm,自动球压痕试验结果可以认为 是铣削影响层材料的宏观特性。

压痕法是一种以 HERTZ 理论为基础,基于传统 硬度测试衍生出来的表征材料其他力学性能的方法, 早在 1951 年由英国学者 TABOR<sup>[15]</sup>提出。1992 年,美

国学者 OLIVER 等<sup>[16]</sup>在前人研究的基础上完善了此方 法,提出了纳米压痕测试技术的理论基础,发展成为 当前测量小尺寸材料性能常用的纳米压痕法。纳米压 痕法有十分严格的使用限制,例如对使用温度和地面 振动等方面的要求。因此,借助纳米压痕法的理论基 础,发展了技术相对简单、非破坏性的球形压痕测试 技术[17]。自动球压痕测试技术便是其主要应用之一, 20世纪80年代由美国橡树岭国家实验室的HAGGAG 提出[18],用来获得材料应变硬化指数、屈服强度和断 裂韧性等力学性能参数。本文作者采用美国 ATC 公司 生产的 SSM-B4000<sup>™</sup> 型应力应变显微探针测试系统 对 7050-T7451 铝合金进行自动球压痕实验测试,获得 载荷-深度数据。据此分析得到材料表面应力应变关 系,并通过有限元仿真分析验证本构关系准确性。上 述室温条件下材料表面本构关系模型建立的方法,为 建立精确的有限元模型提供支持。

# 1 实验

## 1.1 实验材料

选取美国 Kaiser Aluminum & Chemical Corp 公司 生产的 7050-T7451 铝合金预拉伸板材毛坯件,其化学 成分与材料性能分别如表 1 和 2 所列<sup>[19]</sup>。通过线切割 将试样从 200 mm×100 mm×58 mm 毛坯件上取出, 铣削加工后进行实验。

#### 表1 7050-T7451 铝合金的化学成分<sup>[19]</sup>

 Table 1
 Chemical composition of 7050-T7451 aluminum alloy (mass fraction, %)<sup>[19]</sup>

Zn	Mg	Cu	Zr	Si
5.93	2.23	2.16	0.11	0.019
Fe	Ti	Cr	Mn	Al
0.068	0.02	< 0.01	< 0.01	Bal.

表 2 7050-T7451 铝合金材料性能<sup>[19]</sup>

 Table 2
 Material properties of 7050-T7451 aluminum

 alloy<sup>[19]</sup>
 Image: Second Second

Parameter	Value	
Density/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.83	
Ultimate tensile strength/MPa	524	
Yield tensile strength/MPa	469	
Modulus of elasticity/GPa	71.7	
Poisson ratio	0.33	

2984

#### 1.2 实验方法

实验测试在室温条件下进行,每个测试过程都包含多次加载卸载阶段(加卸载次数可设定,范围为1~8次),测试系统如图1所示。设定测试系统加卸载次数分别为1次、7次,进行自动球压痕实验测试,获取两条载荷-深度曲线数据。实验开始时,压头移动速率设定为0.508 mm/s,靠近试样表面时,降低到0.127 mm/s,接触到试样基准面时,压头速率进一步降低到0.005334 mm/s,待压头开始平稳接触试样表面时,进入预加载阶段,预加载载荷为53.379 N。之后,测试系统按既定循环次数进行加载卸载过程,当完成最后一次加载后,载荷完全卸除,测试结束,整个测试过程耗时 2 min 左右。



图1 自动球压痕测试系统

Fig. 1 Automated ball indentation test system

#### 1.3 实验结果

测试系统在压头开始接触试样表面时,并不记录 载荷值,而是当压头与试样表面稳定接触并达到预加 载载荷时记录位移值。因此,载荷与位移的起始位置 并不是从0开始,需要对位移值进行修正,经修正后 载荷-深度曲线如图 2 所示。其中,P 指加载载荷; P<sub>1</sub>指加载次数为7时第一次的加载载荷;P<sub>2</sub>指加载次



**图 2** 铝合金 7050-T7451 自动球压痕(ABI)实验载荷-深度 曲线

Fig. 2 Load-depth curves of ABI test of 7050-T7451 aluminium alloy

数为7时第二次的加载载荷。

从图 2 可以看出,载荷循环次数对 7050-T7451 铝合金材料压痕测试结果影响较小,每个载荷循环对 应的总压痕深度 h<sub>t</sub>都包括塑性变形部分 h<sub>p</sub>和弹性恢复 部分 h<sub>e</sub>。利用超景深 VHX-600E 型显微镜观察压痕外 观形貌,如图 3 所示。



图3 压痕外观形貌

Fig. 3 Indentation appearance

## 2 本构关系模型的建立

#### 2.1 应变硬化指数的求解

金属材料均匀塑性变形阶段,真实应力-塑性应 变曲线一般通过式(1)幂律强化方程<sup>[20]</sup>(Holloman 方程) 来表示:

$$\sigma_{\rm t} = K \varepsilon_{\rm p}^{\ n} \tag{1}$$

式中: n 为应变硬化指数; K 为强度系数;  $\sigma_{t}$  为真实应力;  $\varepsilon_{p}$  为塑性应变。

每个载荷循环对应的真实应力-塑性应变值均由 式(2)、式(3)求出<sup>[21]</sup>:

$$\varepsilon_{\rm p} = 0.2d_{\rm p}/D \tag{2}$$

$$\sigma_{\rm t} = 4P / \pi d_{\rm p}^{2} \delta \tag{3}$$

其中,

G

$$U_{\rm p} = \left\{ \frac{0.5CD(h_{\rm p}^2 + (d_{\rm p}/2)^2)}{h_{\rm p}^2 + (d_{\rm p}/2)^2 - h_{\rm p}D} \right\}^{1/3}$$
(4)

$$C = 5.47P(1/E_1 + 1/E_2)$$
(5)

$$\delta = \begin{cases} 1.12 & \varPhi \leqslant 1 \\ 1.12 + \tau \ln \varPhi & 1 < \varPhi \leqslant 27 \\ \delta_{\max} & \varPhi > 27 \end{cases}$$
(6)

$$\mathbf{D} = \varepsilon_{\rm p} E_2 / 0.43 \sigma_{\rm t} \tag{7}$$

$$\delta_{\max} = 2.87 \alpha_{\rm m} \tag{8}$$

$$\tau = (\delta_{\max} - 1.12) / \ln 27 \tag{9}$$

式中: D 为压头直径; hp 为塑性压痕深度; dp 为塑性

压痕直径;  $E_1$ 为被测材料弹性模量; c、 $\phi$ 、 $\tau$ 为计算 过程的中间量;  $E_2$ 为压头材料弹性模量(641.22 GPa);  $\delta$  为约束因子,其值随球形压头下部被测材料所处变 形阶段(弹性、弹塑性与完全塑性变形)的不同有 3 种 不同情况(这里材料完全塑变, $\delta=\delta_{max}$ );  $a_m$ 为与材料应 变率敏感性成比例的系数,对于 7050-T7451 铝合金这 类低应变率敏感性材料<sup>[22]</sup>,  $a_m=1.0$ 。

通过式(1)~(3)求出 7 组真实应力-塑性应变值,进 行曲线拟合,得到应变硬化指数 n=0.1449 及强度系数 K=823.70237 MPa,结果如图 4 所示。



图 4 铝合金 7050-T7451 真实应力-塑性应变拟合曲线 Fig. 4 Fitting curve of true stress and plastic strain of aluminium alloy 7050-T7451

#### 2.2 屈服强度求解

利用式(10)~(12)估算材料屈服强度 σ<sub>v</sub>值<sup>[21]</sup>:

 $P/d_t^2 = A(d_t / D)^{m-2}$ (10)

 $\sigma_{\rm y} = \beta_{\rm m} A \tag{11}$ 

$$d_{\rm t} = 2(h_{\rm t}D - h_{\rm t}^2)^{1/2} \tag{12}$$

式中: $\beta_m$ 为材料类型常数<sup>[23]</sup>(对于铝合金材料,  $\beta_m=0.219$ ); *m*为 Meyer 指数<sup>[24]</sup>;  $h_t$ 为加载载荷最大时 的压痕深度;  $d_t$ 为压痕深度  $h_t$ 时压痕直径。

求出 7 次加卸载阶段  $P/d_t^2 = d_t D$  值,进行曲线 拟合,结果如图 5 所示。图中横纵轴为对数坐标,当  $d_t D=1$ 时,  $P/d_t^2 = A$ 。

通 过 式 (11) 计 算 得 材 料 表 层 屈 服 强 度 σ<sub>y</sub>=329.64257 MPa,与内部存在差异(材料屈服强度为 469 MPa(见表 2))。

屈服强度是直接反映材料抵抗塑性变形能力的力 学指标,显微硬度也在一定程度上反映表面层对塑性 变形的抗力,有研究表明,屈服强度与显微硬度呈线 性正比关系<sup>[25]</sup>。铣削时,材料表面层金属塑性变形引 起的硬化、刀-屑、刀-工接触面摩擦及金属塑性流动 产热引起的软化与相变的综合作用使材料表面层硬化 (软化),抵抗塑性变形的能力发生变化。铣削后,材 料表面层屈服强度与内部的存在差异。



图5 A 值回归分析曲线

Fig. 5 Regression analysis for value A

#### 2.3 材料表面本构关系模型建立

金属材料塑性变形阶段流动应力应变行为可以通 过式(13)描述<sup>[26]</sup>,式中只有两个未知变量:应变硬化 指数 *n* 与屈服强度 σ<sub>v</sub>。

$$\sigma_{\rm t} = \sigma_{\rm y} \left( 1 + \frac{E}{\sigma_{\rm y}} \varepsilon_{\rm p} \right)^n \tag{13}$$

代入 *n* 与 *o*<sub>y</sub> 值后, 7050-T7451 铝合金材料表面本 构关系如式(14)所示:

$$\sigma_{\rm t} = 330(1 + 218\varepsilon_{\rm p})^{0.145} \tag{14}$$

# 3 压痕有限元仿真

## 3.1 有限元模型建立

使用 ABAQUS 有限元仿真软件,建立有限元模型,仿真压痕实验过程。在模型中,压头直径 0.7635 mm,设为刚体;工件尺寸 4 mm×2 mm(长(*x*)×高(*y*)),设为弹塑性体。设定单元类型为 CAX3 线性减缩积分单元,分别约束工件左边、底边 *x* 方向与 *y* 方向位移自由度,边界条件为对称边界条件,共划分为 1469个网格。根据一般力学实验结果(见表 2),初设 *o*<sub>y</sub>值为 300、310、…、500 MPa,*n* 值为 0.05、0.1、0.15、0.2,并根据式(13)定义材料属性,将一对 *n* 与 *o*<sub>y</sub>值代入式(13),就对应一种本构关系,需进行一次压痕过程仿真。*n* 与 *o*<sub>y</sub>值有 84 种组合,总共进行 84 次仿真。网格剖分与仿真应力云图如图 6 所示。



图 6 网格剖分与 Mises 应力云图(n=0.15,  $\sigma_y=330$  MPa) Fig. 6 Mesh generation and Mises stress-field nephogram (n=0.15,  $\sigma_y=330$  MPa): (a) Loading process; (b) Unloading process

### 3.2 有限元仿真结果

所有仿真结束后,在 ABAQUS 软件中,导出每 种  $n \subseteq \sigma_y$ 组合下的本构关系对应的载荷-深度数据, 结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出,随着 ABAQUS 中定义的铝合 金 7050-T7451 材料本构关系发生变化,载荷-深度曲 线亦随之变化。材料应变硬化指数 n 一定,以图 7(a) 为例,随着屈服强度 σ<sub>y</sub>增大,曲线斜率呈增大趋势, 即压入相同深度时,所需载荷增大;材料屈服强度 σ<sub>y</sub> 一定,以 σ<sub>y</sub>=300 MPa 对应的曲线为例,实际实验曲线 为参照,随着应变硬化指数 n 增大,即从图 7(a)到图 7(d),曲线斜率增大,这表明施加载荷相同时,压入 深度随 n 增大不断减小。可见,应变硬化指数 n 与屈 服强度 σ<sub>y</sub>发生变化,相应载荷-深度曲线呈有规律变 化。如果应变硬化指数 n 与屈服强度 σ<sub>y</sub>满足一定关系, 则可以得到相同的载荷-深度曲线。因此,对仿真结 果进行分析,得到仿真曲线与实验载荷-深度曲线最 接近时应变硬化指数 n 与屈服强度 σ<sub>y</sub>应满足的函数 关系。



图7 载荷-深度仿真曲线

Fig. 7 Load-depth simulation curves: (a) *n*=0.05; (b) *n*=0.1; (c) *n*=0.15; (d) *n*=0.2

# 4 本构关系模型正确性验证

根据仿真得到的每种 $n = \sigma_y$ 组合下本构关系对应的载荷-深度数据,分析得到使平方误差和为最小时,即实验曲线与仿真曲线最接近时,应变硬化指数n = R服强度 $\sigma_y$ 应满足的关系。如果通过实验得到的应变硬化指数n = R服强度 $\sigma_y$ 值能够满足此函数关系,则证明其正确。

#### 4.1 平方误差和

载荷-深度仿真曲线与实验曲线的接近程度通过式(15)平方误差和(Sum-square error, *E*<sub>s</sub>)表示:

$$E_{\rm s} = \sum_{i=1}^{N} (L_{{\rm sim},i} - L_{{\rm exp},i})^2$$
(15)

式中: *L*<sub>sim,i</sub>为仿真曲线载荷值; *L*<sub>exp,i</sub>为实验曲线载荷 值; *N* 为所取数据总数(这里求压入深度为 0.02~0.11 mm 对应 10 组载荷的平方误差和)。

以屈服强度 σ<sub>y</sub> 为横坐标,平方误差和 E<sub>s</sub> 为纵坐标,作出了 n 值为 0.05、0.1、0.15、0.2 时,σ<sub>y</sub> 与 E<sub>s</sub> 关系拟合曲线(拟合函数为三次多项式),并求出了 E<sub>s</sub> 最小时的 σ<sub>y</sub> 值,分别为 428.09179、374.42488、322.83139、280.9799 MPa,如图 8 所示。



图8 不同硬化指数下的 Es-oy关系

**Fig. 8** Relationship between  $E_s$  and  $\sigma_y$  under different hardening exponents

#### 4.2 应变硬化指数与屈服强度关系

以应变硬化指数 n 为横坐标,使平方误差和  $E_s$  为最小时的屈服强度  $\sigma_y$  值为纵坐标,作出应变硬化指数 n 与屈服强度  $\sigma_v$ 关系拟合曲线,如图 9 所示。

可见,要得到与实验载荷-深度曲线最接近的仿

真曲线,应变硬化指数 n 与屈服强度  $\sigma_y$ 应满足函数关 系如图 9 所示。通过自动球压痕实验测试得到的铝合 金 7050-T7451 材料表面层应变硬化指数 n 与屈服强度  $\sigma_y$ 较好地满足了此函数关系,证明函数关系与本构关 系模型均正确。

采用式(14)所示的铝合金 7050-T7451 材料表面本 构关系模型,经有限元仿真得出加载阶段载荷-深度 仿真曲线与实验曲线,如图 10 所示。取 10 组载荷的 数据进行计算,平均误差为 5.2%。仿真结果与实验结 果吻合性较好,证明了材料本构关系模型与有限元模 型的正确性。



图9  $E_s$ 最小时的 $\sigma_y$ -n 关系拟合曲线

**Fig. 9** Fitting curve of  $\sigma_{y}$  and *n* when  $E_{s}$  minimum



图 10 载荷-深度仿真曲线与实验曲线

Fig. 10 Load-depth simulation and experimental curves

# 5 结论

采用应力应变显微探针系统对铝合金
 7050-T7451 铝合金材料表面进行自动球压痕实验测

试,获得载荷-深度数据。据此分析计算,得到应变 硬化指数 *n*=0.1449,屈服强度 σ<sub>v</sub>=330 MPa。

2) 使用 ABAQUS 软件进行压痕过程的有限元仿 真,得到了 7050-T7451 铝合金材料表面本构关系中应 变硬化指数 *n* 与屈服强度 σ<sub>y</sub>的变化对载荷-深度曲线 影响规律。

 对有限元仿真结果进行分析,得到使仿真载荷
 -深度曲线与实验载荷-深度曲线最接近,应变硬化指数 n 与屈服强度 σ<sub>y</sub>应满足的关系表达式。并用实验数 据对仿真分析结果进行了验证,证明本构关系模型正确。

#### REFERENCES

- DUQUESNAY D L, UNDERHILL P R. Fatigue life scatter in 7xxx series aluminum alloys[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(2): 398–402.
- [2] 刘 兵,彭超群,王日初,王小锋,李婷婷.大飞机用铝合金的研究现状及展望[J].中国有色金属学报,2010,20(9): 1705-1715.

LIU Bing, PENG Chao-qun, WANG Ri-chu, WANG Xiao-feng, LI Ting-ting. Recent development and prospects for giant plane aluminum alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(9): 1705–1715.

- [3] 王建国, 王祝堂. 航空航天变形铝合金的进展(3)[J]. 轻合金 加工技术, 2013, 41(10): 1-14.
  WANG Jian-guo, WANG Zhu-tang. Advancement in aerospace wrought aluminium alloys(3)[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2013, 41(10): 1-14.
- [4] CHEN J F, ZHEN L, JIANG J T, YANG L, SHAO W Z, ZHANG B Y. Microstructures and mechanical properties of age-formed 7050 aluminum alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 539: 115–123.
- [5] 牟海阔,黄信达,袁益楚,张小明,丁 汉. 铝锂合金高速铣 削表面完整性实验研究[J]. 中国科学技术科学, 2014, 44(1): 89-98.

MOU Hai-kuo, HUANG Xin-da, YUAN Yi-chu, ZHANG Xiao-ming, DING Han. Investigation of surface integrity of aluminum lithium alloy in high speed machining[J]. Scientia Sinica Technologica, 2014, 44(1): 89–98.

- [6] ASTAKHOV V P. Surface integrity-definition and importance in functional performance[M]. London: Springer, 2010.
- [7] HUANG X, SUN J, LI J. Effect of initial residual stress and machining-induced residual stress on the deformation of aluminium alloy plate[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 61(2): 131–137.
- [8] 孙 杰,李剑峰,王中秋,宋良煜,何 勇. 航空整体结构件 加工变形控制与校正关键技术[J]. 航空制造技术, 2009(23):

62-66.

SUN Jie, LI Jian-feng, WANG Zhang-qiu, SONG Liang-yu, HE Yong. Key technology on processing deformation control and correction of aviation overall parts[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(23): 62–66.

- [9] 王中秋,李剑峰,孙 杰,李桂玉. 航空整体结构件侧壁滚压 校正的有限元分析[J]. 中国机械工程,2009,20(5):612-616. WANG Zhong-qiu, LI Jian-feng, SUN Jie, LI Gui-yu. FEM analysis of deformation correction by side-wall rolling of aircraft monolithic components[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(5): 612-616.
- WU B, LI M Q, MA D W. The flow behavior and constitutive equations in isothermal compression of 7050 aluminum alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 542: 79–87.
- [11] LI Jiang, LI Fu-guo, CAI Jun, WANG Rui-ting, YUAN Zhan-wei, XUE Feng-mei. Flow behavior modeling of the 7050 aluminum alloy at elevated temperatures considering the compensation of strain[J]. Materials and Design, 2012, 42: 369–377.
- [12] 滑勇之,关立文,刘辛军,崔海龙. 铝合金 7050-T7451 高温 高应变率本构方程及修正[J]. 材料工程,2012(12): 7-13.
  HUA Yong-zhi, GUAN Li-wen, LIU Xin-jun, CUI Hai-long. Research and revise on constitutive equation of 7050-T7451 aluminum alloy in high strain rate and high temperature condition[J]. Journal of Materials Engineering, 2012(12): 7-13.
- [13] 付秀丽,艾 兴,万 熠,张 松. 铝合金 7050 高温流变应 力特征及本构方程[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(12): 113-116.

FU Xiu-li, AI Xing, WAN Yi, ZHANG Song. Flow stress characteristics and constitutive equation at high temperature for 7050 aluminum alloy[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(12): 113–116.

- [14] 王虹入,王中秋,张 倩,李剑峰,孙 杰.切削法构建铝合 金 Al7050-T7451 材料流动应力本构模型[J].山东大学学报 (工学版), 2012, 42(1): 115-120.
  WANG Hong-ru, WANG Zhong-qiu, ZHANG Qian, LI Jian-feng, SUN Jie. Flow stress determination of aluminum alloy 7050-T7451 using cutting experiment inverse analysis methods[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2012, 42(1): 115-120.
- [15] TABOR D. The hardness of metals[M]. Oxford: Clarendon Press, 1951.
- [16] OLIVER W C, PHARR G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments[J]. Journal of Materials Research, 1992, 7(6): 1564–1583.
- [17] 崔 航,陈怀宁,林泉洪. 材料局部性能的球形压痕评价技术研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(9): 92-95.
   CUI Hang, CHEN Huai-ning, LIN Quan-hong. The research progress in spherical indentation evaluation techniques for local

material properties[J]. Materials Review, 2007, 21(9): 92-95.

- [18] HAGGAG F M. Field indentation microprobe for structural integrity evaluation: US, 4852397[P]. 1989–08–01.
- [19] 黄晓明,孙 杰,李剑峰,罗育果. 7050-T7451 铝合金预拉伸板材热膨胀系数变化规律及机理[J]. 中国有色金属学报,2013,23(12): 3282-3288.
   HUANG Xiao-ming, SUN Jie, LI Jian-feng, LUO Yu-guo.

Varying rules and mechanism of thermal expansion coefficient for pre-stretched 7050-T7451 aluminum alloy plate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(12): 3282–3288.

 [20] 杨伯源,张义同. 工程弹塑性力学[M]. 北京: 机械工业出版 社, 2003.
 YANG Bo-yuan, ZHANG Yi-tong. Engineering elastic-plastic

mechanics[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.

- [21] HAGGAG F M. In-situ ABI testing to determine yield strength, pipe grade, and fracture toughness of in-service oil and gas pipelines[J]. Russian Oil and Gas Technology Magazine, 2011(4): 22–29.
- [22] 郭伟国, 田宏伟. 几种典型铝合金应变率敏感性及其塑性流

动本构模型[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(1): 56-61. GUO Wei-guo, TIAN Hong-wei. Strain rate sensitivity and constitutive models of several typical aluminum alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(1): 56-61.

- [23] HAGGAG F M, BELL G E C. Measurement of yield strength and flow properties in spot welds and their HAZs at various strain[C]//The ASM 3rd international conference on trends in welding research. USA: Gatlinburg, 1992: 637–642.
- [24] ATTAF M T. Connection between the loading curve models in elastoplastic indentation[J]. Materials Letters, 2004, 58: 3491–3498.
- [25] RODRIGUEZ R, GUTIERREZ I. Correlation between nanoindentation and tensile properties influence of the indentation size effect[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 361(1/2): 377–384.
- [26] DAO M, CHOLLACOOP N, van VLIET K J, VENKATESH T A, SURESH S. Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation[J]. Acta Materialia, 2001, 49(19): 3899–3918.

(编辑 龙怀中)