

汽车用 5182 铝合金板材的温拉伸流变行为

王孟君^{1,2}, 任 杰¹, 黄电源¹, 姜海涛¹

- (1. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083;
2. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

摘 要: 在变形温度为 323~573 K、应变速率为 0.001~0.1 /s 条件下, 采用 Instron-8032 电子拉伸实验机对汽车用 5182 铝合金板的流变行为进行研究, 采用修正后的 Fields-Backofen 方程描述 5182 铝合金温拉伸时的流变行为, 建立 5182 铝合金在温拉伸时的应力-应变本构模型。结果表明: 在同一应变速率下, 合金的流变应力随温度升高而降低; 对于较高温度(448、523 和 573 K)、较低应变速率($\dot{\epsilon}=0.001$ /s), 合金的流变应力出现明显的峰值应力, 表现出动态再结晶特征; 随着应变速率增加, 合金的流变应力呈现稳态, 表现出动态回复特征。

关键词: 5182 铝合金; 温拉伸; 流变应力; 本构方程

中图分类号: TG 146.21

文献标识码: A

Flow behavior of 5182 aluminum alloy for automotive body sheet during warm tensile deformation

WANG Meng-jun^{1,2}, REN Jie¹, HUANG Dian-yuan¹, JIANG Hai-tao¹

- (1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The flow behavior of 5182 aluminum alloy for automotive body sheet at the strain rate ranging from 0.001 to 0.1 /s and temperature ranging from 323 to 573 K was studied on Instron-8032 tensile tester. A constitutive equation using up-dated Fields-Backofen equation was established to describe the flow behavior of 5182 aluminum alloy during warm tensile. The results show that at the same strain rate the flow stress reduces with increasing temperature. When the deforming temperatures are high (448, 523 and 573 K) and strain rate is low (0.001 /s), the flow stress decreases after a peak value with increasing strain, showing continuous dynamic recrystallization. And with increasing strain rate, the steady state flow characteristics appear, showing dynamic recovery.

Key words: 5182 aluminum alloy; warm tensile; flow stress; constitutive equation

为降低汽车的燃油消耗, 世界各国都在研究汽车轻量化问题, 而铝合金作为一种轻合金材料正在不断地被应用到汽车的设计和开发中^[1]。5000 系铝合金属于 Al-Mg 系, 目前已有几种特殊的 5000 系铝合金用作汽车内部面板, 但其高昂的制造成本限制了其应用范围。因此, 必须寻找 5000 系普通铝合金来代替, 而

5000 系普通铝合金的成形性相对较低^[2]。因此, 研究开发适用于汽车板料成形的 5000 系普通铝合金, 具有重要的意义。

5182 铝合金作为工业生产中广泛应用的一种合金材料, 人们对其变形时的组织演变特征已进行较为深入研究^[3-4], 但对其温变形, 尤其是温拉伸时的流变

行为研究不多。金属温变形流变应力是变形体内部显微组织演变的综合反映, 是表征金属塑性成形性能的最基本量, 受合金化学成分、变形温度、变形程度以及应变速率等的影响^[5-6]。本文作者通过 5182 铝合金板单向温拉伸实验, 研究变形温度、变形程度以及应变速率等条件对其成形性能的影响, 建立该合金温拉伸时的应力—应变材料模型, 为进一步开发 5182 铝合金的温成形工艺提供理论参考。

1 实验

本实验采用厚度为 1.2 mm 的退火态 5182 铝合金轧制板材, 合金化学成分为(质量分数, %): 0.10 Si、0.22 Fe、0.03 Cu、0.24 Mn、4.33 Mg、0.2 Cr、0.01 Ni、0.03 Zn、0.0115 Ti、Al 余量。

板材的生产工艺流程为: 熔炼→铸造→锯切→铣面→均匀化→热轧(5.0 mm)→冷轧(1.2 mm)→退火(250 °C、2 h)。

将板材沿轧制方向加工成标距为 30 mm 的标准试样, 在 Instron-8032 电子拉伸实验机上进行温拉伸实验, 变形温度为 323~573 K, 应变速率分别为 0.001、0.01 和 0.1 /s。温度、位移和位移速度等变形条件由计算机系统自动控制, 并采集真应力和真应变等数据。

2 结果与讨论

2.1 铝合金的真应力—真应变曲线

不同变形温度和应变速率下 5182 铝合金在拉伸变形中的真应力—真应变曲线如图 1 所示。由图 1 可知: 合金在变形时, 流变应力随应变的增加先迅速增大, 当真应变 ε 超过一定值后, 真应力 σ 随着应变量的继续增大呈现稳态流变阶段, 然后合金发生断裂; 在同一温度下, 流变应力曲线随应变速率的增加而升高, 但试样断裂时的真应变降低, 如在温度为 523 K、应变速率为 0.01 /s 时, 试样断裂时的真应变为 0.27, 而应变速率为 0.1 /s 时, 真应变降低到 0.24。这主要是因为随着应变速率的增大, 单位时间内参加运动的位错增多, 从而使合金应变硬化程度增加^[7-8]; 在同一应变速率下, 流变应力曲线随变形温度的升高而下降。在较低的应变速率下, 当变形温度较高时, 流变应力随应变的增加有所降低, 表现出动态再结晶特征。

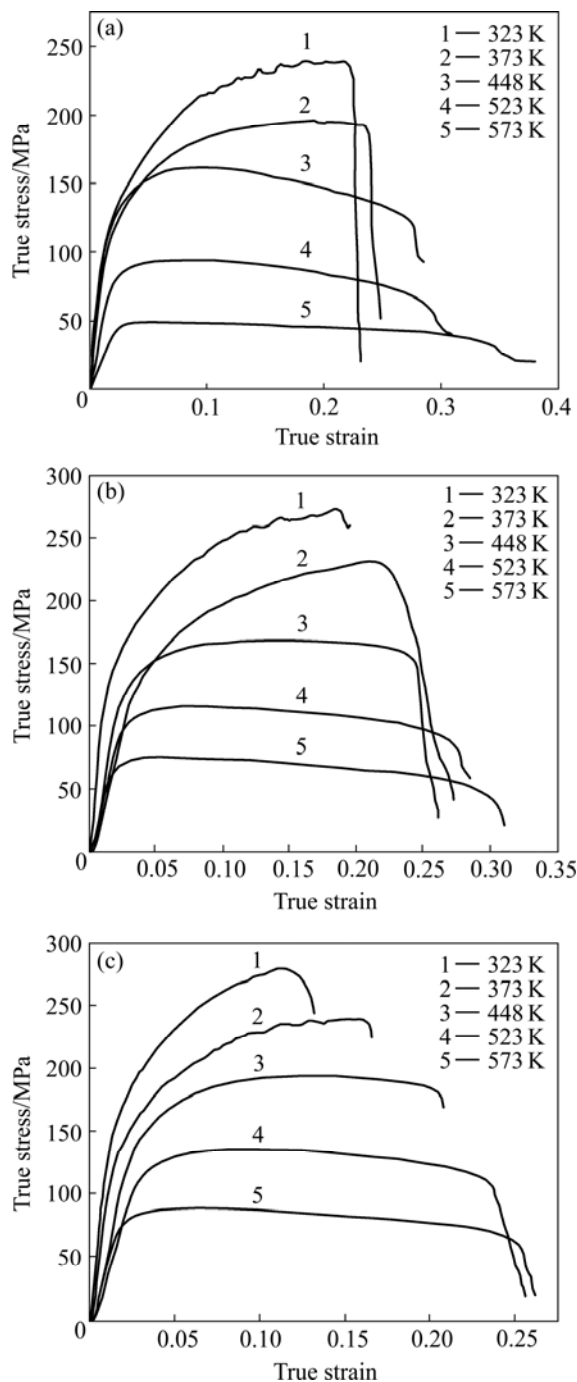


图 1 5182 铝合金温拉伸变形的真应力—真应变曲线

Fig.1 True stress—true strain curves of 5182 aluminum alloy at different temperatures and strain rates: (a) $\dot{\varepsilon}=0.001$ /s; (b) $\dot{\varepsilon}=0.01$ /s; (c) $\dot{\varepsilon}=0.1$ /s

2.2 温变形流变行为的数学模型

在综合考虑应变和应变速率对流变应力的影响时, 材料在不同温度和应变速率条件下的单向拉伸曲线常用的 Fields—Backofen 方程表示为^[9-11]

$$\sigma = C\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \quad (1)$$

式中 C 为材料强度系数; n 为应变硬化系数; m 为应变速率敏感系数。

由于进行铝合金板温拉深成形数值模拟时, 需要提供不同温度下的流变应力模型, 即确定不同温度下的应变硬化指数 n 值、应变速率敏感指数 m 值和强度系数 C 值^[12-13], 因此需通过曲线拟合的方法, 导出 5182 铝合金在温变形条件下以温度 T 和应变速率 $\dot{\epsilon}$ 为自变量的变形性能参数的连续性函数表达式。

1) n 值的连续性函数

图 2 所示为应变硬化指数 n 随变形温度和应变速率的变化曲线, 其横坐标为应变速率的自然对数。从图中可以看出: n 值随着温度上升以及应变速率降低而发生下降。并且对于某一温度, n 值和 $\ln \dot{\epsilon}$ 满足一定的线性关系, 因此, n 值可以表示为

$$n = A_1 \ln \dot{\epsilon} + B_1 \tag{2}$$

式中 A_1 为应变速率的影响系数; B_1 为温度的影响系数。

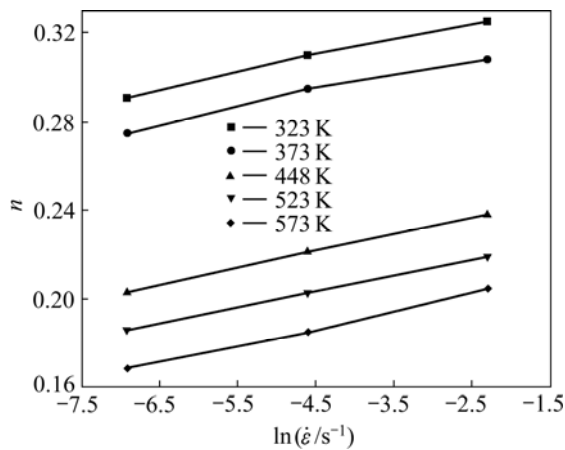


图 2 不同温度下 n 值与应变速率对数的关系
Fig.2 Relationships between n value and $\ln \dot{\epsilon}$ at different temperatures

通过拟合曲线, 分别得到了不同温度下的 A_1 值和 B_1 值, 如表 1 所示。从表 1 可知, 随着温度的变化, A_1 值的波动很小, 可以认为是定值, 取其平均值 0.007 32。

表 1 A_1 和 B_1 的拟合结果

Table 1 Calculated value of A_1 and B_1

T/K	A_1	B_1
323	0.007 38	0.342 67
373	0.007 27	0.325 67
448	0.007 40	0.255 67
523	0.007 23	0.235 67
573	0.007 31	0.222 33

对于 B_1 值, 作 B_1 值与温度倒数的曲线, 结果如图 3 所示。由图 3 可知, B_1 值与 $1/T$ 满足线性关系, 通过拟合可以得到:

$$B_1 = 0.052 29 + 96.048 7 / T \tag{3}$$

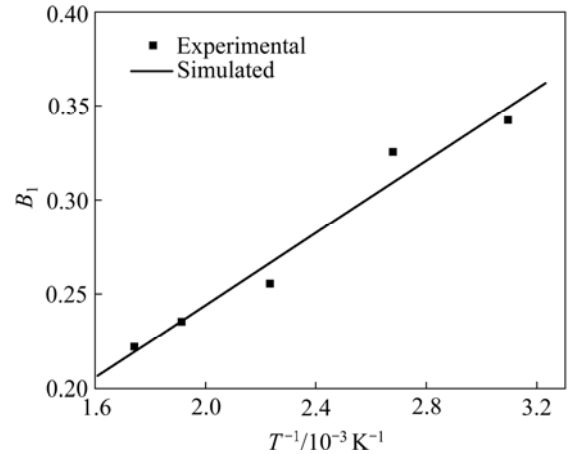


图 3 B_1 值与温度倒数的关系
Fig.3 Relationship between B_1 value and $1/T$

2) m 值的连续性函数

m 值的物理意义是金属材料成形过程中应变速率的变化对初始缩颈局部强化的影响程度^[13-14]。 m 值的增大表示强化程度加强, 可使变形在别处发生, 形成均匀变形从而推迟分散缩颈的出现。

根据等应变速率拉伸法^[14]可以计算出 m 值, 结果如图 4 所示, 通过计算机拟合得出 m 值跟温度存在立方曲线关系:

$$m = -0.570 89 + 0.004 87 T - 1.281 46 \times 10^{-5} T^2 + 1.126 13 \times 10^{-8} T^3 \tag{4}$$

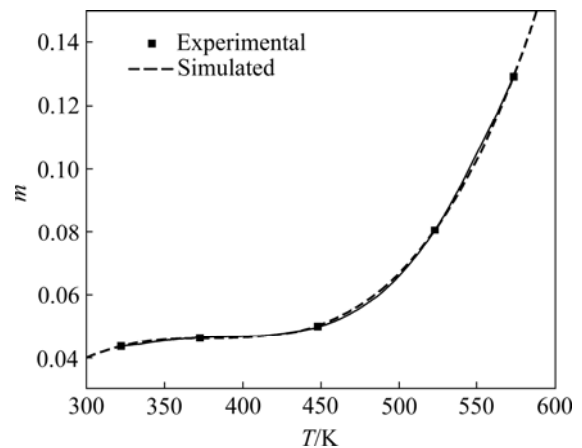


图 4 m 值与温度的关系
Fig.4 Relationship between m value and T

3) C 值的连续性函数

利用材料模型(1)及 n 和 m 值可计算出 C 值。计算结果表明, 对于同一应变速率, 材料强度系数 C 值与温度存在线性关系, 如图 5 所示, 可以表示为

$$C = A_2 T + B_2 \quad (5)$$

式中 A_2 为温度对 C 值的影响系数; B_2 为应变速率对 C 值的影响系数。

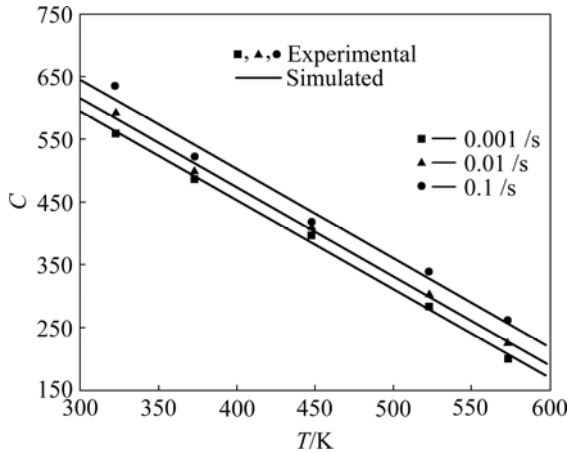


图 5 不同应变速率下 C 值与温度的关系
Fig.5 Relationships between C value and T at different strain rates

通过拟合曲线, 得到不同应变速率下的 A_2 值和 B_2 值, 结果如表 2 所示。由表 2 可知, A_2 值随着应变速率的变化而变化很小, 可以取其平均值为 $-1.415\ 03$ 。而对于 B_2 值, 作 B_2 值与应变速率自然对数的曲线, 结果如图 6 所示。由图 6 可知, B_2 值与 $\ln \dot{\epsilon}$ 满足线性关系, 因此, 通过拟合可以得到:

$$B_2 = 1\ 095.617\ 1 + 11.401\ 03 \ln \dot{\epsilon} \quad (6)$$

表 2 A_2 和 B_2 的拟合结果

$\dot{\epsilon}/s^{-1}$	A_2	B_2
0.001	-1.410 36	1 017.758 75
0.01	-1.417 64	1 041.319 25
0.1	-1.417 08	1 070.262 26

所以材料强度系数 C 值可以表示为

$$C = -1.415\ 03T + 11.401\ 03 \ln \dot{\epsilon} + 1095.617\ 1 \quad (7)$$

4) 模型的确定

综上所述, 利用 Fields-Backofen 方程, 并通过拟合应变硬化指数 n 值、应变速率敏感指数 m 值和强度系数 C 值, 得到 5182 铝合金板材在温拉伸变形过程

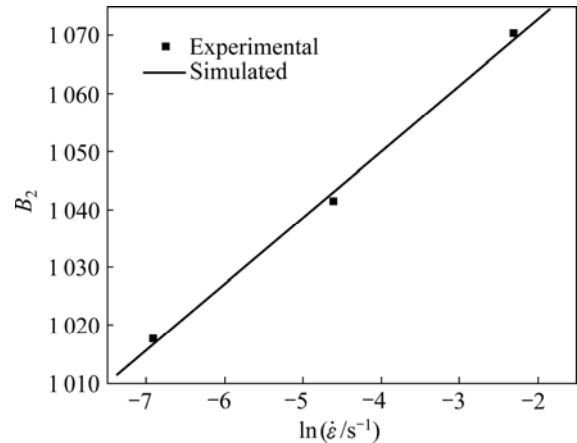


图 6 B_2 值与 $\ln \dot{\epsilon}$ 的关系
Fig.6 Relationship between B_2 value and $\ln \dot{\epsilon}$

中的应力—应变本构方程, 可表示为

$$\sigma = C \epsilon^n \dot{\epsilon}^m$$

其中

$$C = -1.415\ 03T + 11.401\ 03 \ln \dot{\epsilon} + 1\ 095.617\ 1$$

$$n = 0.522\ 9 + 0.007\ 318 \ln \dot{\epsilon} + 96.048\ 87/T$$

$$m = -0.570\ 89 + 0.004\ 87T - 1.281\ 46 \times 10^{-5} T^2 + 1.126\ 13 \times 10^{-8} T^3$$

2.3 模型计算结果与实验比较

根据材料模型所计算的曲线和实验得出的曲线进行比较, 结果如图 7 和 8 所示。由图 7 和 8 可知, 相同应变速率条件下(见图 7), 对于较低温度的变形, 在峰值应力之前的均匀变形阶段, 计算曲线和实验曲线

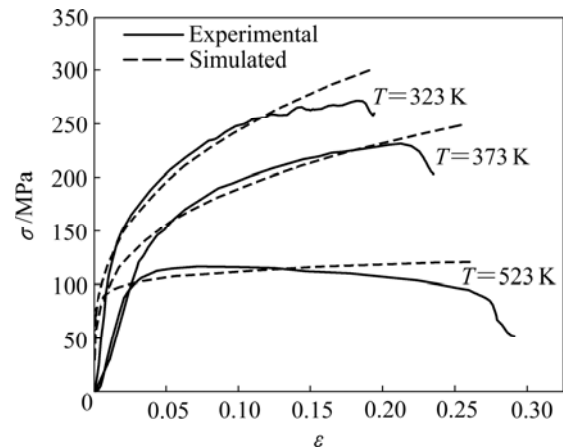


图 7 应变速率为 0.01/s 时真应力的计算值与实验值比较
Fig.7 Comparisons of true strain between simulated values and experimented ones at $\dot{\epsilon}=0.01/s$

的走势和数值都比较接近,但随着温度升高,发生动态再结晶后的合金计算曲线和实验曲线误差逐渐增大;温度相同的条件下(见图8),在峰值应力之前的均匀变形阶段,实验曲线和计算曲线的走势和数值都比较接近,但随着塑性变形的积累,材料进入失稳阶段,而且在变形后期5182铝合金的畸变能大幅度增加,发生动态回复,故误差逐渐增大。但就总体而言,本模拟所建立的流变应力模型是合适的,可以用于5182铝合金的温变形流变应力的预测和数值模拟。

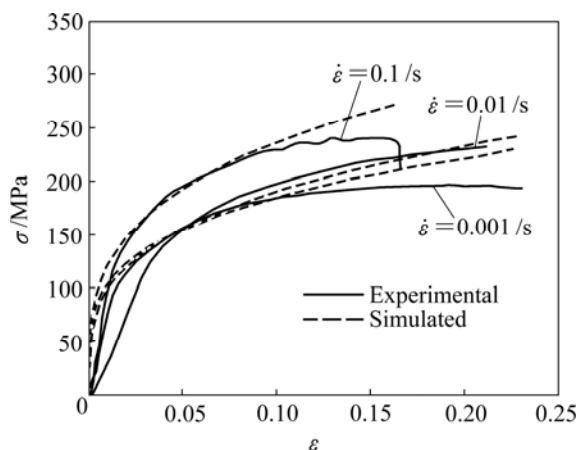


图8 373 K时不同应变速率下的模型计算值与实验值的比较
Fig.8 Comparisons between simulated values and experiment values ($T=373$ K) under different strain rates

3 合金温变形的物理本质

5182 铝合金温变形的流变行为与变形体内的位错组态密切相关,其塑性变形主要是以位错的运动和晶界滑移来实现的^[4, 15]。变形初期,位错密度逐渐增加,需要较高的能量来启动位错,流变应力达到峰值后,开始进入稳态变形,流变应力基本保持不变。此时合金变形过程中位错密度的增加和由动态回复引起的位错密度的减少之间达到动态平衡,加工过程中产生的硬化作用几乎被动态回复所引起的软化作用抵消,合金变形组织中的亚晶平均大小,亚晶间平均取向差以及平衡位错密度均保持基本不变。

随着变形温度的升高和应变速率的降低,原子的运动能力增强,位错的可动距离增大,又由于5182铝合金中含有较多的Mg元素能使合金的层错能降低,层错宽化,从而使合金发生动态再结晶,亚晶尺寸增大,流变应力降低。

4 结论

1) 5182 铝合金温拉伸变形中发生明显的流变软化,在同一应变速率下,合金的流变应力随温度的升高而降低;而对于同一温度,应变速率较低时,合金的流变应力在达到峰值后逐渐下降,表现出动态再结晶特征;随着应变速率增加,合金的流变应力呈现出稳态,表现出动态回复特征。

2) 对 Fields-Backofen 方程进行修正,使系数 n 、 m 和 C 值都考虑温度及应变速率变化的影响,得出5182 铝合金板材温拉伸时的本构方程,该模型在均匀变形阶段推导出的结果与实验结果比较吻合。

REFERENCES

- [1] 王孟君, 黄电源, 姜海涛, 任杰. 汽车用铝合金的研究进展[J]. 金属热处理, 2006, 31(9): 35-39.
WANG Meng-jun, HUANG Dian-yuan, JIANG Hai-tao, REN Jie. Research progress of aluminium alloys for the automotive industry[J]. Heat Treatment of Metals, 2006, 31(9): 35-39.
- [2] 邓学峰, 张辉, 陈振华. 铝合金成形性及成形工艺研究现状[J]. 材料导报, 2005, 19(12): 56-59.
DENG Xue-feng, ZHANG Hui, CHEN Zhen-hua. Sheet metal formability and forming process of aluminum alloy[J]. Materials Review, 2005, 19(12): 56-59.
- [3] 王孟君, 黄电源, 姜海涛. 退火对汽车用5182铝合金板材组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2007, 32(9): 18-20.
WANG Meng-jun, HUANG Dian-yuan, JIANG Hai-tao. Influence of annealing process on microstructure and properties of 5182 aluminium alloy sheet for automobile[J]. Heat Treatment of Metals, 2007, 32(9): 18-20.
- [4] WANG Meng-jun, HUANG Dian-yuan, JIANG Hai-tao. Effect of pre-aging on microstructure and properties of 2000 series aluminum alloy for automotive body sheets[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2007, 17(Special 1): s262-s265.
- [5] 林启权, 张辉, 彭大暑, 林高用, 王振球. 5182 铝合金热压缩变形流变应力[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2002, 24(3): 84-88.
LIN Qi-quan, ZHANG Hui, PENG Da-shu, LIN Gao-yong, WANG Zhen-qiu. Flow stress behavior of 5182 aluminum alloy under hot compression deformation[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2002, 24(3): 84-88.
- [6] 单毅敏, 罗兵辉, 柏振海. 5083 铝合金高温变形的流变应力[J]. 铝加工, 2006, 172(6): 1-6.
SHAN Yi-min, LUO Bing-hui, BAI Zhen-hai. Flow stress of 5083 aluminum alloy during hot compression deformation[J].

- Aluminum Fabrication, 2006, 172(6): 1-6.
- [7] MCQUEEN H J, BELLING J. Constitutive constants for hot working of Al-4.5Mg-0.35Mn(AA5182)[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2000, 39(4): 483-492.
- [8] 杨军军, 朱远志, 黎文献, 肖于德. Al-Fe-V-Si 耐热铝合金高温变形及流变应力研究[J]. 铝加工, 2001, 23(4): 34-38.
YANG Jun-jun, ZHU Yuan-zhi, LI Wen-xian, XIAO Yu-de. Study on Al-Fe-V-Si alloys high temperature deformation and flow stress[J]. Aluminium Fabrication, 2001, 23(4): 34-38.
- [9] 邓学峰, 张 辉, 陈振华. 耐热铝合金(FVS0812)板材温拉伸本构方程[J]. 塑性工程学报, 2006, 13(3): 83-87.
DENG Xue-feng, ZHANG Hui, CHEN Zhen-hua. Tensile deformation behavior of heat-resistance aluminum (FVS0812) sheet at elevated temperature[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2006, 13(3): 83-87.
- [10] ZHOU M, CLODE M P. Constitutive equations for modeling flow softening due to dynamic recovery and heat generation during plastic deformation[J]. Mechanics of Materials, 1998, 27(2): 63-76.
- [11] SHI H, MCLAREN A J, SELLARS C M, SHAHANI R, BOLINGBROKE R. Constitutive equations for high temperature flow stress of aluminum alloys[J]. Materials Science and Technology, 1997, 13(3): 210-216.
- [12] 李 迪, 毕新雯, 李光利. 汽车覆盖件用铝合金板冲压成型的材料参数敏感性[J]. 山东理工大学学报, 2004, 18(3): 27-31.
LI Di, BI Xin-wen, LI Guang-li. Parameter sensitivity of stamping forming of aluminium alloy sheets used in automobile cover[J]. Journal of Shandong University of Technology, 2004, 18(3): 27-31.
- [13] 于忠奇, 赵亦希, 林忠钦. 汽车用铝合金板拉深性能评估参数[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(10): 1689-1693.
YU Zhong-qi, ZHAO Yi-xi, LIN Zhong-qin. Evaluation parameter of drawability of automotive aluminum alloy sheets[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(10): 1689-1693.
- [14] 张晓华, 邱晓钢, 卢国清, 唐 静. 应变速率敏感系数(m 值)测试方法探讨[J]. 钢铁钒钛, 2001, 22(1): 63-68.
ZHANG Xiao-hua, QIU Xiao-gang, LU Guo-qing, TANG Jing. Study of test and measurement method for coefficient (m value) of strain rate sensitivity[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2001, 22(1): 63-68.
- [15] 林均品, 程荆卫. Al-2Mg 合金的动态再结晶[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(3): 510-514.
LIN Jun-pin, CHENG Jing-wei. Dynamic recrystallization during hot torsion of Al 2Mg alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(3): 510-514.

(编辑 龙怀中)