

文章编号: 1001-4888(2008)01-0077-07

# 加载速率对 6020 铝合金材料力学性能影响的实验研究<sup>\*</sup>

贾江滢, 徐家福, 富东慧, 王忠保, 侯振德

(天津大学 机械工程学院 力学系, 天津 300072)

**摘要:** 通过拉伸实验研究了加载速率在 1mm/min, 10mm/min, 100mm/min 以及 200mm/min 范围内 6020 铝合金材料的力学性质, 结果表明这种材料有近似于理想弹塑性的性质, 应力—应变曲线明显地表现为线弹性和线塑性的特点, 而且加载速率对于该铝合金材料的力学性质没有明显的影响。作为对比还测试了 45# 中碳钢在相同的加载速率条件下的力学特性, 得出随着加载速率的增加, 无论屈服强度还是抗拉强度均有一定的提高, 塑性有了一定的降低。最后, 根据实验结果确定了该铝合金材料的本构关系。

**关键词:** 力学性质; 加载速率; 6020 铝合金材料; 本构关系

**中图分类号:** O341

**文献标识码:** A

## 0 引言

6020 铝合金是一种无铅的材料, 适合于切削加工, 具有加工性能好、耐腐蚀等特点, 常用于制造液压元件, 如阀、油缸制动器件以及各种联结件。正因为这类构件在正常工作的状态下经常受到动态应力的作用, 所以有必要研究这种材料在不同的加载速率下的力学性质。

不同的材料对加载速率的依赖性是不同的。文献[1]从拉伸实验着手, 研究了加载速率对 PC/ABS 高分子材料拉伸性能的影响。实验发现, 屈服应力随加载速率的增加而缓慢地增加, 断裂应力则分散性较大, 与加载速率没有明显的关系; 文献[2]研究了从常温到高温及不同加载速率对 3D-C/SiC 材料拉伸性能的影响, 并且得出了随着加载速率的提高, 断裂应变减小, 初始弹性模量增加的结论; 文献[3]研究了加载速率对 16Mn 和 Q235B 钢力学性质的影响, 确定随着加载速率的提高屈服强度和抗拉强度增加而塑性降低。

本文通过拉伸试验, 分别研究了加载速率在 1mm/min, 10mm/min, 100mm/min 以及 200mm/min 范围内 6020 铝合金材料的力学性质, 结果显示这种材料有近似于理想弹塑性的性质, 应力—应变曲线明显地表现为线弹性和线塑性的特点, 而且加载速率对于该铝合金材料的力学性质没有明显的影响。作为对比还测试了 45# 中碳钢在相同的加载速率条件下的力学特性。最后, 根据实验结果确定了该铝合金材料的本构关系。

## 1 材料与方法

参照 GB/T-228 的要求, 将 6020 铝合金材料加工成为标准试样, 直径  $10 \pm 0.05$  mm, 标距 50 mm。将试样分为四组, 每组三根, 分别在加载速率为 1mm/min, 10mm/min, 100mm/min 以及 200mm/min 下测量应力—应变曲线。测试在 CSS-4100 电子万能试验机上进行。

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2007-03-05; 修订日期: 2007-05-30

为了确定在整个加载过程中材料的力和变形的关系,实验选用了大量程的 YJY11 型变形传感器测量试样的伸长,量程 25mm,标距 50mm,这样可以确保直至试样被拉断也不必卸下传感器。本实验中加载速率的控制是由试验机自动实现的,以试验机横梁位移为控制基准。

2 结果与讨论

2.1 铝合金试样拉伸试验

(1) 图 1 是 6020 铝合金试样在上述四种加载速率下的应力—应变曲线图。

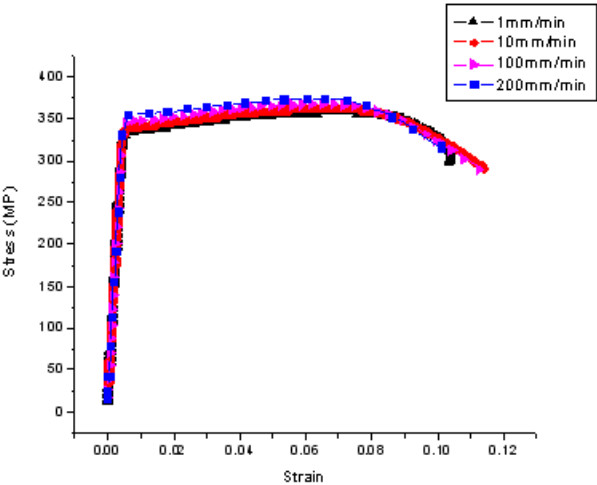


图 1 6020 铝合金试样拉伸试验时不同加载速率的应力—应变曲线图

Fig. 1 The stress-strain curves of 6020 aluminum alloy under four loading rates

(2) 表 1 为全部 12 根铝合金试样在不同的加载速率下的测量结果。

表 1 铝合金试样在不同加载速率下的测量结果

Tab. 1 Testing results of 6020 aluminum alloy under four loading rates

| 速率<br>(mm/min) | 试样号 | 抗拉强度 $R_m$<br>(MPa) | 屈服强度 $R_e$<br>(MPa) | 弹性模量 $E$<br>(GPa) | 断后伸长率 $A$<br>(%) |
|----------------|-----|---------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| 1              | 1   | 357.7               | 332.7               | 76                | 11.38            |
|                | 2   | 363.5               | 339.9               | 70                | 10.78            |
|                | 3   | 365.9               | 339.3               | 72                | 12.36            |
|                | 平均  | 362.4               | 337.3               | 73                | 11.51            |
| 10             | 4   | 356.3               | 336.2               | 72                | 12.16            |
|                | 5   | 376.9               | 353.0               | 75                | 10.72            |
|                | 6   | 365.3               | 344.9               | 69                | 12.92            |
|                | 平均  | 366.2               | 344.7               | 72                | 11.93            |
| 100            | 7   | 367.2               | 345.4               | 76                | 13.68            |
|                | 8   | 364.9               | 342.5               | 75                | 12.38            |
|                | 9   | 353.4               | 305.4               | 73                | 10.34            |
|                | 平均  | 361.8               | 331.1               | 75                | 12.13            |
| 200            | 10  | 354.3               | 313.5               | 70                | 12.34            |
|                | 11  | 359.7               | 323.4               | 67                | 11.86            |
|                | 12  | 359.7               | 329.1               | 70                | 13.30            |
|                | 平均  | 357.9               | 322.0               | 69                | 12.50            |

由图 1 可以看出,6020 铝合金材料具有近似于理想弹塑性的性质,在局部变形(颈缩)发生之前,曲线呈两段折线 AB 和 BC。AB 为弹性阶段,到达 B 点后材料呈现线塑性的性质,曲线存在开始发生塑

性变形的标志点,即B点,但是不存在典型的屈服阶段,B点是实质意义的屈服极限。

表1不仅列出了全部12根试样的测量结果,还给出了每组3根试样的平均值。表中结果显示在各种加载速率下测量值都有相互交叉,分析各种加载速率下的平均值可以看出,抗拉强度和屈服强度并非随着加载速率单调变化。若以全部12根试样的测试结果为本,各指标的平均值及标准差分别为:抗拉强度( $R_m$ ) $362.1 \pm 6.6$  MPa,屈服强度( $R_e$ ) $333.8 \pm 13.9$  MPa,断后伸长率( $A$ ) $12.02 \pm 1.05$  (%)。其中屈服强度和断后伸长率的标准差分别达到相应平均值的4.2%和8.7%,12根试样中屈服强度的最大、最小值相差47.6 MPa,说明结果有一定的分散性。只有断后伸长率的平均值随着加载速率单调递增,但是各组中的实际值相差较大,且相互交叉,不能肯定地给出断后伸长率随着加载速率单调增加的结论。

作为对比,以同样的方式进行了45#中碳钢试样在不同的应变加载速率下的拉伸试验。

## 2.2 45#中碳钢试样拉伸试验

(1) 图2为45#中碳钢试样在四种加载速率下的应力—应变曲线图。

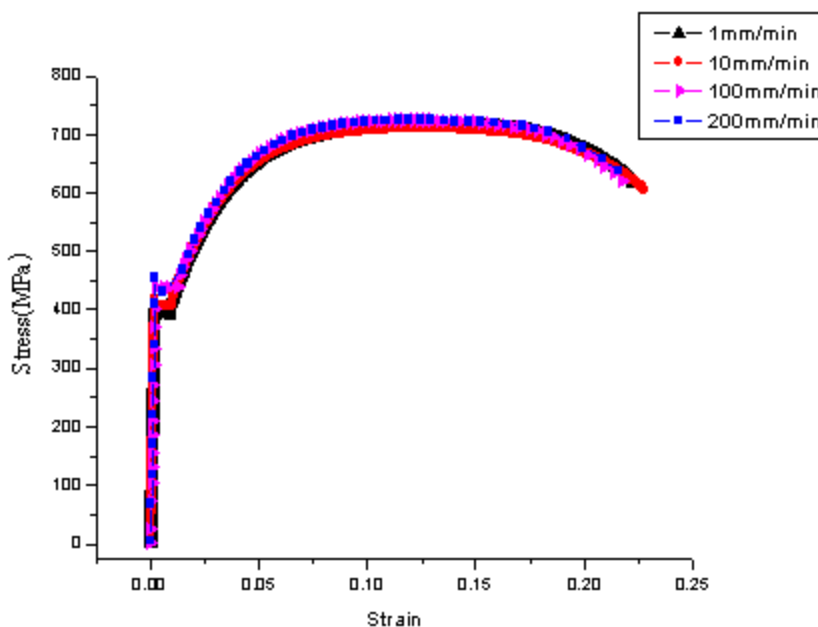


图2 45#中碳钢试样拉伸试验时不同加载速率的应力—应变曲线图

Fig. 2 The stress-strain curves of 45# steel under four loading rates

(2) 表2为全部12根45#中碳钢试样在不同的加载速率下的测量结果。

由图2可以看出,45#中碳钢材料呈典型塑性材料的拉伸性质。表2中列出了在四种加载速率下的测试结果。从表中数据可以看出,材料的抗拉强度和屈服强度基本上随着加载速率单调上升,各组的平均值呈完全单调递增趋势。塑性指标断后伸长率的值在各组中交叉较多,但平均值呈单调下降趋势。若以加载速率为1mm/min的测试结果的平均值为基准,加载速率为10mm/min,100mm/min和200mm/min对应的抗拉强度增加的幅值分别为1.7%,2.69%和2.97%;屈服强度分别为5.18%,15%和16.6%;断后伸长率分别下降5.33%,10.3%和12.3%,相比抗拉强度,屈服强度和塑性指标变化幅值较大。此结论与Q235B和16Mn一致<sup>[3]</sup>,即强度指标随着加载速率的增加而增加,塑性指标随着加载速率的增加而减小。

对比6020铝合金和45#中碳钢的测量结果可以看出,45#中碳钢表现出确定的对于加载速度的依赖性。而6020铝合金则不然,测量结果的分散性也可能有材料自身的原因,但无论如何不能认为与加载速率相关。因此,下文所确定的6020铝合金材料的弹塑性本构关系也不考虑应变率这一因素。

表 2 45# 中碳钢试样在不同加载速率下的测量结果  
Tab.2 Testing result of 45# steel under four loading rates

| 速率<br>mm/min | 试样号 | 抗拉强度 $R_m$<br>(MPa) | 屈服强度 $R_e$<br>(MPa) | 弹性模量 $E$<br>(GPa) | 断后伸长率 $A$<br>(%) |
|--------------|-----|---------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| 1            | 1   | 698                 | 391                 | 216               | 21.6             |
|              | 2   | 707                 | 385                 | 204               | 28.6             |
|              | 3   | 715                 | 382                 | 209               | 23.1             |
|              | 平均  | 707                 | 386                 | 210               | 24.4             |
| 10           | 4   | 730                 | 416                 | 226               | 24.1             |
|              | 5   | 718                 | 399                 | 222               | 21.7             |
|              | 6   | 710                 | 402                 | 219               | 23.5             |
|              | 平均  | 719                 | 406                 | 222               | 23.1             |
| 100          | 7   | 727                 | 453                 | 215               | 21.9             |
|              | 8   | 726                 | 442                 | 211               | 21.1             |
|              | 9   | 724                 | 438                 | 212               | 22.6             |
|              | 平均  | 726                 | 444                 | 213               | 21.9             |
| 200          | 10  | 729                 | 448                 | 213               | 22.2             |
|              | 11  | 724                 | 455                 | 204               | 22.3             |
|              | 12  | 730                 | 447                 | 216               | 19.7             |
|              | 平均  | 728                 | 450                 | 211               | 21.4             |

### 2.3 6020 铝合金材料的线性强化弹塑性力学模型

从该铝合金材料拉伸试验时不同的加载速率的应力—应变曲线图(图 1)中看出,在弹性阶段, $\sigma$ 与 $\epsilon$ 之间的关系是线性的,这时应力与应变之间的关系可表示为:

$$\sigma = E\epsilon$$

如果应力加载到超越屈服极限,通常的应力应变关系可写为:

$$\sigma = \varphi(\epsilon, \dot{\epsilon})$$

其中 $\dot{\epsilon}$ 表示应变率。尽管试验机横梁的速率并不完全等于试样的应变率,但仍反映了与应变率无关这一实验结论,因此对于 6020 铝合金材料,可以忽略应变率的作用,于是该铝合金材料在达到局部变形阶段之前,可以用线性强化弹塑性力学模型描述的工程应力—应变的关系表示<sup>[4]</sup>:

$$\begin{cases} \sigma = E\epsilon & \epsilon \leq \epsilon_e \\ \sigma = R_e + E'(\epsilon - \epsilon_e) & \epsilon > \epsilon_e \end{cases} \quad (1)$$

其中  $E$  表示弹性模量,是本构模型中线弹性阶段的斜率; $E'$ 表示线塑性阶段的斜率。由于认为材料的力学性质不依赖于加载速率,故以 12 根试样的平均值为基础确定其本构方程。将 6020 铝合金材料的加载测试平均值代入上述的线性强化弹塑性力学模型中,可以得到该铝合金材料的本构方程:

$$\begin{cases} \sigma = 72.3 \times 10^9 \epsilon & \epsilon \leq 0.00462 \\ \sigma = 0.334 \times 10^9 + 0.527 \times 10^9 (\epsilon - 0.00462) = 0.332 \times 10^9 + 0.527 \epsilon \times 10^9 & \epsilon > 0.00462 \end{cases} \quad (2)$$

方程(2)表示的本构关系在图 3 中用曲线进行了描述。为了便于进行对比,图中还给出了一条实测的工程应力—应变曲线。

图 3 中,根据本构方程(2)描绘的曲线可以近似地模拟实测曲线在局部变形阶段以前的曲线性质。

由于材料在承受超过屈服极限的拉伸应力时产生的塑性变形比较大,故有意义的本构关系应该是建立在真应力—应变基础上的。根据文献[5]和[6],在体积不变的基本假设下,真应力和真应变分别可以表示为:

$$\sigma_r = \sigma(1 + \epsilon) \quad (3)$$

真应变定义为瞬时长度增量与该时刻的长度之比,试样总体真应变为:

$$\epsilon_r = \ln(1 + \epsilon) \quad (4)$$

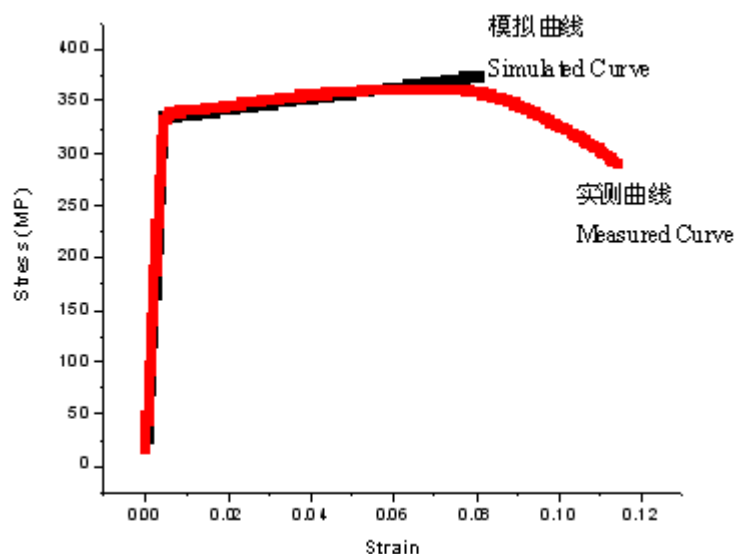


图 3 实测曲线与模拟曲线的对比

Fig. 3 The comparing between measured curve and simulated curve

其中  $\epsilon, \sigma$  分别表示工程应变和工程应力;  $\epsilon_r, \sigma_r$  分别表示真应变和真应力。

图 4 是以加载速率为 10mm/min 的情况为例,列出的工程应力—应变与真应力—应变的曲线对比图。因为(3)式只在颈缩发生前有意义,所以应力—应变曲线只在 C 点之前有效。

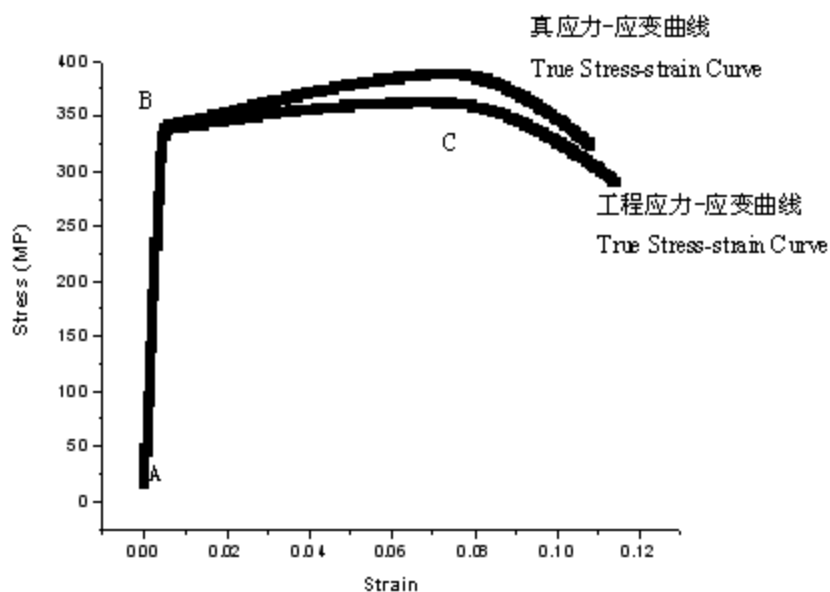


图 4 工程应力—应变与真应力—应变曲线对比图

Fig. 4 The comparing between engineering stress-strain curve and true stress-strain curve

在弹性阶段,随着拉伸应力的增加,试件的横截面积仅仅发生了微小的变化,故此时的真应力—应变的关系与工程应力—应变是一致的关系:

$$\sigma_r = E\epsilon_r \quad \epsilon \leq \epsilon_e$$

在塑性阶段,联立求解(1)、(3)、(4),得到线性强化弹塑性力学模型描述的真应力—应变关系:

$$\sigma_r = e^{\epsilon_r} [R_e + E' (e^{\epsilon_r} - 1 - \epsilon_e)] \quad \epsilon > \epsilon_e$$

将 6020 铝合金材料的加载试验数据代入上述的弹塑性模型中,可以得到该铝合金材料在真应力—

应变下的本构方程,

$$\begin{cases} \sigma_r = 72.3 \times 10^9 \epsilon_r & \epsilon \leq 0.00462 \\ \sigma_r = e^{\epsilon_r} \times 10^9 [0.334 + 0.852(e^{\epsilon_r} - 1.00462)] & \epsilon > 0.00462 \end{cases} \quad (5)$$

如前所述的本构关系表现的是局部变形阶段之前的变化规律。方程(5)表示的本构关系在图 5 中用曲线进行了描述。为了便于进行对比,图中还给出了一条实测的应力—应变曲线。

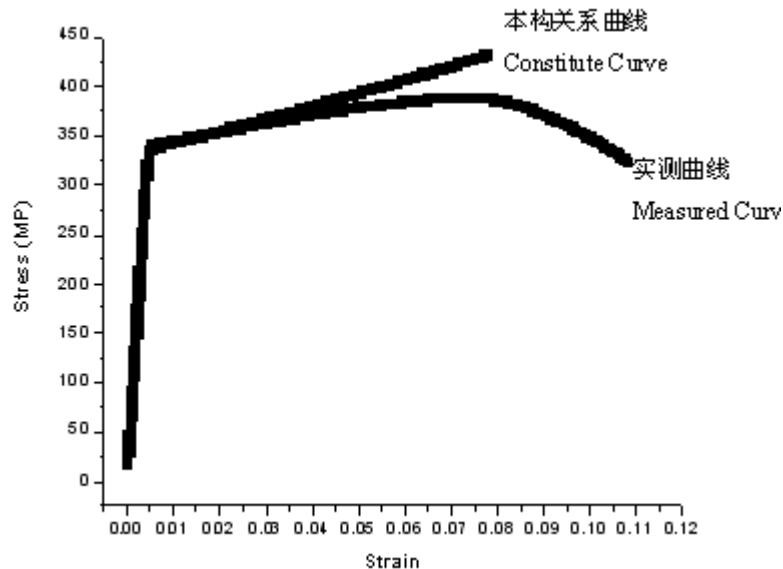


图 5 实测图形与模拟图形的对比

Fig. 5 The comparing between measured curve and simulated curve

图 5 中,根据本构方程(5)描绘的曲线可以近似地模拟实测曲线在局部变形阶段以前的曲线性质。

### 3 问题与讨论

应用大量程变形传感器有利于完整测量力—变形曲线,却会影响弹性模量的测量精度。然而弹性模量并不是研究的重点,因为在应力波传播的应变率范围内弹性模量基本上是不变的,而实际测试的应变率是远小于应力波传播的应变率的。铝合金材料和 45 号中碳钢材料的弹性模量的平均值及标准差分别为  $72 \pm 3 \text{ GPa}$ ,  $214 \pm 7 \text{ GPa}$ ,相对小的标准差也说明了测试结果的有效性。

本文通过对 6020 铝合金材料在不同的加载速率下的拉伸试验的研究,以及对 45 号中碳钢材料在相同条件下的对比性的试验研究,可以得到:6020 铝合金材料具有近似于理想弹塑性的性质,应力—应变曲线明显地表现为线弹性和线塑性的特点,而且加载速率对于该铝合金材料力学性质的影响不明显。而 45 号钢材料的强度指标随着加载速率的增大而提高,塑性指标随着加载速率的增大而降低。

#### 参考文献:

- [1] 方钦志,李慧敏,欧阳小东. 加载速率对 PC/ABS 拉伸性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程,2006,22(1):131—134 (Fang Qinzhi, Li Huimin, Ouyang Xiaodong. Effect of Loading Rate on the Tensile Properties of PC/ABS. Polymer Materials Science & Engineering, 2006, 22(1): 131—134 (in Chinese))
- [2] 罗国清,乔生儒. 加载速率对 3D-C/SiC 不同温度拉伸性能的影响[J]. 材料工程,2003,10:9,10,39 (Luo Guoqing, Qiao Shengru. Influence of Loading Rates on 3D-C/SiC Tensile Properties at Different Temperature. Journal of Materials Engineering, 2003, 10: 9, 10, 39 (in Chinese))
- [3] 张莉,张玉凤,霍立兴. 加载速率对结构钢力学性能和断裂韧度的影响[J]. 焊接学报,2003,24(1):94—96 (Zhang Li, Zhang Yufeng, Huo Lixing. Effect of Loading Rate on Mechanical Properties and Fracture Toughness of Structural Steel. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(1): 94—96 (in Chinese))
- [4] 周家泽. 工程材料弹塑性应力应变模型分析[J]. 武汉科技学院学报,2003,16(6):41—45 (Zhou Jiaze. Stress and

- Strain Analysis for Elastic and Plastic Model of Engineering Materials. Journal of Wuhan University of Science and Engineering, 2003, 16(6): 41—45 (in Chinese))
- [5] 李玉兰. 真应力—应变的定义及其力学特征[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2001, 24(3): 58—60 (Li Yulan. Definition and Mechanical Characteristics of True Stress-Strain. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2001, 24(3): 58—60 (in Chinese))
- [6] 徐秉业, 刘信生. 应用弹塑性力学[M]. 清华大学出版社, 1995 (Xu Bingye, Liu Xinsheng. Applied Elas-Plasticity Mechanics. Tsinghua University Press, 1995 (in Chinese))

## Effect of Loading Rate on the Tensile Properties of 6020 Aluminum Alloy

JIA Jiang-ying, XU Jia-fu, FU Dong-hui, WANG Zhong-bao, HOU Zhen-de

(Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The tensile mechanical properties of 6020 aluminum alloy under the loading rates: 1mm/min, 10mm/min, 100mm/min and 200mm/min were obtained using an universal test machine. The results showed that its mechanical properties approached to ideal plastoelasticity, and its stress-strain relationship presented the characteristic of linear-elastic and linear-plastic. Its mechanical properties were not strongly influenced by the loading rates. As a comparison, a type of 45 steel is tested under the same experimental conditions. It showed that, with the enhancement of the loading rates, the yield strength and tensile strength increased while the elongation decreased. Finally, the constitutive relation of this alloy aluminum was constructed based on the experimental results.

**Keywords:** mechanical properties; loading rate; 6020 alloy aluminum; constitutive equation