

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.02.015

新氢能源储蓄罐用奥氏体不锈钢 速度敏感性研究

宋春雨, 龚红英*, 邹琼琼, 黄继龙, 吕弘毅

(上海工程技术大学 材料工程学院, 上海 201620)

摘要:为了研究310S奥氏体不锈钢的速度敏感性对材料成形性能的影响,通过不同应变速率下的单向拉伸试验获取相对应的工程应力应变数据,将其转化为真实应力应变数据后,对真实应力应变数据进行计算,求得相应变形速率下的各硬化参数。基于上述拟合结果,选取适当的本构方程模型,进行非线性拟合,得到一个受应变速率影响的本构方程。通过笔者研究,确定310S奥氏体不锈钢的硬化行为确实受应变速率影响,且本文所拟合的本构方程可对该材料的速度敏感性作出准确判断。

关键词:奥氏体不锈钢;应变速率;应变硬化;本构方程

中图分类号:TB302.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2895(2017)02-0070-04

Sensitivity of Strain Rate for 310S Austenitic Stainless Steel

SONG Chunyu, GONG Hongying*, ZOU Qiongqiong, HUANG Jilong, LÜ Hongyi

(School of Material Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: The purpose was to study the sensitivity influence of the strain rate on the formability for 310S austenitic stainless steel. Engineering stress-strain data were obtained by the uniaxial tension test with different strain rate, and they were turned to the true stress-strain data, and the hardening parameters were gained from the true stress-strain calculating. Based on the above fitted results, the appropriate constitutive equation was chosen. Through the non-linear fitting, a constitutive equation which influences by the strain rate was established. The hardening behavior of 310S austenitic stainless steel was actually influenced by the strain rate, and the constitutive equation could judge the behavior accurately.

Keywords: austenitic stainless steel; strain rate; strain hardening; constitutive equation

氢作为一种新兴汽车能源,以其绿色无污染的特征得到广大科研工作者的青睐。目前,汽车氢能源储存罐通常选用Al6061合金,但由于铝合金屈服强度与抗拉强度均很低,使其难以承受氢气的高压力,所以必须在氢能源储存罐外围紧密包裹一层高强碳纤维复合材料。但这将大大提高制造成本,增加工艺复杂性及维修难度,为此,选择一种含铁的高强度钢种替换铝合金不失为一种很好的方法,对此国内外专家展开了一系列的研究,其中310S奥氏体不锈钢脱颖而出。将310S奥氏体不锈钢作为氢能源储存罐的角度考虑, Ji

等人发现在存储罐加工过程中采用预变性可有效阻碍伸长变形过程中的机械孪晶转变,并且也可阻止氢在孪晶界传递从而抑制脆性转变,很大程度上提高了存储罐材料对氢脆的抑制作用^[1]。国内外的科研工作者针对310S作为氢能源储存罐的制作材料也展开了一系列的耐氢蚀性研究。所以说,310S奥氏体不锈钢取代铝合金作为氢能源储存罐的制作材料的前景不可小觑。

有研究表明,310S奥氏体不锈钢不同于304及316L等奥氏体不锈钢,在冷轧形变过程中310S不会

收稿日期:2016-10-17;修回日期:2016-11-29

基金项目:上海工程技术大学2015年研究生创新项目(15KY0509)。

第一作者简介:宋春雨(1990),女,蒙古族,吉林吉林人,硕士研究生,主要研究方向为奥氏体不锈钢板料冲压。E-mail:hyrene@sina.com

发生马氏体转变^[2]。刘辉在其硕士毕业论文中提及 310S 奥氏体不锈钢长期在 650 ~ 980 °C 的温度下使用容易产生 σ 相,导致材料变脆^[3]。然而在本课题研究中发现,310S 奥氏体不锈钢在常温下通过不同应变速率进行单向拉伸所呈现的力学性能却也不尽相同,这说明在 310S 的塑性成形过程中应变速度是重要的影响因素。然而当前,科研工作者针对 310S 奥氏体不锈钢的研究大多偏向于氢脆与耐腐蚀性,如 Elger 等人在研究中发现 310S 奥氏体不锈钢在 HCL 气氛作用下表面会出现环形氯化斑块;Noriyuki 等人发现虽然 310S 对氢脆不敏感,但氢可导致该种不锈钢产生微观裂纹^[4-5]。而对于该钢种的成形性能的研究却较为空白,如若欲以此材料代替铝合金作为氢能源储存罐材料,其成形性能的研究必不可少,这对生产实践有着直接的指导意义。因此本课题将以单向拉伸试验为技术依托,针对该钢种展开速敏性研究,着重阐明不同应变速率下该钢种的力学性能变化,深入分析其变化原因,最后建立针对于该钢种的速度敏感性本构方程,以期对工程实践与相关课题科研研究提供理论指导。

1 实验测试及分析

欲探究应变速率对金属材料力学性能的影响,单向拉伸试验是最简便直接且利于分析的试验方法。在试验过程中,为保证结果的准确性,在各应变速率下的拉伸试样均采用同一尺寸,且板料轧制方向与拉伸方向也都保持平行。

金属在再结晶温度以下进行塑性变形,称之为冷加工。冷加工会使材料的强度和硬度提高,即通常所说的加工硬化,但加工硬化会降低材料的延展性,使工件在加工过程中过早的发生破裂。拉伸试验常被用于测定应变速率对强度的影响,诸如像扭转、挤压和胀形实验虽然也被用于测定加工硬化,但拉伸试验无疑是最简单,也是最通用的测定方法,况且本课题重点在于测定应变速率对 310S 奥氏体不锈钢的力学性能的影响,如若采用其他试样方法,变形速度将很难进行准确且大范围的控制。

310S 奥氏体不锈钢的化学元素组成如表 1 所示^[6]。

表 1 310S 奥氏体不锈钢化学成分

Table 1 Chemical composition of 310S

austenitic stainless steel							%
C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Fe
≤0.080	≤2.000	≤0.045	≤0.030	≤1.500	24~28	19~22	其余

本文中试验用板料厚度为 0.5 mm,参照在 2010 年修改和重新颁布的材料单向拉伸试验国家标准—《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温拉伸方法》(GB/T 228.1-2010)来设计拉伸试样,如图 1 所示。在进行单向拉伸试验前,应预先用砂纸打磨试样形变部分的边界,以避免线切割过程中产生的毛刺影响实验结果。

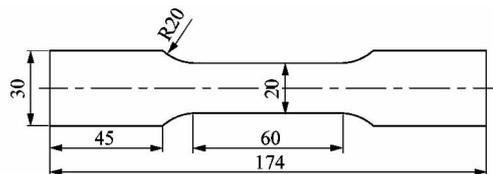


图 1 单向拉伸实验试样示意图

Figure 1 Diagram of one-way tensile specimen

为研究应变速率对 310S 奥氏体不锈钢硬化行为的影响,现将拉伸速度分为 6 档设置,并采用双引伸计进行测量,获得工程应力应变数据。随着试验的进行,试样的横截面积将会缩小,所以工程应力应变并不能准确表达试样横截面积变化后材料所受的应力应变关系,因而笔者将获得的工程应力应变数据进行处理^[7],利用如下公式进行转换,绘制相应的真实应力应变曲线。

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon), \quad (1)$$

$$\sigma_t = \sigma(1 + \varepsilon). \quad (2)$$

式中: ε_t 为真实应变, ε 为工程应变, σ_t 为真实应力, σ 为工程应力。

由于 310S 奥氏体不锈钢的弹性变形极少,而且本文研究目的主要为应变速率对其力学性能的影响,其中不涉及弹性变形部分研究,故而简单的幂次法则并不适用于本次研究,故而采用有效塑性公式^[8]:

$$\sigma_t = \sigma_s + K\varepsilon_t^n. \quad (3)$$

借助 ORIGIN 软件进行真实应力应变曲线的绘制,同时从拉伸试验中提取各应变速率下的屈服应力 σ_s ,根据公式(3)计算应变强化因子 K、硬化指数 n 值,在各应变速率下的真实应力-应变曲线如图 2 所示; σ_s 、K 值、n 值及 σ_b 测量及计算结果如表 2 所示。

如图 2 所示,310S 奥氏体不锈钢在各应变速度下进行单向拉伸试验的结果显示,变形速率对该钢种的应力应变关系有着显著的影响。当应变速率为 1 s^{-1} 时,相较于其他应变速率下的拉伸结果,材料发生明显的软化现象,其屈服强度与抗拉强度均显著低于其他应变速率下的试样。一方面屈服强度的降低使得该钢种更易于加工,但另一方面,抗拉强度的降低却使其可加工区间缩短,从而导致总体上的可加工性下降。

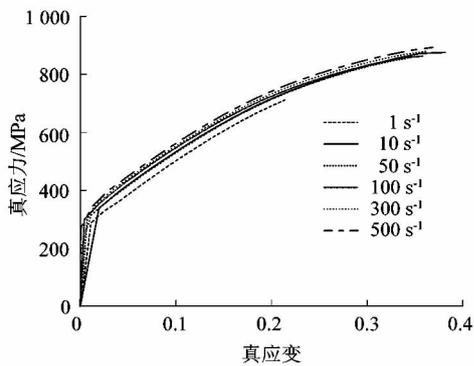


图2 不同应变速率下真实应力应变曲线
Figure 2 True stress-strain curve under different strain rate

纵观整体,除在 10 s^{-1} 的应变速率下的应力应变曲线略高于应变速率为 50 s^{-1} 时的测量结果,其他曲线均为升次排布,即,在拉伸过程中,应变速率越大,试样抗拉强度越高。这足以说明应变速度对 310S 奥氏体不锈钢的力学性能有很大影响,下面将详细分析应变速率对其各项力学性能的影响。

表2 不同应变速率下的 σ_s 、 K 值、 n 值及 σ_b

Table 2 σ_s , K , n and σ_b under different strain rate

应变速率/ (s^{-1})	屈服强度 σ_s/MPa	应变强化 因子 K	硬化指数 n	抗拉强度 σ_b/MPa
1	183	1 628	0.789	711
10	193	1 227	0.452	876
50	194	1 241	0.583	860
100	207	1 167	0.538	863
300	186	1 196	0.496	879
500	202	1 199	0.446	892

如表 2 所示,除了应变速率为 1 s^{-1} 时的数据,其他各应变速率下的 σ_s 、 K 值、 n 值及 σ_b 的数值变动范围相近,说明 310S 奥氏体不锈钢的力学性能受应变速率影响较大,不同的应变速率下的力学性能参数都有一定的差异。 K 值是表征加工硬化速度快慢的系数, K 值越大,材料在变形过程中的硬化行为发生得越剧烈。 n 值与 K 值有着相似的趋势判断作用,但趋势引导不同, n 值大时变形抗力增加较快,两者关系紧密,综合作用影响着材料变形过程中的总体硬化行为^[9]。从数据面上看,应变速率在 50 s^{-1} 时加工硬化行为最为剧烈,在该速度下的 n 值远高于其他应变速度下的值,屈服强度与抗拉强度值相比其他应变速度时低,在一定程度上影响材料的加工性能。应变速率为 100 s^{-1} 时加工硬化行为最弱,但 n 值同比其他应变速度较高,说明在该应变速率下 310S 奥氏体不锈钢的局部应变

能力较强,经对比可知,该速度下的抗拉强度同比其他速度下时低,这正是局部应变能力强的表现。

2 本构方程

基于上述情况可知,310S 奥氏体对应变速率有一定的敏感性,而通常使用的 Swift、Hollomon 和 Voce 等本构模型就应变速率对变形过程的影响均未能充分考量。针对本课题中所遇情况采用超塑性本构模型^[10]最为适合:

$$\sigma_{\text{真}} = k\varepsilon_{\text{真}}^m \dot{\varepsilon}^n + \alpha \quad (4)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率, k, m, n, α 为拟合参数,将 $10, 50, 300$ 及 500 s^{-1} 应变速率及与其相对应的真实应力应变代入该模型进行拟合,结果如下:

$$\sigma_{\text{真}} = 1\,216\varepsilon_{\text{真}}^{0.494} \dot{\varepsilon}^{-0.022} + 194 \quad (5)$$

为进一步印证该拟合结果的准确性,现将应变速率为 $75, 100$ 及 150 s^{-1} 的拉伸试验最末点的真实应力应变值及相应的应变速率代入该本构方程,通过该本构方程计算出的结果与实验结果对比如表 3 所示。从表 3 可知,在采纳数据范围内,该本构方程误差最高为 1.88% ,说明该拟合结果与实际数据相吻合,可以作为 310S 奥氏体不锈钢速度敏感性预测的依据。

表3 结果验证

Table 3 Verify consequence

应变速率/(s^{-1})	实验数据/MPa	本构方程数据/MPa	误差/%
75	853	869	1.88
100	863	851	1.38
150	871	859	1.39

3 结语

为研究应变速率对 310S 奥氏体不锈钢的力学性能参数的影响,笔者通过不同速率单向拉伸试验对其进行速度敏感性研究。首先,实验直观结果证明,310S 奥氏体不锈钢在变形过程中的力学性能确实受应变速度影响。其次,根据实验结果对各应变速率下真实应力应变曲线进行计算,同时从计算结果中获取硬化参数,并进行比对。最后,根据比对结果选取适合的本构方程模型进行拟合,确立适用于 310S 奥氏体不锈钢的应变速度敏感性本构方程,经取样验证,结果表明该本构方程能够较为准确地描述不同应变速率下真实应力与应变之间的关系。该本构方程对工程实践有着可靠的指导意义。

参考文献:

[1] JI H, PARK I J, LEE S M, et al. The effect of pre-strain on hydrogen embrittlement in 310S stainless steel [J]. Journal of alloys and compounds, 2014, 598: 205 - 212.