

拉伸速率对 GH4169 合金高温拉伸性能的影响

张明珠, 郑永健, 兰福立, 张公军, 张浩, 卢焕明

(中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江省宁波 315201)

摘要: 针对合金高温拉伸性能测试, 通常按照国标 GB/T 228.2 开展, 该标准对于拉伸速率的选取给出多种选择, 为准确获得 GH4169 合金的高温拉伸性能, 研究了不同大小拉伸速率以及屈服前后不同拉伸速率参数配置对其高温拉伸性能的影响。结果表明: 当拉伸速率增大时, 材料的屈服强度及抗拉强度增大; 当屈服后的拉伸速率较屈服前明显增大时, 材料的高温拉伸曲线出现 GB/T 228.1 标准中的“应变速率突然增加时的应力-应变行为”, 在曲线上形成跳动台阶, 导致抗拉强度值为非真实值, 影响结果的准确性, 当屈服前后采用统一的拉伸速率, 无上述现象, 可获得准确的强度值。

关键字: 电子万能试验机; GH4169 合金; 高温条件; 拉伸速率

中图分类号: TG115.5; TG132.3

Effect of tensile rate on the high-temperature tensile properties of GH4169 alloys

Zhang Mingzhu, Zheng Yongjian, Lan Fuli, Zhang Gongjun, Zhang Hao, Lu Huanming

(Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, CAS, Ningbo 315201, China)

Abstract: In order to accurately obtain the high-temperature tensile properties of GH4169 alloy, the effects of different sizes of tensile rates and different tensile rate parameter configurations before and after yield were studied on their high-temperature tensile properties. The results show that when the tensile rate increases, the yield strength and tensile strength of the material increase. When the tensile rate after yield is significantly bigger than before yielding, the high-temperature tensile curve of the material appears as described in the GB/T 228.1 that “stress-strain behavior when the strain rate increases suddenly”, and a runout step is formed on the stress-strain curve, and the tensile strength value at this time is a non-true value, which affects the accuracy of the results. When a uniform tensile rate is applied before and after yielding, there is no such phenomenon, and accurate strength values can be obtained.

Keywords: Electronic universal testing machines; GH4169 alloy; High temperature conditions;

Tensile rate

电子万能材料试验机是一种高精度、高效率的材料力学试验设备，试验机通过不同方式施加力，使试样在不同条件下产生形变，从而得到材料的强度、塑性等性能参数。其中，测试参数的合理设置对于材料性能的准确测定具有关键性作用。

GH4169 是一种镍基变形高温合金，因其工作温度高，材料强度高、塑性好等特点而广泛应用于航空航天工业领域，尤其在发动机领域有重要的推动作用^[1]。针对高温条件下服役的材料，需要具备良好的高温力学性能，准确测定 GH4169 合金在高温条件下的力学性能对于零件的性能评估尤其重要。目前，针对金属材料常温力学性能测试的方法，行业内研究较多^[2-4]，但是对于金属材料高温条件下力学性能试验方法的研究还相对较少。

文中将针对 GH4169 合金的高温拉伸试验，研究不同拉伸速率大小以及屈服前后拉伸速率变化对其高温拉伸性能的影响。

1 试验部分

1.1 仪器和试验材料

Z100 电子万能材料试验机，配备高温炉、激光引伸计（德国 Zwick/Roll）。

试验材料为 GH4169 高温合金，试验所用拉伸试样参照《GB/T 228.2-2015 金属材料 拉伸试验 第 2 部分：高温试验方法》附录 A 的要求，加工成平行段长度为 30mm，平行段直径为 4mm，螺纹头部直径为 8mm 的圆棒试样。

1.2 试验方法

试验温度为 800 °C，保温时间为 10min。本试验采用夹头分离速率的控制方式，由平行长度估算应变速率的方法进行试验速率的控制，并参照标准 GB/T 228.2 要求的参数进行设置，具体参数如表 1 所示。

表 1 GH4169 合金的高温拉伸试验参数

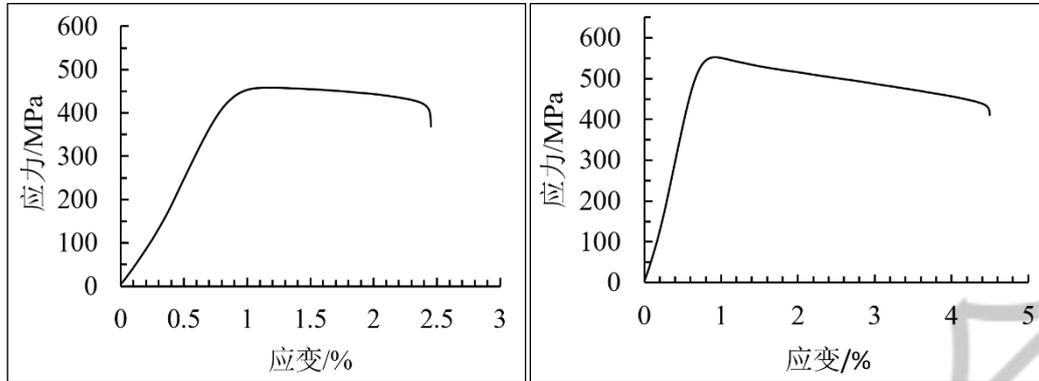
Table1 High temperature tensile test parameters of GH4169 alloy

试样编号	屈服点及弹性段拉伸速率/（mm/min）	屈服后拉伸速率/（mm/min）
1	0.126	0.126
2	0.45	0.45
3	0.126	2.52

2 结果与讨论

2.1 不同拉伸速率对 GH4169 合金高温拉伸曲线的影响

图 1 为 1 号、2 号试样在不同拉伸速率下的高温拉伸应力应变曲线，表 1 为相应的强度结果。



(a) 1 号试样的高温拉伸曲线

(b) 2 号试样的高温拉伸曲线

图 1 不同拉伸速率下的高温拉伸应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of high temperature tensile tests at different tensile test rate: High temperature tensile curve of sample 1; (b) High temperature tensile curve of sample 2

表 2 GH4169 合金的高温拉伸试验结果

Table2 High temperature tensile test results of GH4169 alloy

试样编号	拉伸速率/(mm/min)	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	抗拉强度 R_m /MPa
1	0.126	456	458
2	0.45	551	552

从图 1 可以看出，GH4169 合金在 800°C 下的高温拉伸应力应变曲线没有明显的屈服平台，即曲线没有上屈服点和下屈服点。曲线包含 3 个部分：变形初期为弹性变形过程，曲线为直线型；随着外加载荷的增大，材料进入均匀塑性变形阶段，曲线呈现抛物线状；随着载荷增大，应力达到抗拉强度值，试样开始颈缩然后进入不均匀塑性变形阶段，最后试样发生断裂。

由表 2 可以看出，试验过程对于拉伸速率参数较敏感，拉伸速率增大时，GH4169 合金的屈服强度及抗拉强度均增大。屈服强度是材料从弹性变形转变为塑性变形所对应的应力点，位错的增殖、运动是材料产生塑性变形的的主要原因。试样发生屈服时，晶粒内结构薄弱的区域首先产生塑性变形滑移带，随着时间的增加逐渐扩展到整个试样，当拉伸速率增加时，滑移带扩展时间不足，运动不充分，导致位错滑移困难，使得材料屈服强度上升^[5-7]，金属的

塑性变形来不及在整个试样内均匀传递，也会导致材料屈服强度上升^[6,7]。金属材料发生塑性变形的过程会伴随着形变强化的发生，变形量越大，相应的形变强化越严重，当拉伸速率提高时，材料形变强化程度增大，增加了继续塑性变形的阻力，使得材料的塑性变形困难，继而导致抗拉强度上升^[8]。

2.2 屈服点前后拉伸速率参数设置对 GH4169 合金高温拉伸曲线的影响

图 2 为 1 号、3 号试样在不同拉伸试验参数下的高温拉伸应力应变曲线，表 3 为试样拉伸试验的特征参数值。

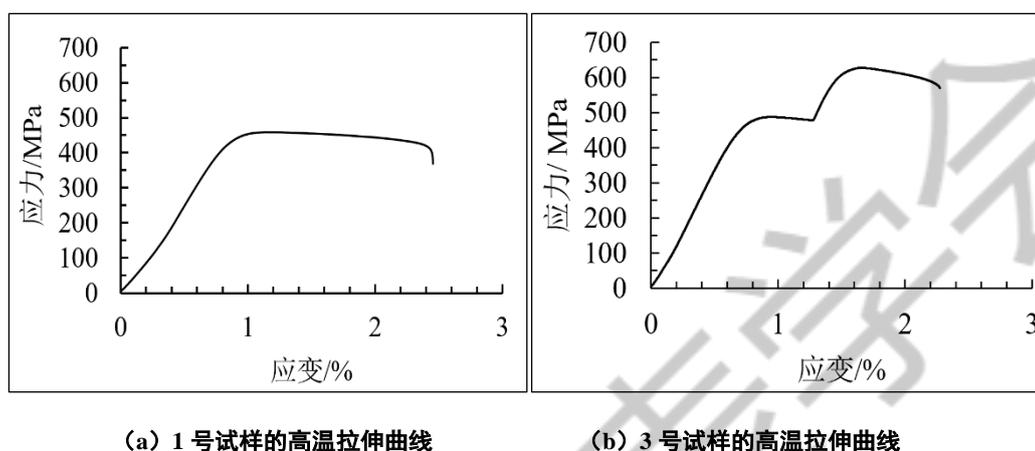


图 2 不同拉伸试验参数下的高温拉伸应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of high temperature tensile tests at different tensile test parameters: (a) High temperature tensile curve of sample 1; (b) High temperature tensile curve of sample 3

表 3 GH4169 合金高温拉伸试验特征参数值

Table3 GH4169 alloy high temperature tensile test characteristic parameters

试样 编号	试验速率/(mm/min)	屈服强度	抗拉强度
	屈服点及弹性段	屈服后	
		$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa
1	0.126	0.126	456
3	0.126	2.52	487

由图 2 (b) 可知，当 GH4169 合金高温拉伸过程中屈服后的拉伸速率较屈服前突然增大时，材料的高温拉伸应力应变曲线出现标准 GB/T228.1-2010 中所述的“关于应变速率突然增加时的应力-应变行为”，即材料的应力值明显增大，在应力应变曲线上形成不连续的跳动台阶，这属于标准中不允许出现的情况，此时的抗拉强度值为非真实值，它是由于突然的应变速率增加而带来的。由图 2 (a) 可以看出，当屈服前后的拉伸速率不发生变化时，材料高温拉伸应力应变曲线很光滑。

综上所述, 高温条件下, GH4169 合金屈服前后的加载速率设置对拉伸试验结果影响较大, 试验过程中对于 GBT228.2 标准中推荐的试验速率需要合理选用, 因其导致屈服后的拉伸速率参数较屈服前明显增大, 因此在实际高温测试时, 拉伸速率参数的选取在参考标准的同时还需进一步合理设置。

3 结语

针对 GH4169 合金高温拉伸试验, 拉伸速率参数的设置会对结果产生直接影响, 当拉伸速率整体增大时, 材料的屈服强度及抗拉强度也随之增大; 当屈服后的拉伸速率较屈服前发生突然增大时, 材料的应力应变曲线上引入不连续的跳动台阶, 导致材料应力值明显增大, 此时的抗拉强度值为非真实值, 将影响对合金性能的准确测定; 当屈服前后采用统一的拉伸速率时, 材料应力应变曲线无应力突变现象发生, 整条曲线呈光滑状态, 可获得准确的强度值。针对金属高温拉伸试验, 对于 GBT228.2 标准中推荐的试验速率需要结合材料特性进行合理选用, 同时, 材料间进行性能对比时也需要确认所用测试条件的一致性。

参考文献:

- [1] 吴昊. 高温合金叶片挤压工艺过程模拟及模具结构优化[D]. 东北: 东北大学, 2014.
- [2] 李培芬, 康赫男, 宾远红. 拉伸速度对金属材料拉伸性能测试结果的影响[J]. 计量与测试技术, 2013,40(11):61-61.
- [3] 卢国清, 齐彪, 陈德, 等. 拉伸试验速率对测试结果的影响[J]. 物理测试, 2015,33(5):1-5.
- [4] 敬仕煜, 普晓明, 杨华春. 横梁位移模式下的拉伸试验速率控制与验证测试方案[J]. 理化检验:物理分册, 2021,57(6):11-15.
- [5] 张有为, 乔建军, 任学平. 拉伸速率控制模式及拉伸速率对冷轧薄板强度测试结果的影响[J]. 理化检验:物理分册, 2013,49(4):233-235.
- [6] 湛欣. 金属拉伸试验速度对屈服强度的影响及其负荷速率的控制[J]. 温州大学学报, 2003(02):111-112.
- [7] 张庆国, 高文山, 白宗奇. 拉伸速率对力学性能测定的影响[J]. 物理测试, 1999(4):34-35.
- [8] 汪红晓. 拉伸速率对 GH2909 高温拉伸测试结果的影响[J]. 特钢技术, 2018,24(1):36-38.