DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.2268

变形速率对 ZGH3030 镍基高温合金力学性能的影响

逯红果[1,2],周　丽[1],马中钢[2],崔　彬[2],李化坤[2],徐　琳[2],李　娜[2],王光华[2],李道乾[2],殷凤仕[3]
(1. 山东理工大学 化学化工学院,山东 淄博 255049; 2. 山东瑞泰新材料科技有限公司,山东 淄博 256100; 3. 山东理工大学 机械工程学院,山东 淄博 255049)

摘　要:针对 ZGH3030 合金重熔浇铸力学试棒在 800 ℃拉伸试验过程中拉伸强度低于标准值的现象,本实验采用型号为 WDW-100 试验机, 对不同力学试棒通过设定不同的横梁位移速率和相同试棒拉伸过程中改变横梁位移速率,研究了横梁移动速率对 ZGH3030 合金强度的影响。结果表明,ZGH3030 合金在 800 ℃拉伸试验过程中,改变横梁位移测试条件,能够改变合金的抗拉强度值。因此,该方面的研究,有助于在以后类似铸造高温合金拉伸过程中,通过合理设定横梁位移速率,获得合适的抗拉强度值。

关键词:ZGH3030 镍基高温合金;变形速率;高温拉伸;抗拉强度

中图分类号: TG132.3+2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2023)03-0257-06

Effect of Strain Rate on the High-Temperature Mechanical Properties of a ZGH3030 Nickel-Based Superalloy

LU Hongguo[1,2], ZHOU Li[1], MA Zhonggang[2], CUI Bin[2], LI Huakun[2], XU Lin[2], LI Na[2], WANG Guanghua[2], LI Daoqian[2], YIN Fengshi[3]
(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; 2. Shandong Roitie New Material Science and Technology Co., Ltd., Zibo 256100, China; 3. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: Aiming at the phenomenon that the tensile strength of the remelted casting ZGH3030 alloy is lower than the standard value during the tensile test at 800 ℃, the WDW-100 testing machine was used in this test to study the influence of the beam displacement rate on the strength by setting different beam displacement rates for different mechanical test bars and changing the beam displacement rate of the same test bar during the test. The results show that the tensile strength of the ZGH3030 alloy can be changed by changing the beam displacement test conditions during the tensile test at 800 ℃. Therefore, the appropriate tensile strength can be obtained by reasonably setting the displacement rate of the beam, which is helpful for the tensile test of similar cast superalloys in the future.

Key words: ZGH3030 nickel-based superalloy; strain rate; high-temperature tensile test; tensile strength

ZGH3030 镍基高温合金化学成分简单,主要成分为碳、铬、钛和镍元素,在 800 ℃以下具有较好的热强性和高塑性、良好的抗氧化、抗热疲劳和可焊性等,在航空航天、舰船、石油化工等领域得到广泛应用[1]。该合金经过 1 000 ℃固溶处理后为单相奥氏体组织,无 γ′相析出,晶界处存在 MC (M 为 Ti元素)型碳氮化合物, 并且经过高温时效处理或提高碳含量后,能够析出 M_7C_3 (M 为 Cr 元素)型碳化物[2]。

收稿日期: 2022-09-02
基金项目: 山东省重点研发计划(2021JMRH0204);山东省科技型中小企业创新能力提升项目(2022tsgc0040);淄博市“双十”计划项目(2019SS090001)
作者简介: 逯红果,1988 年生,硕士,中级工程师.研究方向:金属材料的组织和性能研究.电话:17560312304, Email: luhongguo12345@163.com.
通讯作者: 周　丽,1967 年生,硕士,高级实验师,硕士生导师.研究方向:高性能高温金属材料的组织和性能研究.电话:13605331243, Email: zhouli@sdut.edu.cn.
引用格式: 逯红果,周丽,马中钢,等.变形速率对 ZGH3030 镍基高温合金力学性能的影响[J].铸造技术,2023,44(3): 257-262.
LU H G, ZHOU L, M Z G, et al. Effect of strain rate on the high-temperature mechanical properties of a ZGH3030 nickel-based superalloy[J]. Foundry Technology, 2023, 44(3): 257-262.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

抗拉强度、屈服强度和断后伸长率是验证合金性能的重要指标。目前,提高合金高温拉伸强度的主要手段有增大晶粒尺寸[3]、改变碳化物形貌[4]、提高γ′相体积分数[5]等。但是,上述方法对于无固溶强化元素和γ′相的ZGH3030合金影响不大。根据HB5195-1996《金属高温拉伸试验方法》可知,可以采用多种横梁移动速率进行拉伸试验。目前对于试验速率对合金性能影响的研究较少。李克杰[6]研究表明,在250 ℃条件下,高强耐热镁稀土合金变形速率从0.5 mm/min提高到4.0 mm/min,屈服强度有所提高,合金抗拉强度先升高后降低。张欢等[7]发现应变速率对Ti6Al4V合金合金室温的抗拉强度、断后伸长率和断面收缩率影响较小,而对屈服强度影响较大。Zhang等[8]研究了在高温下应变速率对合金发生动态再结晶的影响。李细峰等[9]、王岩等[10]及郭青苗等[11]分别研究了应变速率对Invar 36、617B和GH625合金的影响,结果表明,应变速率及变形温度对合金力学性能、动态再结晶晶粒尺寸和体积分数影响较大。此外,变形速率能对合金中位错的形成与滑移产生影响,高变形速率能使合金表面硬化,提高合金拉伸强度;同时,拉伸试验各阶段的塑性变形在不同程度上受到应变速率的影响[12-13]。张俊平等[14]、贾昌远等[15]及苑文婧等[16]分别研究了温度及应变速率对TWIP钢、40CrNiMo钢和HC340LA钢拉伸性能的影响,并分析了拉伸过程中各阶段弹塑性变形的机制。另有学者[17-20]研究了应变速率对各种变形/铸造高温合金组织与力学性能的影响,并对应变速率对合金显微组织的影响进行了分析。上述研究结果表明,合金在高温拉伸试验过程中,应变速率对合金的力学性能影响较大。

本文研究的ZGH3030合金中无固溶强化元素和γ′相,且沿晶界存在少量的MC型碳化物,在800 ℃高温拉伸时,常存在抗拉强度低、伸长率和断面收缩率高的现象。在高温拉伸试验满足HB5195-1996标准要求上,本文研究了横梁位移速率对ZGH3030合金高温拉伸力学性能的影响,为后续同类合金的研究提供技术支持。

1 实验材料与方法

实验采用ZGJL0.5-100-2.5型真空感应炉重熔铸造高温母合金,化学成分见表1。重熔浇注成梅花试棒,重熔时在1 580 ℃精炼5 min,1 420 ℃浇注,模壳焙烧温度为860 ℃,采用填砂造型方式。试棒经1 000 ℃固溶处理2 h并空冷后加工成标距为25 mm、直径为5 mm的标准拉伸试样,然后采用型号为WDW-100的高温拉伸试验机测试800 ℃高温拉伸性能,拉伸过程中横梁位移速率设置为0.6、1.2和2.0 mm/min。拉伸试样断口采用线切割沿中间切割获得纵剖面,经镶嵌、打磨、抛光和腐蚀后观察组织。试样腐蚀剂为20 g $CuSO_4$+100 mL HCL+5 mL H_2SO_4+80 mL H_2O。采用型号为BX53M金相显微镜和型号为FEI-Apreo-S场发射高分辨扫描电镜观察显微组织及断口纵剖面。

表1 母合金化学成分 *w*/%
Tab.1 Chemical composition of the ingots

元素	C	Cr	Ti	Ni
检测值	0.09	21.0	0.30	余

2 实验结果及讨论

2.1 显微组织

图1~2分别为ZGH3030合金显微组织。由图1可知,合金晶界处和晶界附近存在析出相,晶界处析出相呈颗粒状分布,晶界内析出相主要呈颗粒状或长棒分布在基体上。图2(a)为晶界处高倍扫描照片,图2(b)为晶界附近析出相高倍扫描照片,由图1~2可知,合金晶界处和晶界附近存在析出相。图2(c~d)为晶界和晶界附近析出相的能谱分析结果,分析可知,合金晶界和晶界内析出相主要为MC (M为Ti元素)碳化物。

2.2 力学实验结果

表2为ZGH3030合金800 ℃高温拉伸力学结果。由表2可知,在横梁位移速率采用0.6 mm/min时,抗拉强度为154.0 MPa;当横梁位移速率采用1.2 mm/min时,抗拉强度为197.0 MPa,抗拉强度

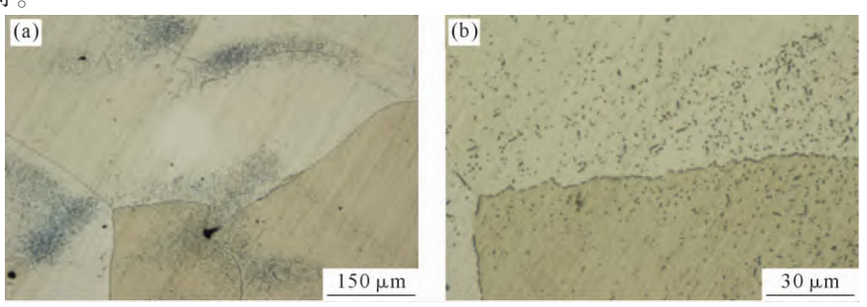

图1 ZGH3030合金金相照片:(a) 低倍,(b) 高倍
Fig.1 Metallographic photographs of the ZGH3030 alloy: (a) low magnification, (b) high magnification

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

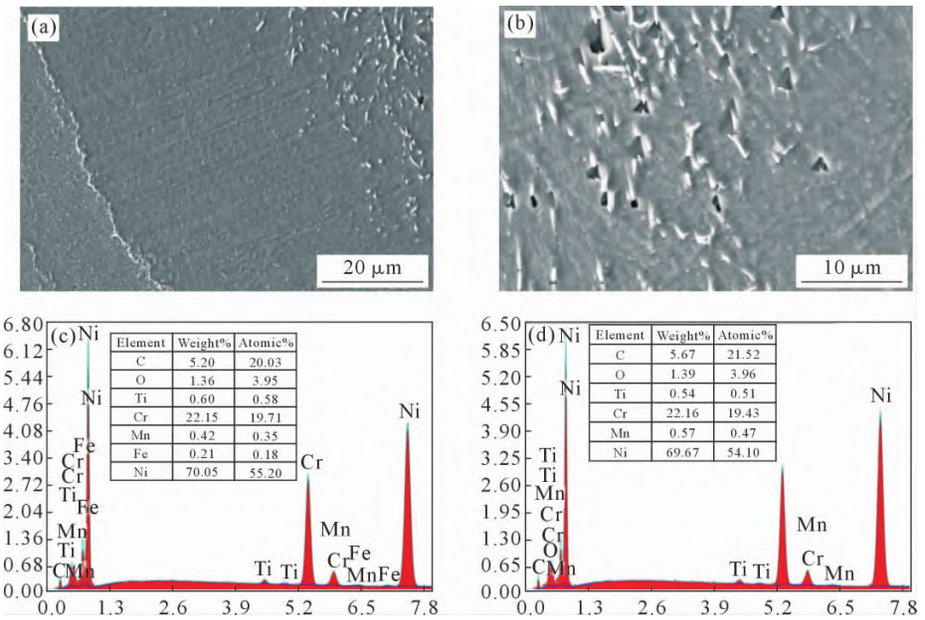

图 2 ZGH3030 合金 SEM 照片及析出相的能谱分析结果：(a~b) 析出相 SEM 照片，(c) 图(a)晶界处析出相能谱分析结果，(d) 图(b)析出相能谱分析结果

Fig.2 SEM images and EDS analysis of the ZGH3030 alloy: (a~b) SEM images of precipitated phase, (c) energy spectrum analysis of the precipitates at grain boundaries in (a), (d) energy spectrum analysis of precipitate in (b)

表 2 ZGH3030 合金在 800 ℃下不同横梁位移速率下的力学性能

Tab.2 Tensile strength of the ZGH3030 alloy at 800 ℃ with different beam displacement rates

beam displacement rate/(mm·min^{-1})	σ_b/MPa
0.6	154.0
1.2	197.0
2.0	183.0

增加，伸长率降低。进一步提高横梁位移速率至 2.0 mm/min时，抗拉强度为 183.0 MPa，其相对于横梁位移速率为 1.2 mm/min 时，抗拉强度和伸长率有所降低。因此，在实际的生产过程中，建议采用的横梁位移速率为 1.2 mm/min，有助于提高合金的高温抗拉强度值。

图 3 所示为 ZGH3030 合金在 800 ℃下不同横梁位移速率下力与位移曲线。图 3(a)为采用不同的横梁位移速率对力–位移的影响，图 3(b)为采用 0.6 mm/min 的横梁位移速率拉伸过程改变横梁位移速率对力–位移的影响。由图 3(a)可知，合金在不同横梁位移速率下，在高温拉伸过程中没有明显的屈服现象，但是横梁位移速率增大，有利于提高 ZGH3030 合金的抗拉强度值。

同时由图 3(b)可知，合金在横梁位移速率为 0.6 mm/min 拉伸塑性变形阶段，横梁位移速率突然增加至 1.2 mm/min 和 5.0 mm/min，曲线存在明显的拐点。并且速率变化越大斜率也越大，与弹性变形阶段斜率相近，甚至超过了弹性段的斜率。图 3(b)表明，提高横梁位移速率有利于提高 ZGH3030 合金的抗拉强度值。

2.3 断口形貌

图 4 所示为 ZGH3030 合金在横梁位移速率为 0.6 mm/min 时的 800 ℃拉伸断口金相照片。图 4(a)为断口处金相照片，图 4(b)为远离断口处金相照片。

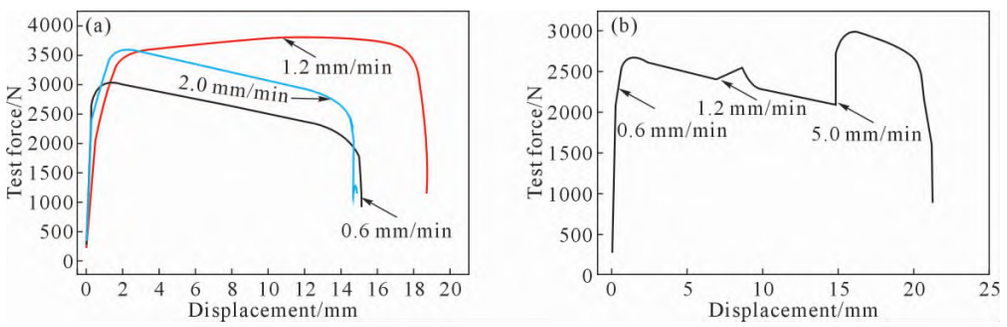

图 3 ZGH3030 合金力与位移速率曲线：(a) 不同横梁位速率移对力–位移曲线的影响，(b) 0.6 mm/min 横梁位移速率拉伸过程中改变横梁位移速率对力–位移曲线的影响

Fig.3 The force and displacement rates curves of the ZGH3030 alloy: (a) the effect of different beam displacements rates on the force-displacement curve, (b) the effect of changing beam displacements rates on the force-displacement rates curve during 0.6 mm/min beam displacement rates drawing process

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

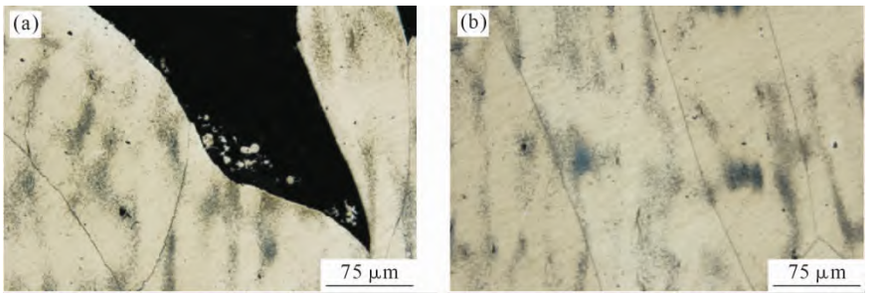

图 4 ZGH3030 合金在 0.6 mm/min 横梁位移速率下断口金相照片:(a) 断口处, (b) 远离断口处
Fig.4 Metallographic photographs of the fracture of the ZGH3030 alloy at a deformation rate of 0.6 mm/min: (a) at the fracture, (b) away from the fracture

由图 4 可知,合金晶粒沿拉伸方向发现较大塑性变形,ZGH3030 合金的断裂方式为沿晶断裂。

图 5 所示为 ZGH3030 合金在横梁位移速率为 0.6 mm/min 时远离拉伸断口扫描照片。根据图 5 可知, 合金在横梁位移速率为 0.6 mm/min 时,基体存在塑性损伤(见箭头)。

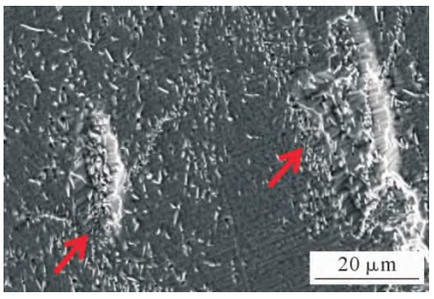

图 5 ZGH3030 合金远离断口处塑性损伤扫描照片
Fig.5 SEM image showing the plastic damage of the ZGH3030 alloy away from fracture

2.4 讨论

已知,ZGH3030 合金中无固溶强化元素和 γ′相存在,析出相主要为沿晶界和晶内分布 MC 型碳化物[1-2]。其中,晶界内 MC 型碳化物呈颗粒状或长棒状分布在基体上。研究表明,高温拉伸过程中,沿晶界呈颗粒状分布的 MC 型碳化物有利于提高合金的塑性和伸长率[3-5]。根据表 2 可知,合金在 800 ℃高温拉伸过程中, 采用 0.6 mm/min 的横梁位移速率时,合金的抗拉强度值低于标准要求。通过提高横梁位移速率,能够提高抗拉强度和降低伸长率。同时,结合图 3(a)应力和位移曲线可知,在不同横梁位移速率下,合金的屈服现象不明显。

根据 GH3625 合金高温拉伸可知[12],高温拉伸变形分为高温弹性阶段、弹–塑性转变阶段和塑性阶段。其中,弹–塑性转变阶段和塑性阶段主要变形机制为滑移和孪生,而孪生能够提供的塑性变形量相比滑移来说是非常有限的[10]。因此,弹–塑性转变阶段和塑性阶段主要是由位错滑移引起的塑性变形[14]。已知,ZGH3030 合金中析出相主要是 MC 型碳化物,在 800 ℃高温拉伸过程中,晶界强度对合金性能影响较小, 而晶界内部 MC 型碳化物主要起到阻碍位错滑移的作用,进而提高合金强度。

同时,根据相关研究可知,对于塑性较大的合金材料,800 ℃高温拉伸过程中会基体会形成塑性损伤[8-11,13](图 5)。已知,塑性损伤的过程分为形核、长大及汇聚成微裂纹。因此,横梁位移速率增加导致塑性变形的时间较短,位错滑移不充分,交滑移形成的孔洞难以长大,塑性协调变形能力降低,微孔生成及联通形成裂纹的速度加快,导致塑性下降[15-17]。同时,横梁位移速率增加, 还会导致滑移面向有利于外加应力方向转动的时间不充分, 位错滑移变得困难[17-18],有利于提高合金的强度。另外,合金塑性变形常伴随着形变硬化, 位移速率较小, 形变硬化有回复过程。位移速率提高,回复过程困难,形变硬化值提高有利于提高合金的强度[6,19]。因此,横梁位移速率由 0.6 mm/min 提高至 1.2 mm/min 合金的抗拉强度提高,伸长率降低。

但是,高温横梁位移速率由 1.2 mm/min 提高至 2.0 mm/min 时,由于位移速率过高,导致合金塑性变形的阻力过大, 此时合金内裂纹的萌生与扩展将成为影响合金最大抗拉强度的决定因素。此时,合金内克服裂纹增长所需的塑性功将逐渐降低, 裂纹易于扩展,从而降低合金抗拉强度[6,20]。

同时,根据图 3(b)力和位移曲线可知,塑性变形阶段提高横梁位移速率, 曲线存在明显的拐点。并且,速率变化越大斜率也越大,与弹性变形阶段斜率相近。产生这种现象的原因有 2 个:①合金在塑性变形阶段提高位移速率, 此时塑性变形机制以位错滑移为主, 在瞬间加速载荷作用下位错来不及运动而表现出较高的变形抗力; ②位移速率改变瞬间,因为载荷增加较快,而应变量测量要等到试验机系统受力改变后再传到试样,试样再变形,再测量试样平行段部分的变形, 即变速的瞬间试验机系统、试样夹持段、平行段变形是从先到后顺

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

序，使得应力增加较快而变形增加小。在这两种因素的作用下，会在拉伸曲线上出现斜率高于弹性段的情况[18]。

3 结论

(1)ZGH3030 合金基体上存在沿晶界分布的颗粒状 MC 型碳化物，晶界附近存在呈颗粒状或长棒状的 MC 型碳化物。

(2)在 800 ℃高温拉伸时，横梁位移速率由 0.6 mm/min 提高至 1.2 mm/min 时，合金的抗拉强度值提高，伸长率降低。但是，横梁位移速率由 1.2 mm/min 提高至 2.0 mm/min 时，合金的抗拉强度值降低，伸长率降低。

(3)ZGH3030 合金在 800 ℃高温拉伸时，建议采用 1.2 mm/min 的横梁位移速率，合金的抗拉强度值最优。

参考文献：

[1] 颜鸣皋，刘伯操，李金桂，等. 中国航空材料手册[M]. 北京：中国标准出版社，2002.
YAN M H, LIU B C, LI J G, et al. China aviation materials manual [M]. Beijing: Standards Press of China, 2002.

[2] 安宁，张志伟，白凤江，等. 碳含量对 GH3030 合金组织和性能的影响[J]. 金属热处理，2018, 43(5): 11-15.
AN N, ZHANG Z W, BAI F J, et al. Effect of carbon content on microstructure and mechanical properties of GH3030 alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43(5): 11-15.

[3] 殷凤仕，孙晓峰，李耀彪，等. 熔体过热处理对 M963 合金组织和高温持久性能的影响金属学报[J]. 2003, 39(1): 75-78.
YIN F S, SUN X F, LI Y B, et al. Effect of melt superheating treatment on the microstructure and high temperature stress rupture properties of M963 superalloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 39(1): 75-78.

[4] 逯红果，王光华，田立敏，等. K424 高温合金显微组织和力学性能分析[J]. 铸造技术，2020, 41(9): 820-822, 830.
LU H G, WANG G H, TIAN L M, et al. Analysis of microstructure and mechanical properties of K424 superalloy[J]. Foundry Technology, 2020, 41(9): 820-822, 830.

[5] 陈昊，董建新，张麦仓. 热处理工艺对铸造高温合金 K480 组织的影响[J]. 材料热处理学报，2012, 33(7): 37-44.
CHEN H, DONG J X, ZHANG M C. Effect of heat treatment process on microstructure of cast superalloy K480[J].Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(7): 37-44.

[6] 李克杰. 拉伸速率对 Mg-12Gd-2Y-Sm-0.5Zr 合金强度的影响[J].稀土，2014, 35(2): 54-57.
LI K L. Effects of tensile rate on tensile strength of Mg-12Gd-2Y-Sm-0.5Zr alloy[J]. Chinese Rare Earths, 2014, 35(2): 54-57.

[7] 张欢，李庆，郭子静，等. 应变速率对 Ti6Al4V 合金室温拉伸性能的影响[J]. 金属热处理，2018, 43(11): 70-73.
ZHANG H, LI Q, GUO Z J, et al. Effect of strain rate on tensile properties of Ti6Al4V alloy at room temperature[J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43(11): 70-73.

[8] ZHANG D X, WEN Z X, YUE Z F, et al. Effect of strain rate and temperature on mechancalpeoperty of nickel-based superally GH3230[J].Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(11): 2601-2606.

[9] 李细锋，陈楠楠，李佼佼，等. 温度与应变速率对 Invar 36 合金变形行为的影响[J]. 金属学报，2017, 53(8): 968-974.
LI X F, CHEN N N, LI J J, et al. Effect of temperature and strain rate on deformation behavior of Invar 36 alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 53(8): 968-974.

[10] 王岩，徐芳泓，李阳，等. 应变速率对 617B 镍基高温合金组织演变的影响[J]. 稀有金属材料与工程，2014, 43(12): 3027-3030.
WANG Y, XU F H, LI Y, et al. Effect of strain rate on the microstructural evolution of 617B Ni-base superalloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(12): 3027-3030.

[11] 郭青苗，李德富，彭海健，等. 应变速率对 GH625 合金热变形过程组织演变的影响[J]. 北京科技大学学报，2011, 33(5): 587-592.
GUO Q M, LI D F, PENG H J, et al. Effect of strain rate on the microstructural evolution of hot deformed GH625 superalloy[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(5): 587-592.

[12] 高钰璧，丁雨田，李海峰，等. 变形速率对 GH3625 合金弹–塑性变形行为的影响[J]. 金属学报，2022, 58(5): 695-708.
GAO Y B, DING Y T, LI H F, et al. Effect of deformation rate on the elastic-plastic deformation behavior of GH3625 alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2022, 58(5): 695-708.

[13] 李华卫，王承忠. 基于拉伸变形本质行为的试验方法探讨[J]. 理化检验(物理分册)，2018, 54(4): 239-243.
LI H W, WANG C Z. Analysis on test methods based upon intrinsic behavior of tensile deformation[J]. Physical Testing and Chemical Analysis(Part A:Physical Testing), 2018, 54(4): 239-243.

[14] 张俊平，段先锋，史子木，等. 温度及应变速率对 TWIP 钢拉伸性能的影响[J]. 机械工程材料，2015, 39(5): 4-9.
ZHANG J P, DUAN X F, SHI Z M, et al. Effect of temperature and strain rate on tensile properties of TWIP steel[J]. Material for Mechanical Engineering, 2015, 39(5): 4-9.

[15] 贾昌远，霍元明，何涛，等. 40CrNiMo 钢高温拉伸变形行为和组织演变规律[J]. 金属热处理，2022, 47(4): 69-74.
JIA C Y, HUO Y M, HE T, et al. High temperature tensile deformation behavior and microstructure evolution law of 40CrNiMo steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(4): 69-74.

[16] 苑文婧，刘晓航，田浩彬，等. 应变速率对 HC340LA 低合金高强度钢板拉伸性能的影响[J]. 机械工程材料，2015, 39(8): 91-93.
YUAN W J, LIU X H, TIAN H B, et al. Effect of strain rate on tensile properties of high strength low alloy steel plate HC340LA[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015,39(8): 91-93.

[17] 赵强，刘杨，王磊，等. 应变速率对 GH4169 合金焊接接头拉伸变形行为的影响[J]. 材料研究学报，2016, 30(12): 881-887.
ZHAO Q, LIU Y, WANG L, et al. Effect of strain rate on tensile deformation behavior of laser welded joints of superalloy GH4169 [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2016, 30(12): 881-887.

[18] 张波，龙老虎，周斌，等. 拉伸速率对 Mar-M247 镍基高温合金高温强度的影响[J]. 理化检验(物理分册)，2020, 56(4): 6-9.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

ZHANG B, LONG L H, ZHOU B, et al. Effect of tensile rate on high temperature strength of Mar-M247 nickel base superalloy[J]. Physical Testing and Chemical Analysis(Part A:Physical Testing), 2020, 56(4):6-9.

[19] 冯策，李德福，郭胜利，等. 拉伸变形对 Hastelloy C-276 合金组织与力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程，2016, 45(12): 3128-3134.
FENG C, LI D F, GUO S L, et al. Effects of tensile deformation on microstructure and mechanical properties of Hastelloy C-276 alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(12): 3128-3134.

[20] 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.
ZHANG Q G, GAO W S, BAI Z Q. Effect of tensile rate on determination of mechanical properties [J]. Physics Examination and Testing, 1999(4): 34-35.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net