

不同Al+Ti含量下 GH738合金固溶温度范围的探讨

周世鑫, 卢熠, 杨家典, 徐兵

贵州航宇科技发展股份有限公司 贵州贵阳 550081

摘要: 对不同Al+Ti含量下GH738合金在标准固溶温度范围内进行试验, 获得了不同固溶温度下GH738合金显微组织及力学性能; 通过对比, 得到了不同Al+Ti含量下GH738合金显微组织和力学性能最佳的固溶温度范围。结果表明: 当Al+Ti含量较低时, 适当降低固溶温度可获得较为均匀的显微组织, 但过低的固溶温度会使力学性能有所降低; 当Al+Ti含量较高时, 标准范围内固溶温度对锻件晶粒尺寸影响不大, 可适当选择较高的固溶温度, 使锻件组织均匀的同时具有良好的力学性能。

关键词: GH738; 热处理; Al+Ti含量; 显微组织; 力学性能

Discussion on the solution temperature range of GH738 alloy under different Al+Ti contents

ZHOU Shixin, LU Yi, YANG Jiadian, XU Bing

Guizhou Aviation Technical Development Co., Ltd., Guiyang 550081, Guizhou, China

Abstract: Experiments were conducted on GH738 alloy with different Al+Ti contents within the standard solution temperature range to investigate the microstructure and mechanical properties of the alloy at different solution temperatures. By comparison, the optimal solution temperature range for the microstructure and mechanical properties of GH738 alloy with different Al+Ti contents were obtained. The results show that when the Al+Ti content is lower, lowering the solution temperature appropriately can achieve a more uniform microstructure, but excessively low solution temperature can reduce the mechanical properties. When the Al+Ti content is higher, the solution temperature within the standard range has little effect on the grain size of the forging, and a higher solution temperature can be chosen appropriately to achieve a uniform forging structure with the better mechanical properties.

Keywords: GH738; heat treatment; Al+Ti content; microstructure; mechanical properties

1 序言

GH738镍基高温合金凭借其卓越的高温强度、

优良的耐蠕变性能和抗氧化性能, 在航空航天领域被广泛用于制造燃烧室、涡轮发动机叶轮、燃气涡

第一作者: 周世鑫, 硕士, 主要从事金属热变形行为研究, E-mail: 1716122756@qq.com。

轮、燃气轮机燃烧器和喷嘴等关键部件；在石油化工领域，其被应用于高温高压下的管道、阀门和反应器。此外，GH738合金还可用于核能、风电和化工等领域^[1-3]。GH738合金的主要强化相为 γ' 相[Ni₃(Ti, Al)]，该相具有高强度和耐热性，在热处理和锻造加热过程中， γ' 相会析出并均匀分布在基体中^[4, 5]。 γ 相作为GH738合金的基体相，主要由Ni、Cr等元素组成，该相具有良好的可塑性和变形性能，在高温下能保持较高的强度和塑性^[6-8]。大量研究表明， γ' 相的溶解温度由合金的化学成分决定，而Al、Ti作为GH738合金 γ' 相的主要形成元素，影响最为显著，Al还可以改善合金的抗氧化性，Ti可以提高合金的抗蠕变性能及耐腐蚀性能。在生产中，常将Al+Ti含量的总和作为固溶温度选择的依据，这意味着Al+Ti含量的变化，其固溶温度也将随之不同^[9, 10]。

目前，针对GH738合金已经开展了一系列关于热变形过程、力学性能、析出相等方面的研究^[11-14]，然而对于不同Al+Ti含量下固溶温度的研究还有待深入。在实际生产中，每炉材料之间元素往往存在较大范围的波动，这给生产工艺的定型带来了很大的不确定性。因此，本文旨在探讨出不同Al+Ti含量下其组织性能最优的固溶温度范围，以期为实际生产提供参考。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

试验共选取4组不同Al+Ti含量的GH738合金，具体化学成分见表1，试验料经同一工艺：锻粗→冲孔→环轧后的锻件，环锻件尺寸： ϕ (785±4)mm× ϕ (631±4)mm×(110±3)mm；从锻件上切取试块经不同热处理制度后检测组织、力学性能，得出不同Al+Ti含量下性能最优的固溶温度。

表1 GH738合金主要化学成分（质量分数）（%）

试验组别	C	Al	Ti	Cr	Co	Mo	Si	Fe	Al+Ti
A组	0.044	1.29	2.8	19.33	13.48	4.22	0.072	0.91	4.09
B组	0.044	1.37	2.88	19.98	13.63	4.31	0.064	0.83	4.25
C组	0.043	1.49	2.93	19.48	13.48	4.27	0.059	0.93	4.42
D组	0.039	1.51	3.01	19.90	13.71	4.40	0.051	0.81	4.52

2.2 试验方法

根据GH738合金锻件相关验收标准建议的固溶处理制度：1010~1030℃+保温(4±0.5)h+水冷或油冷；本试验主要研究了固溶温度在1010℃、1020℃及1030℃时不同Al+Ti含量对锻件性能的影响。从每组锻件上沿径向、轴向切取3块弦长为200mm的试块，按不同的固溶处理制度（见表2）进行热处理后，进行力学性能及金相组织检测；同时，从每组试块的锻态、固溶态及固溶+时效后的试块上切取20mm×20mm×20mm的高倍试样，利用金相显微镜进行晶粒度检查。

表2 热处理制度

制度	固溶处理	第一次时效	第二次时效
1	1010℃ (4+0.5) h, 油冷	845℃ (4+0.5) h 空冷	760℃ (16+0.5) h 空冷
2	1020℃ (4+0.5) h, 油冷		
3	1030℃ (4+0.5) h, 油冷		

将不同状态的高倍试样经机械打磨抛光后，使用7.5gFeCl₃+100mLHCl溶液腐蚀10~15s，用DMI3000M显微镜进行晶粒组织情况观察。在不同固溶+时效处理后的各组试块上各切取2根室温拉伸、2根高温拉伸及2个硬度试样，采用电子万能试验机进行室温拉伸、高温拉伸检测；室温拉伸速率设置为：屈服前0.015mm/min，屈服后3.6mm/min；高温拉伸（760℃）速率设置为：屈服前0.005mm/min，屈服后2.5mm/min；在布氏硬度机上进行试样硬度检测。对不同Al+Ti含量下不同热处理制度的GH738合金力学性能及金相组织情况进行探讨。

3 试验结果与分析

3.1 不同Al+Ti含量及不同固溶温度下GH738合金显微组织对比

图1所示为Al+Ti含量为4.09%时试样锻态及不同温度固溶后的显微组织。从图1可看出，随着固溶温度的升高，晶粒快速长大；当温度为1020℃时，晶粒虽有明显长大，但整体保持晶粒度在ASTM5.5级，平均晶粒尺寸62.4μm。当温度增加至1030℃时，晶粒迅速长大，晶粒度骤降为ASTM1.5级，平均晶粒尺寸216.4μm。这是因为GH738合金的主要强

化相为 γ' 相, γ' 相主要的化学成分是Ti、Al元素^[15]; 当Al+Ti含量较低时, γ' 相的溶解温度较低, 当温度升高后, 基体中的 γ' 相快速溶解, 使基体中 γ' 相大幅

度减少。加之Al+Ti含量较低, 基体中原始 γ' 相析出更少, 对晶界的钉扎作用变弱, 因此当固溶温度升高时, 晶粒便迅速长大。

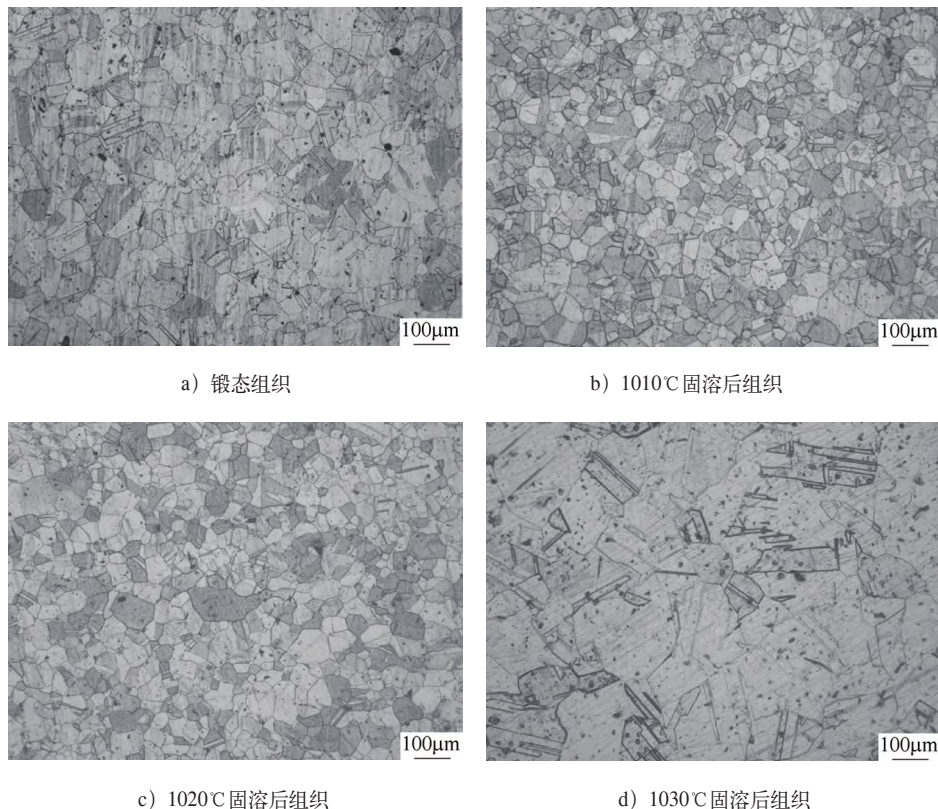


图1 Al+Ti含量为4.09%时不同温度固溶态晶粒组织

图2所示为Al+Ti含量为4.25%时试样的锻态及不同温度固溶后的显微组织。从图2可看出, 随着固溶温度的增加, 晶粒逐渐长大, 当温度为1020℃时, 晶粒虽有明显长大, 但试样晶粒度保持在ASTM6级, 平均晶粒尺寸为59.6 μm ; 当温度增加至1030℃时, 晶粒快速长大, 晶粒度降为ASTM2级, 平均晶粒尺寸为174.1 μm 。与图1比较可知, Al+Ti含量为4.25%时试样晶粒尺寸整体较含量为4.09%时更细小。

图3所示为Al+Ti含量为4.42%时试样锻态及不同温度固溶后的显微组织。从图3可看出, 随着固溶温度增加, 晶粒长大并不明显, 仅当温度为1020℃、1030℃时, 存在少量大晶粒, 但整体试样晶粒度维持在ASTM6级, 平均晶粒尺寸为56.2 μm 。对比图1、图2可知, 当GH738合金的Al+Ti含量达到4.42%时, 可使合金在标准热处理温度范围内晶粒尺寸不会骤然长大。

图4所示为Al+Ti含量为4.52%时锻态及不同温

度固溶后的显微组织。从图4可看出, 随着固溶温度的增加, 试样晶粒并没有明显长大, 整体晶粒度维持在ASTM6级, 平均晶粒尺寸为55.5 μm 。

对比图1~图4可知, 随着Al+Ti含量的增加, 经相同变形后的试样锻态晶粒也在逐渐变细, 当Al+Ti含量接近标准要求上限时, 其变细程度有所下降。当固溶温度为1010℃时, Al+Ti含量为4.09%的晶粒尺寸存在长大趋势, 但长大程度并不明显; 当固溶温度上升至1020℃时, Al+Ti含量为4.09%及4.25%的晶粒尺寸均有一定的长大; 当固溶温度上升至1030℃时, Al+Ti含量为4.09%及4.25%的晶粒尺寸快速长大, 晶粒度为ASTM1.5~2级, 平均晶粒尺寸为174.1~216.4 μm ; 而Al+Ti含量为4.42%和4.52%的晶粒尺寸变化不明显且组织较为均匀。由此说明, 当Al+Ti含量达到4.4%以上时, 标准推荐的固溶温度对晶粒大小影响较小, 且可获得均匀细小的组织。

图5所示为GH738合金不同Al+Ti含量在不同温

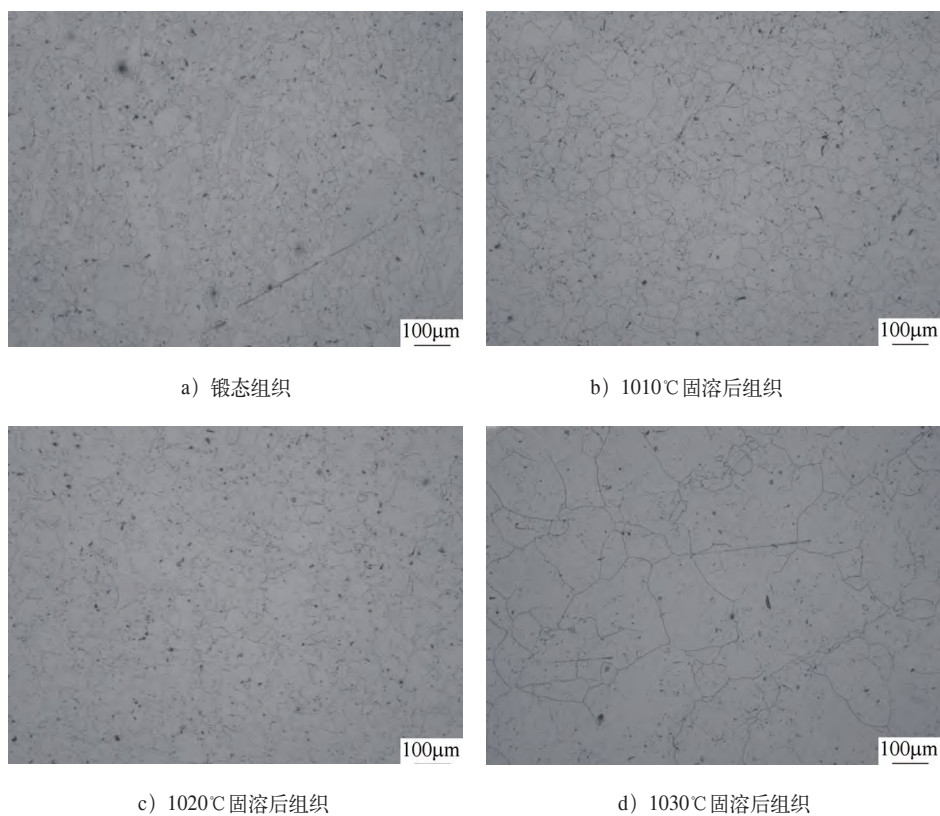


图2 Al+Ti含量为4.25%时不同温度固溶态晶粒组织

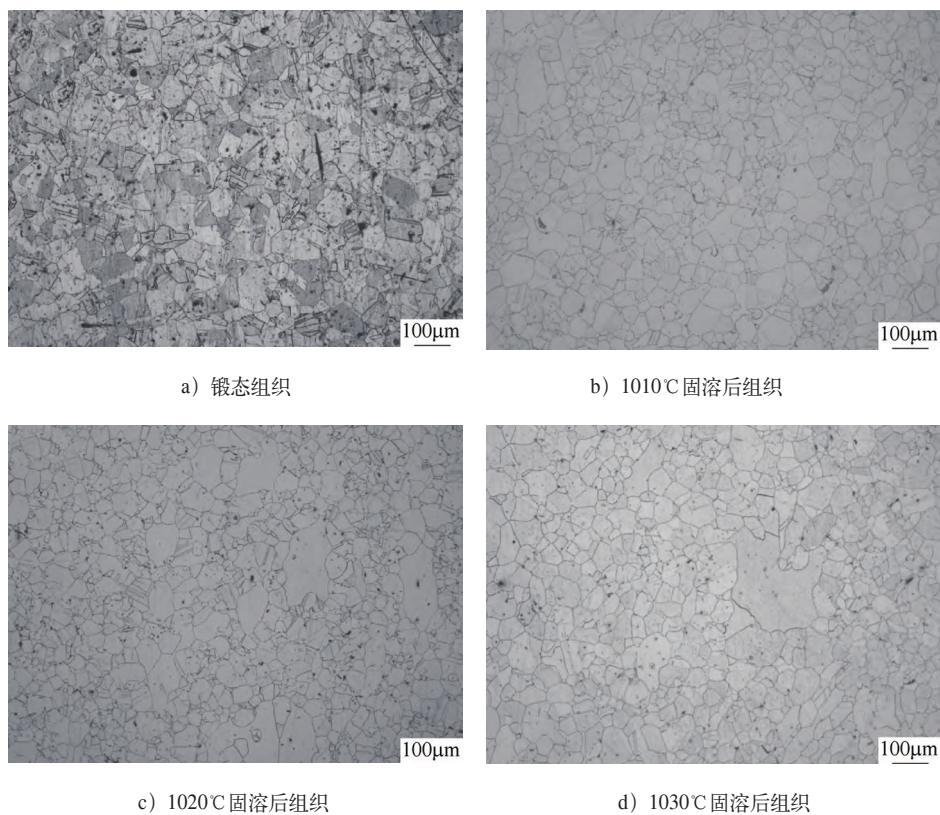


图3 Al+Ti含量为4.42%时不同温度固溶态晶粒组织

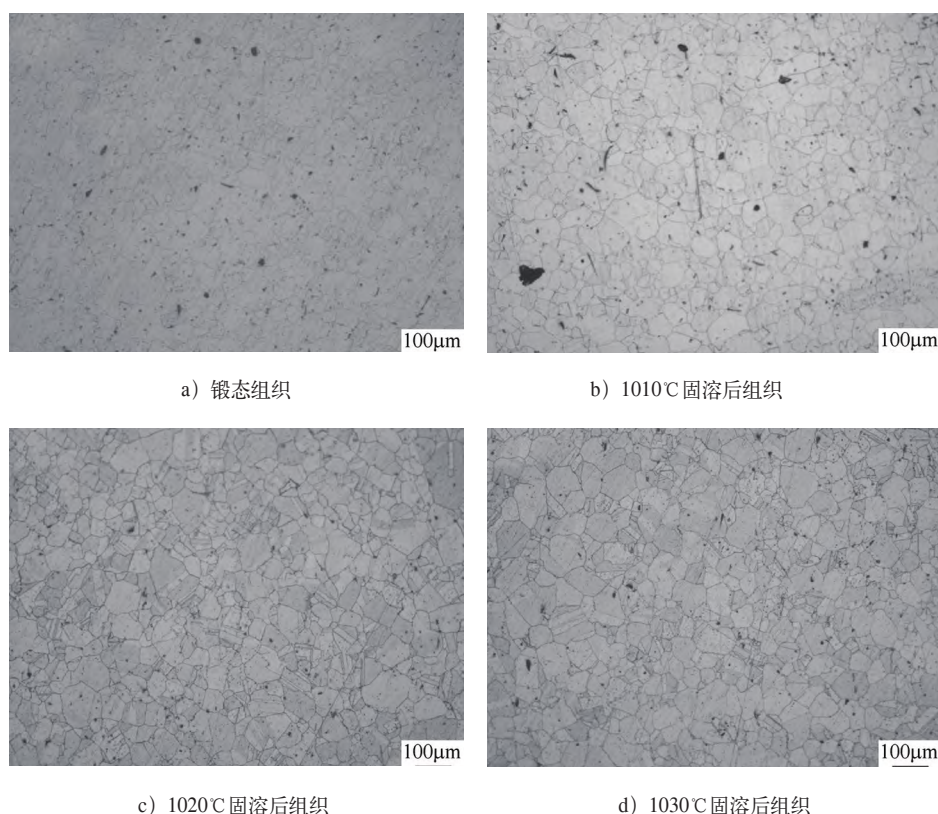


图4 Al+Ti含量为4.52%时不同温度固溶态晶粒组织

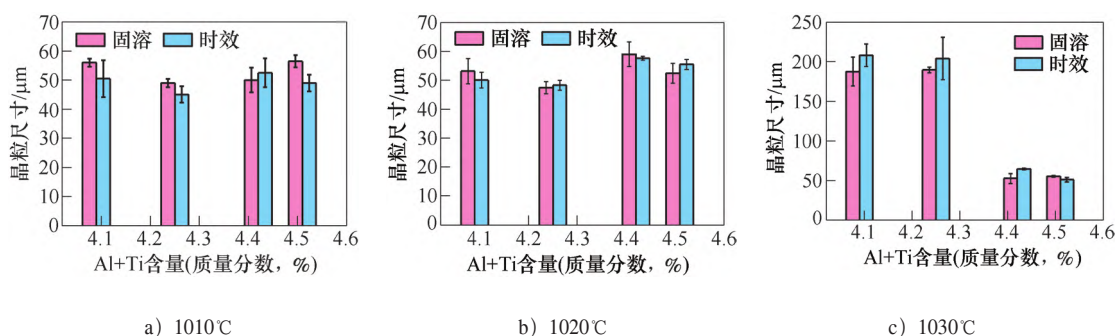


图5 不同Al+Ti含量固溶态与时效态晶粒度对比

度固溶再经标准时效后的晶粒尺寸对比情况。从图5可看出，显微组织在经标准时效后，晶粒较固溶态尺寸并没有发生急剧变化。因为固溶处理温度是影响GH738合金锻件晶粒大小的主要因素，而时效处理温度低于GH738合金晶粒长大温度，所以该阶段晶粒尺寸不会发生显著变化。因此，在后期的生产中，根据不同Al+Ti含量选择相应的固溶处理制度，可避免晶粒尺寸长大及混晶产生。

3.2 不同Al+Ti含量及不同固溶温度对GH738合金室温拉伸性能影响

图6所示为不同Al+Ti含量在不同固溶温度下

GH738合金的室温拉伸情况。从图6a可看出，在试验范围内，当温度一定时，随着Al+Ti含量的增加，GH738合金的抗拉强度逐渐增加，且Al+Ti含量在相对较低时，随着含量增加，其抗拉强度增加速度更快。当Al+Ti含量接近标准要求上限时，其增加幅度有所降低。根据上述显微组织分析可知，GH738合金的主要强化相为 γ' 相，当Al+Ti含量过少时，其基体中 γ' 相较少，使得合金强度较低；随着Al+Ti含量的增加，合金强度逐渐增大，当Al+Ti增加到足够多时， γ' 相回溶温度变高且溶解能力逐渐饱和，在试验温度范围内继续增加Al+Ti，其强

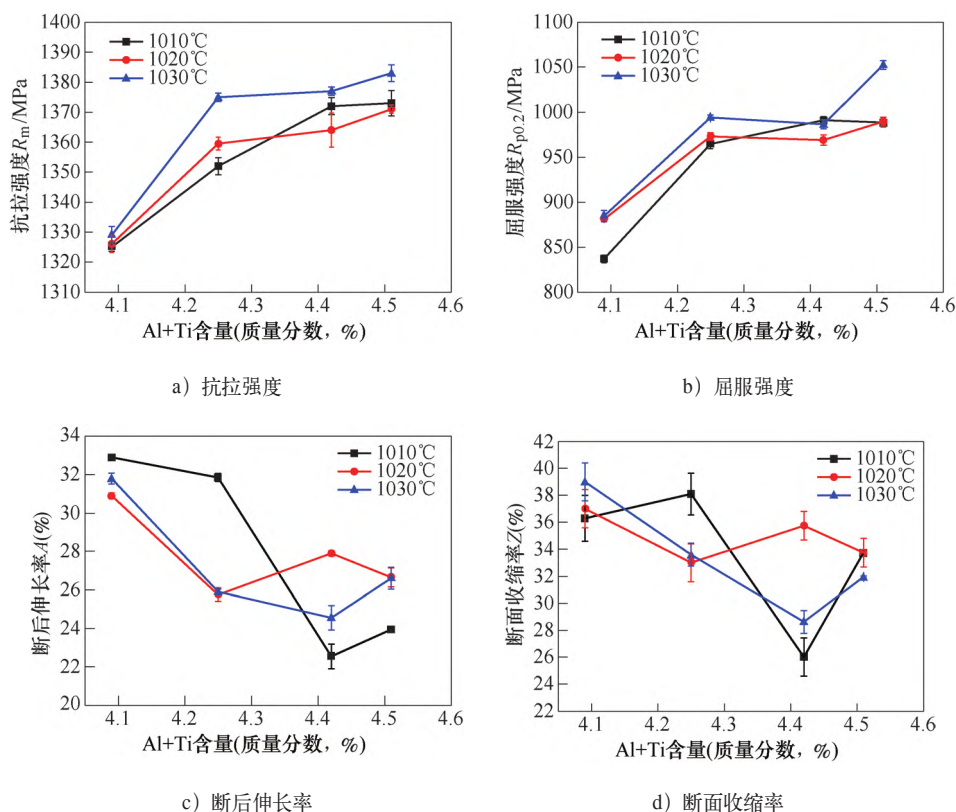


图6 GH738合金不同Al+Ti元素含量下的室温拉伸性能

度上升速率较慢并逐渐趋于平缓。从图6b可知,屈服强度与抗拉强度变化规律大致相同,随着Al+Ti含量的增加,GH738合金的屈服强度也逐渐增加,且固溶温度为1030℃时,屈服强度和抗拉强度均比固溶温度为1010℃时要高。随着Al+Ti含量的增加,室温断后伸长率及断面收缩率逐渐降低并趋于平缓。

3.3 不同Al+Ti含量及不同固溶温度对GH738合金高温拉伸性能的影响

图7所示为GH738合金不同Al+Ti含量在不同固溶温度下的高温拉伸性能。从图7a、b可看出,在试验范围内,当温度一定时,随着Al+Ti含量的增加,GH738合金的高温抗拉强度及屈服强度呈现先升后降趋势;当Al+Ti含量一定时,GH738合金在1010℃固溶的抗拉强度较1020℃、1030℃固溶后的高温抗拉强度平均低60~100MPa,GH738合金在1010℃固溶的屈服强度较1020℃及1030℃固溶后屈服强度低60~80MPa。随着Al+Ti含量的增加,高温断后伸长率、断面收缩率呈逐渐下降趋势。Al+Ti含量及固溶温度对合金性能的影响与显微组织的影响是相应的,随着Al+Ti含量增加,基体中一次

γ' 相数量较多;当固溶温度逐渐增加时, γ' 相逐渐溶解,冷却析出的二次 γ' 相增多,强度升高。但在高应力作用下,晶界的扩散能力高于晶内,同时因为固溶温度较高,因此使 γ' 相及晶粒长大,晶界体积分数减少,合金在变形时晶界的协调性降低,合金塑性降低。

3.4 GH738合金不同Al+Ti含量下的硬度

图8所示为GH738合金不同Al+Ti含量经不同温度固溶+标准时效处理后的硬度。从图8可看出,由于Al+Ti含量的增加,合金中形成的 γ' 相数量也会相对较多,故GH738合金的硬度也在逐渐增大。当Al+Ti含量一定时,固溶温度较高的合金硬度反而较低,这主要是因为基体中 γ' 相一定,随着固溶温度的升高, γ' 相不断溶解,二次 γ' 相逐渐长大、粗化^[16-18],使得固溶温度较高的合金硬度反而较低。

3.5 结论

从本试验中可知,少许Al+Ti含量的变化,对锻件的晶粒尺寸及力学性能影响都是极大的。当Al+Ti含量在4.09%~4.25%时,降低固溶温度到1020℃时,可获得较好的显微组织与力学性能;当Al+Ti含量在4.25%~4.4%时,固溶温度根据元素

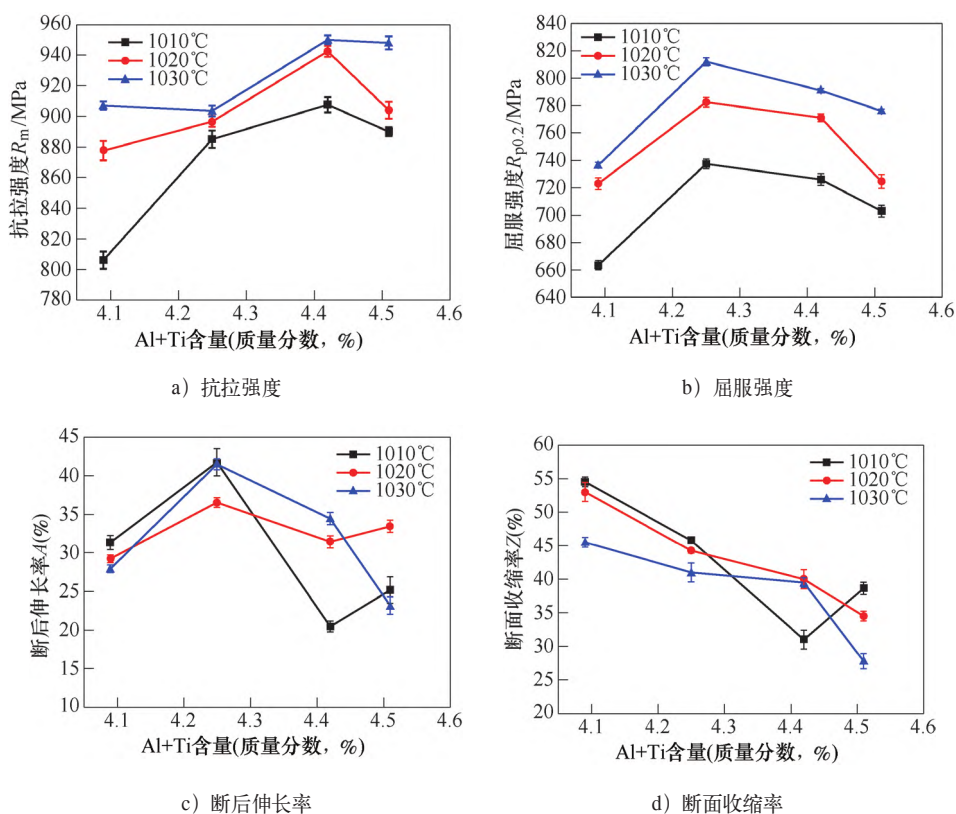


图7 GH738合金不同Al+Ti元素含量下的高温拉伸

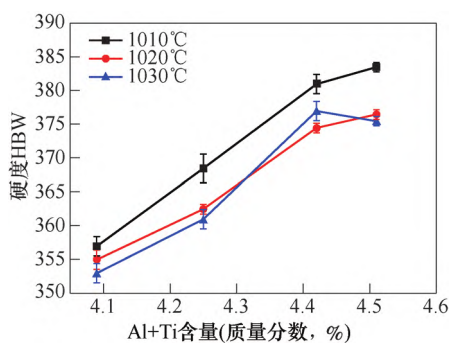


图8 不同Al+Ti含量热处理后硬度

含量及晶粒大小可选择在1020~1030℃；当Al+Ti含量在4.4%~4.52%时，标准范围内固溶温度对锻件晶粒尺寸影响不大，但较低的固溶温度会使锻件力学性能降低。

4 结束语

1) 在本试验中，当GH738合金Al+Ti含量<4.4%时，采用1030℃及以上固溶温度会使锻件晶粒尺寸快速长大；Al+Ti含量>4.4%时，在标准范围内固溶温度的高低对锻件晶粒尺寸没有太大影响。

2) 随着Al+Ti含量的增加，锻件的室温及高温力学性能逐渐增加，但当Al+Ti含量达到一定水平

时，锻件的高温力学性能存在一定的降低趋势。

3) 当Al+Ti含量<4.4%时，可通过适当降低固溶温度来保证锻件获得较好的显微组织及力学性能，但固溶温度降低至1020℃以下时，会使锻件力学性能也相应降低；当Al+Ti含量≥4.4%时，标准范围内固溶温度对锻件晶粒尺寸影响不大，因此可适当选择较高的固溶温度，使锻件组织均匀的同时具有良好的力学性能。

参考文献：

- [1] 张尤. GH738组织演变过程中非线性超声响应研究[D]. 南昌：南昌航空大学，2022.
- [2] WANG L, YANG G, LEI T, et al. Hot deformation behavior of GH738 for A-USC turbine blades[J]. Journal of Iron and Steel Research(International), 2015, 22 (11) : 1043-1048.
- [3] 龚志华. W代Mo对Waspaloy镍基合金组织与性能的影响[D]. 北京：钢铁研究总院，2021.
- [4] 田沛玉. GH738合金晶粒组织与力学性能的关联性[J]. 山东工业技术，2017 (11) : 41-42.
- [5] STEVENS R A, FLEWITT P E J. The effects of γ' precipitate coarsening during isothermal aging

- and creep of the nickel-base superalloy IN-738[J]. Materials Science and Engineering, 1979, 37 (3) : 237-247.
- [6] OJO O A, RICHARDS N L, CHATURVEDI M C. On incipient melting during high temperature heat treatment of cast Inconel 738 superalloy[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39 (24) : 7401-7404.
- [7] 张伟, 陈子帅, 董瑞峰, 等. 热加工过程中Ni基变形高温合金析出相的演变规律[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52 (9) : 3170-3178.
- [8] 李吉晓. GH4738合金热变形行为及螺栓热微模拟研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2023.
- [9] 刘湘斌, 王涛, 陈爽, 等. Al、Ti对热处理GH4738合金 γ' 相溶解规律的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51 (12) : 93-96.
- [10] 王煜, 孙林根, 于文龙. 高温长期时效对Waspaloy合金组织与性能的影响[J]. 热力透平, 2018, 47 (1) : 29-33.
- [11] 刘辉, 蔡新宇. 热加工参数对GH738合金动态再结晶行为的影响[J]. 钢铁研究学报, 2014, 26 (3) : 46-50.
- [12] 马文彬, 赵子华, 骆红云, 等. 高温合金GH738超高周疲劳行为研究[J]. 金属热处理, 2019 (S1) : 630-633.
- [13] LIU N, LI Z, ZHANG G. Hot deformation behavior and microstructure evolution of spray formed GH738 superalloy[J]. Rare Metals, 2011, 30: 388-391.
- [14] 陈子帅. 热加工工艺对GH4738高温合金组织性能影响机理研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2021.
- [15] 曾维虎, 周晓明, 方波, 等. 固溶处理温度对GH738合金组织和性能的影响[J]. 铸造技术, 2019, 40 (5) : 500-503.
- [16] ZHANG H R, OJO O A. Cr-rich nanosize precipitates in a standard heat-treated Inconel 738 superalloy[J]. Philosophical Magazine, 2010, 90 (6) : 765-782.
- [17] 荣义, 成磊, 唐超, 等. 固溶冷却介质对优质GH738合金组织及力学性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28 (11) : 74-78.
- [18] 陈伟, 周江波, 岑凯强, 等. 固溶温度对GH4738晶粒组织与硬度的影响[J]. 特钢技术, 2023, 29 (1) : 22-24.

(收稿日期: 20241210)

(上接第102页)

- (WSE 2017) & 3rd International Workshop on Computer-Aided Welding Engineering (CAWE 2017) " proceedings [C]. Zurich, Switzerland: Trans. Tech. Publications Ltd., 2017.
- [14] H A A R M A N N K, V A I L L A N T J C, V A N D E N B E R G H E B, et al. The T91/P91 book[M]. Boulogne: Vallourec and Mannesmann Tubes, 2002.
- [15] 卢新生, 郭新芳, 万夫伟, 等. 不同加热方法对大径厚壁P91管道焊后热处理温度分布的影响[J]. 焊接技术, 2019, 32 (S1) : 46-48.
- [16] 张建林, 鲁立, 刘川, 等. A335P92钢厚壁管局部感应加热温度场的数值模拟[J]. 材料热处理学报, 2018, 39 (10) : 106-111.
- [17] 李报, 陈思杰, 刘毅辉. 焊后热处理对T91钢TLP连接接头组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42 (10) : 56-60.
- [18] SILWAL B, LI L, DECEUSTER A, et al. Effect of postweld heat treatment on the toughness of heat-affected zone for grade 91 steel[J]. Welding Journal, 2013, 92 (3) : 80-87.

(收稿日期: 20250513)