

· 形变与相变 ·

## 固溶温度对 GH4163 合金显微组织及拉伸性能的影响



李 晴

(大连理工大学宁波研究院, 宁波 315020)

**摘 要:**通过调控固溶温度,探究不同固溶温度下 GH4163 合金的显微组织、室温及高温拉伸性能的变化规律。原始态样品显微组织为变形组织,晶界不连续,碳化物呈偏聚条带状分布;当固溶温度为 1 000 °C 时,晶粒晶界清晰,晶粒发生不完全再结晶,碳化物条带状偏聚现象明显改善;当固溶温度为 1 050 °C 时,晶粒长大缓慢;当固溶温度为 1 080 °C 时,条带状分布的碳化物明显减少,晶粒开始迅速长大。GH4163 合金的室温屈服强度与晶粒尺寸满足霍尔佩奇关系  $\sigma_y = 413.1 + 1578.7d^{-1/2}$ ;随固溶温度升高,合金高温抗拉强度无明显降低;室温塑性及高温塑性均先增加后降低,当固溶温度为 1 080 °C 时,合金展现出最优异的伸长率。

**关键词:**GH4163 合金; 固溶温度; 显微组织; 拉伸性能

**DOI:**10. 20057/j. 1003-8620. 2023-00213 **中图分类号:**TG166. 7

## Effect of Solid Solution Temperature on Microstructure and Tensile Properties of GH4163 Alloy

Li Qing

(Ningbo Institute of Dalian University of Technology, Ningbo 315020, China)

**Abstract:** The microstructure of GH4163 alloy at different solid solution temperatures, the changing pattern of tensile properties at room and high temperature, are investigated by adjusting the solution temperature. The microstructure of the original state sample is deformed tissue, with discontinuous grain boundaries and biased polymer band distribution. The grain boundaries are clear, the grain has incomplete recrystallization, and the band polarization of carbide strip is significantly improved when the solid solution temperature is 1 000 °C. The grains grow slowly when the solution temperature is 1 050 °C. The carbides are significantly reduced, and the grains begin to grow rapidly when the solution temperature is 1 080 °C. The relationship between grain size and yield strength of GH4163 alloy at room temperature satisfies Hall-Petch, which is  $\sigma_y = 413.1 + 1578.7d^{-1/2}$ . The tensile strength of the alloy at high temperature changes little with the solution temperature increasing. Both room and high temperature plasticity increases first and then decreases. The alloy exhibits the most excellent elongation at the solid solution temperature of 1 080 °C.

**Key Words:** GH4163 Alloy; Solid Solution Temperature; Microstructure; Tensile Properties

GH4163(国外牌号 Nimonic 263)合金是一种析出强化型镍基高温合金,使用温度可达 850 °C,且在高温下具有优异的综合力学性能、良好的焊接性能及加工成形性,广泛应用于航空发动机中焊接结构件及承力件,例如燃烧室、涡轮壳体等。有研究者对 GH4163 化学成分进行了探究,王延庆等<sup>[1]</sup>发现碳、铝、钛的含量对 GH4163 合金的强度和塑性,硼和锆元素可以改善合金的持久性能。有研究者对 GH4163 合金的成形性进行了探究,卢顺等<sup>[2]</sup>通过优化 GH4163 合金锤锻模再制造工艺,提高了模具硬度及耐磨性,提升锻模服役寿命。有研究者对 GH4163 合金的组织及性能进行了探究,卢红云等<sup>[3]</sup>研究了 GH4163 合金大晶粒缺陷对焊缝性能的

影响,发现大晶粒缺陷削弱焊缝的高温塑性和室温疲劳性能,焊接速度提高可以改善焊缝大晶粒组织。袁超等<sup>[4]</sup>研究了 C263 合金组织对蠕变性能的影响,发现  $\gamma'$  相的尺寸对 GH4163 蠕变行为产生影响,晶粒组织影响合金的断口形貌。固溶处理的温度调控对 GH4163 合金微观组织的影响规律、及对室温拉伸和高温拉伸的影响机理,鲜有人报道。因此,对 GH4163 合金不同固溶温度下的显微组织特点,及其对室温及高温拉伸性能的影响进行分析探究,为工程化生产提供理论指导。

### 1 试验材料和方法

试验材料为 GH4163 合金锻造棒材,棒材规格为  $\phi 200$  mm。合金的主要元素含量(质量分数/%):

C 0.05, Al 0.60, Ti 2.10, (Al+Ti) 2.70, Cr 19.00, Mo 6.00, Co 19.00。对试验样品进行固溶+时效处理,固溶保温时间 2 h,空冷;时效(800±10)°C,保温 8 h,空冷。通过调控固溶温度,探究不同固溶下 GH4163 合金的显微组织、室温及高温拉伸性能的变化规律。具体热处理方案如下:

I : 固溶(1 000±10)°C+时效; II : 固溶(1 050±10)°C+时效; III : 固溶(1 080±10)°C+时效; IV : 固溶(1 100±10)°C+时效; V : 固溶(1 120±10)°C+时效; VI : 固溶(1 150±10)°C+时效; VII : 固溶(1 170±10)°C+时效; VIII : 固溶(1 190±10)°C+时效。

在棒材 R/2 处取显微组织及拉伸性能试样,使用金相显微镜对样品的显微组织进行观察与分析,利用 Image pro plus 软件对晶粒尺寸进行测量;利用扫描电子显微镜对拉伸断口形貌进行观察与分析;使用电子万能试验机对试样进行拉伸性能测试。

## 2 试验结果

### 2.1 显微组织

随固溶温度的升高,晶粒逐渐长大,晶粒尺寸(平均晶粒直径)变化如图 1 所示。

原始态晶粒形貌,晶界不连续,晶内存在大量孪晶组织,为明显的变形组织,晶内及晶界分布着

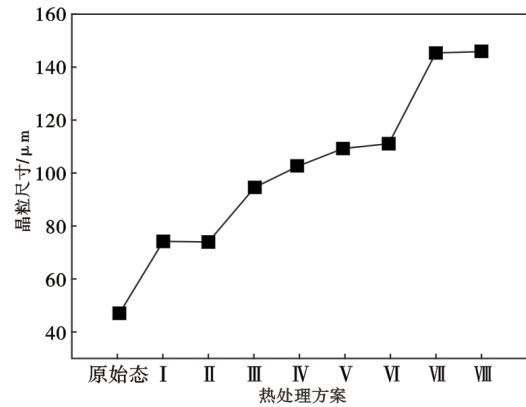


图 1 不同热处理后 GH4163 合金的晶粒尺寸

Fig. 1 Grain size of GH4163 alloy after different heat treatments

条带状的碳化物,如图 2(a)所示。对试样进行 1 000 °C 固溶处理后,晶粒晶界明显,晶内存在大量孪晶组织,说明晶粒发生回复再结晶,但再结晶不完全,残留孪晶组织。碳化物呈条带状分布但密度明显减少,如图 2(b)所示。固溶温度由 1 000 °C 升至 1 050 °C 时,晶粒尺寸变化不明显,孪晶数量减少,条带状碳化物减少,如图 2(c)所示。当固溶温度达到 1 080 °C 时,条带状分布的碳化物明显减少,晶粒开始迅速长大,如图 2(d)所示。

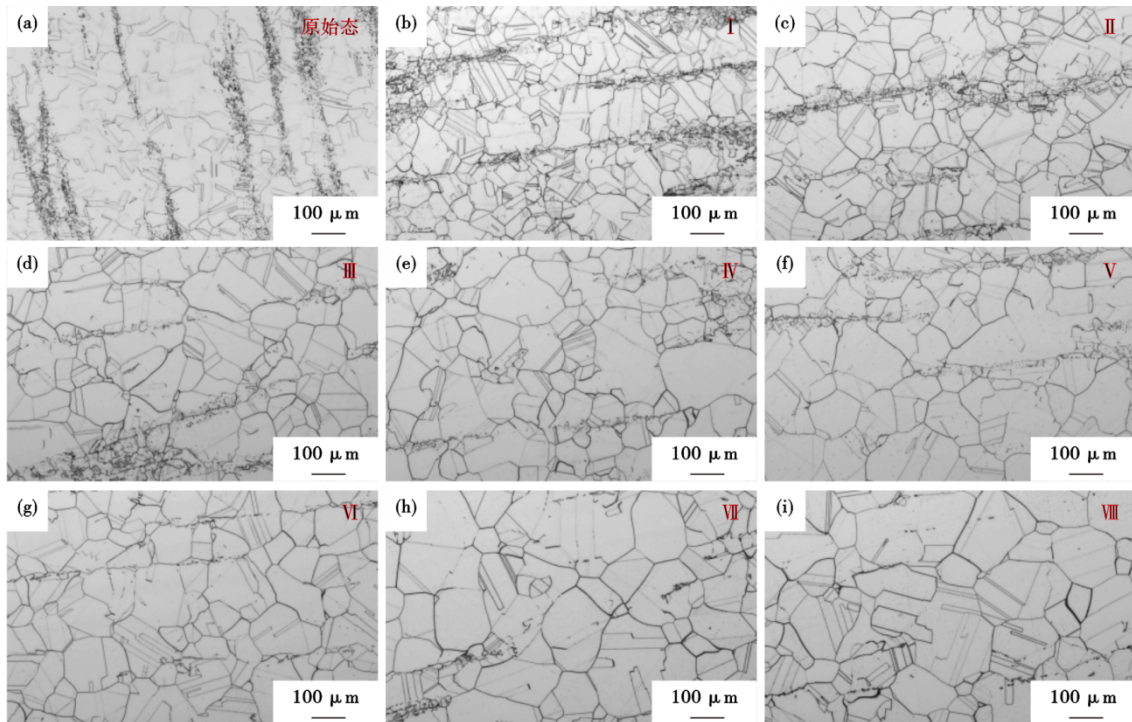


图 2 不同热处理方案 GH4163 合金显微组织:(a)原始态,(b) I ,(c) II ,(d) III ,(e) IV ,(f) V ,(g) VI ,(h) VII ,(i) VIII

Fig. 2 Microstructure of GH4163 alloy in different heat treatment systems: (a) AS, (b) I, (c) II, (d) III, (e) IV, (f) V, (g) VI, (h) VII, (i) VIII

## 2.2 拉伸性能

对不同热处理态的样品进行室温拉伸及780℃拉伸性能检测,探究固溶温度的变化对GH4163合金的室温拉伸及高温拉伸性能的影响。每种热处理方案处理后的GH4163合金分别取两个室温拉伸及高温拉伸样品,计算拉伸性能平均值。

不同热处理态GH4163合金室温拉伸性能,如图3所示,对于抗拉强度,相较于原始态,1000℃固溶+时效处理后,试样的抗拉强度提高,但随固溶温度的升高,抗拉强度逐渐降低;对于屈服强度,固溶+时效处理后且随固溶温度的升高,屈服强度逐渐降低,说明晶粒尺寸对GH4163合金室温屈服强度影响较大;对于塑性,随固溶温度的升高,伸长率呈先增加后降低的趋势,1080℃固溶+时效处理后,合金展现出最优异的伸长率。

不同热处理态GH4163合金780℃拉伸性能如图4所示,与室温抗拉强度展现的规律不同,高温抗拉强度随固溶温度的升高,强度无明显的降低;随固溶温度升高,伸长率呈先升高后降低趋势,1080℃固溶+时效处理后,合金展现出最优异的伸长率。

## 3 讨论分析

GH4163合金组织结构主要包括基体 $\gamma$ 相、强化相 $\gamma'$ 、碳化物3种析出相,碳化物以 $M_{23}C_6$ 与WC为主<sup>[5]</sup>。随固溶温度的升高,GH4163合金碳化物数量及分布形貌发生变化,如图2所示;当固溶温度为1000℃时,由于固溶温度低,碳化物回溶不明显,仍呈条带状分布,碳化物对晶界存在钉扎作用,抑制晶粒的长大,晶粒组织较细小,如图2(b)所示;当固溶温度为1050℃时,条带状分布的碳化物少量回溶于基体,晶粒开始缓慢长大,如图2(c)所示;固溶温度为1080℃时,条带状分布的碳化物进一步减少,碳化物对晶界钉扎作用减小,晶粒开始迅速长大,如图2(d)所示;当固溶温度为1100℃时,条带状分布碳化物大量回溶于基体,晶粒明显长大如图2(e)所示;当固溶温度达到1150℃时,碳化物基本全部溶于基体如图2(g)所示。

随固溶温度的升高,GH4163合金的室温抗拉及屈服强度逐渐降低,如图3(a)所示。晶界上的自由能要高于晶内,变形过程中,位错在已经滑移的

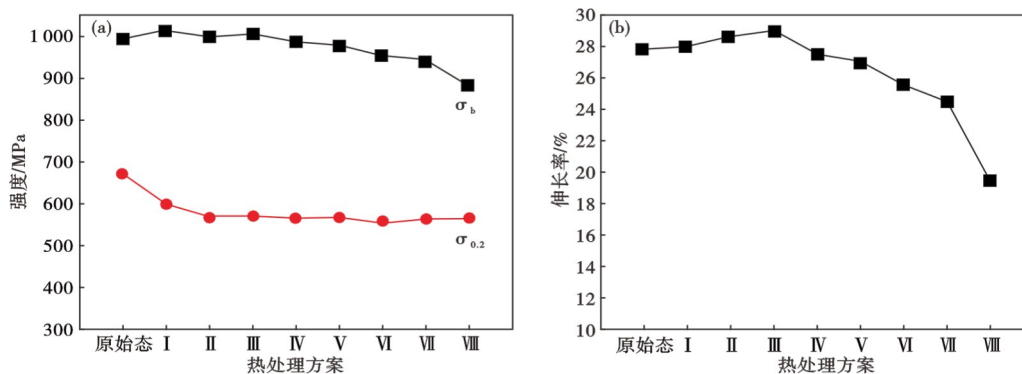


图3 GH4163合金室温拉伸性能:(a)强度,(b)伸长率

Fig. 3 Tensile properties of GH4163 alloy at room temperature : (a) Strength, (b) elongation

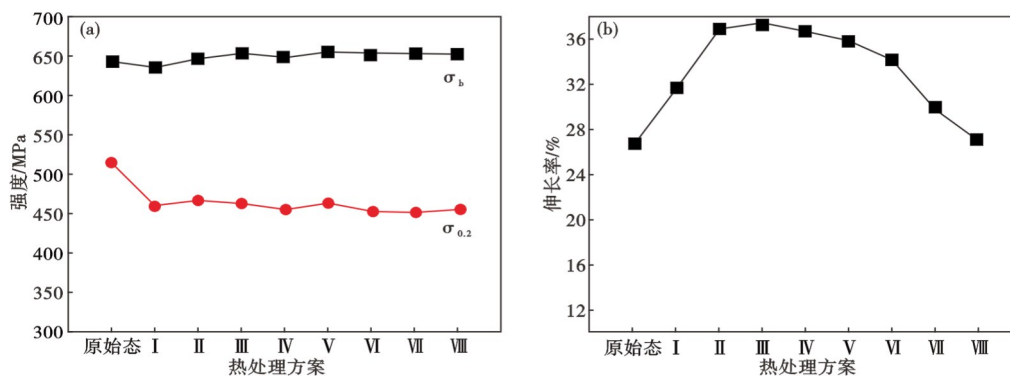


图4 GH4163合金780℃拉伸性能:(a)强度,(b)伸长率

Fig. 4 Tensile properties of GH4163 alloy at 780 °C : (a) Strength, (b) elongation

晶界处塞积,当塞积产生足够的应力集中时,相邻晶粒滑移系中的位错源才能被激发<sup>[6]</sup>,各个晶粒协同变形。晶粒尺寸越小,单位面积内的晶界数量越多,位错源激发所需的外加应力也更大,所以合金产生屈服现象需要的应力也越大<sup>[7]</sup>。

根据 Hall-Petch 关系<sup>[8]</sup>得式(1):

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中, $\sigma_y$ 代表屈服强度, $\sigma_0$ 代表由晶体结构及位错密度产生的摩擦应力, $k$ 代表晶界对强度的影响系数, $d$ 代表晶粒尺寸。

对 GH4163 合金室温屈服强度及晶粒尺寸进行拟合,拟合曲线如图 5 所示,得到屈服强度  $\sigma_y$  与晶粒尺寸  $d$  的关系式为:

$$\sigma_y = 413.1 + 1578.7d^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$\sigma_y$  与  $d^{1/2}$  基本呈线性关系,即 GH4163 合金晶粒尺寸与室温屈服强度满足霍尔佩奇关系。

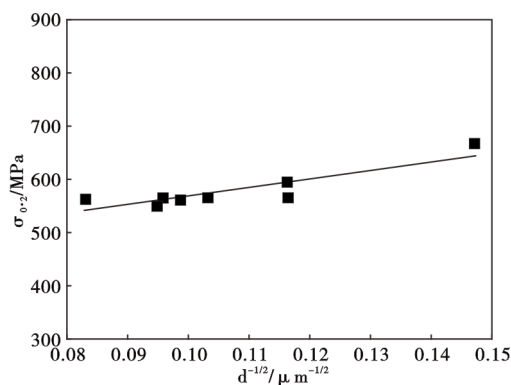


图 5 晶粒尺寸与屈服强度的关系

Fig. 5 The relationship between grain size and yield strength

对于 GH4163 合金室温伸长率,相较于锻态,随固溶温度的升高,伸长率呈先增加后降低的趋势。晶界和孪晶界有利于  $M_{23}C_6$  析出, $M_{23}C_6$  沿晶界呈膜状快速生长,减小晶界的结合力,在负载过程中,裂纹源易在晶界上的碳化物处萌生,并促进裂纹沿晶界扩展,从而削弱合金的塑性<sup>[9]</sup>;随固溶温度的升高,碳化物由条带分布转变为弥散分布,且数量逐渐减少,所以固溶处理后 GH4163 合金塑性有所提高;当固溶温度达到 1 080 °C 时,随固溶温度的升

高,晶粒开始迅速长大,合金伸长率逐渐降低,此时,晶界对塑性起主要影响作用。在变形过程中,随晶粒尺寸的减小参与变形的晶粒数量会增加,变形越均匀越不容易产生应力集中,材料抵抗塑性变形的能力越强<sup>[10-11]</sup>;此外晶粒越细小,晶界越多越曲折,对裂纹扩展的阻碍作用越大<sup>[12]</sup>,材料展现优异的塑韧性,晶粒尺寸增大会明显削弱材料的塑性。

对于 GH4163 合金 780 °C 高温拉伸性能,随固溶温度的升高,合金晶粒尺寸增大,晶界数量减少,抗拉强度及屈服强度无明显的降低,屈服强度与晶粒尺寸不满足霍尔佩奇关系。由于晶界上存在空位、位错等各种晶体缺陷,且晶界原子呈无序排列。在高温下,晶界变形量明显增加,晶界强度降低成为薄弱环节<sup>[13]</sup>,所以随固溶温度的升高,晶界数量减少,合金高温强度降低不明显。随固溶温度的升高,GH4163 合金伸长率呈先增加后降低的趋势,当固溶温度为 1 080 °C 时,合金展现出最佳伸长率。

#### 4 结论

(1) 固溶温度对 GH4163 合金的显微组织产生影响。GH4163 合金锻态组织晶界不连续,晶内存在大量孪晶组织,为明显的变形组织,碳化物呈条带状分布;当固溶温度为 1 000 °C 时,晶界清晰,碳化物变化不明显;当固溶温度为 1 050 °C 时,条带状碳化物减少,晶粒长大缓慢;当固溶温度为 1 080 °C 时,晶内与晶界碳化物明显溶解,条带状分布的碳化物明显减少,晶粒开始迅速长大;当固溶温度达到 1 150 °C 时,碳化物基本全部溶于基体。

(2) 固溶温度对 GH4163 合金的室温拉伸性能产生影响。随固溶温度的升高,GH4163 合金的室温抗拉及屈服强度逐渐降低,室温屈服强度与晶粒尺寸满足霍尔佩奇关系  $\sigma_y = 413.1 + 1578.7d^{-\frac{1}{2}}$ ;随固溶温度升高,伸长率呈先增加后降低的趋势,1 080 °C 固溶+时效处理后合金展现出最优异的伸长率。

(3) 固溶温度对 GH4163 合金的 780 °C 高温拉伸性能产生影响。随固溶温度的升高,合金抗拉强度及屈服强度无明显的降低;随固溶温度的升高,合金伸长率呈先增加后降低的趋势,当固溶温度为 1 080 °C 时,合金展现出最佳伸长率。

#### 参考文献

- [1] 王延庆,蒙肇斌,尹俊杰,等. GH163 合金化学成分的研究[J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(7): 143-148.
- [2] 卢顺,甘玉平,余盈燕,等. GH4163 锤锻模梯度增材再制造

研究[J]. 铝加工, 2022(5): 58-62.

- [3] 卢红云. C263 合金氩弧焊大晶粒缺陷的研究[J]. 航空工艺技术, 1990, (5): 2-5.

[4] 袁 超, 郭建亭, 关 逊, 等. 镍基高温合金 Nimonic C263 的蠕变曲线特征[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(S2): 305-308.

[5] 刘 艳. GH163 合金成分、组织与性能的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2001.

[6] 陈世雄, 彭必友, 潘仁元, 等. 室温微成形尺寸效应对材料韧性影响的研究现状[J]. 锻压技术, 2016, 41(11): 1-8.

[7] 房 娃. 超细晶 Mg-3Al-Zn 合金制备及塑性变形行为[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

[8] Wang Y, Wang Y T, Li R D, et al. Hall-Petch relationship in selective laser melting additively manufactured metals: Using grain or cell size[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(4): 1043-1057.

[9] 郑雷刚, 胡小强, 康秀红, 等. Cr-Mn-N 奥氏体耐热钢中  $M_{23}C_6$  型碳化物析出特征及其对韧塑性的影响[J]. 金属学报, 2013, 49(9): 1081-1088.

[10] 徐裕来. 超超临界汽轮机叶片用高温合金 Nimonic 80A 成分优化、微结构及其高温强化机理研究[D]. 上海: 上海大学, 2013.

[11] 李 晴, 李成龙, 钟裕国, 等. 固溶温度对 UNS N07718 合金组织及冲击性能的影响[J]. 特殊钢, 2023, 44(1): 78-82.

[12] 陈国胜. 晶界相对高温合金中高温塑性的影响[J]. 材料工程, 1994, 22(S1): 10-12.

[13] 刘锦溪. Hastelloy C-276 合金长期时效后的组织变化机理及对力学性能的影响规律研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.

关于认准《特殊钢》网址、防范假冒网站的声明

《特殊钢》期刊由中信泰富特钢集团股份有限公司主管、大冶特殊钢有限公司主办,由《特殊钢》编辑部负责运营,是全国特殊钢行业知名的综合性科技刊物(双月刊);《特殊钢》期刊于 1980 年创刊发行,国际标准刊号为 ISSN1003-8620,国内统一刊号为 CN42-1243/TF。《特殊钢》期刊的宗旨:“构建特钢共享平台,引领行业创新发展。”

编辑部发现网络上存在大量假冒《特殊钢》期刊的网页,为维护我刊良好声誉和广大作者、读者的利益,本编辑部郑重声明如下:

(一) www.specialsteeljournal.com 为《特殊钢》期刊的唯一网址,备案号为鄂 ICP 备 2022000839 号,请广大作者、读者使用本网址进行投稿、订阅、论文免费下载等操作。

(二) 除维普、万方、知网、超星为本社授权合作网站,具有数字化复制权、发行权、汇编权、翻译权、信息网络传播权、版式设计专有权,其余网站皆未经本编辑部授权,无权从事相关内容的刊登、收费阅读,承揽稿件,承接广告等行为,请广大作者、读者提高警惕,注意甄别,谨防受骗,由此造成的一切损失和后果,本编辑部不承担任何经济 and 法律责任;同时也鼓励向本编辑部进行举报相关侵权线索。

(三) 未经授权网站请于 2024 年 9 月 30 日前自行将与《特殊钢》期刊相关的内容撤除,逾期仍存在涉嫌侵害著作权、名誉权的单位或个人,本编辑部保留进一步发函、举报、诉讼等法律手段进行维权,必要时上报公安机关依法追究刑事责任。

《特殊钢》编辑部