

## 碳含量及热加工变形量对镍基合金 GH3625 组织和性能的影响

李烁<sup>1,2</sup> 闫森<sup>2,3</sup> 金奎文<sup>1</sup> 王勃兴<sup>2,3</sup> 陆凤君<sup>1</sup>

(1 山东工业职业学院, 淄博 256414; 2 中航上大高温合金材料股份有限公司, 邢台 054800; 3 河北省特种合金再生工程技术研究中心, 邢台 054800)

**摘要** 将含 C 量 0.031%、0.048% 和 0.055% 的 GH3625 合金由  $\Phi 480$  mm 铸锭锻造成  $\Phi 155$  mm, 轧制成  $\Phi 90$  mm 的棒材, 后续固溶处理为加热至 1 000 °C, 保温 1 h 后空冷; 将 C 含量 0.023%  $\Phi 480$  mm 铸锭分别锻造至  $\Phi 180$  mm、 $\Phi 155$  mm 和  $\Phi 135$  mm, 将  $\Phi 155$  mm 的锻棒在 450 横列轧机上分别轧至  $\Phi 90$  mm 和  $\Phi 80$  mm, 后续进行固溶处理为加热至 950 °C, 保温 1 h 后空冷。试验结果表明: 当 C 含量由 0.031% 增加至 0.055% 时, GH3625 合金的屈服强度和抗拉强度分别由 419 和 862 MPa 增加至 597 和 938 MPa, 合金的伸长率和断面收缩率变化不大; 随着变形量由 85.9% 增至 97.2%, 0.023% C GH3625 合金的晶粒度由 4 级变为 6 级, 力学性能得到提升。

**关键词** 高温合金 GH3625 C 含量 变形量 晶粒度

## Effect of Carbon Content and Hot-Working Deformation on Microstructure and Properties of Nickel Base Alloy GH3625

Li Shuo<sup>1,2</sup>, Yan Sen<sup>2,3</sup>, Jin Kuiwen<sup>1</sup>, Wang Boxing<sup>2,3</sup> and Lu Fengjun<sup>1</sup>

(1 Shandong Vocational College of Industry, Zibo 256414; 2 High Temperature Alloy Material of Aviation Industry of China, Xingtai 054800; 3 Hebei Engineering Research Center for Special Alloy Regeneration, Xingtai 054800)

**Abstract** GH3625 alloy with carbon content of 0.031%, 0.048% and 0.055% is forged from  $\Phi 480$  mm ingot to  $\Phi 155$  mm bar and rolled into  $\Phi 90$  mm bar and heating at 1 000 °C for 1 h, air cooling. The 0.023% C alloy is forged from  $\Phi 480$  mm to  $\Phi 180$  mm,  $\Phi 155$  mm and  $\Phi 135$  mm respectively, and the  $\Phi 155$  mm forging stock is rolled to  $\Phi 90$  mm and  $\Phi 80$  mm bar respectively by the 450 horizontal rolling mill. The following solid solution treatment is heated at 950 °C for 1 h, air cooling. The test results show that with increasing the C content from 0.031% to 0.055% the yield and tensile strength of GH3625 alloy increase respectively from 419 and 862 MPa to 597 and 938 MPa. But the elongation and reduction of section of alloy have little change. With the increase of deformation from 85.9% to 97.2%, the grain size rating of 0.023% C GH3625 alloy changes from 4 to 6, and the mechanical properties are improved.

**Material Index** Superalloy GH3625, Carbon Content, Deformation, Grain Size

GH3625 为镍基固溶强化高温合金, 其中主要元素 Mo 含量为 8% ~ 10%、Nb 含量为 3.15% ~ 4.15% 和 Cr 含量为 20% ~ 23%, 其中 Mo 元素和 Nb 元素为主要的固溶强化元素, 合金中高 Cr 含量使 GH3625 具备了优良的抗氧化性、耐腐蚀性能和耐盐雾气氛下的应力腐蚀性能<sup>[1-3]</sup>, 在海水、淡水和空气中, 极少出现腐蚀现象, 从低温到 980 °C 均具有良好的力学性能和疲劳性能, 该合金在航空发动机零部件、宇航结构件、海洋器械和核动力设备中得到广泛应用<sup>[4-6]</sup>。

高温合金 GH3625 使用形式有板材、棒材、管材、丝材和锻材等, 而材料的性能受到成分和变形量的影响很大, 因此研究 C 含量及变形量对 GH3625 组织和性能的影响显得十分重要<sup>[7-8]</sup>。

### 1 试验材料和方法

试验材料采用真空感应 + 保护气氛电渣炉重熔

(VIM + ESR) 双联工艺冶炼, 锭型为  $\Phi 480$  mm, 锭型重量为 2 t, 设计了 4 炉不同 C 含量的试验钢(材料 1-4), 其成分如表 1 所示, 除 C 元素外, 其他元素含量相近。将试样 1-3 先锻造至  $\Phi 155$  mm, 再轧制为  $\Phi 90$  mm 棒材, 试样 1-3 经固溶处理后(加热至 1 000 °C, 保温 1 h 后空冷)。将试样 4 锻造至  $\Phi 180$  mm、 $\Phi 155$  mm 和  $\Phi 135$  mm, 将  $\Phi 155$  mm 的锻棒在 450 横列轧机上分别轧至  $\Phi 90$  mm 和  $\Phi 80$  mm, 试样 4 经固溶处理(加热至 950 °C, 保温 1 h 后空冷)。

按照 GB/T 228-2010《金属材料拉伸试验方法》制备拉伸性能试样, 采用 UTM 5305 电子万能试验机测试拉伸性能。采用 HB-3000 布氏硬度计分别测试材料的布氏硬度, 并在 ZEISS Scope. A1 金相显微镜下观察其金相组织。

表 1 试验高温合金 GH3625 的化学成分/%  
Table 1 Chemical composition of tested superalloy GH3625/%

合金试样	C	Cr	Mo	Nb	S	P	Al	Ti	Co	Fe	Mn	Si
1	0.055	21.06	8.99	3.47	0.002	0.005	0.30	0.16	0.08	4.37	0.04	0.30
2	0.048	21.37	8.96	3.49	0.002	0.004	0.24	0.10	0.01	4.65	0.08	0.27
3	0.031	21.36	8.95	3.51	0.001	0.005	0.29	0.12	0.05	4.58	0.07	0.20
4	0.023	22.51	8.15	3.21	0.001	0.004	0.21	0.20	0.05	4.34	0.03	0.15
标准	≤0.10	20~23	8.0~10.0	3.15~4.15	≤0.015	≤0.015	≤0.40	≤0.40	≤1.0	≤5.0	≤0.50	≤0.50

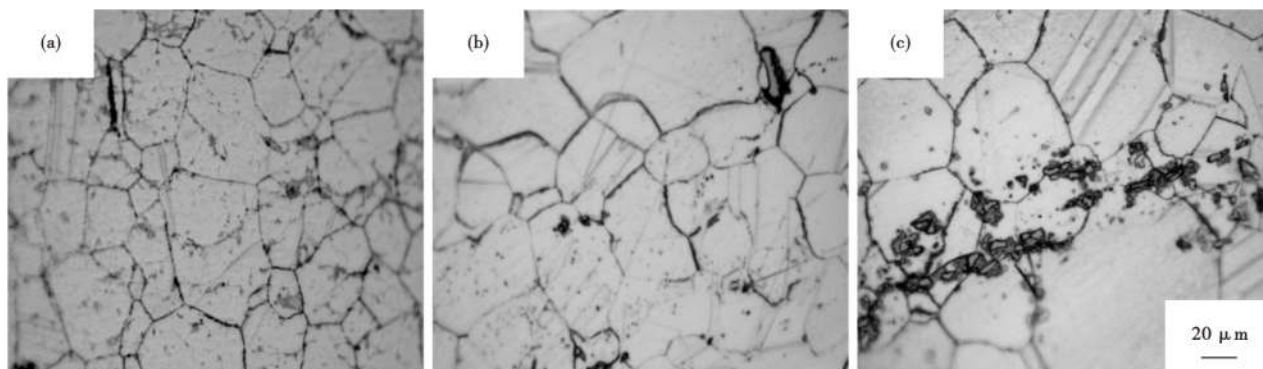


图 1 0.031% C (a), 0.048% C (b) 和 0.055% C (c) GH3625 合金 Φ90 mm 轧材 1 000 °C 1 h 空冷的组织形貌  
Fig. 1 Microstructure morphology of 0.031% C (a), 0.048% C (b) and 0.055% C (c) GH3625 alloy Φ90 mm rolled bar heating at 1 000 °C for 1 h, air cooling

## 2 试验结果及分析

### 2.1 C 含量对合金组织和性能的影响

在高温合金 GH3625 中, C 主要以碳化物的形式存在, 图 1 为 GH3625 不同 C 含量棒材的显微组织, 从图 1(a) C 含量为 0.031%, 图 1(b) C 含量为 0.048%, 图 1(c) C 含量为 0.055%。如图 1 所示, 在 GH3625 中, 随着 C 含量的增加, 碳化物的数量越来越多, 并且主要分布在晶界处, 一次碳化物主要是在液相凝固时候生成的一次相, 从图 1(c) 中可以发现经过锻造和轧制后被破碎为小块, 沿着变形方向呈带状分布, 主要分布于晶界不连续的碳化物可以

阻止沿晶界滑动和裂纹扩展, 提高材料的力学性能。

不同 C 含量的高温合金 GH3625 力学性能见图 2, 如图 2 所示 C 含量在 0.031% ~ 0.055%, 试样 1 (0.031% C)、试样 2 (0.048% C) 和试样 3 (0.055% C) 随着 C 含量的增加, 屈服强度和抗拉强度分别从 419 MPa 升高至 597 MPa 以及 862 MPa 增加至 938 MPa, 布氏硬度由 198 增加至 229, 伸长率和断面收缩率分别由 62% 降至 53.5% 以及 66% 降至 57%。力学性能的变化趋势为强度和硬度随着 C 含量的增加而升高, 伸长率和断面收缩率则随着 C 含量的增加而降低, 高温合金 GH3625 的基体为奥

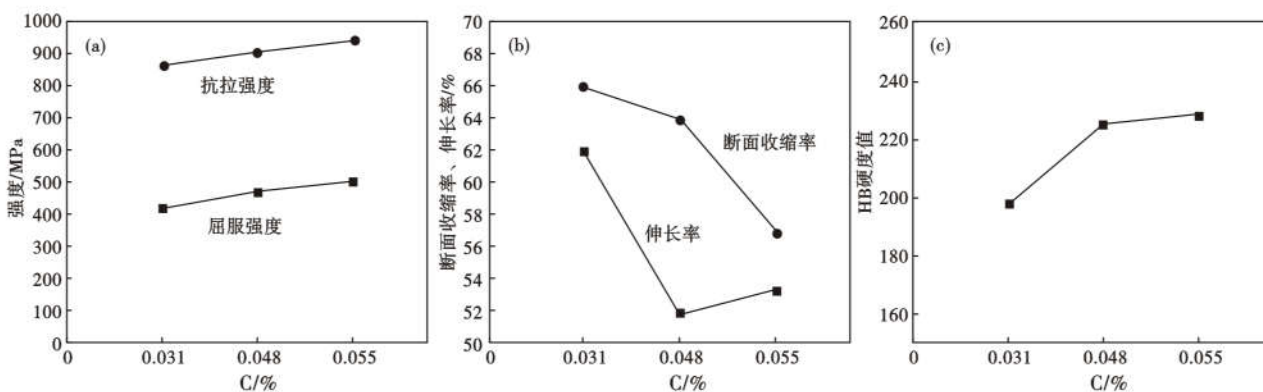


图 2 C 含量对 1 000 °C 1 h 空冷 Φ90 mm GH3625 合金棒材屈服和抗拉强度(a)伸长率和断面收缩率(b)及 HB 硬度值(c)的影响  
Fig. 2 Effect of C content on yield and tension strength (a), elongation and reduction of area (b), and HB hardness number (c) of Φ90 mm bar of GH3625 alloy treated at 1 000 °C for 1 h, air cooling

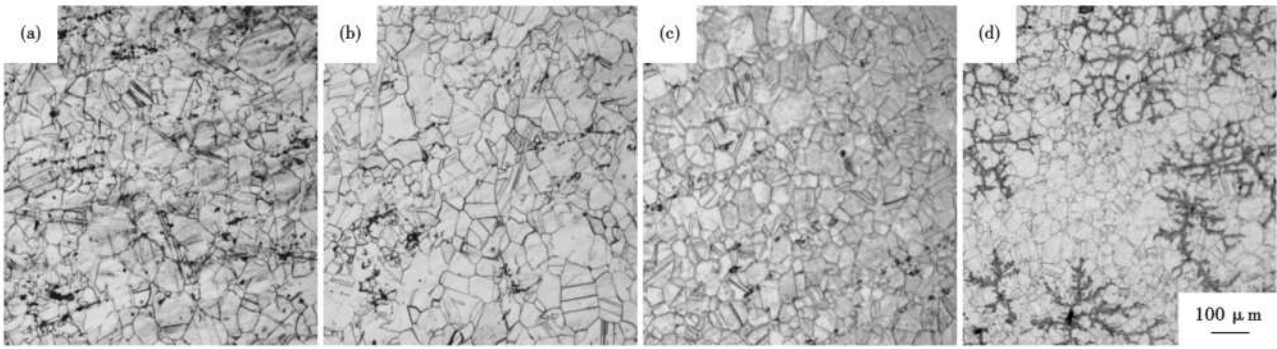


图3 热加工变形量 85.9% (a), 89.6% (b), 96.5% (c) 和 97.2% (d) 0.023% C GH3625 合金轧材 950 °C 1 h 空冷的组织形貌  
Fig.3 Microstructure morphology of 0.023% C GH3625 alloy rolled bar with deformation 85.9% (a), 89.6% (b), 96.5% (c) and 97.2% (d) and heated at 950 °C for 1 h, air cooling

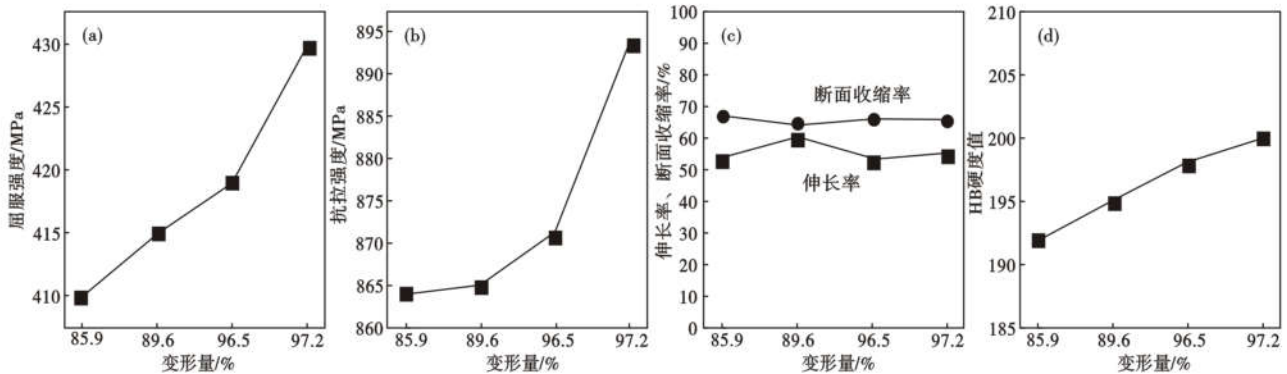


图4 热轧变形量对 0.023% C GH3625 合金轧材 950 °C 1 h 空冷的屈服(a)、抗拉(b)强度、伸长率和断面收缩率(c)及 HB 硬度值(d)的影响

Fig.4 Effect of hot-rolling deformation on yield (a) and tensile (b) strength, elongation and reduction of area (c), and HB hardness number (d) of 0.023% C GH3625 alloy rolled bar heated at 950 °C for 1 h, air cooling

氏体,随着 C 含量的增加,融入基体中的 C 元素造成更多的晶格畸变,更多的晶格畸变增大了位错运动的阻力,使滑移更加难以进行,基体本身的固溶强化得到增加,引起材料的强度和硬度上升,此外,与图 1 中碳化物的分布和数量有密切关系,随着二次碳化物沿晶界和晶内析出数量增加以及锻造过程中一次碳化物破碎为细小的析出物,析出强化作用明显,使强度和硬度增加,塑性降低。

## 2.2 变形量对材料组织和性能的影响

高温合金 GH3625 试样 4(0.023% C)通过锻造和轧制加工成不同尺寸的棒材,不同变形量的 GH3625 的组织照片如图 3 所示,图 3(a、b、c、d)的变形量分别为 85.9%、89.6%、96.5% 和 97.2%。从图 3 中可知,基体组织为典型的奥氏体组织,随着变形量的增加,晶粒越来越细,晶粒度分别为 4 级、4.5 级、5.5 级和 6 级。晶粒度的大小主要受热动态再结晶作用的影响,动态再结晶的驱动力为温度和畸变能,形核点为晶界、亚晶界和晶粒内部形变带,

热变形过程中温度一致,随着变形量的增加,畸变能和晶粒内部形变带增加,因而形核率增加,试样的晶粒越细。

高温合金 GH3625 试样 4 通过锻造和轧制分别加工至  $\Phi 180$  mm、 $\Phi 135$  mm、 $\Phi 90$  mm 和  $\Phi 80$  mm 不同规格的棒材,然后试样 4 经固溶处理(加热至 950 °C,保温 1 h 后空冷),不同变形量的高温合金 GH3625 力学性能见图 4,试样 1~试样 4 分别对应加工至  $\Phi 180$  mm、 $\Phi 135$  mm、 $\Phi 90$  mm 和  $\Phi 80$  mm 不同尺寸的棒材。从图 4 中可知,随着变形程度的增加,试样的屈服强度由 410 MPa 逐渐增加至 430 MPa,抗拉强度由 864 MPa 增加至 894 MPa,试样的 HB 硬度与强度变化趋势一致由 190 增加至 200,材料的塑性变化程度不大,伸长率由 53.5% 变为 55%,断面收缩率由 67% 变为 66%,不同变形量的试样力学性能的变化主要与材料的晶粒度有关,试样基体为奥氏体,大量的合金元素主要起到了固溶强化的作用和部分析出强化的作用,随着变形程

度的增加,试样的晶粒越来越细,造成塑性变化不大的情况下引起强度和硬度的增加。

### 3 结论

(1)在一定范围内,GH3625 随着 C 含量的增加,碳化物的数量越来越多,并且主要分布在晶界处,一次碳化物主要是在液相凝固时生成的一次相,并且在热加工过程中被破碎为尺寸更小的碳化物,沿着变形方向呈带状分布,破碎后的一次碳化物和晶内及晶界分布细小的二次碳化物可以阻止沿晶界滑动和裂纹扩展,提高材料的力学性能,其中屈服强度和抗拉强度最高可以达到 597 MPa 和 938 MPa,HB 布氏硬度值为 229,同时伸长率和断面收缩率分别为 53.5% 和 57%。

(2)GH3625 基体组织为典型的奥氏体组织,随着变形量的增加,畸变能和晶粒内部形变带增加,形核率增加获得动态再结晶晶粒越来越细。

(3)对于 GH3625,材料成分和变形温度等条件相同的情况下,不同变形量的材料力学性能的变化主要与材料的晶粒度有关,在 GH3625 中,大量的合金元素主要起到了固溶强化的作用和部分析出强化的作用,随着变形程度的增加,试样的晶粒越来越细,造成塑性变化不大的情况下引起强度和硬度的增加。

山东省职业教育技艺技能传承创新平台:《大气环境(VOCs)检测技艺技能传承创新平台》

### 参考文献

[1]郭建亭. 高温合金材料学[M]. 北京: 科学出版社,2008.

[2]张红斌. 国外 Inconel 625 合金的进展[J]. 特钢技术,2000,3(3): 69-80.

[3]Shaikh M A, Ahmad M, Shoaib K A, et al. Precipitation Hardening in Inconel625[J]. Metal Science Journal,2000,16(2):129-132.

[4]毛信孚,傅莉,谢伟,等. Inconel 625 合金摩擦焊接工艺研究[J]. 航空精密制造技术,2006,42(6):44-47.

[5]中国金属学会高温材料分会编. 中国高温合金手册[M]. 北京: 中国标准出版社. 2012.

[6]刘志超,周海涛,李庆波,等. GH625 合金的热变形行为[J]. 热加工工艺, 2010,39(12):31-35.

[7]蔡梅,刘建平,吴香菊,等. GH625 合金锻造工艺研究[J]. 沈阳航空航天大学学报,2011,28(4):52-59.

[8]郭岩,侯淑芳,周荣灿. IN625 合金 760 ℃时效析出相对冲击性能的影响[J]. 动力工程学报,2011(31): 75-78.

李烁(1983-),男,博士(2015年北京科技大学),2006年山东理工大学(本科)毕业,高温合金产品开发和技术研究。E-mail:157028836@qq.com

收稿日期:2021-06-20

## 下 期 要 目

影响连铸钢包自开率因素的分析 .....	康 铭等
六流中间包挡墙优化的数值模拟和工业实践 .....	李玉峰等
GCr15 轴承钢精炼渣对夹杂物去除行为的研究 .....	赵新凯等
水电站用 800 MPa 级低焊接裂纹敏感性高强度钢板 SX780CF 的开发 .....	罗应明等
白云鄂博矿钕钛资源冶炼 BT700L 钢合金化工艺研究 .....	董 方等
核电用超纯 316H 奥氏体不锈钢锻件的质量控制 .....	李 青等
低碳铝脱氧 20 钢水洁净度控制研究 .....	屠兴圻等
高品质自卸车厢体用 NM450 耐磨钢板的开发 .....	张卫攀等
GH2132 合金 2 t 电渣锭重熔工艺改进 .....	崔利民等
高品质 980 mm × 1 960 mm 电渣扁锭轧制 164 mm × 1 700/1 806 mm 12Cr2Mo1VR 钢板研发 .....	侯敬超等
回火温度对 20SiMnMo 高强度钢微观组织与力学性能的影响 .....	林文政等
轧制变形对 F-M 双相钢 0.05C-2.8Mn-4.2Ni-2Al-1.2Mo-1.9Cu 晶粒细化的影响 .....	马才女等