

热等静压对 DD3 单晶高温合金组织与性能的影响

Effects of HIP on Microstructures and Properties of DD3 Single Crystal Superalloys

韩 梅, 骆宇时

(北京航空材料研究院 先进高温结构材料国防科技重点实验室, 北京 100095)

HAN Mei, LUO Yurshi

(National Key Laboratory of Advanced High Temperature Structural Materials, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 选用两种热等静压工艺对 DD3 合金进行热等静压实验, 研究了热等静压对 DD3 单晶高温合金组织与性能的影响。观察、分析了热等静压及完全热处理后组织, 测试了经热等静压并热处理后合金的持久、蠕变及拉伸性能。结果表明: 热等静压工艺可部分或完全消除 DD3 合金的铸造疏松或缩孔, 但导致合金 γ' 强化相的回溶和不规则长大, 热处理后 γ' 相粗大且立方化和规则性差, 合金的中、高温持久和蠕变性能有所降低, 对 900℃ 拉伸性能无明显影响。

关键词: 热等静压; DD3; 单晶高温合金; 组织; 性能

中图分类号: TG132.3⁺2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2008)08-0040-04

Abstract: Two HIP (Hot Isostatic Press) processes were applied to investigate the effect on microstructures and properties of DD3 single crystal superalloys. The microstructures after HIP and HIP with standard heat treatment were observed with OP and SEM. Tensile strength, stress rupture and creep properties of DD3 after HIP and standard heat treatment were tested. The results showed that the HIP can eliminate casting microporosity but degraded the stress rupture and creep properties. The γ' precipitates in the matrix changed their shape from cuboidal to round one along with the changes in size due to the HIP. Which may have a detrimental effect on the stress rupture and creep properties.

Key words: HIP (Hot Isostatic Press); DD3; single crystal superalloy; microstructure; property

热等静压处理是消除铸件内部疏松孔洞等缺陷、提高铸件致密度的有效方法, 在国内外得到广泛应用^[1-3]。单晶高温合金由于铸造凝固过程特别, 相对于其他铸造合金, 铸造缺陷较少, 故长期以来, 对单晶高温合金的热等静压研究甚少。但对单晶合金的组织 and 性能研究表明, 单晶高温合金在凝固过程中在枝晶间形成一定量的疏松和缩孔, 这些疏松和缩孔是合金持久蠕变及疲劳失效的主要裂纹形成源。

为减少或消除单晶高温合金中的铸造缺陷, 进一步提高单晶高温合金的综合性能, 国外已开展了将热等静压的技术应用于单晶高温合金的研究。在对第一代、第二代单晶高温合金中的热等静压应用研究过程中, 发现热等静压可有效消除单晶合金枝晶间的疏松和缩孔等缺陷, 且显著提高合金疲劳性能^[4-6]。但目前将热等静压应用于单晶高温合金零件实际生产的报道较少。在国内, 热等静压技术虽广泛应用, 但热等静

压技术在单晶高温合金中的应用研究尚未开展。DD3 合金是我国第一个第一代单晶高温合金^[7], 已应用于某先进航空发动机。

为进一步挖掘该合金的力学性能, 跟踪国外先进单晶高温合金及叶片制造工艺技术, 本工作借鉴国内外热等静压工艺方法, 制定热等静压工艺方案, 研究了热等静压对 DD3 单晶合金组织与性能的影响。

1 实验

实验用合金为 DD3 合金, 成分和性能满足要求。采用螺旋选晶法在定向凝固炉上进行小炉熔炼及定向凝固, 制得[001]取向 $\phi 15\text{mm}$ 试棒。在热等静压设备上热等静压。

热等静压工艺: HIP-I: 1180℃/160MPa, 4h 后随炉冷却; HIP-II: 1200℃/160MPa, 4h 后随炉冷却。

对完成热等静压的试棒,按 DD3 合金标准热处理工艺进行热处理。然后加工成标准力学性能用试样。在力学性能试样机上测试 1000℃/195MPa 和 760℃/785MPa 持久、900℃拉伸及 982℃/206.84MPa 蠕变性能。

在热等静压后的试棒上沿[001]方向切取小试样,试样经常规金相技术处理,利用徕卡 DMR HCS 光学显微镜观察合金疏松和缩孔等铸造缺陷消除情况。在 S-3500N 扫描电镜下观察合金热等静压及完全热处理后的枝晶形貌和 γ' 相形态。

2 结果与分析

2.1 铸造缺陷

图 1 是热等静压前后试棒铸造缺陷分布情况。热

等静压前,试棒中存在一定量大小不一的疏松和缩孔(示于图 1a);经 HIP-I:1180℃/160MPa,4h 热等静压后,疏松和缩孔明显减少,仍存在较大尺寸的缩孔(示于图 1b);经 HIP-II:1200℃/160MPa,4h 热等静压后,疏松和缩孔基本完全消除,存在极少量的大尺寸缩孔(示于图 1c)。

2.2 组织

图 2 是热等静压前后 DD3 合金枝晶干枝晶间过渡区域显微组织。图 3 是热等静压前后 DD3 合金枝晶间显微组织。从图 3 可知,两种热等静压工艺处理后,枝晶间的 γ' 都发生了一定程度的回溶和长大, γ' 数量减少,形状变得很不规则。相对于 HIP-I, HIP-II 处理后的 γ' 更大程度地回溶和长大,形状更不规则(示于图 3c)。可见,热等静压改变了 γ' 强化相的形态

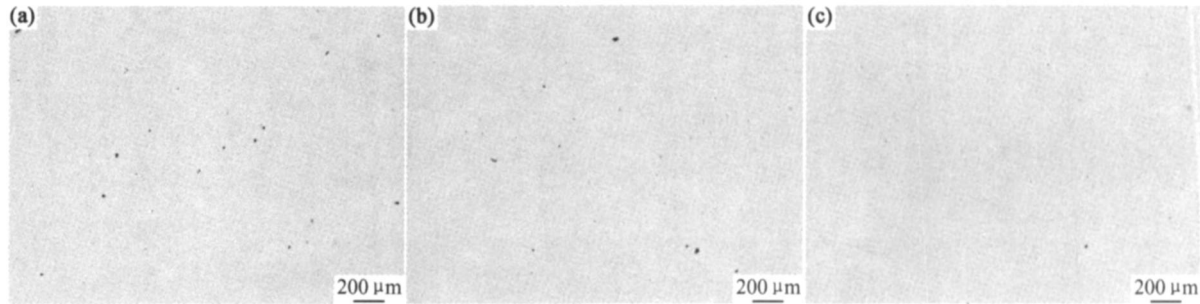


图 1 DD3 合金中的疏松和缩孔 (a)未热等静压;(b)热等静压工艺 I;(c)热等静压工艺 II
Fig. 1 Casting porosity and micropores of DD3
(a) No HIP;(b) HIP-I;(c) HIP-II

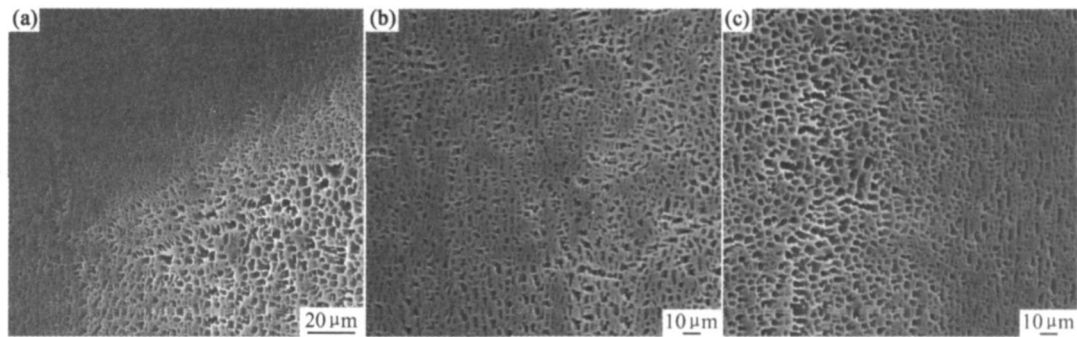


图 2 DD3 合金枝晶干枝晶间过渡区域显微组织 (a)铸态;(b)热等静压工艺 I;(c)热等静压工艺 II
Fig. 2 Microstructures at transitional region of dendrite and inter-dendrite of DD3
(a) as-cast;(b) HIP-I;(c) HIP-II

和数量,热等静压温度越高,对 γ' 强化相的影响越大。

图 4、5 分别是不同工艺处理后合金枝晶干、枝晶间显微组织。相对于未进行热等静压直接完全热处理的试样,热等静压+完全热处理后的合金枝晶干、枝晶

间的 γ' 粗大,形状不规则,立方化程度差。两种不同的 HIP+ 完全热处理后, HIP-II+ 完全热处理后的 γ' 尺寸更大,形状更不规则(示于图 4c)。可见,热等静压对热处理后 γ' 强化相的形态和数量有明显影响。热等静压温度越高,影响越显著。

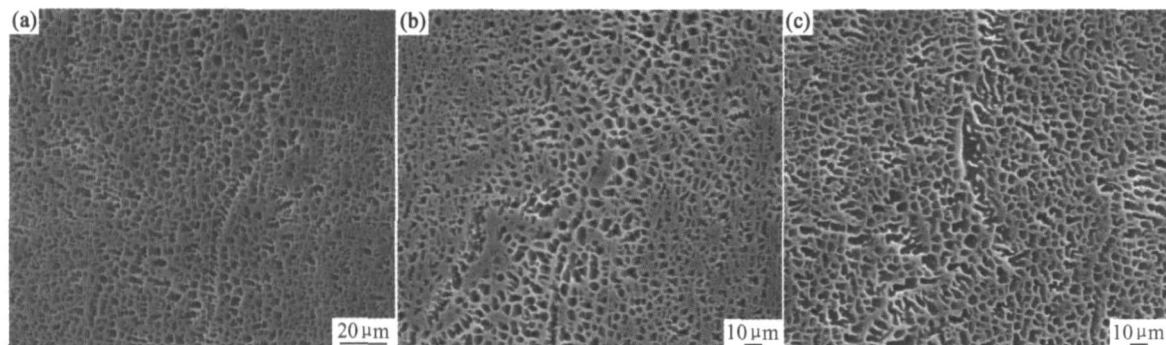


图 3 DD3 合金枝晶间显微组织 (a)铸态;(b)热等静压工艺 I;(c)热等静压工艺 II

Fig. 3 Microstructures at inter-dendrite of DD3 (a) as-cast;(b) HIP-I;(c) HIP-II

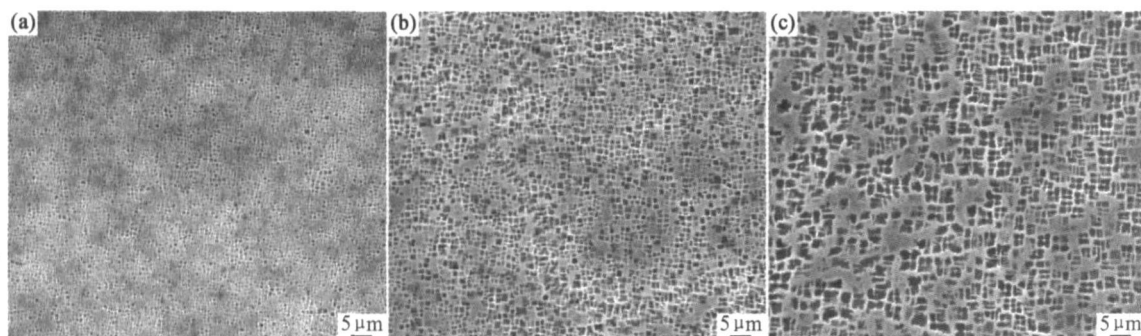


图 4 不同工艺处理后 DD3 合金枝晶干显微组织

(a)热处理;(b)热等静压工艺 I + 热处理;(c)热等静压工艺 II + 热处理

Fig. 4 Microstructures at dendrite of DD3

(a) HT;(b) HIP-I + HT;(c) HIP-II + HT

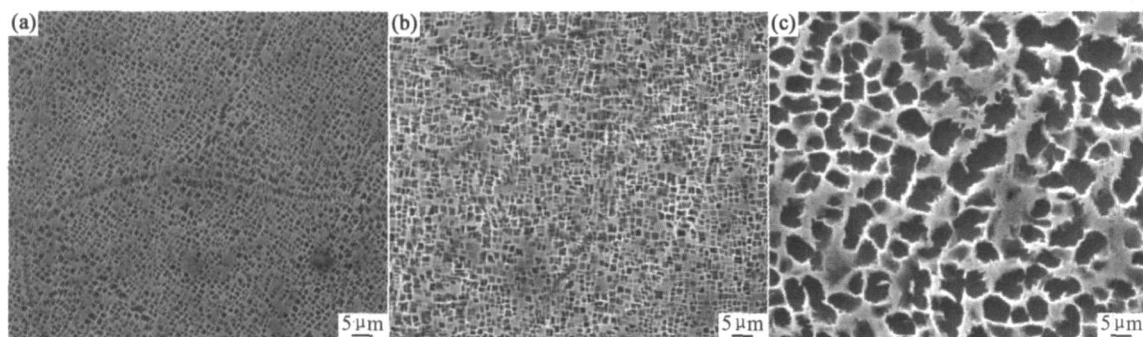


图 5 不同工艺处理后 DD3 合金枝晶间显微组织

(a)热处理;(b)热等静压工艺 I + 热处理;(c)热等静压工艺 II + 热处理

Fig. 5 Microstructures at inter-dendrite of DD3

(a) HT;(b) HIP-I + HT;(c) HIP-II + HT

2.3 力学性能

图 6 是不同工艺处理后合金力学性能比较图。两种热等静压工艺都明显降低了合金 1000℃/195MPa, 760℃/785MPa 的持久性能(示于图 6a); 热等静压后合金 900℃拉伸性能变化不大(示于图 6b); 实验的两种热等静压工艺明显降低了合金在 982℃/206 84MPa 蠕变性能(示于图 6c)。从性能的对比可

见, 热等静压明显降低了合金持久及蠕变性能, 而对 900℃的拉伸性能无明显影响。

3 讨论

从实验结果可以看出, 热等静压可有效减少或消除 DD3 单晶高温合金铸造过程中的疏松和缩孔, 这是

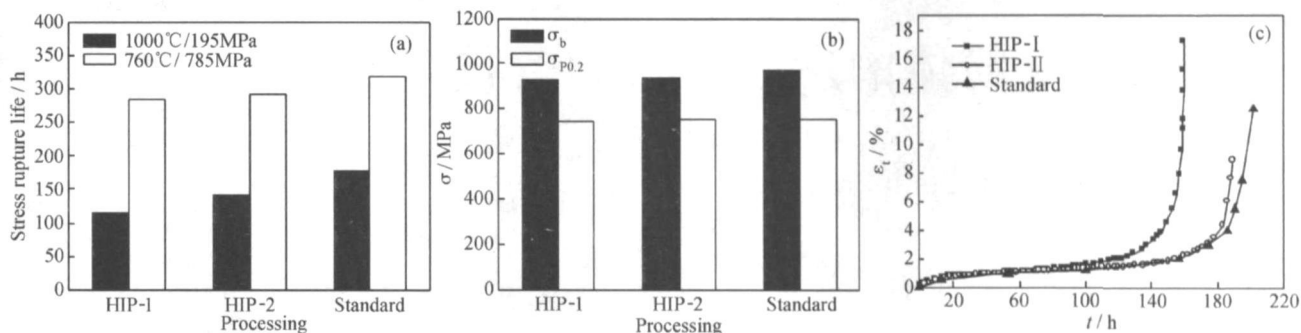


图6 不同工艺条件下 DD3 合金的性能

(a) 1000℃/195MPa, 760℃/785MPa 持久寿命; (b) 900℃拉伸强度; (c) 982℃/206.84MPa 蠕变曲线

Fig 6 Properties of DD3 after different processing (a) stress rupture at 1000℃/195MPa and 760℃/785MPa;

(b) tensile strength at 900℃; (c) creep curves at 982℃/206.84MPa

进行热等静压处理带来的益处。但在经过热等静压处理后, γ' 相回溶并长大, 经过 DD3 合金标准的热处理后, γ' 相粗大, 立方化程度差, 排列不整齐, 这种组织形态是造成合金高温持久、高温蠕变性能降低的根本原因。要想得到良好的性能, 就必须针对热等静压处理后的组织形态, 重新研究适合的热处理工艺。只有热等静压和热处理工艺相匹配, 才能提高 DD3 合金的性能。

4 结论

(1) 热等静压可有效减少或消除 DD3 单晶高温合金铸造过程中的疏松和缩孔。热等静压工艺 I 部分消除 DD3 合金中的疏松和缩孔等铸造缺陷, 工艺 II 基本可消除疏松和缩孔等铸造缺陷。

(2) 铸态 DD3 单晶合金经热等静压工艺处理后, γ' 相回溶并长大, 完全热处理后 γ' 相粗大, 立方化程度差且排列不整齐。工艺 II 热等静压后 γ' 相回溶, 长大程度更为严重, 完全热处理后, γ' 相也更为粗大, 立方化和排列整齐程度更差。

(3) 经两种热等静压工艺处理后, DD3 合金高温持久, 高温蠕变性能有所降低。工艺 I 热等静压后合金高温持久, 蠕变性能下降更为明显。

(4) 两种热等静压工艺对 DD3 单晶合金高温拉伸性能无明显影响。

参考文献

[1] 汤鑫, 于保正, 刘发信. K418B 合金控晶铸造整体叶轮热等静压

和热处理工艺研究[J]. 材料工程, 2003, (9): 41-47.

- [2] KIM M T, CHANG S Y, WON J B. Effect of HIP process on the microstructural evolution of a nickel-based superalloy [J]. Mater Sci Eng, 2006, A441: 126-134.
- [3] APPA RAO G, KUMAR M, SRINIVAS M, et al. Effect of solution treatment temperature on the microstructure and tensile properties of P/M (HIP) processed superalloy Inconel 718 [J]. Journal of Material Science and Technology, 2003, (19): 1-8.
- [4] FRITZEMEIER L G. The influence high thermal gradient casting, hot isostatic pressing and alternate heat treatment on the structure and properties of a single crystal nickel base superalloy [A]. REICHMAN S, DUHL D N, MAURER G, et al. Superalloys 1988 [C]. Pennsylvania: TMS, 1988. 265-274.
- [5] FOSTER S M, NIELSEN T A, NAGY P. Enhanced rupture properties in advanced single crystal alloys [A]. REICHMAN S, DUHL D N, MAURER G, et al. Superalloys 1988 [C]. Pennsylvania: TMS, 1988. 245-254.
- [6] CHANG J C, YUN Y H, CHOI C, et al. Development of microstructure and mechanical properties of a Ni base single crystal superalloy by hot-isostatic pressing [J]. J Mater Eng Performance, 2003, (12): 420-425.
- [7] 吴仲棠, 陈德厚, 钟振刚. DD3 单晶涡轮叶片合金[J]. 航空材料, 1987, (5): 1-5.

收稿日期: 2008-03-13; 修订日期: 2008-06-14

作者简介: 韩梅(1973—), 女, 工程师, 研究方向为单晶高温合金, 联系地址: 北京 81 信箱 1 分箱(100095)。E-mail: hanmei@bmw.biam.cn