

凝固速率对 DZ22 合金力学性能和组织的影响^①

西北工业大学 刘忠元 李建国 史正兴 傅恒志
北京航空材料研究所 余力 陈荣章 王罗宝

本文采用 ZMLMC 超高梯度定向凝固法 (ZMLMC 法), 研究了两种凝固速率下 DZ22 合金的高温力学性能和组织。结果表明, 较高凝固速率下大幅度地提高了合金的高温力学性能, 980℃, 220MPa 条件下的高温持久寿命由 71h 50min 提高到 168h 5min; 一次、二次枝晶臂间距 λ_1 和 λ_2 分别由 105 μm 和 32.7 μm 左右减小到 68 μm 和 16 μm 左右; 元素的枝晶偏析得到抑制; 合金显微组织的组成相 γ' 、 $(\gamma-\gamma')$ 共晶、MC 型碳化物的形态、大小和分布均发生了明显的变化。

关键词: 凝固速率, DZ22 合金, 高温力学性能, 显微组织, 枝晶特性

The Effect of Solidification Rate on Mechanical Properties and Microstructure of Directionally Solidified Superalloy DZ22

Liu Zhongyuan Li Jianguo Shi Zhengxing Fu Hengzhi

(Northwestern Polytechnical University)

She Li Chen Rongzhang Wang Luobao

(Beijing Institute of Aeronautical Materials)

This paper deals with mechanical properties and microstructure of directionally solidified superalloy DZ22 at two solidification rates with zone melting and liquid metal cooling (ZMLMC) directional solidification process. Experimental results show that the stress-rupture life of DZ22 at 980℃ and 220MPa was increased from 71 hours and 50 minutes to 168 hours and 5 minutes at relatively high solidification rate. The primary and secondary dendritic arm spacing λ_1 and λ_2 of DZ22 was decreased from 105 μm and 32.7 μm to 68 μm and 16 μm respectively. The microsegregation of elements was decreased. The morphology, size and distribution of γ' , eutectic $(\gamma-\gamma')$ and MC was changed obviously.

Keywords: solidification rate, superalloy DZ22, mechanical properties at high temperature, microstructure, dendritic characteristic

1 前言

目前先进航空发动机的涡轮叶片和导向叶片的生产通常采用普通定向凝固技术 (HRS 法), 由于其凝固过程中的冷却速率小, 导致铸件的枝晶组织粗大, 侧向分枝发达, 枝晶偏析严重, 析出相粗大, 因而限制了合金高温力学性能的提高。采用区域熔化和液态金属冷却相结合的超高梯度定向凝固技术 (ZMLMC 法), 由于冷却速率明显提高, 导致铸件组织细化, 大幅度提高了合

金的力学性能^[1,2]。本文采用 ZMLMC 法研究了两种凝固速率对具有较高的中、高温性能的定向凝固涡轮叶片合金 DZ22 的力学性能和组织的影响。

2 试验条件

试验采用了目前先进实验室用的区域熔化和液态金属冷却相结合的超高梯度定向凝固法 (ZMLMC 法), 固液界面前沿液相中的温度梯度 (G_L) 约为 1300K·cm⁻¹, 抽拉速率为 3.0~10×10⁴ $\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。试验合金选用先进航空发动机广泛应用的具有较高的中、高温力学性

^① 国家自然科学基金重大资助项目

能的定向凝固涡轮叶片合金 DZ22。在超高梯度定向凝固装置上用两种凝固速率制备成直径为 7mm、长度为 90mm 的试样。

在 MΠ-3Г 型持久试验机上测定两种凝固速率 DZ22 合金相同热处理状态下 (1210℃, 2h, 空冷+870℃, 32h, 空冷) 的高温持久力学性能, 试验条件为 980℃, 220MPa, 试样尺寸为 $\phi 3\text{mm} \times 15\text{mm} \times 40\text{mm}$ 。

采用常规的金相、扫描电镜、电子探针等方法, 分析合金的宏观、微观组织。

3 试验结果与讨论

3.1 高温持久力学性能

表 1 列出了两种凝固速率 DZ22 合金相同热处理条件下 (1210℃, 2h, 空冷+870℃, 32h, 空冷) 的高温持久力学性能, 试验条件为 980℃, 220MPa。可以看出, 较高凝固速率下大幅度提高了合金的高温持久力学性能。平均而言, 在保持较高水平的断面收缩率情况下, 高温持久寿命提高到 168h5min, 增幅达 136%, 最高可达 170%。高温持久性能的极大提高可归因于较高凝固速率使定向凝固合金获得了超细柱状枝晶组织和良好

的微观组织的形态、大小和分布。

表 1 两种凝固速率 DZ22 合金的高温持久性能

| 凝固参数 | | | 试样号 | 高温持久性能 980℃, 220MPa | |
|--|--|---|-----|------------------------|---------------|
| R ($\mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | G ($\text{K} \cdot \text{cm}^{-1}$) | \dot{T} ($\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$) | | τ (h) | ψ (%) |
| 60 | 1310 | 7.2 | 11 | 66 : 35 | 36.64 |
| | | | 12 | 77 : 05 | 46.76 |
| 220 | 1140 | 25.1 | 31 | 192 : 05 | 51.49 |
| | | | 32 | 144 : 05 | 50.05 |

3.2 枝晶特性

图 1 和表 2 分别示出了两种凝固速率的枝晶组织和枝晶特性。可以看出, 较高凝固速率下柱状枝晶组织显著细化, 一次、二次枝晶臂间距 λ_1 和 λ_2 分别减小到 68 μm 和 16 μm , 为较低凝固速率的 64% 和 48%。元素的枝晶偏析程度明显减弱, 尤其是偏析程度较大的元素的变化更加明显, 例加, 正偏析元素 Nb 的偏析比由 2.00 下降到 1.61, 而负偏析元素 W 的偏析比由 0.75 上升到 0.83。这表明元素在枝晶轴和枝晶间的分布更加

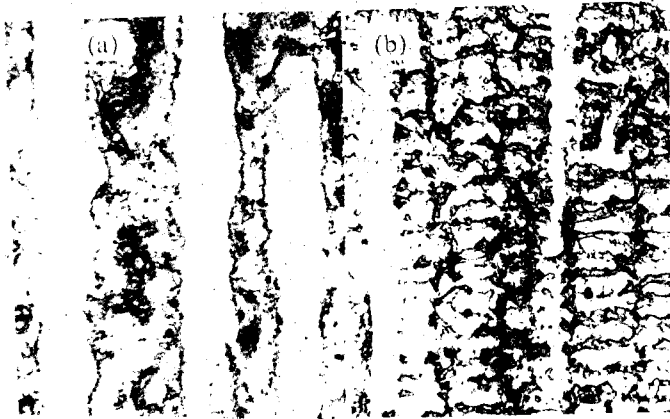


图 1 两种凝固速率下的枝晶组织 $\times 200$
(a) $R = 60 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (b) $R = 220 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

表 2 两种凝固速率下的枝晶特性

| 凝固速率, R ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 枝晶臂间距, μm | | 元素偏析比, SR | | | | | | |
|---|----------------------|-------------|-----------|------|------|------|------|------|--|
| | λ_1 | λ_2 | Nb | Ti | Al | Cr | Co | W | |
| 60 | 105 | 32.7 | 2.00 | 1.50 | 1.19 | 1.10 | 0.80 | 0.75 | |
| 220 | 68 | 16 | 1.61 | 1.27 | 1.10 | 1.08 | 0.92 | 0.83 | |

均匀。枝晶特性的上述变化, 无疑将对定向凝固合金的高温力学性能产生有益的影响。

对材料凝固界面形态和微观组织变化的研究结果

表明, 凝固组织的变化与 I. S. Miroshnichenko 的设想^[3]相一致 (图 2)。较低凝固速率下, 由于冷却速率小 ($\dot{T} = 7.2 \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$), 导致柱晶组织粗大, 侧向分枝发达, 微观偏析严重, 析出相粗大, 因此限制了合金高温力学性能的提高。凝固速率的增加, 冷却速率随之增大 ($\dot{T} = 25.1 \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$), 柱状凝固组织更加细化, 如图 2 中的 f, 一次枝晶臂间距获得细化, 侧向分枝萎缩, 枝晶偏析得到抑制, 强化相的形态、大小和分布更加合理。所有这一切, 将对充分挖掘材料在力学性能方面的潜力具有十分

重要的意义。

3.3 显微组织

两种凝固速率下 DZ22 合金的显微组织如图 3 所示。可以看出, 合金各组成相的形态、大小和分布均发生了明显的变化。

(1) γ'

两种凝固速率下的 γ' 的形态、大小具有明显的差

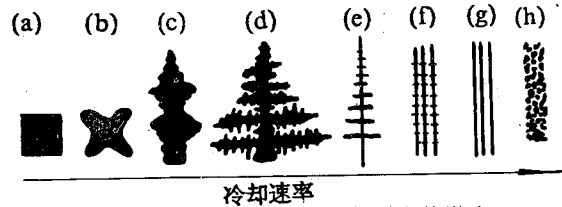


图 2 冷却速率对凝固组织形态的影响

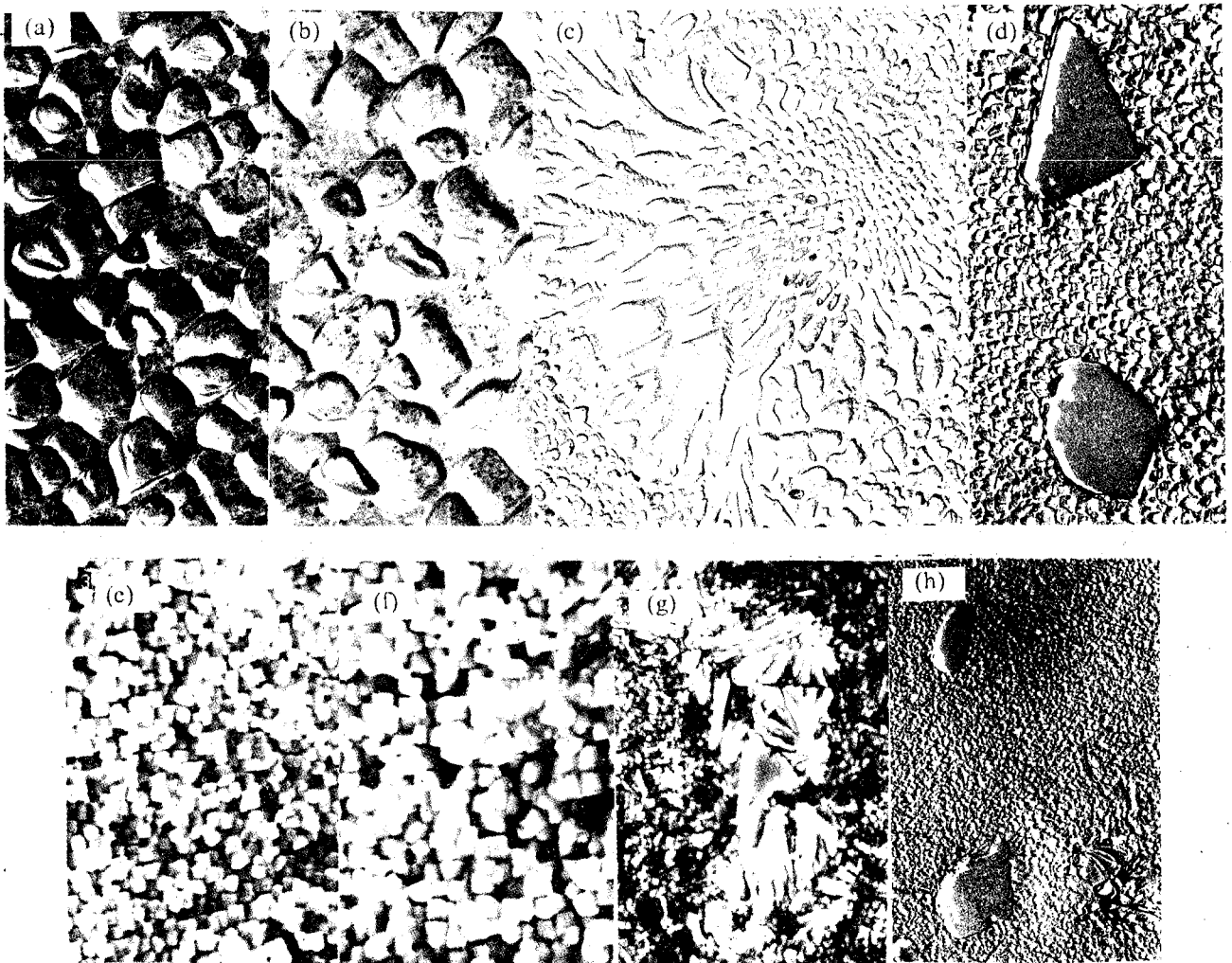


图 3 两种凝固速率下的 DZ22 合金的显微组织

$R=60\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$: (a) 枝晶轴的 γ' , $\times 30000$; (b) 枝晶间的 γ' , $\times 30000$; (c) $(\gamma-\gamma')$ 共晶, $\times 6000$;
 $R=220\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$: (d) MC, $\times 6000$; (e) 枝晶轴的 γ' , $\times 20000$; (f) 枝晶间的 γ' , $\times 20000$;
 (g) $(\gamma-\gamma')$ 共晶, $\times 6000$; (h) MC, $\times 6000$

别。在较低凝固速率下, γ' 相为粗大的立方形, 枝晶轴和枝晶间 γ' 相的大小相差较大, 且枝晶间的 γ' 相很不均匀, γ' 相的尺度, 枝晶间最大为 $0.730\mu\text{m}$, 最小为 $0.167\mu\text{m}$; 而枝晶轴最大为 $0.400\mu\text{m}$, 最小为 $0.100\mu\text{m}$ 。在较高凝固速率下, γ' 相的尺度明显减小, 其

形态仍为立方形, 枝晶轴 γ' 的尺度平均为 $0.10\mu\text{m}$, 枝晶间约为 $0.15\mu\text{m}$ 。就 γ' 分布的均匀度而言, 两种凝固速率下是相似的, 即枝晶轴 γ' 的均匀度较枝晶间的主要均匀得多。 γ' 是 DZ22 合金的主要强化相。指出, 蠕变断裂强度是由细小 γ' ($<0.5\mu\text{m}$) 量控制的。显然,

对于较高凝固速率下, 由于冷却速率较大 γ' 的形核率增加^[4], 导致了 γ' 的细化, 枝晶轴和枝晶间的 γ' 均小于 $0.5\mu\text{m}$, 使细小的 γ' 量增加, 将会对合金高温力学性能作出贡献。

(2) $(\gamma-\gamma')$ 共晶和 MC 型碳化物

图 3c、g 示出了两种凝固速率下 DZ22 合金 $(\gamma-\gamma')$ 共晶的形态和大小。可以看出, 较低凝固速率下 $(\gamma-\gamma')$ 共晶的尺度粗大, 形态为非常发达的菊花状, 边缘呈粗大的不规则的长条块状, 中心则呈非常细小的立方形; 较高凝固速率下的 $(\gamma-\gamma')$ 共晶的尺度明显减小, 形态呈小扇形状和长条块状。两种凝固速率下 DZ22 合金的 MC 型碳化物的大小也有些减小, 如图 3d、h 所示。

根据合金的凝固顺序, $(\gamma-\gamma')$ 共晶是在后凝固区的晶界及枝晶间形成的一次相, 其大小、形态受后凝固区的化学成分和冷却速率所控制^[4]。由于较低凝固速率下的冷却速率小, 导致枝晶组织粗大, 形成 $(\gamma-\gamma')$ 共晶的条件充分, 使之成为形态完整的菊花状共晶体。对于较高凝固速率、枝晶明显细化, 局部凝固时间缩短, 其长大受时空条件制约, 导致 $(\gamma-\gamma')$ 共晶只能沿一次枝晶轴的晶界和枝晶间形成小扇形状的共晶体。MC 型碳化物是合金在凝固期间析出的初生相, 其形态、大小和分布, 同样受时空条件所制约, 对于较高凝固速率下, MC 的尺度减小, 其分布只能沿一次枝晶轴的晶界和枝晶间。

4 结论

(1) 采用较高凝固速率, 大幅度地提高了定向凝固合金 DZ22 的高温持久性能, 与较高凝固速率相比, 980°C , 220MPa 条件下的高温持久寿命由 $71\text{h } 50\text{min}$ 增加到 $168\text{h } 5\text{min}$, 提高了 136% 。

(2) 两种凝固速率 DZ22 合金的枝晶特性明显不同, 较高凝固速率的枝晶明显细化, 枝晶偏析得到抑制, 一次、二次枝晶臂间距 λ_1 和 λ_2 分别为 $68\mu\text{m}$ 和 $16\mu\text{m}$, 为较低凝固速率的 64% 和 48% 。

(3) 两种凝固速率下 DZ22 合金的显微组织的形态、大小和分布具有显著的差异。在较高凝固速率下, 合金组成相 γ' 、 $(\gamma-\gamma')$ 共晶、MC 型碳化物均得到明显细化。

参考文献

1. Chu Shunagie, Li Jiangao, Liu Zhongyuan, Shi Zhengxing, Fu Hengzhi, # FHO on Morphologies, Microsegregation, and Mechanical Behavior of Directionally Solidified Cobalt-Base Superalloy at

Medium Cooling Rate, # FKM. Trans. A, 1994, Vol. 25A, MARCH, 637-642

2. 刘忠元, 杨爱民, 李建国, 史正兴, 傅恒志, 镍基高温合金超细定向柱晶的凝固特性, 材料科学进展, 1992, 6 (6), 481~486
3. I. S. Miroshnichenko. Journal of Crystal Growth, 1979, 11, 344
4. 刘忠元, 余力, 陈荣章, 顾林喻, 凝固速率对定向凝固合金 DZ22 显微组织的影响, 航空学报, 1995, 16 (3)

(上接第 24 页)

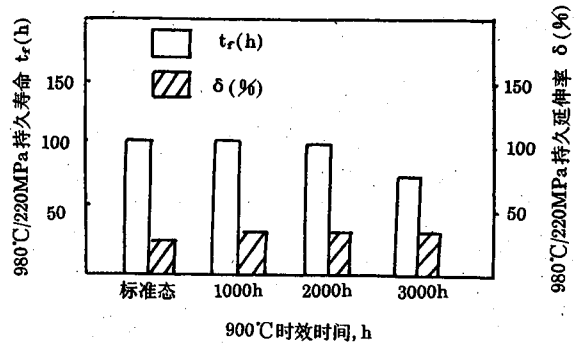


图 4 长期时效对持久性能的影响

参考文献

1. 《航空材料学报》专题资料 (2), 苏联镍基铸造高温合金, P35~38
2. 《铸造高温合金论文集》, 1986, P94~107

可重复利用的木制材料 MW-R

三泽住宅有限公司开发出一种用于室内装饰的可重复利用的木制材料, 这种材料由锯末和木屑等研磨后的粉末组成, 并能通过提取木粉然后将其恢复原状而重复利用。木粉用塑料粘合剂铸塑成型, 制成表面看来象天然木料的室内装修木料和家具。

传统再生木制材料一直由比纤维粗的碎屑制成, 而用于 MW-R 的木粉由 $1\sim 100\mu\text{m}$ 的小颗粒组成。木粉与塑料粘合剂混合, 然后挤压成型, 其组份是耐热的, 因此挤压时木粉不会燃烧。这使得该复合木制材料可以做地板、墙壁、顶棚、门窗和家具等房屋部件的装饰面。这种复合材料与天然木材同样舒适、美观, 性能和质量优于木材且成本比传统装饰材料低 $20\sim 30\%$ 。

(祝)