

抽拉速率对定向凝固 DZ483 合金的微观组织及力学性能的影响

肖 旋¹, 高 慈^{1,2}, 秦学智², 郭永安², 郭建亭², 周兰章²

(1. 沈阳理工大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110159;

2. 中国科学院 金属研究所, 沈阳 110016)

摘 要: 研究抽拉速率对 DZ483 合金微观组织及力学性能的影响。结果表明: 随着抽拉速率的提高, 合金的一、二次枝晶间距逐渐减小, γ' 相尺寸减小, 但 γ' 相的数量增多; 共晶组织及枝晶间碳化物的数量增多。碳化物形貌由块状转变成条状, 类型不随抽拉速率的提高而改变。随着抽拉速率的升高, 除 Cr 元素偏析系数在 1 左右波动外, 其余元素的偏析程度都增加, 其中 W、Mo 元素偏析程度明显加重; DZ483 合金的持久性能随抽拉速率的提高先升高后降低。不同抽拉速率下, 合金断口均呈现出韧性断裂和脆性断裂混合特征, γ' 相为合金的主要强化相。随着抽拉速率的提高, 一方面, 合金中 γ' 相的数量逐渐增多, 尺寸逐渐减小, 提高了合金的持久性能; 另一方面, 由于元素偏析程度加重、碳化物和共晶数量增多及 γ' 相筏形化规则程度的下降, 降低了合金的持久性能。

关键词: DZ483 高温合金; 定向凝固; 抽拉速率; 微观组织; 持久性能

中图分类号: TG132

文献标志码: A

Effects of withdrawal rate on microstructures and mechanical properties of directionally solidified DZ483 superalloy

XIAO Xuan¹, GAO Ci^{1,2}, QIN Xue-zhi², GUO Yong-an², GUO Jian-ting², ZHOU Lan-zhang²

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: The effects of withdrawal rate on the microstructure and mechanical properties of directionally solidified DZ483 superalloy were investigated. The results show that, with the withdrawal rate increasing, both the primary and secondary dendrite arm spacing decrease gradually, and the size of γ' precipitates decreases, but the quantity of γ' phase increases obviously. The number of eutectic and carbides within the interdendritic region increases. However, the morphology of carbides transforms from blocky into strip-like. Except the Cr element with segregation coefficient of about 1, the segregation of the elements becomes worse with the increase of the withdrawal rate, especially W and Mo. With the increase of the withdrawal rate, the stress rupture life of the alloy increases initially and then decreases. The main fractographic appearance is brittle and tough at different withdrawal rates. With the withdrawal rate increasing, on the one hand, the size of γ' precipitates decreases, and the quantity increases, which improves the stress-rupture properties. On the other hand, stress-rupture properties of superalloy worsen because of the increase of element segregation, the increase of the number of γ/γ' eutectic structure and carbides, and the decrease of the irregular morphology of γ' rafting.

Key words: DZ483 superalloy; directional solidification; withdrawal rate; microstructure; creep properties

高温合金因其合金化程度较高, 在英、美等国称之为超合金。在先进的航空发动机中, 高温合金占航空发动机材料总量的 40%~60%^[1-2]。因此, 高温合金性能的优劣对航空发动机的总体性能有着至关重要的影响^[3-4]。随着燃气轮机的不断发展, 推重比要求不断提高, 为增大推力和提高燃油效率、减少污染气体排放, 发动机涡轮前的进口气体温度不断升高, 这就要求研发出具有更佳优异性能的合金^[5-6]。最早采用普通铸造工艺获得的 Ni 基合金, 其高温性能已接近其极限^[6-7], 而且合金化程度的大幅提高使得合金在凝固过程中的偏析程度不断增加, 增大了有害相的析出倾向, 导致合金在高温长期使用过程中出现组织不稳定及力学性能快速恶化等问题。因此, 通过普通铸造工艺获得的合金已不能满足航空发动机对材料的要求。基于此, 定向凝固工艺被广泛地接受与应用。通过定向凝固工艺, 获得沿凝固方向长成相互平行的柱状晶合金, 使得晶体方向和受力方向相平行, 进而大幅提高合金叶片的受力或耐高温能力^[8]。且定向凝固工艺的采用可在原来合金的基础上进一步细化凝固组织, 减少凝固缺陷和有害相^[9]。

国内大量的研究表明^[6-10]: 定向凝固工艺一旦确定后, 温度梯度 G_L 则基本不变, 这时, 主要通过控制凝固速率 R 来改变合金的组织 and 性能(在小于临界抽拉速率的条件下, 凝固速率 R 与抽拉速率 v 变化基本保持一致)。因此, 抽拉速率便成为影响合金性能的重要参数。为此, 本文作者研究抽拉速率对定向凝固 DZ483 高温合金微观组织和力学性能的影响, 以期为实际生产提供理论依据。

1 实验

DZ483 合金的化学成分如表 1 所列, 在其他工艺参数相同的条件下, 采用高速凝固(HRS)工艺制备取向为[001]的定向高温合金试棒, 抽拉速率分别为 3、6 和 12 mm/min。选取不同抽拉速率合金试棒的中部进行组织观察并利用 CSS-3905 持久试验机对不同抽拉速率试样棒进行 950 °C、275 MPa 的持久性能测试。采用腐蚀液(配比为: 2 g CuSO₄+20 mL HCl+20 mL H₂O)对金相试样进行化学腐蚀; 采用 Axiovert 200MAT 光学显微镜(OM)和配有能谱(EDS)分析系统的 S-3400N 型扫描电子显微镜(SEM)进行显微组织和断口观察。利用线切割机从距持久断口 5 cm 处沿横向切割获得厚度为 700 μm 的透射样品薄片, 将其磨至 40 μm 后进行双喷减薄, 双喷液为 10%高氯酸+90%

酒精(质量分数)。透射电镜观察在 FEI Tecnai G2 透射电镜(TEM)上开展, 操作电压 200 kV。利用电子探针(EPMA)分析各相的化学成分及元素偏析情况。

表 1 DZ483 合金成分

Table 1 Chemical composition of DZ483 alloy (mass fraction, %)

Cr	Co	Mo	Ta	Ti	W	Al	C	Ni
11.88	9.06	2.06	4.94	3.92	3.72	3.48	0.074	Bal.

2 结果与讨论

2.1 抽拉速率对铸态树枝晶的影响

图 1 所示为不同抽拉速率下 DZ483 合金在金相显微镜下的微观组织。由图 1 可以看出, 合金组织呈枝晶状, 图中白色十字部分为枝晶干区域, 黑色部分为枝晶间区域。合金在凝固时, 生长形态与温度梯度 G 和凝固生长速率 R 的比值有关。当 G/R 值较小时, 合金以树枝状形态生长。细长的一次枝晶沿着合金控制方向平行生长, 而短小的二次枝晶则垂直于一次枝晶排列。其中无规则地分布在枝晶间区域的白色高亮物为 γ/γ' 共晶。

利用公式:

$$\lambda_1 = N_p^{-1/2} \quad (1)$$

式中: λ_1 为一次枝晶臂间距; N_p 为单位面积内一次枝晶干的数目。测得一次枝晶臂间距分别约为 313、284 和 247 μm。

可以看出, 随着抽拉速率的提高, 一次枝晶臂间距有减小的趋势。这是由于一次枝晶间距主要由 $G_L^{-1/2} \cdot R^{-1/4}$ 决定^[11-12](G_L 为液相线前沿的温度梯度, R 为晶体的生长速度)。在合金生长速率较小的情况下, 温度梯度 G_L 几乎保持不变, 因此, 随抽拉速率的增加, $G_L^{-1/2} \cdot R^{-1/4}$ 值逐渐减小, 所以, 一次枝晶臂间距逐渐减小。

利用公式:

$$\lambda_2 = L/(n-1) \quad (2)$$

式中: λ_2 为二次枝晶臂间距; L 为平行且靠近一次枝晶干穿过 n 个二次枝晶臂线段的长度, 测得的二次枝晶臂间距分别为 75、58 和 43 μm。可见, 二次枝晶间距随着抽拉速率的增加, 也有减小的趋势。这主要是由于二次枝晶间距与抽拉速率之间存在如下关系:



图 1 不同抽拉速率下 DZ483 合金横向及纵向的显微组织

Fig. 1 Microstructures of DZ483 alloys along horizontal ((a), (c), (e)) and longitudinal ((b), (d), (f)) directions at different withdrawal rates: (a), (b) 3 mm/min; (c), (d) 6 mm/min; (e), (f) 12 mm/min

$$\lambda_2 = B(G_L v)^{-1/3} \quad (3)$$

式中： B 为常数； v 为抽拉速率。在定向凝固过程中，其他工艺参数一定，随着抽拉速率的提高，定向凝固固-液界面的温度梯度 G_L 基本保持恒定不变，因此，在抽拉速率 v 提高的情况下，二次枝晶臂间距逐渐减小。

2.2 抽拉速率对 γ' 相的影响

不同抽拉速率下铸态 DZ483 合金中 γ' 相的形貌如图 2 所示。从图 2 中可以看出，不同抽拉速率下， γ' 相形貌均呈不规则的蝴蝶状。且随着抽拉速率的增大， γ' 相尺寸逐渐减小，数量增多。这是由于绝大部分 γ'

相是通过过饱和 γ 相在脱熔状态下形成的，在较小抽拉速率下，由于冷却速率较小， γ' 相形核过冷度小，形核较少，长大时间长，所以 γ' 相尺寸较大，形状也比较规则^[13]；当抽拉速率增大时，冷却速率增大， γ' 相形核过冷度大，形核数量明显增多，长大时间变短，因此 γ' 相数量增多，尺寸变小，形状也变得不规则。利用金相分析软件，对每个抽拉速率下的 20 张 γ' 相照片进行分析，测得抽拉速率为 3、6 和 12 mm/min 的 γ' 相尺寸依次为 734、623 和 517 nm。

2.3 抽拉速率对共晶和碳化物的影响

图 3 所示为不同抽拉速率下 DZ483 合金中共晶组织的形貌。由图 3 中可以看出，合金中 γ/γ' 共晶组织均

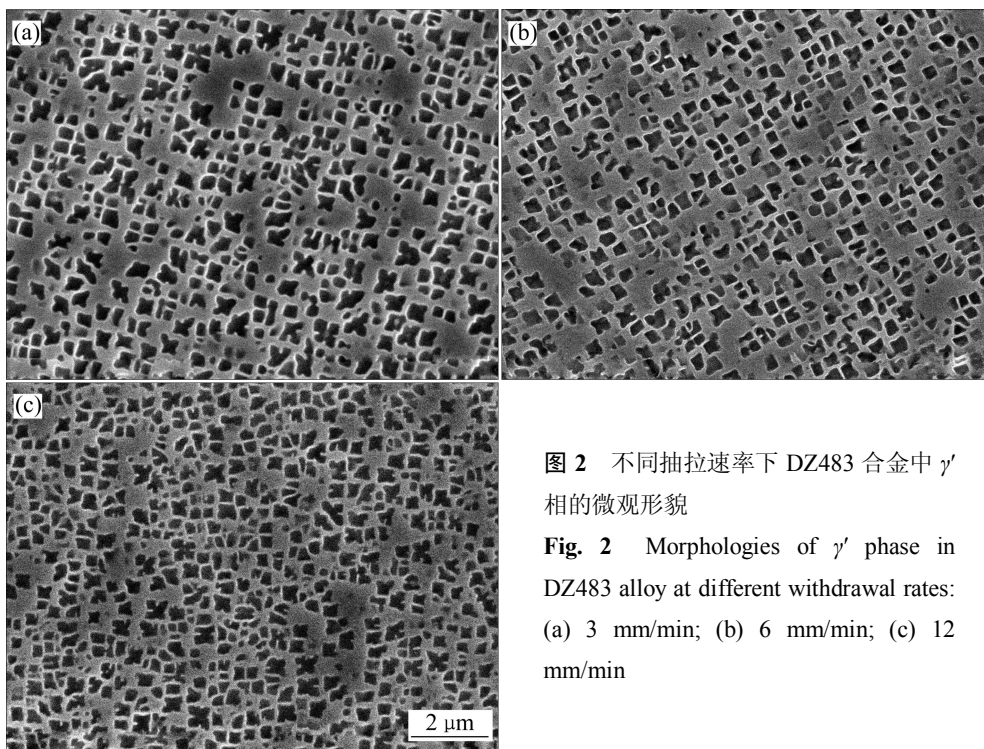


图 2 不同抽拉速率下 DZ483 合金中 γ' 相的微观形貌

Fig. 2 Morphologies of γ' phase in DZ483 alloy at different withdrawal rates: (a) 3 mm/min; (b) 6 mm/min; (c) 12 mm/min

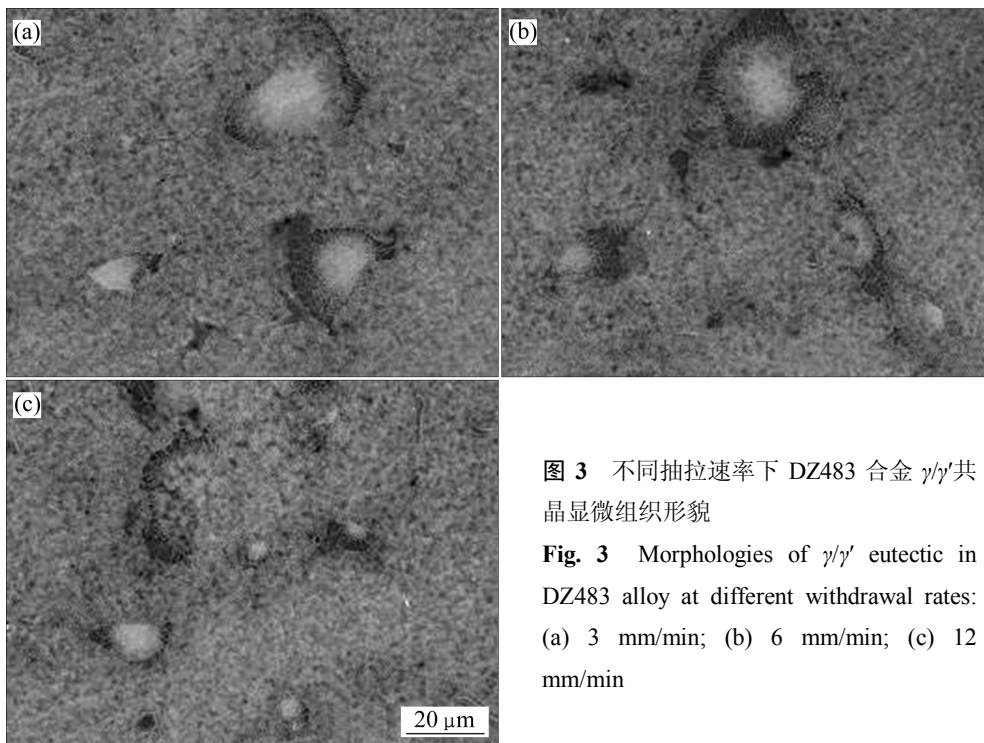


图 3 不同抽拉速率下 DZ483 合金 γ/γ' 共晶显微组织形貌

Fig. 3 Morphologies of γ/γ' eutectic in DZ483 alloy at different withdrawal rates: (a) 3 mm/min; (b) 6 mm/min; (c) 12 mm/min

由外围大片、内部细小均匀的网状 γ' 相组成, 大多分布在枝晶间区域。且随着抽拉速率的增大, 共晶组织的尺寸逐渐减小, 但数量有所增多。这是由于抽拉速率的提高, 凝固速率逐渐增大, 不利于凝固过程中溶质的扩散, 同时也增加了糊状区的宽度, 使得枝晶间残余液相增多。由于这些液相元素偏析程度较大, 均

达到共晶成分, 发生共晶反应^[14], 因此, 形成的共晶组织数量增多。

不同抽拉速率下碳化物的形貌如图 4 所示。随着抽拉速率的增加, 不仅元素的偏析程度加大, 而且二次枝晶干数量增多, 更加阻碍了元素的扩散, 使得碳化物形成元素 Ti 和 Ta 在枝晶间处的含量升高, 促进

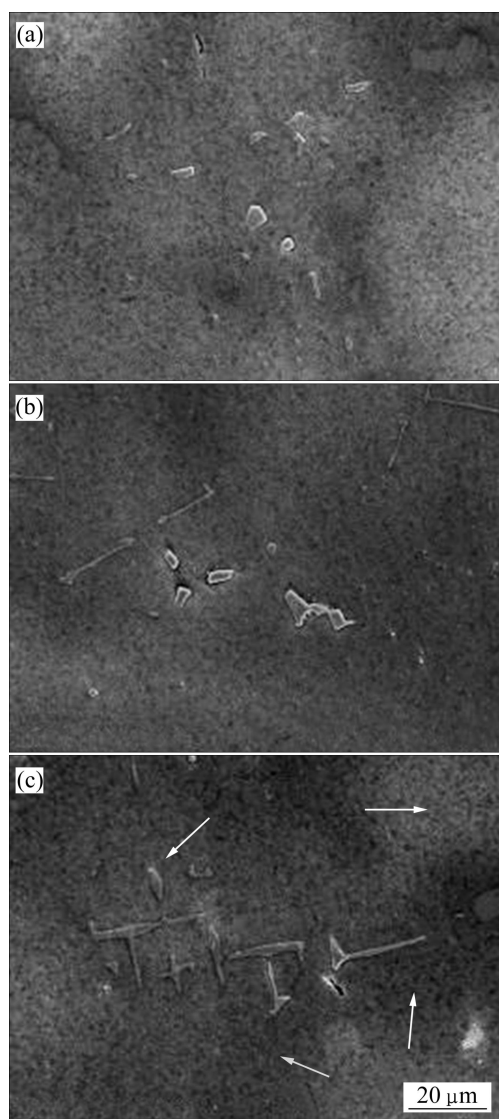


图 4 不同抽拉速率下 DZ483 合金碳化物的微观形貌

Fig. 4 Morphologies of carbides (as arrows indicating) in DZ483 alloy at different withdrawal rates: (a) 3 mm/min; (b) 6 mm/min; (c) 12 mm/min

了 MC 碳化物在枝晶间处形核。因此, 合金中枝晶间碳化物的数量随着抽拉速率的提高而增加, 且形貌也由最初的块状向长条状转变。经 TEM 分析, 碳化物的类型不随抽拉速率的增大而改变, 都是富含 Ta 和 Ti 的 MC 型碳化物。

2.4 抽拉速率对元素偏析的影响

通常将枝晶干元素含量与枝晶间元素含量的比值定义为元素偏析系数^[14-15], 元素的偏析系数大于 1, 为正偏析元素, 说明元素聚集于枝晶干区域, 正偏析系数越大, 元素在枝晶干区域的含量越高; 元素的偏析系数小于 1, 为负偏析元素, 说明元素聚集于枝晶

间区域, 负偏析系数越大, 元素在枝晶间区域的含量越高。抽拉速率对 DZ483 合金各元素偏析系数的影响如图 5 所示。由图 5 可见, W、Co 和 Cr 元素的偏析系数大于 1, 为正偏析元素, 主要偏析于枝晶干区域; Mo、Al、Ta 和 Ti 元素偏析系数小于 1, 为负偏析元素, 主要偏析于枝晶间区域。且随着抽拉速率的增加, W 和 Mo 的偏析程度不断增大, Co、Al 和 Ti 元素的偏析程度略有增加, Cr 元素的偏析系数在 1 附近波动。

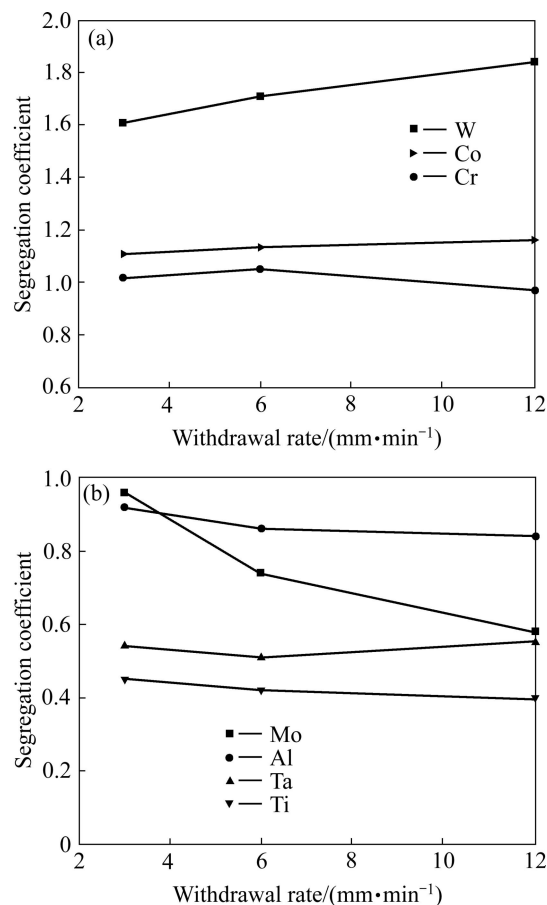


图 5 抽拉速率对 DZ483 合金各元素偏析系数的影响

Fig. 5 Effect of withdrawal rate on segregation coefficient of each element in DZ483 alloy: (a) Positive segregation elements; (b) Negative segregation elements

元素的偏析实质是元素的扩散再分配, 枝晶干区域含高熔点的元素比较多, W 元素的熔点远高于其他元素的熔点, 所以优先在枝晶干富集。在凝固初期, γ 相优先生成, 形成枝晶干区域, 枝晶干对大原子有排斥作用^[15], 使 Ti、Mo 等大原子元素向枝晶间富集; 随着抽拉速率的增大, 枝晶界面形核过冷度逐渐增加, 有利于二次枝晶生长, 二次枝晶阻碍枝晶间液相流动扩散, 使负偏析元素随抽拉速率的增加偏析程度加大; 然而元素的扩散取决于扩散时间和扩散距离。一方面,

随着抽拉速率的提高, 合金冷却速率增大, 使得溶质元素在合金中扩散时间变短, 提高了偏析程度; 另一方面, 抽拉速率的增加导致一次枝晶间距减小, 元素的扩散距离缩短, 元素的偏析程度降低。有研究表明, 当抽拉速率较小时, 扩散时间起主导作用; 而当抽拉速率较大时, 扩散距离起主导作用^[16-18]。本实验所选择的抽拉速率较小, 合金的偏析程度由扩散时间决定, 因此, 随着抽拉速率的提高, 合金元素的偏析程度加大。

2.5 抽拉速率对 DZ483 合金持久性能的影响

不同抽拉速率下 DZ483 合金的持久性能如图 6 所示。由图 6 可以看出, 随着抽拉速率的提高, 合金的持久性能先增强后降低。图 7(a)、(c)和(e)所示为不同抽拉速率下合金持久断口形貌。从图中可以看出, 不同抽拉速率下的合金断口不仅均有韧窝存在, 而且还呈较明显的沿晶断裂特征。韧窝呈典型的韧性断裂特

征, 而沿晶断裂是典型的脆性断裂特征, 因此, 不同抽拉速率下合金的断裂形式均属于韧脆混合型断裂。

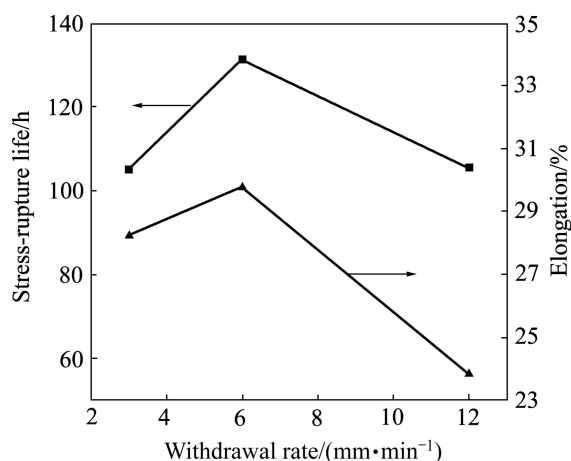


图 6 不同抽拉速率 DZ483 合金的持久性能

Fig. 6 Stress-rupture properties of DZ483 alloy at different withdrawal rates

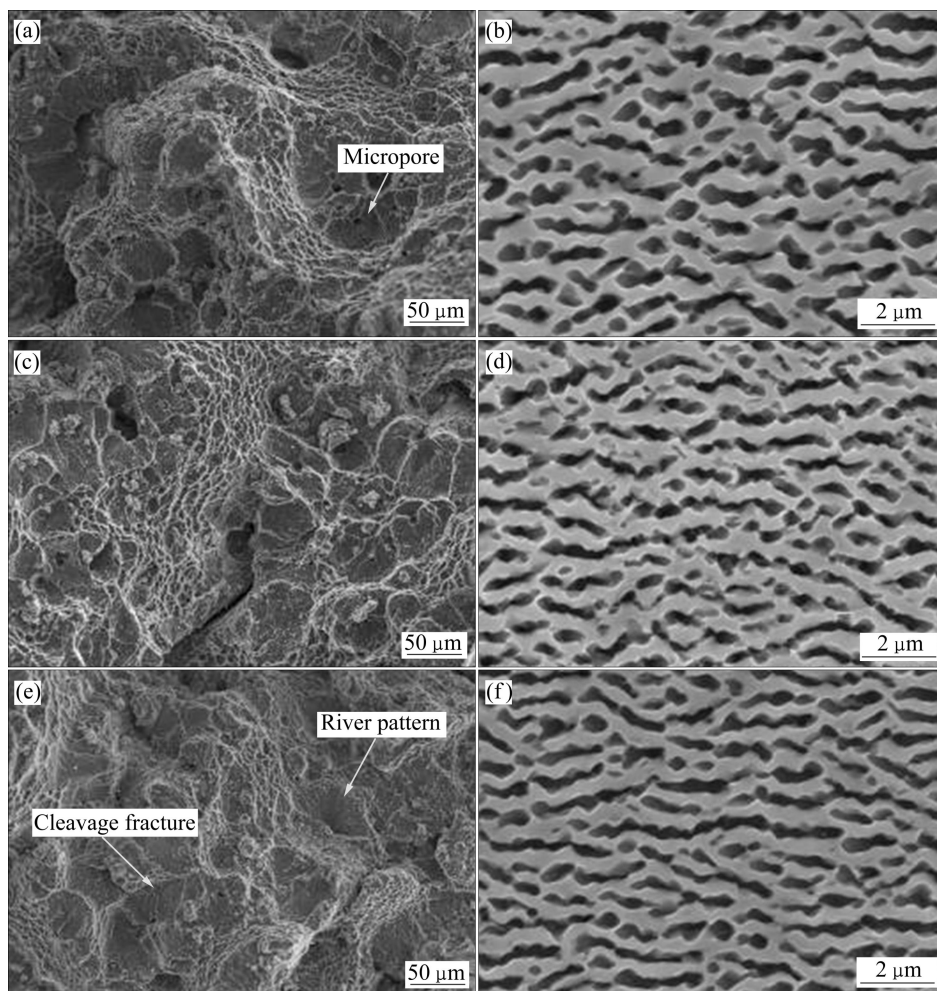


图 7 不同抽拉速率下 DZ483 合金持久断口形貌及 γ' 筏形化

Fig. 7 Fracture morphologies of stress-rupture samples of DZ483 alloy and γ' rafting at different withdrawal rates: (a), (b) 3 mm/min; (c), (d) 6 mm/min; (e), (f) 12 mm/min

而且抽拉速率为 12 mm/min 的合金断口中存在另外一种脆性断裂特征, 即形貌表现为河流花样和解理台阶的解理断裂类型, 也就是说, 此速率下合金的脆性特征明显, 合金的伸长率及持久寿命最低。值得注意的是, 不同抽拉速率的合金断口形貌都存有少量微孔, 微孔的形成可能是在持久实验的过程中, 裂纹沿碳化物或其他夹杂物边缘扩展, 在失效时, 碳化物或杂质脱落造成的^[19-20]。对持久样品纵截面形貌观察发现, 不同抽拉速率下 DZ483 合金的 γ' 相都已筏形化, 如图 7(b)、(d) 和 (f) 所示。随着抽拉速率的增大, γ' 相筏形化通道由不连续逐渐变为连续, 筏形化的方向均垂直于拉伸载荷的应力轴, 属于 N 型筏形化, 错配度为负值。

在 DZ483 合金基体中, 位错主要在 γ/γ' 界面处塞积, 如图 8(a) 所示, 因此, 合金的持久性能主要取决于 γ' 强化相。也就是说, γ' 相的形态和数量对合金的性能有较大影响。随着合金抽拉速率的提高, γ' 相数量逐渐增多, 尺寸逐渐减小, 细小的 γ' 相能有效提高合金的持久性能^[21]。而且, 抽拉速率的提高细化了合金的枝晶组织, 进一步提高了合金的持久性能。然而, 由于枝晶偏析的影响, 不同区域(枝晶干、枝晶间)中元素在 γ' 相中的分布有差异, 导致 γ' 相强度不同, 因此, 对合金的强化效果也不同^[22], 在变形过程中, γ' 相强化效果较低的区域容易产生裂纹, 降低了合金的持久性能。另外, 由于共晶数量的增多, 裂纹也容易在其周围产生与扩展, 如图 8(b) 所示, 降低了合金的持久性能。

另有研究表明: γ' 相筏形化的规则程度也对合金持久性能有一定的影响。筏形化较规则时, γ' 相的长径比较大, 较大的长径比能有效抑制位错攀移机制的产生^[21], 迫使位错主要以切过 γ' 相的机制进行扩展, 提高了位错扩展所需要的能量, 因此, 合金的持久性能提高。随着抽拉速率的提高, 合金中 γ' 相筏形化的速度越来越快, 但由于元素偏析程度增大, 影响了 γ' 相的自扩散, 使得在 12 mm/min 抽拉速率下部分区域 γ' 相筏形化方向平行于拉伸载荷应力轴, 如图 8(c) 所示。另外, 共晶组织和碳化物的存在也会导致 γ' 相筏形化的规则程度下降, 进而影响合金的持久性能。

综上所述, 一方面, 随着抽拉速率的提高, 合金中 γ' 相的数量逐渐增多, 尺寸逐渐减小, 提高了合金的持久性能; 另一方面, 由于元素偏析程度加大、碳化物和共晶数量增多及 γ' 相筏形化规则程度下降, 降低了合金的持久性能。因此, 在以上两方面因素共同作用下, 不同抽拉速率下合金的持久性能呈现出先增

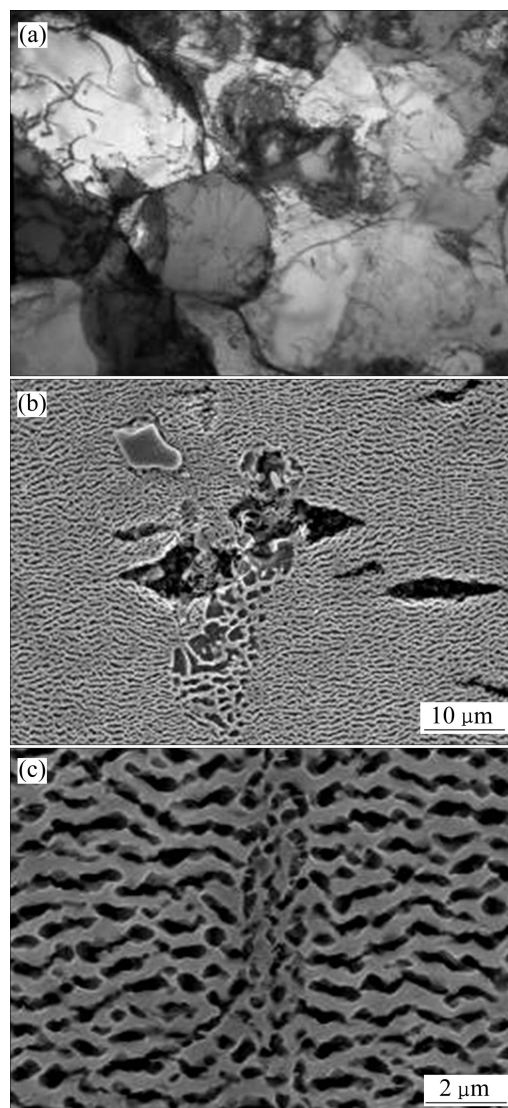


图 8 DZ483 合金的 TEM 和 SEM 像

Fig. 8 TEM and SEM images of DZ483 alloys: (a) TEM image of dislocation; (b) SEM image of crack produced in eutectic around; (c) SEM image of γ' rafting parallel to axis of stress

强后降低的趋势。当抽拉速率为 6 mm/min 时, 持久性能达到峰值。

3 结论

1) 随着抽拉速率的提高, 合金的一、二次枝晶间距逐渐减小, γ' 相尺寸也随着减小, 但数量增多, 共晶含量增加, 枝晶间区域碳化物数量增多, 形貌也由最初的块状向长条状转变。

2) 除 Cr 元素偏析系数在 1 附近波动外, 其余元

素的偏析程度均随着抽拉速率提高而增大, W 和 Mo 元素偏析程度最明显。

3) γ' 相是合金的主要强化相,随着抽拉速率的提高, γ' 相的数量增多,尺寸减小,合金的持久性能提高;但是,由于元素偏析程度加大、碳化物和共晶数量增多以及 γ' 相筏形化规则程度下降,降低了合金的持久性能。

REFERENCES

- [1] BRIDGMAN P W. Crystals and their manufacture, mass field: England, 88650[P]. 1926-02-16.
- [2] 郭建亭. 高温合金材料学(上册)[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 3-16.
GUO Jian-ting. Materials science and engineering for superalloys (I) [M]. Beijing: Science Press, 2008: 3-16.
- [3] POLLOCK T M, ARGON A S. Creep resistance of CMSX-3 nickel base superalloy single crystals[J]. Acta Metallurgica et Materialia, 1992, 40(1): 1-30.
- [4] 郭建亭, 袁超, 侯介山. 高温合金的蠕变及疲劳-蠕变-环境交互作用规律和机理[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(3): 487-504.
GUO Jian-ting, YUAN Chao, HOU Jie-shan. Creep and creep-fatigue-environment interaction and mechanisms of superalloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(3): 487-504.
- [5] SHENG L Y, XIE Y, XI T F, GUO J T, ZHENG Y F, YE H Q. Microstructure characteristics and compressive properties of NiAl-based multiphase alloy during heat treatments[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528(29/30): 8324-8331.
- [6] FU H Z, GENG X G. High rate directional solidification and its application to single crystal superalloys[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2001, 2(1): 197-204.
- [7] ZHANG J, LOU L H. Directional solidification assisted by liquid metal cooling[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2007, 23(3): 289-300.
- [8] HARRIS K, ERICKSON G L, SCHWER R E. Directionally solidified and single-crystal superalloys—Metals Handbook[M]. New York: American Society for Metals, 1990: 995-1010.
- [9] 金涛, 李金国, 赵乃仁, 王震, 孙晓峰, 管恒荣, 胡壮麒. 抽拉速率对一种镍基单晶高温合金凝固参数和凝固组织的影响[J]. 材料工程, 2002, 3(2): 30-42.
JIN Tao, LI Jin-guo, ZHAO Nai-ren, WANG Zhen, SUN Xiao-feng, GUAN Heng-rong, HU Zhuang-qi. Effects of withdrawal rate on solidification parameters and microstructure of a nickel-base single crystal superalloy[J]. Chinese Journal of Materials Engineering, 2002, 3(2): 30-42.
- [10] 赵乃仁, 金涛, 孙晓峰, 管恒荣, 杨洪才, 胡壮麒. 抽拉速率对 SRR99 单晶高温合金组织和性能的影响[J]. 材料研究学报, 2008, 22(2): 46-52.
ZHAO Nai-ren, JIN Tao, SUN Xiao-fen, GUAN Heng-rong, YANG Hong-cai, HU Zhang-qi. Effects of withdrawal rate on microstructure and mechanical property of single crystal superalloy SRR99[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2008, 22(2): 46-52.
- [11] 刘忠元, 李建国, 傅恒志. 凝固速率对定向凝固合金 DZ22 枝晶臂间距和枝晶偏析的影响[J]. 金属学报, 1995, 31(7): 329-332.
LIU Zhong-yuan, LI Jian-guo, FU Heng-zhi. Dendritic arm of spacing and microsegregation of directionally solidified superalloy DZ22 at various solidification rates[J]. Acta Metallurgical Sinica, 1995, 31(7): 329-332.
- [12] 冯广召, 沈军, 邹敏佳, 刘林. 抽拉速率对高温合金 DZ125 定向凝固中的缩松的影响[J]. 铸造, 2009, 58(5): 427-430.
FENG Guang-zhao, SHEN Jun, ZOU Min-jia, LIU Lin. Influence of withdrawal rate on the micro-porosity of super-alloy DZ125 in directional solidification[J]. Foundry, 2009, 58(5): 427-430.
- [13] SHENG L Y, GUO J T, TIAN Y X, ZHOU L Z, YE H Q. Microstructure and mechanical properties of rapidly solidified NiAl-Cr(Mo) eutectic alloy doped with trace Dy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 475(1/2): 730-734.
- [14] 张剑, 骆宇时, 赵云松, 杨帅, 贾玉亮, 崔丽丽, 许剑伟, 唐定中. 一种低密度镍基单晶高温合金的组织与性能研究[J]. 航空材料学报, 2011, 31: 90-93.
ZHANG Jian, LUO Yu-shi, ZHAO Yun-song, YANG Shuai, JIA Yu-liang, CUI Li-li, XU Jian-wei, TANG Ding-zhong. The research of microstructure and property of a low density nickel base single crystal superalloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31: 90-93.
- [15] 顾林喻, 刘忠元, 史正兴. 高梯度快速定向凝固下 DZ22 高温合金的显微偏析[J]. 中国有色金属学报, 1996, 6(2): 110-113.
GU Lin-yu, LIU Zhong-yuan, SHI Zheng-xing. Microsegregation of DZ22 superalloy under unidirectional solidification with high temperature gradient and rapid growth rate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1996, 6(2): 110-113.
- [16] HOU J S, GUO J T, ZHOU L Z, YE H Q. Sigma phase formation and its effect on mechanical properties in the corrosion-resistant superalloy K44[J]. Z Metallkund, 2006, 97: 174-181.
- [17] POLLOCK T M, ARGON A S. Directional coarsening in nickel-base single crystals with high volume fractions of coherent precipitates[J]. Acta Metallurgical Materials, 1994, 42:

- 1859–1874.
- [18] HOU J S, GUO J T, ZHOU L Z, YUAN C, YE H Q. Microstructure and mechanical properties of cast Ni-base superalloy K44[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2004, 374: 327–334.
- [19] SCHNEIDER W, MUGHRABI H. Creep and fracture of engineering materials and structures[C]// *Proceedings of the 5th International Conference on Creep and Fracture of Engineering Materials and Structure*. London: Swansea, 1993: 209–213.
- [20] YU J J, SUN X F, JIN T, ZHAO N R, GUAN H R, HU Z Q. Effect of Re on deformation and slip systems of a Ni base single crystal superalloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 458: 39–43.
- [21] BETTGE D, OSTERLE W, ZIEBS J. Temperature dependence of yield strength and elongation of the nickel-base superalloy IN738LC and the corresponding microstructural evolution[J]. *Materials Research and Advanced Techniques*, 1995, 86: 190–197.
- [22] 夏鹏成, 于金江, 孙晓峰, 管恒荣, 胡壮麒. 高温时效时间对定向凝固 DZ951 镍基高温合金组织和持久性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2010, 39(1): 69–71.
- XIA Peng-cheng, YU Jin-jiang, SUN Xiao-feng, GUAN Heng-rong, HU Zhuang-qi. Influence of high-temperature aging time on microstructure and stress rupture property of directionally solidified DZ951 Ni-based superalloys[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2010, 39(1): 69–71.

(编辑 陈卫萍)