

抽拉速率对定向凝固高温合金 DZ445 微观组织和力学性能的影响

徐 超¹, 周兰章¹, 郭建亭¹, 杨功显²

- (1. 中国科学院 金属研究所, 沈阳 110016;
2. 东方汽轮机有限公司, 德阳 618000)

摘 要: 研究不同抽拉速率(4, 5, 7, 9, 10 mm/min)对定向凝固 DZ445 高温合金微观组织和力学性能的影响。结果表明: 随着抽拉速率由 4 mm/min 增加到 10 mm/min, 一次枝晶臂间距 λ_1 和二次枝晶臂间距 λ_2 逐渐减小, 枝晶组织逐渐细化; 枝晶干和枝晶间 γ' 相尺寸也逐渐减小, 枝晶间 γ' 相的尺寸比枝晶干 γ' 相的大, 这种差别随着凝固速率的增加而减小; 合金元素的偏析随凝固速率的增大越来越严重; 除抽拉速率为 4 mm/min 外, 抽拉速率对 DZ445 合金室温拉伸性能影响不大; 当抽拉速率太高或者太低时, 合金 650 ℃ 拉伸伸长率均明显降低; 抽拉速率对合金的持久性能影响明显; 当抽拉速率为 7 mm/min 时, 合金的拉伸性能、持久性能和微观组织达到综合平衡, 为最佳抽拉速率; DZ445 定向柱晶合金比同成分 K445 等轴晶合金具有更好的室温和高温拉伸性能及持久性能。

关键词: 定向凝固高温合金; DZ445 合金; 抽拉速率; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG132.3

文献标志码: A

Effect of withdrawal rate on microstructures and mechanical properties of directionally solidified superalloy DZ445

XU Chao¹, ZHOU Lan-zhang¹, GUO Jian-ting¹, YANG Gong-xian²

- (1. Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. Dongfang Turbine Co. Ltd., Deyang 618000, China)

Abstract: The effects of withdrawal rate (4, 5, 7, 9, 10 mm/min) on the microstructure and mechanical properties of directionally solidified superalloy DZ445 were investigated. The results show that with the increase of withdrawal rate from 4 mm/min to 10 mm/min, both the primary and secondary dendrite arm spacing decrease gradually, and the average size of γ' precipitates well-distributed in both dendrite core and interdendritic, decreases gradually. The average size of γ' precipitates in dendrite core is smaller than that in interdendritic areas. The tendency of segregation of elements is more intense with the increase of withdrawal rate. At room temperature, the tensile properties of the DZ445 alloy under different withdrawal rates differ slightly, except at 4 mm/min. At 650 ℃, the tensile elongations at both too high and too low withdrawal rate decrease obviously. Besides, the withdrawal rate has an apparent effect on the stress-rupture properties of the DZ445 alloy. To sum up, the alloy under withdrawal rate of 7 mm/min has a good balance of tensile property, stress-rupture property and microstructure. Therefore, 7 mm/min is finally determined to be the optimal withdrawal rate. DZ445 columnar crystal alloy under the optimal withdrawal rate has better tensile property and stress-rupture property than K445 polycrystal alloy, which has the same composition as DZ445 alloy.

Key words: directionally solidified superalloy; DZ445 alloy; withdrawal rate; microstructure; mechanical properties

高温合金是指以铁、钴、镍为基体, 能在 600 ℃ 以上的高温及一定应力作用下长期工作的一类金属材料。

料。高温合金具有良好的高温强度、高温韧性、以及良好的抗氧化和抗腐蚀性能, 广泛应用于制造航空发

动机、火箭发动机和燃气轮机的高温热端部件,以及其他比较苛刻的应用环境,比如核电站和化学处理厂^[1-2]。最初的高温合金通过锻造生产,主要通过合金成分的调整来提高合金的性能。20世纪50年代中期,真空熔炼技术的应用,使精密铸造涡轮叶片用高温合金得到发展,高温合金的使用温度达到950℃左右。然而,用普通方法得到的等轴晶铸造合金,其高温性能的提高已接近极限^[3]。合金化程度的大幅度提高,不仅加重了合金的凝固偏析,而且增大了有害相的析出倾向,使合金在高温长期使用中组织不稳定,力学性能变差。20世纪60年代中期,美国PW公司发明了定向凝固工艺并用于生产镍基合金柱晶涡轮叶片,使叶片工作温度提高约50℃,从而极大地推动了高温合金的发展^[4]。

定向凝固柱晶高温合金由于消除了横向晶界,其持久性能、冷热疲劳性能以及薄壁性能大幅度提高。定向凝固的重要工艺参数包括凝固过程中固-液界面前沿液相中的温度梯度 G_L 和固-液界面向前推进速度,即凝固速率 R 。定向凝固工艺一旦确定后,温度梯度 G_L 则基本固定,这时则主要通过调节凝固速率 R 来控制合金的组织 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 的变化基本一致),所以铸型的抽拉速率是一个非常重要的参数。抽拉速率对定向凝固柱晶合金和单晶合金的微观组织和力学性能影响显著,目前已经针对多种高温合金进行了大量研究,如单晶合金RENE N4^[5]、DD98^[6]、IC6SX^[7]、SRR99^[8]、DD6^[9]和定向柱晶合金DZ22^[10]、DZ125^[11]等。这些合金的组织 and 性能随着抽拉速率的变化表现出相似的规律,但又有各自的特点。

DZ445合金是本研究组新近研制成功的定向凝固镍基高温合金,具有抗热腐蚀性能优异和高温长期组织稳定的特点,主要用作重型燃气轮机的涡轮叶片材料。为了进一步提高合金的性能,在其化学成分确定之后,需要研究合金的制备工艺,其中定向凝固工艺是最重要的。抽拉速率是影响定向凝固高温合金性能的关键工艺参数,为此,本文作者研究了抽拉速率对DZ445合金微观组织和力学性能的影响。

1 实验

DZ445合金的化学成分如表1所列^[12]。采用25 kg真空感应炉熔炼母合金,并在国产10 kg定向凝固炉中制备柱晶试样。定向凝固试验采用高速凝固(HRS)工艺,模壳温度和浇注温度均为1520℃,温度梯度

约为85℃/cm,真空度 <1 Pa,试样尺寸为 d 15 mm \times 160 mm,每组8支试样。抽拉速率分别采用4、5、7、9和10 mm/min。

表1 DZ445合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of DZ445 alloy (mass fraction, %)

C	B	Cr	Co	W	Mo
0.024	0.012	12.53	9.81	4.46	1.21
Al	Ti	Ta	Hf	Ni	
3.76	2.28	4.65	0.32	Bal.	

在铸态试棒中部用线切割切取试棒的横截面和纵截面,经研磨、抛光后,采用腐蚀剂(配比为2 g CuSO₄+20 mL HCl+20 mL H₂O)进行化学腐蚀,以显示合金的微观组织。DZ445合金热处理制度为((1 210 \pm 10)℃, 2 h,空冷)+((1 080 \pm 10)℃, 2 h,空冷)+((850 \pm 10)℃, 24 h,空冷)。不同抽拉速率定向凝固试棒经热处理后,沿试棒纵向切取拉伸和持久试样,测试其室温和650℃的拉伸性能及870℃和980℃的持久性能。

应用光学显微镜(OM)和配有能谱(EDS)分析系统的S-3400N型扫描电子显微镜(SEM)进行显微组织观察和微观偏析分析。

2 结果与分析

2.1 抽拉速率对微观组织的影响

2.1.1 抽拉速率对铸态枝晶组织的影响

不同抽拉速率下DZ445合金的显微组织如图1所示。由图1可见:随着抽拉速率的增加,合金凝固枝晶组织逐渐细化;当抽拉速率为4和5 mm/min时,枝晶粗细不均匀,且有不连续枝晶出现,枝晶偏离度大(见图1(a)和(a'));当抽拉速率为9和10 mm/min时,枝晶偏离太大,尺寸大小很不均匀(见图1(c)和(c'));当抽拉速率为7 mm/min时,一次枝晶臂平行于控制方向生长,柱晶尺寸均匀(见图1(b)和(b'))。因此,从枝晶组织观察,当抽拉速率为7 mm/min时,树枝晶生长良好。

2.1.2 抽拉速率对枝晶臂间距的影响

抽拉速率对一次和二次枝晶臂间距的影响如图2所示。可见,随着抽拉速度的增加,一次和二次枝晶臂间距逐渐减小。采用非线性回归分析法对其进行回归分析,得到一次枝晶臂间距 λ_1 与抽拉速率 v 的数学

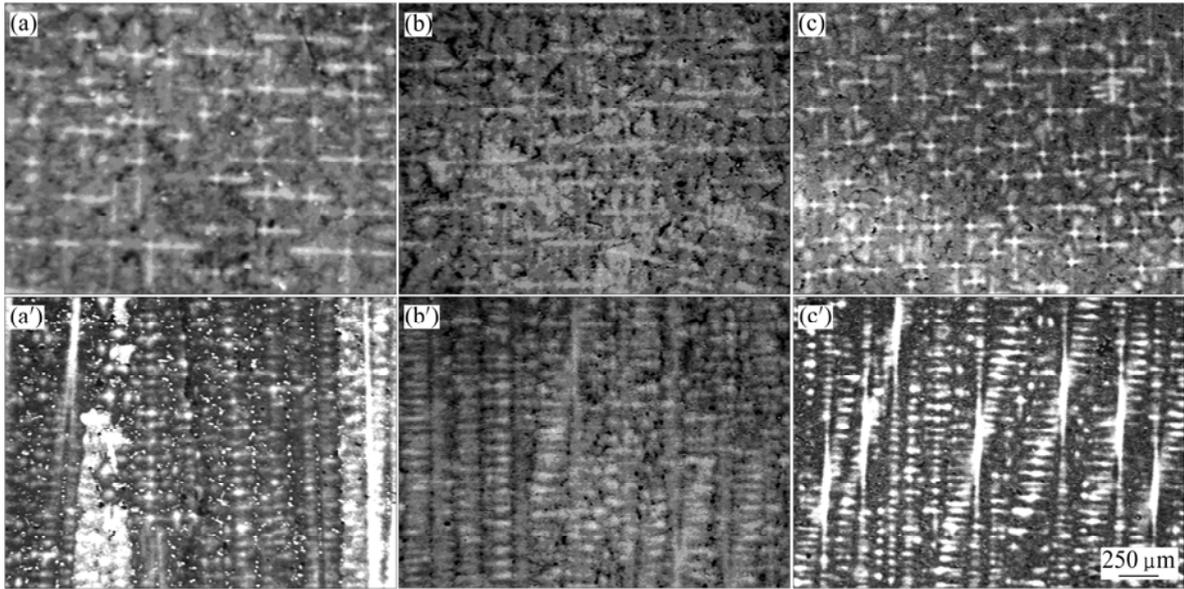


图 1 不同抽拉速率下 DZ445 合金横向和纵向的微观组织

Fig.1 Microstructures of DZ445 alloys along horizontal ((a), (b), (c)) and longitudinal ((a'), (b'), (c')) under different withdrawal rates: (a), (a') 5 mm/min; (b), (b') 7 mm/min; (c), (c') 9 mm/min

表达式如下：

$$\lambda_1 = 0.00516v^{-0.37} \quad (1)$$

式中：一次枝晶臂间距 λ_1 和抽拉速率 v 的单位分别为 cm 和 cm/s。对于 IN738LC 合金，在温度梯度为 85 K/cm 定向凝固条件下，一次枝晶臂间距与抽拉速率 v 之间有类似关系^[13]：

$$\lambda_1 = 0.00328v^{-0.31} \quad (2)$$

所以，一次枝晶臂间距 λ_1 与抽拉速率 v 间是指数关系，指数的大小取决于合金成分和工艺参数。而 λ_1 与 G_L 和 R 有下列关系^[14]：

$$\lambda_1 = [-64\theta D_L m_L (1-K)c_0]^{1/4} G_L^{-1/2} R^{-1/4} \quad (3)$$

式中： θ 为毛细现象常数(估计值为 1.76×10^{-7} km)； D_L 为液相中溶质元素的扩散系数； m_L 为液相线斜率； c_0 为合金元素的浓度； K 为常数； G_L 为固液界面前沿液相中的温度梯度； R 为凝固速率，在此可用 v 代替。利用这一关系，可以根据 λ_1 和 R 求出温度梯度 G_L ，同时可以求出冷却速率 $v_c = G_L R$ 。这对于研究 G_L 值和 v_c 值是非常有用的数学式。

一次枝晶臂间距随着凝固速率的增大而变小，这是由于随着凝固速率增大，冷却速率增大。在定向凝固过程中，枝晶臂间距取决于凝固界面处的散热条件；散热能力越强，则每一分枝所析出的结晶潜热的影响

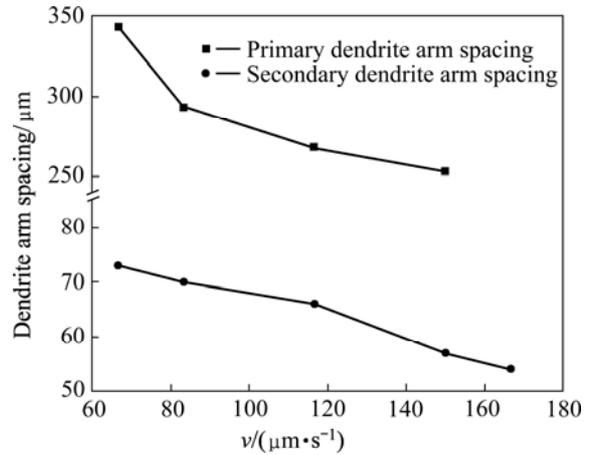


图 2 枝晶臂间距与凝固速率的关系

Fig.2 Relationship between dendrite arm spacing and withdrawal rate

区越小，枝晶间距就越小；而冷却速率越大，则散热能力越强，枝晶臂间距就愈细小。

从图 2 可见 λ_2 也随凝固速率的增加呈减小趋势，将实验测得的二次枝晶臂间距 λ_2 对凝固速率 v 进行非线性回归，得到：

$$\lambda_2 = 0.00155v^{-0.31} \quad (4)$$

式中：二次枝晶臂间距 λ_2 和抽拉速率 v 的单位分别为 cm 和 cm/s。

二次枝晶臂间距 λ_2 与 $G_L R$ 的关系通常可表示为^[15]

$$\lambda_2 = A(G_L R)^{-1/3} \quad (5)$$

式中: A 为常数。式(5)说明二次枝晶臂间距与 $G_L R$ 呈指数关系。对于一定的合金, 冷却速率愈大, 则局部凝固时间愈短, 二次枝晶间距愈小, 组织愈致密, 相关性能愈好。

2.1.3 抽拉速率对合金微观偏析的影响

表 2 所列为抽拉速率为 7 mm/min 时 DZ445 合金主要元素成分的典型分布。定义元素的微观偏析系数为枝晶轴元素含量与枝晶间元素含量的比值, 抽拉速率对 DZ445 合金中各元素偏析系数的影响如图 3 所示。元素的偏析系数大于 1, 说明元素聚集于枝晶干区域, 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, 说明元素聚集于枝晶间区域, 偏析系数越小, 元素在枝晶间区域的含量越高。由表 2 和图 3 可见: W 元素的偏析系数大于 1, 并且随着抽拉速率的增加, 偏析系数不断增大, W 元素也越来越向枝晶干聚集; Cr 元素的偏析系数在 1 上下波动, Co 元素的偏析系数略大于 1, 并且 Cr 和 Co 的偏析系数随抽拉速率的增加变化不大, 说明 Cr 和 Co 在枝晶间与枝晶干区域分布差别不大, 几乎没有偏析行为; Al、Ta 和 Ti 元素偏析系数小于 1, 但是随着抽拉速率的增加, 偏析系数只是略有减小, 变化不大; Mo 和 Hf 元素的偏析系数也小于 1, 但随着抽拉速率的增加, 偏析系数明显减小。

合金在凝固过程中的溶质再分配是偏析产生的根本原因。一般来说, 在非平衡凝固条件下, 先凝固的枝晶干区域含高熔点的元素多, 后凝固的枝晶间区域含低熔点的元素多。元素 W 的熔点高达 3 422 , 远高于其他元素的, 所以强烈偏析于枝晶干区域。高温合金在凝固初期, 首先发生液相向 γ 相的转变, 形成枝晶干区域, 枝晶干对 Ti、Mo、Hf 等大原子有排斥作用, 使这些元素向枝晶间富集。凝固过程中和凝固后固溶体中的扩散可以降低偏析程度, 扩散又取决于扩散时间和扩散距离。一方面, 随着抽拉速率的增加, 合金的冷却速率也增大, 使得溶质元素在固溶体中的扩散时间缩短, 降低了扩散均匀化的效果, 提高了偏

析程度; 另一方面, 抽拉速率增加导致一次枝晶间距减小, 从而缩短了扩散距离, 有利于溶质元素的扩散, 降低了偏析程度。当合金凝固速率较低时, 溶质元素的扩散时间起着主导作用, 而当合金的凝固速率较高时, 扩散距离将起主要作用^[16]。本实验所选择的抽拉速率较低, 合金的偏析程度应由溶质元素的扩散时间决定, 所以当抽拉速率增加时, 合金的冷却速率增加, 溶质元素的扩散时间缩短, 偏析程度加重。

2.1.4 抽拉速率对 γ' 相形貌、数量和尺寸的影响

抽拉速率对 γ' 相形貌和大小影响分别如图 4 和 5 所示。由图 4 和 5 可见: 枝晶干和枝晶间 γ' 相数量

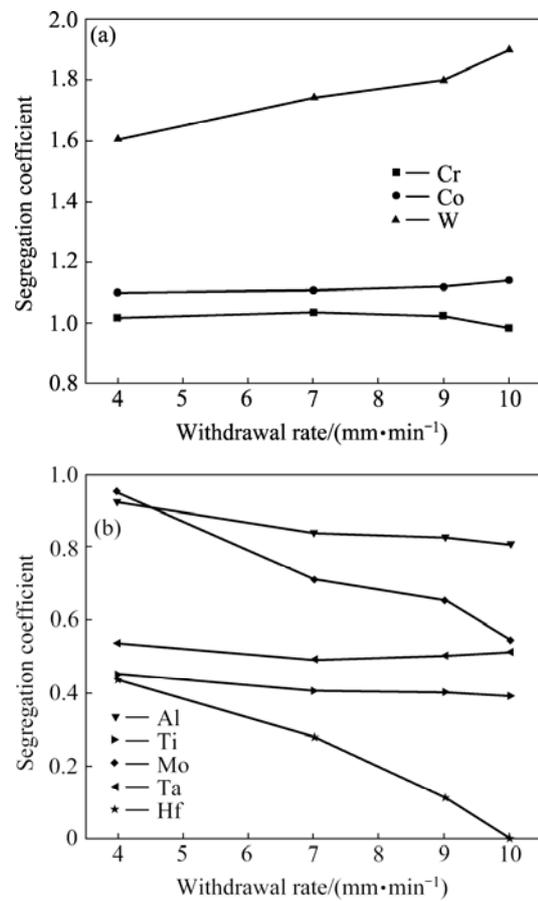


图 3 抽拉速率对 DZ445 合金中各元素偏析系数的影响
Fig 3 Effect of withdrawal rate on segregation coefficient of each element in DZ445 alloy

表 2 DZ445 合金元素成分的典型分布

Table 2 Typical composition distribution of elements in DZ445 alloy

Zone	Mass fraction/%									
	Ni	Cr	Co	Al	Ti	Ta	W	Mo	Hf	
Whole alloy	Bal.	12.53	9.81	3.76	2.28	4.65	4.46	1.21	0.32	
Dendrite core	58.48	13.87	10.95	3.28	1.41	2.39	7.20	1.86	0.07	
Interdendritic region	57.90	13.38	9.89	3.92	3.52	4.74	4.13	2.64	0.27	

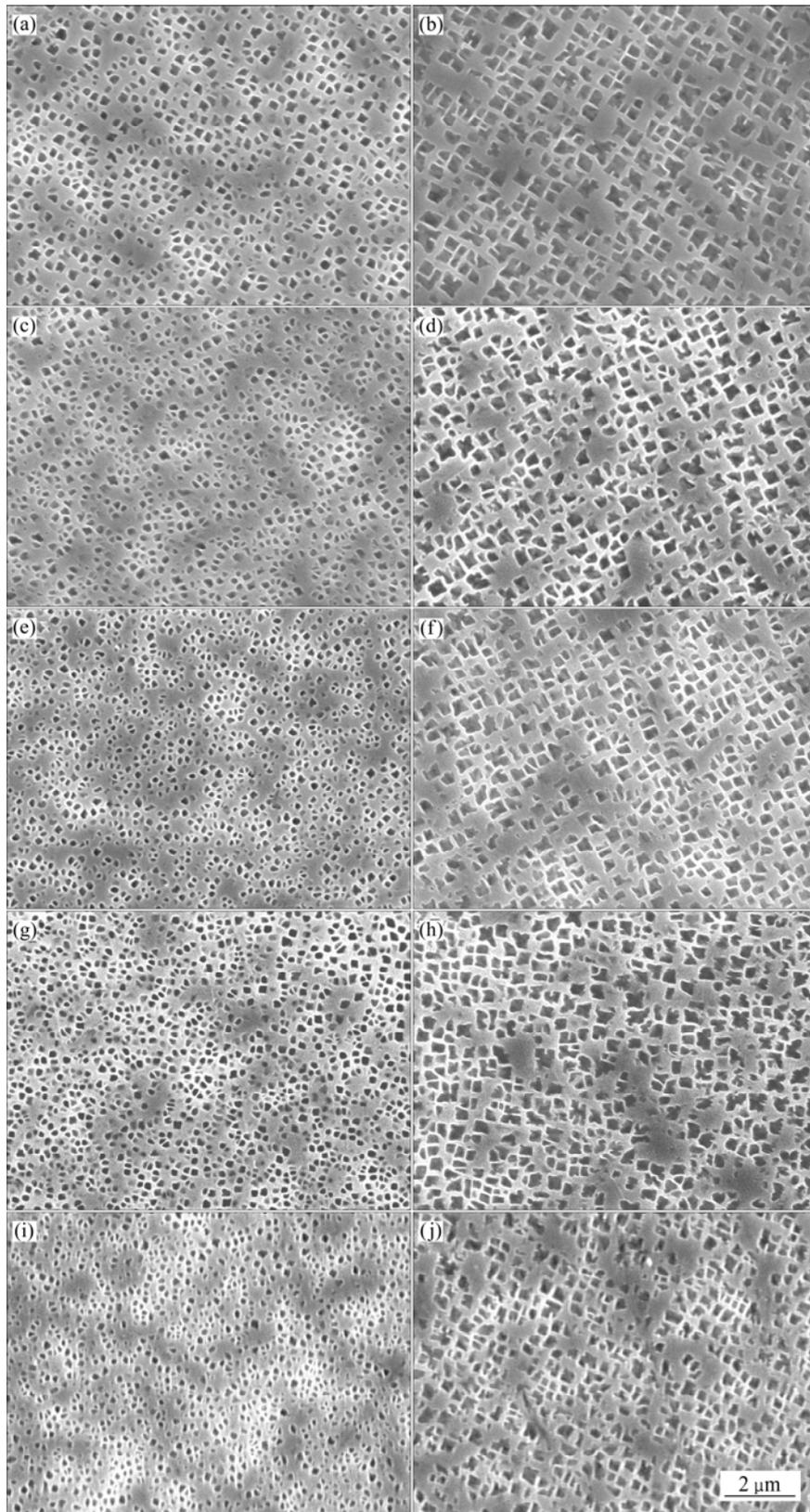


图4 不同抽拉速率下DZ445合金中的 γ' 相形貌

Fig.4 Morphologies of γ' phase in DZ445 alloy solidified at different withdrawal rates: (a) Dendrite core, 4 mm/min; (b) Interdendrite area, 4 mm/min; (c) Dendrite core, 5 mm/min; (d) Interdendrite area, 5 mm/min; (e) Dendrite core, 7 mm/min; (f) Interdendrite area, 7 mm/min; (g) Dendrite core, 9 mm/min; (h) Interdendrite area, 9 mm/min; (i) Dendrite core, 10 mm/min; (j) Interdendrite area, 10 mm/min

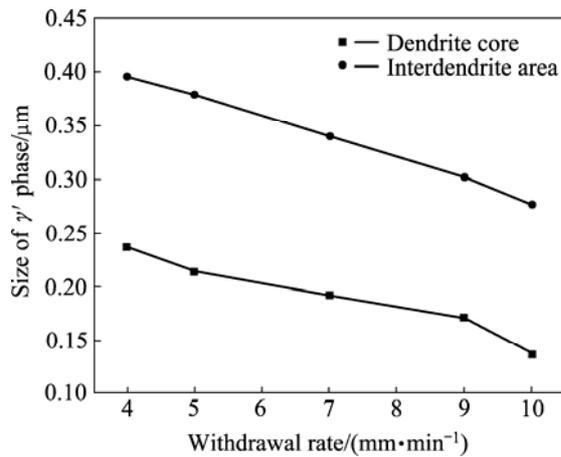


图 5 不同抽拉速率下 γ' 相尺寸的变化

Fig.5 Size change of γ' precipitates at different withdrawal rates

不一样, 枝晶干 γ' 相数量相对较少, 枝晶间 γ' 相数量较多, 而且枝晶干 γ' 相尺寸较小, 枝晶间 γ' 相较大; γ' 相无论在枝晶干和枝晶间均呈近似立方形; 随着抽拉速率增大, 枝晶干和枝晶间 γ' 相尺寸均减小; 枝晶间与枝晶干 γ' 相的尺寸差别, 随抽拉速率增大而略变小。

由于凝固过程枝晶轴和枝晶间存在微观凝固偏析, 在枝晶间富集了大量 Al、Ti 和 Ta 等 γ' 相形成元素(见表 2 和图 3), 使枝晶间溶质过饱和度大于枝晶干的, 因而枝晶间 γ' 相形核较早, 形核率大, 而且长大速度较快, 从而造成枝晶间 γ' 相尺寸较大。

2.2 抽拉速率对力学性能的影响

2.2.1 抽拉速率对拉伸性能的影响

抽拉速率对 DZ445 合金室温和 650 °C 拉伸性能的影响分别如图 6 和 7 所示。除抽拉速率最低的 4 mm/min

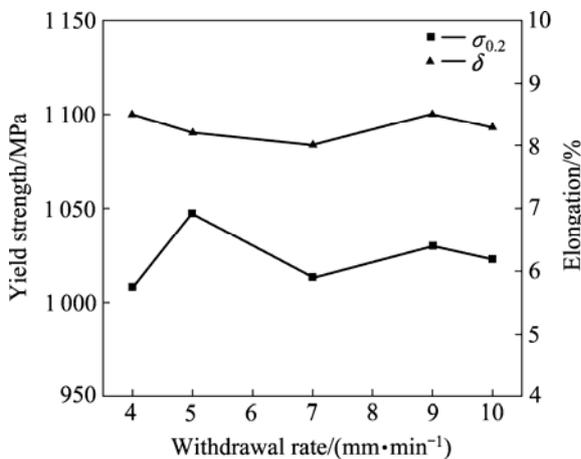


图 6 抽拉速率对 DZ445 合金室温拉伸性能的影响

Fig.6 Effects of withdrawal rate on tensile properties of DZ445 alloy at room temperature

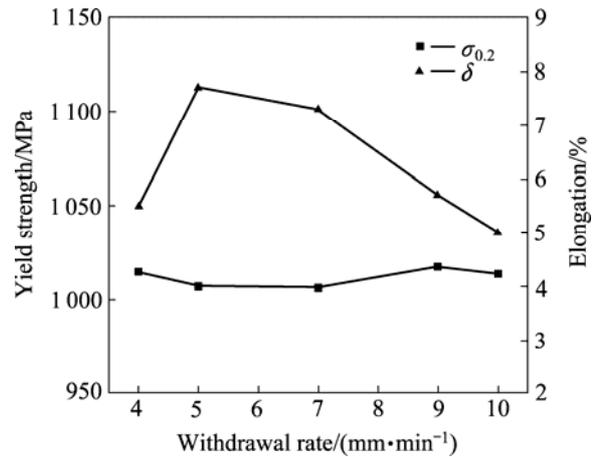


图 7 抽拉速率对 650 °C DZ445 合金拉伸性能的影响

Fig.7 Effects of withdrawal rate on tensile properties of DZ445 alloy at 650 °C

试样外, 其他抽拉速率条件下, 室温拉伸强度和塑性均比较接近(见图 6); 而对于 650 °C 拉伸实验, 抽拉速率对屈服强度影响不明显。当抽拉速率太低或太高, 伸长率均明显降低, 当抽拉速率为 5 mm/min 和 7 mm/min 时, 伸长率较大(见图 7)。

2.2.2 抽拉速率对持久性能的影响

从表 3 可见, 抽拉速率对 870 °C、370 MPa 和 980 °C、180 MPa 条件下持久时间有明显影响。对前一持久试验条件, 3 种抽拉速率下持久寿命和持久塑性都保持在较高水平, 彼此相差不大, 但抽拉速率为 7 mm/min 的试样, 性能稍低, 而对后一实验条件, 随抽拉速率从 5、7 mm/min 增大到 9 mm/min 时, 合金的持久寿命延长。对抽拉速率为 5 mm/min 的试样, 持久寿命明显较短, 不能被选用, 而抽拉速率为 9 mm/min 的试样, 持久时间稍长, 但在此抽拉速率下,

表 3 抽拉速率对 DZ445 合金持久性能的影响

Table 3 Effects of withdrawal rate on stress-rupture properties of DZ445 alloy

Temperature/ °C	Stress/ MPa	Withdrawal rate/ (mm·min ⁻¹)	Life/ h	Elongation/ %	Area reduction/ %
870	370	5	220	29.0	41.7
		7	185	20.0	36.1
		9	260	31.1	39.2
980	180	5	95	31.1	55.6
		7	125	24.5	34.1
		9	135	31.2	48.4

650 拉伸伸长率太低,因而也不能被选作最合适的抽拉速率。因此,从持久性能和拉伸性能及显微组织综合分析,7 mm/min 是最佳的抽拉速率。

2.3 定向凝固柱晶合金 DZ445 与等轴晶合金 K445 力学性能比较

在最佳抽拉速率 7 mm/min 条件下,制备 DZ445 合金拉伸和持久试样,测试室温和高温拉伸性能以及 980 的持久性能。

拉伸性能测试结果如表 4 和 5 所示。由表 4 和 5 可见:在选定的最佳抽拉速率和室温条件下,与同一成分的 K445 等轴晶合金相比,DZ445 柱晶合金的抗拉强度提高 15%,伸长率提高 21%;在 650 实验条件下,抗拉强度提高 11%,伸长率提高 7%。所以,采用抽拉速率为 7 mm/min 的定向凝固柱晶合金,室温和 650 拉伸性能与等轴晶合金 K445 的相比,有明显改善。

定向柱晶合金 DZ445 在 980 的持久性能提高更明显。100 h 的持久强度提高了 18 MPa,持久伸长率是 K445 合金的 3 倍多(见表 6)。在持久应力作用下,等轴晶合金 K445 裂纹从表面氧化了的晶界萌生,并沿垂直于拉应力的横向晶界扩展,造成沿晶断裂;而

定向柱晶合金 DZ445,由于消除了横向晶界,只有纵向晶界,推迟了蠕变裂纹的形成与扩展,因而持久时间明显延长,同时明显增加了第三阶段的蠕变应变,使持久伸长率大大增加。

3 结论

1) 随着抽拉速率的增加,合金的一次和二次枝晶臂间距逐渐减小,其数学表达式分别为 $\lambda_1 = 0.00516v^{-0.37}$ 和 $\lambda_2 = 0.00155v^{-0.31}$,枝晶间和枝晶干 γ' 相尺寸减小,且枝晶干上 γ' 相数量少于枝晶间的,其尺寸也小于枝晶间 γ' 相的;合金元素的偏析程度增加。

2) 抽拉速率对室温拉伸性能影响不大。抽拉速率太低或太高时,650 拉伸伸长率明显降低;在 980,180 MPa 条件下,持久寿命随抽拉速率增大而延长;当抽拉速率为 7 mm/min 时,持久性能、拉伸性能和微观组织达到综合平衡,为最佳抽拉速率。

3) 定向凝固合金 DZ445 与同成分等轴晶合金 K445 相比,具有更好的室温和高温拉伸性能以及持久性能。

表 4 DZ445 合金与 K445 合金的室温拉伸性能比较

Table 4 Comparison between tensile properties of DZ445 and K445 alloy at room temperature

Alloy	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ %
DZ445	1 265	1 010	8.0
K445	1 103	960	6.6

表 5 DZ445 合金与 K445 合金的 650 拉伸性能比较

Table 5 Comparison between tensile properties of DZ445 and K445 alloy at 650

Alloy	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ %
DZ445	1 310	905	7.3
K445	1 185	880	6.8

表 6 DZ445 合金与 K445 合金的 980 持久性能比较

Table 6 Comparison between stress-rupture properties of DZ445 and K445 alloy at 980

Alloy	Stress/MPa	Life/h	Elongation/%
DZ445	180	125	24.5
K445	162	117	7.3

REFERENCES

- [1] POLLOCK T M, TIN S. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: Chemistry, microstructure, and properties[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(2): 361-374.
- [2] 郭建亭. 高温合金材料学(下册)[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 862-882.
GUO Jian-ting. Materials science and engineering for superalloys() [M]. Beijing: Science Press, 2010: 862-882.
- [3] 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() [M]. Beijing: Science Press, 2010: 3-16.
- [4] VERSNYDER F L, SHANK M E. The development of columnar grain and single crystal high temperature materials through directional solidification[J]. Mater Sci Eng A, 1970, 6(4): 213-247.
- [5] ELLIOTT A J, TIN S, KING W T, HUANG S C, GIGLIOTTI M F X, POLLOCK T M. Directional solidification of large superalloy castings with radiation and liquid-metal cooling: A comparative assessment[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35(10): 3221-3231.
- [6] 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

- 响[J]. 材料工程, 2002(3): 36-39.
- 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]. Material Engineering, 2002(3): 36-39.
- [7] 蒋立武, 李树索, 邱自成, 韩雅芳. 抽拉速率对 Ni₃Al 基单晶合金 IC6SX 凝固组织和高温持久性能的影响[J]. 金属学报, 2009, 45(5): 547-552.
- JIANG Li-wu, LI Shu-suo, QIU Zi-cheng, HAN Ya-fang. Effects of withdrawal rate on microstructure and stress rupture properties of a Ni₃Al-based single crystal superalloy IC6SX[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(5): 547-552.
- [8] 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.
- [9] 刘维维, 唐定中. 抽拉速率对 DD6 单晶高温合金凝固组织的影响[J]. 材料工程, 2006(1): 16-18.
- LIU Wei-wei, TANG Ding-zhong. Effect of withdrawal rate on solidification microstructure of single crystal superalloy DD6[J]. Material Engineering, 2006(1): 16-18.
- [10] 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 spacing and microsegregation of directionally solidified superalloy DZ22 at various solidification rates[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1995, 31(7): 329-332.
- [11] 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.
- [12] QIN X Z, XU C, ZHOU L Z, GUO J T. Effects of withdrawal rate on the microstructure and mechanical properties of a DS Ni-base superalloy[C]// Proceedings of the 9th Liege Conference on Metals for Advanced Power Engineering. Leige, 2010.
- [13] KERMANPUR A, VARAHRAAM N, ENGILEHEI E. Directional solidification of Ni-base superalloy IN738LC to improve creep properties[J]. Mater Sci Technol, 2000, 16(5): 579-586.
- [14] MCLEAN M. 定向凝固高温材料[M]. 陈石卿, 陈荣章, 译. 北京: 航空工业出版社, 1988: 13.
- MCLEAN M. Directionally solidified high temperature materials[M]. CHEN Shi-qing, CHEN Rong-zhang, transl. Beijing: Aviation Industry Press, 1988: 13.
- [15] Feurer U, Wunderlin R. Fundamentals of solidification[M]. Aedermannsdorf, Switzerland Trans Tech Publications Ltd., 1986: 214.
- [16] 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.

(编辑 龙怀中)