

吹砂条件对 DZ125 合金再结晶和蠕变性能的影响

孙颖¹, 刘军和¹, 王福德¹, 张明俊²

(1. 空军装备部驻沈阳地区某军事代表室, 辽宁沈阳 110043;
2. 中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 辽宁沈阳 110043)

摘要: 在不同吹砂条件下对DZ125合金进行吹砂处理, 研究了吹砂强度、吹砂介质以及热处理工艺对合金再结晶及蠕变性能的影响。结果表明, 在相同的热处理条件及吹砂介质下, 合金的再结晶层厚度随吹砂强度的增加而加深。当吹砂介质和吹砂强度相同时, 标准热处理态合金的再结晶层最深, 其次是固溶态合金, 而均匀化处理合金的再结晶层厚度最小。在 0.4 MPa/1 min条件下, 吹湿砂样品的再结晶层最薄, 吹干砂样品次之, 而吹河砂样品再结晶层最厚。DZ125合金在980 °C/235 MPa下蠕变测试结果表明, 再结晶的试样的蠕变寿命明显低于未发生再结晶的标准热处理态合金, 而不同吹砂强度下DZ125合金的蠕变寿命相当, 说明当再结晶层超过某一厚度值后, 其在合金中的损伤作用相当。此外, 再结晶对壁厚2 mm到4 mm试样的蠕变性能并无明显的影响。

关键词: DZ125合金; 再结晶; 吹砂处理; 蠕变性能

作者简介:

孙颖(1980-), 女, 高级工程师, 主要研究方向为航空动力装备冶金过程的设计和研究。E-mail: 411542774@qq.com

中图分类号: TG132.3⁺²
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2023)12-1568-05

收稿日期:

2023-05-15 收到初稿,
2023-07-04 收到修订稿。

DZ125合金是我国自主研发的一种定向凝固高温合金, 因具备优异的综合性能而应用于航空发动机和燃气轮机叶片材料^[1-3]。在柱状晶高温合金制备的过程中, 型壳的收缩以及后续的机械清壳和吹砂等工序导致塑性变形, 从而引入残余应力。其中, 以吹砂过程中引起的塑性变形最为严重, 致使合金在热处理以及服役过程中易发生回复和再结晶^[4-5]。定向凝固柱晶高温合金成功地消除了横向的晶界, 但纵向的晶界依旧成为合金高温服役过程中较为薄弱的部位, 再结晶的出现可能会使叶片频繁发生断裂事故, 从而造成较大的损失^[6-7]。1999年至2002年, 多起定向凝固高温合金叶片的叶身裂纹和断裂失效均证明与再结晶相关, 这导致了大量发动机叶片被返厂检修以及飞机的停飞, 造成了较大的损失^[8]。

为了防止再结晶导致涡轮叶片在高温服役过程中的出现灾难性风险, 国内外研究者对单晶及柱晶的表面再结晶行为进行了广泛的研究, 主要集中在再结晶形成机制^[4, 9]、组织演变^[10-11]以及对蠕变性能的影响^[12-14]等方面。李鸿^[15]对DZ4合金研究时发现叶片经过吹砂处理后再进行固溶处理, 合金中产生了再结晶组织, 并且在给定的远小于70%的塑性变形下, 再结晶的温度在1 000~1 050 °C范围内。顾欣^[16]等在不同吹砂时间下对DZ125合金进行吹砂处理, 结果发现合金在热处理后再结晶层随着吹砂时间的延长不断加深, 但并未讨论吹砂强度和吹砂介质的影响。

本文主要研究吹砂强度、吹砂介质和热处理工艺对DZ125合金再结晶及再结晶后蠕变性能的影响, 旨在掌握再结晶缺陷的微观特征和形成机理, 评估其危害程度以便研究控制方法, 避免事故的重复发生并确保使用安全。

1 试验材料和方法

试验采用ALD型真空定向凝固炉制备了DZ125柱状晶高温合金试棒, 试棒在1 600 °C下精炼4~5 min, 预冷至1 520 °C浇注入型壳内, 静置1 min后, 以6 mm/min

的抽拉速度制备出尺寸为 $\Phi 16 \text{ mm} \times 190 \text{ mm}$ 的试棒。利用线切割机将铸态DZ125合金试棒加工成片状蠕变试样。蠕变试样采用M-2型预磨机磨去表面的氧化皮后使用2 000#砂纸终磨至表面光滑平整。以干砂为吹砂介质,分别在0.3、0.4和0.5 MPa的吹砂强度下对铸态的DZ125合金进行吹砂处理,吹砂时间为1 min;然后在0.4 MPa/1 min的条件下分别采用干砂、湿砂和河砂对DZ125合金进行吹砂处理,研究吹砂介质对DZ125合金再结晶的影响。不同吹砂介质下,湿砂的吹砂强度最低,干砂的吹砂强度略强于湿砂,而河砂的吹砂强度最大。在吹砂处理结束之后对合金分别进行A、B、C, 3种不同的热处理: A, 均匀化热处理: 1 180 °C/2 h; B, 固溶热处理: 1 180 °C/2 h+1 230 °C/3 h.; C, 标准热处理工艺: 1 180 °C/2 h+1 230 °C/3 h.+1 100 °C/4 h A.C.+870 °C/20 h。

将铸态和热处理态及吹砂后发生再结晶的DZ125合金试棒线切割成小试样,依次经过机械预磨、抛光和表面化学腐蚀后,用S-3400N型扫描电镜下观察样品发生再结晶后的表面。采用带有的标尺图片测定出再

结晶层的厚度。对标准热处理态和不同吹砂强度处理后的试样在980 °C/235 MPa下进行蠕变性能测试,相同条件下的性能测试选择三个试样进行并取平均值,绘制出蠕变曲线并得到合金的蠕变寿命,研究再结晶层厚度对DZ125合金蠕变性能的影响。标准蠕变试样的厚度为4 mm,同时采用标准试样厚度二分之一(2 mm)的薄试样进行相同条件下的蠕变试验,以确定试样厚度与再结晶后的蠕变性能之间是否存在关系。

2 结果与分析

2.1 吹砂强度及热处理工艺对 DZ125 合金再结晶行为的影响

图1为不同吹干砂强度下DZ125合金经1 180 °C × 3 h热处理后发生再结晶的微观组织形貌图,图1a-c的吹干砂强度分别为0.3、0.4和0.5 MPa。经统计,吹砂强度为0.3、0.4和0.5 MPa下合金的再结晶层厚度分别约为7、15和32 μm ,再结晶分布均较为均匀。可见,随着吹砂强度的增加,DZ125合金的再结晶层厚度不断增加,并且再结晶组织均为胞状再结晶。

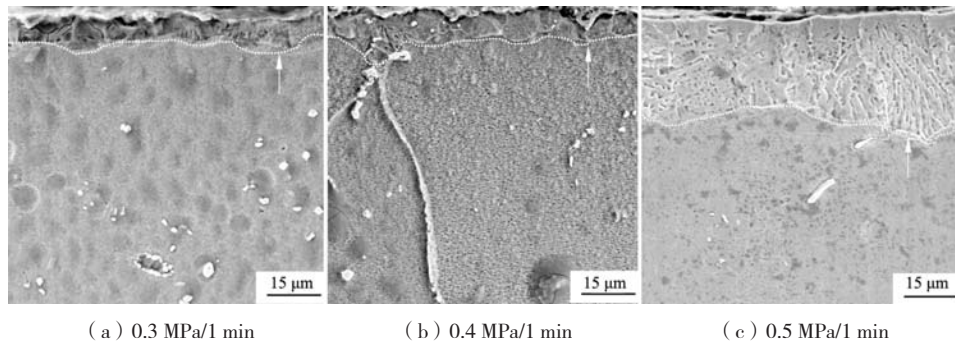


图1 DZ125合金在不同吹砂强度下均匀化热处理(1 180 °C × 3 h)后的组织

Fig. 1 Microstructure of DZ125 alloy after homogenization heat treatment under different blowing sand strength

图2为1 180 °C × 3 h+1 230 °C × 3 h固溶处理后不同吹干砂强度吹砂后DZ125合金表面发生再结晶的微观组织形貌。图2a-c中对应的吹干砂强度分别为0.3、0.4和0.5 MPa,吹砂时间为1 min。经统计,不同吹砂强度处理后的再结晶层厚度分别为21 μm (0.3 MPa), 29 μm (0.4 MPa)和37 μm (0.5 MPa)。随着吹砂强度的增加合金再结晶层不断变深,再结晶层厚度的分布情况都比较均匀。

由图1和图2可知,在均匀化(1 180 °C/3 h)和固溶热处理(1 180 °C/3 h+1 230 °C/3 h)后,合金表面的再结晶组织均随吹砂强度增大而增厚,主要是因为合金表面的塑性变形程度和变形层厚度随着吹砂强度的增大而加大,导致表面存在更大的残余应力,这成为再结晶形核和长大的驱动力,从而加快了再结晶形核和长大速率,进而导致再结晶层深度的增加^[5, 12]。

DZ125合金经标准热处理后发生再结晶的组织形

貌如图3所示。图3a-c的吹干砂强度分别为0.3、0.4、0.5 MPa,吹砂时间为1 min。吹砂强度为0.3、0.4、0.5 MPa时获得再结晶层厚度分别为45、60、100 μm 。合金发生再结晶后在表面形成一层细小的晶粒,细小晶粒下面还存在一层尺寸较大的晶粒。再结晶晶界处存在碳化物析出^[17]。

经标准热处理后合金的再结晶层厚度比1 180 °C/3 h和1 180 °C/3 h+1 230 °C/3 h。尺寸厚的原因是,经固溶处理后,由于时效处理的温度较高,时间较长,因此导致了再结晶晶粒的继续长大,从而加大了再结晶层的厚度^[5]。

2.2 吹砂介质对 DZ125 合金再结晶厚度的影响规律

为了研究吹砂介质对再结晶层厚度的影响,试验在0.4 MPa/1 min的吹砂条件下研究了不同吹砂介质对DZ125合金再结晶层厚度的影响(图4)。由图4可

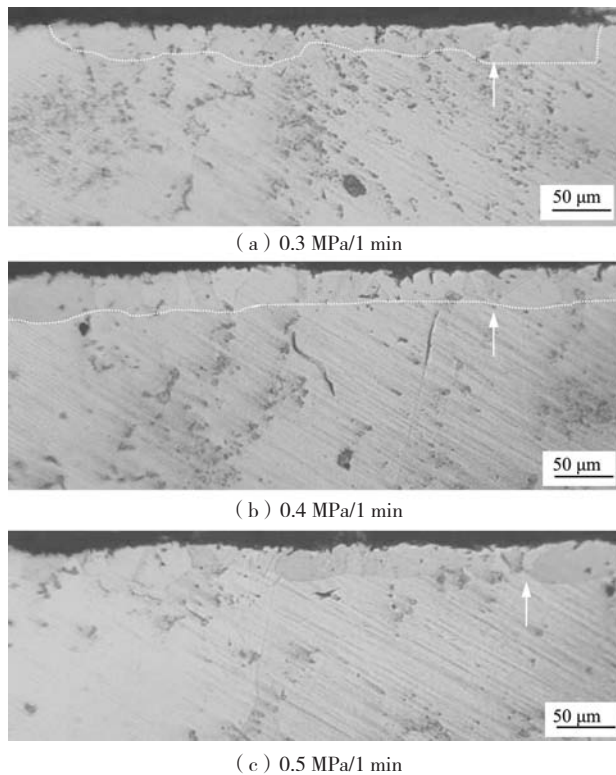


图2 DZ125合金在不同吹砂强度下固溶热处理后的组织
Fig. 2 Microstructure of DZ125 alloy after solution heat treatment under different blowing sand strength

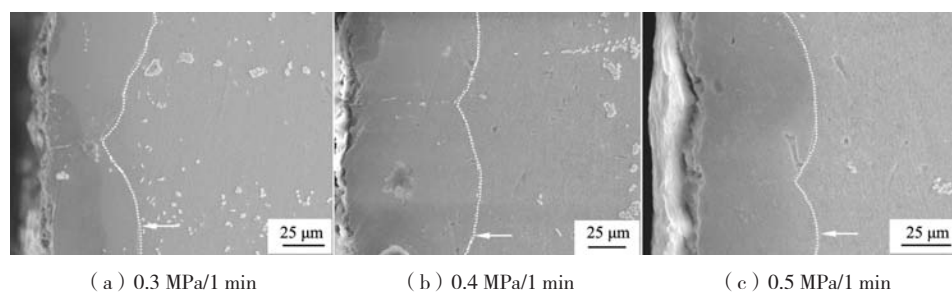


图3 不同吹砂强度下DZ125合金在标准热处理后的再结晶形貌

Fig. 3 Recrystallization morphologies of DZ125 alloy after standard heat treatment under different sand blowing strength

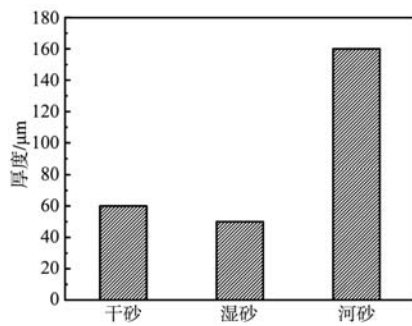


图4 吹砂介质对再结晶层厚度的影响

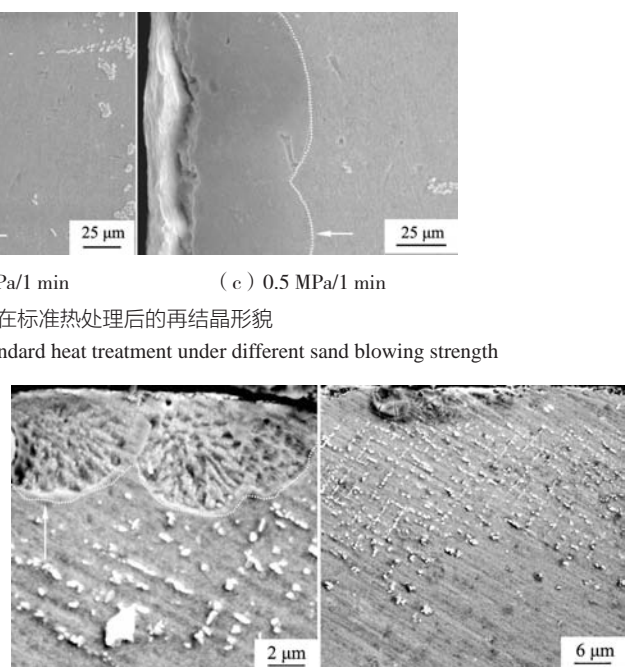
Fig. 4 Influence of sand blowing medium on the thickness of recrystallization layer

2.3 再结晶对合金蠕变性能的影响

图7为DZ125合金经不同吹干砂强度处理和未处理的试样在982 °C/235 MPa下的蠕变曲线, 由图可见, 未

知, 在相同吹砂强度和时间条件下, 经过相同的热处理后, 吹湿砂所得到的再结晶层厚度最浅, 约为50 μm, 干砂次之, 约为60 μm, 而吹河砂获得的再结晶层最深, 达到了160 μm。为了得到DZ125合金发生再结晶的温度, 将0.4 MPa/1 min下吹砂处理的试样分别在1 000、1 050、1 100、1 150、1 230 °C下保温处理4 h, 根据不同温度下合金中的再结晶情况确定合金发生再结晶的温度范围。图5为在1 000 °C/4 h保温处理后DZ125合金中的胞状再结晶组织, 可见在1 000 °C下再结晶只发生在表层的部分区域并且再结晶层的深度较浅(约为8 μm), 而表层的其余部分区域没有发生再结晶。此外, 在试样表面的滑移线附近发现了大量颗粒状碳化物的析出, 如图5a和b所示。

图6为1 050~1 230 °C下保温4 h后DZ125合金中的再结晶形貌。经1 050 °C/4 h保温后(图6a), 合金的表层出现了厚度约为30 μm的胞状再结晶组织, 而后随着温度的升高, 胞状再结晶层的厚度逐渐增加。在1 230 °C/4 h处理后(图6d), 合金表层出现等轴状再结晶晶粒, 再结晶区域厚度增大至80 μm左右。由以上的对比可以看出, 当热处理温度高于1 000 °C时, 合金中的部分区域将发生再结晶。因此可以认为DZ125合金发生再结晶的温度大于1 000 °C。



(a) 发生再结晶区域 (b) 未发生再结晶区域

图5 DZ125合金1 000 °C再结晶形貌

Fig. 5 Recrystallization morphology of DZ125 alloy at 1 000 °C

经吹砂处理的标准热处理态合金的蠕变寿命为83.7 h, 伸长率为27.2%, 而发生再结晶的合金试样的蠕变寿命仅为未吹砂处理合金的62%左右。有研究表明^[16, 18],

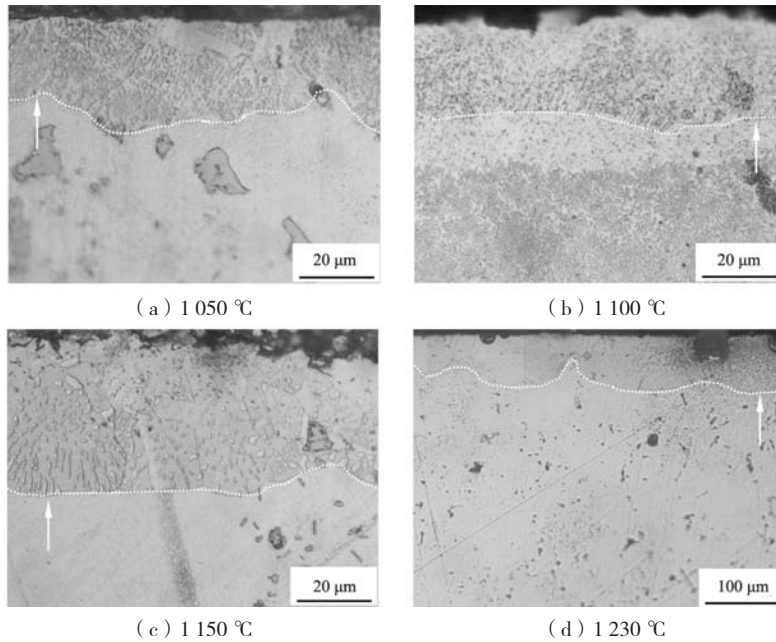


图6 DZ125合金经不同温度保温4 h后的再结晶形貌

Fig. 6 Recrystallization morphologies of DZ125 alloy after being held at different temperatures for 4 h

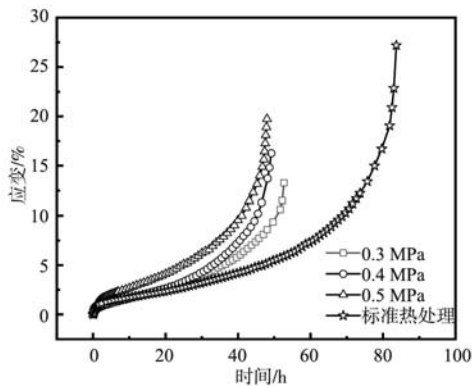


图7 DZ125合金经不同吹砂强度处理后在980 °C/235 MPa下的蠕变曲线

Fig. 7 Creep curves at 980 °C/235 MPa of DZ125 alloy treated with different sand blowing strength

合金在蠕变过程中的裂纹主要在与应力轴垂直的横向再结晶晶界处萌生，因此在高温蠕变期间，横向的再结晶晶界是合金中的薄弱部位，对合金的蠕变性能起到较大的破坏作用。

表1为发生再结晶的DZ125合金试样的蠕变性能，可以看出，当在不同的吹砂强度下进行吹砂处理后，虽然合金中的再结晶层厚度随着吹砂强度增加明显增厚，但是合金的蠕变寿命彼此相差不大，这说明当再结晶层厚度达到临界值后，其对合金蠕变寿命的降低作用甚微。为了确定再结晶是否会严重影响薄壁结构的蠕变性能，对更薄厚度的试样进行了相同条件下的蠕变性能测试。可以发现薄试样与厚试样的蠕变寿命相当，说明再结晶对壁厚2~4 mm试样的蠕变性能影响不大，这主要是因为再结晶层厚度远小于合金试样的

表1 不同吹砂强度下不同厚度的DZ125合金试样在980 °C/235 MPa下的蠕变性能

Table 1 Creep properties of DZ125 alloy samples with different thicknesses at 980 °C/235 MPa under different sand blowing strength

序号	吹砂条件	蠕变寿命/h	伸长率/%	试样厚度/mm
1	0.3 MPa, 1 min	52.7	13.3	4
		53.3	30.7	2
2	0.4 MPa, 1 min	49.7	16.3	4
		49.2	22.4	2
3	0.5 MPa, 1 min	48.0	19.7	4
		48.1	22.4	2

厚度，此外由于再结晶层达到一定厚度后对蠕变性能的影响已基本固定，因此试样变薄也未对蠕变性能产生过大影响^[15]。

3 结论

(1) 当吹干砂强度由0.3 MPa增加至0.5 MPa时，在相同的热处理条件下，DZ125合金的再结晶层厚度随吹砂强度的增加明显增厚。当吹砂条件为0.4 MPa/1 min时，吹湿砂后的再结晶层最薄，干砂次之，而河砂最厚。

(2) 在相同的吹干砂强度下，标准热处理态合金再结晶层最深，其次是固溶态合金，最后是均匀化处理的合金，说明高温长时间的热处理可以使再结晶晶粒长大。

(3) 发生再结晶的试样在980 °C/235 MPa下的蠕变寿命明显低于未发生再结晶的标准热处理态合金试

样,而不同吹干砂强度下,DZ125合金的蠕变寿命随着吹砂强度增加而略有下降,说明当再结晶层超过某

一厚度值后,其损伤作用与再结晶层厚度的相关性减弱。

参考文献:

- [1] 田宁.长寿命服役条件下DZ125合金的蠕变行为及影响因素[D].沈阳:沈阳工业大学,2014.
- [2] 牛倩,张鹏,李娇,等.新型定向凝固镍基高温合金DZ445中 γ' 相在高温下的演变规律[J].机械工程材料,2023,47(3):12-18.
- [3] 田宁,赵国旗,张萍,等.热处理对DZ125定向凝固合金组织结构与蠕变行为的影响[J].金属热处理,2022,47(8):188-194.
- [4] 熊继春,李嘉荣,赵金乾,等.单晶高温合金DD6再结晶晶界析出相特征及其形成机制[J].金属学报,2009,45(10):1232-1236.
- [5] 刘丽荣,浦一凡,彭志江,等.合金状态对DZ125定向凝固高温合金再结晶的影响[J].材料热处理学报,2015,36(S II):182-186.
- [6] AN W R, UTADA S, GUO X T, et al. Thermal cycling creep properties of a directionally solidified superalloy DZ125 [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 104 (9) : 269-284.
- [7] WANG S F, DITTA A, XU Y, et al. Effect of microstructures restoration on high temperature fatigue behavior of DZ125 superalloy [J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2021, 31 (4) : 633-640.
- [8] 张卫方,高威,赵爱国,等.定向凝固合金叶片的疲劳断裂分析[J].机械工程材料,2003(9):48-51.
- [9] 熊继春,李嘉荣,赵金乾,等.单晶高温合金DD6再结晶晶界析出相特征及其形成机制[J].金属学报,2009,45(10):1232-1236.
- [10] LIN S C, CHEN K, ZENG Q, et al. A method for increasing the supersolvus critical strain for recrystallization in single crystal superalloys [J]. Materials Research Letters, 2023, 11 (10) : 856-862.
- [11] 曲彦平,刘丽荣,祖国庆,等.DD6单晶高温合金热处理过程中的再结晶组织演化[J].材料工程,2011(8):14-18.
- [12] XIE G, WANG L, ZHANG J, et al. Influence of recrystallization on the high-temperature properties of a directionally solidified Ni-base superalloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39 (1) : 206-210.
- [13] ZHANG B, LU X, LIU D L, et al. Influence of recrystallization on high-temperature stress rupture property and fracture behavior of single crystal superalloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 551: 149-153.
- [14] MENG J, JIN T, SUN X F, et al. Effect of surface recrystallization on the creep rupture properties of a nickel-base single crystal superalloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527: 6119-6122.
- [15] 李鸿.DZ4合金定向凝固涡轮叶片再结晶试验研究[D].贵阳:贵州大学,2006.
- [16] 顾欣,杜洪强,于幸福,等.吹砂时间对定向凝固DZ125合金再结晶厚度及蠕变性能的影响[J].铸造,2017,66(3):228-233.
- [17] 史振学,刘世忠,赵金乾.C含量对单晶高温合金再结晶的影响[J].失效分析与预防,2019,14(1):8-13.
- [18] 孙传棋,陶春虎,习年生,等.无铅定向凝固高温合金及其过载机械损伤[J].机械工程材料,2001(8):4-7.

Effect of Sand Blowing Conditions on Recrystallization and Creep Properties of DZ125 Alloy

SUN Ying¹, LIU Jun-he¹, WANG Fu-de¹, ZHANG Ming-jun²

(1. A Military Representative Office of the Air Force Equipment Department in Shenyang, Shenyang 110043, Liaoning, China; 2. Shenyang Liming Aero-Engine (Group) Corporation Ltd., Shenyang 110043, Liaoning, China)

Abstract:

DZ125 alloy was treated with different sand blowing conditions. The effect of sand blowing strength, sand blowing medium and heat treatment regime on recrystallization and creep properties was studied in detail. The results showed that the thickness of recrystallization layer increases with the increase of sand blowing strength under the same heat treatment process and sand blowing medium conditions. Furthermore, the recrystallization layer of standard heat-treated alloy is the thickest, followed by solution-treated alloy, and the recrystallization layer of homogenization-treated alloy is the thinnest under the same conditions of sand blowing medium and strength. Under the condition of 0.4 MPa and 1 min, the recrystallization layer of wet sand is the thinnest, followed by dry sand, and river sand is the thickest. The creep test results of DZ125 alloy at 980 °C /235 MPa showed that the creep lives of recrystallized samples are obviously lower than that of standard heat-treated samples without recrystallization, and the creep lives of DZ125 alloy at different sand blowing strengths are similar, which indicates that the damage effect of recrystallization layer is similar when the thickness of recrystallization layer exceeds a certain value. Moreover, the recrystallization have no obvious effect on the creep properties of samples with wall thickness of 2 mm to 4 mm.

Key words:

DZ125 alloy; recrystallization; sand blowing; creep property