

# 表面再结晶晶粒对涡轮叶片 DZ4 合金疲劳性能的影响

马显锋<sup>1</sup>, 施惠基<sup>2</sup>

(1. 中山大学 中法核工程与技术学院, 广东 珠海 519082; 2. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084)

**摘要:** 目的 了解表面再结晶晶粒影响涡轮叶片 DZ4 合金疲劳失效的机制, 从而找出提高疲劳寿命的途径。方法 采用我国自主研发的涡轮叶片用定向凝固合金 DZ4。对合金表面采用不同压力(0.1、0.3、0.5 MPa)进行喷丸处理, 随后进行 1220 °C 的热处理, 合金表面塑性变形层发生再结晶形成再结晶晶粒。通过扫描电子显微镜等对不同条件下获得的再结晶微观组织进行观察分析。对于含表面再结晶层的 DZ4 试样和原始 DZ4 试样分别开展低周疲劳测试, 以获得其循环变形行为和低周疲劳寿命。结果 在较低的喷丸压力下(如 0.1 MPa), 表层再结晶组织以离散的再结晶晶粒出现。在较高喷丸压力下(0.3 MPa 和 0.5 MPa), 获得了完全的表面再结晶层, 而且随喷丸压力的增大, 再结晶层厚度增加。疲劳试验结果显示, 在较低喷丸压力(0.1 MPa)下获得的再结晶试样, 其疲劳寿命比原始 DZ4 合金的明显降低; 在 0.5 MPa 下获得的含再结晶层的 DZ4 试样, 具有比原始 DZ4 合金更高的疲劳寿命。结论 定向凝固合金 DZ4 表面的再结晶层并不一定会降低其疲劳寿命。在较低喷丸压力(如 0.1 MPa)及退火条件下形成的离散状再结晶晶粒对疲劳性能有害, 疲劳寿命降低明显。在较高喷丸压力(如 0.5 MPa)和退火条件下形成的致密细晶再结晶层, 可提高 DZ4 合金的低周疲劳性能。晶体塑性模型有助于理解和预测再结晶层对疲劳性能的影响。

**关键词:** 定向凝固合金; 再结晶; 表面处理; 涡轮叶片; 疲劳寿命; 晶粒尺寸; 晶体塑性

**中图分类号:** TG113.25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)04-0110-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.04.019

## Effect of Surface Recrystallized Grains on the Fatigue Performance of Turbine Blade DZ4 Alloy

MA Xian-feng<sup>1</sup>, SHI Hui-ji<sup>2</sup>

(1. Institut Franco-Chinois de l'Energie Nucléaire, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China;

2. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To understand the effect of recrystallization (RX) on the fatigue failure mechanism of turbine blade DZ4 alloy, so as to develop a method to improve the fatigue life. **Methods** The domestic turbine blade DZ4 alloy was used. DZ4 was shot peened under different pressures (0.1, 0.3, 0.5 MPa), and heat treated at 1220 °C to generate surface recrystallization. The micro-

收稿日期: 2016-01-31; 修订日期: 2016-04-05

Received: 2016-01-31; Revised: 2016-04-05

基金项目: 中山大学“百人计划”科研资助项目

Fund: Supported by the "One Hundred Talents" Research Funding Program of Sun Yat-Sen University

作者简介: 马显锋(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为固体力学、先进合金的微结构-性能关系、复杂环境下的可靠性。

Biography: MA Xian-feng (1984—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: solid mechanics, microstructure-property relationship of advanced alloys, reliability under complex environments.

structure of surface recrystallization was characterized by scanning electronic microscope (SEM). Fatigue testing was conducted on the raw DZ4 and surface recrystallized DZ4 alloy. **Results** Under lower pressure (e. g. 0.1 MPa), recrystallization occurred in form of discrete recrystallized grains, which remarkably reduced the fatigue life of DZ4. Under higher peening pressures (0.3 MPa and 0.5 MPa), fully recrystallized grains were observed and the recrystallized thickness increased with peening pressure. The fatigue life of RX-0.5 MPa sample could be longer than that of raw DZ4 alloy. **Conclusion** Recrystallization did not necessarily reduce the fatigue life of DZ4 alloy. Under lower shot peening pressure (e. g. 0.1 MPa) and heat treatment, the discrete RX was the most detrimental to fatigue life. Under higher shot peening pressure (e. g. 0.5 MPa), the compact recrystallized layer with fine grain size was beneficial to the fatigue life of DZ4. Crystal plasticity model was helpful in understanding and predicting the influence of RX on fatigue property.

**KEY WORDS:** directionally solidified alloy; recrystallization; surface treatment; turbine blade; fatigue life; grain size; crystal plasticity

航空发动机的涡轮叶片在高温恶劣环境下长时间高负荷服役,对材料的低周疲劳性能提出了很高的要求<sup>[1]</sup>。定向凝固合金由于其横向晶界被消除,使得其高温力学性能大幅提升,被广泛用于制造发动机的涡轮叶片。在实际发生断裂故障的涡轮叶片的失效分析中,工程人员检查到在断口裂纹源附近有等轴晶组织,经鉴定为再结晶(RX)晶粒<sup>[1]</sup>。文献一般认为,再结晶晶粒会引入横向晶界而成为高温下的潜在裂纹源,使得涡轮叶片的高温疲劳强度明显降低<sup>[2-3]</sup>。近年来,关于定向凝固/单晶合金的再结晶问题逐渐引起重视,在关于再结晶的形成机制和影响因素<sup>[1,4]</sup>、再结晶对于疲劳<sup>[5-7]</sup>和持久性能<sup>[8]</sup>影响方面已经开展了一些卓有成效的研究工作。然而,目前关于再结晶层对定向凝固合金的疲劳断裂机理尚缺乏深入系统的研究<sup>[1,5]</sup>,关于再结晶对疲劳性能的影响程度尚未形成定论<sup>[2,5,7]</sup>。因此,有必要考虑到不同再结晶晶粒组织的特点,有针对性地评价其对低周疲劳性能的影响,在此基础上探索提升涡轮叶片合金疲劳寿命的新途径。

## 1 试验

### 1.1 表面再结晶的制备

所用涡轮叶片定向凝固镍基合金 DZ4 的化学成分<sup>[9]</sup>(以质量分数计)为:0.14% C,9.5% Cr,6.0% Co,5.3% W,3.8% Mo,6.0% Al,1.8% Ti,0.02% B,Ni 余量。DZ4 合金疲劳试样为板状小试样,其标距段的横截面尺寸为 2.5 mm×0.4 mm。喷丸是涡轮叶片等航空构件常用的表面强化方式<sup>[8,10-12]</sup>,且在热处理过程中能够生成均匀的再结晶层便于分析<sup>[4]</sup>,因此本研究中采用喷丸来引入塑性变形<sup>[12]</sup>。试样表面采用砂纸打磨至 1200 号,然后对试样标距段采用钢

丸进行喷丸处理,达到 2×98% 的覆盖率。喷丸处理在气动式自动喷丸设备<sup>[12]</sup>上进行,采用的喷丸压力分别为 0.1、0.3 和 0.5 MPa。随后,对试样在 1220 ℃ 下热处理 4 小时,以模拟实际叶片的固溶处理过程。由于试样表面储存塑性变形能的不同,将会生成不同的再结晶组织。

### 1.2 组织观察与疲劳性能测试

1) 对于原始 DZ4 合金和热处理后的 DZ4 合金,采用砂纸机械打磨至 2000 号,抛光至 1 μm,随后采用腐蚀液(4 g CuSO<sub>4</sub>+20 mL HCl+20 mL H<sub>2</sub>O)对合金表面进行腐蚀,以便观察合金发生再结晶前后的微观组织,包括晶粒、晶界和碳化物等。采用光学显微镜和岛津扫描电镜对微观组织进行观察,并用扫描电镜附带的 EDS 能谱仪分析元素和成分。

2) 疲劳试验在岛津液压伺服疲劳试验机上进行,该试验机将加载台伸入到扫描电镜的真室内,从而能够在疲劳加载过程中进行扫描电镜原位观测<sup>[9]</sup>。样品为板状小试样,测试前试样上下表面用砂纸打磨至 2000 号,并腐蚀表面以方便观察微观组织损伤演化机制。疲劳试验采用应力控制模式,试验过程中的最大拉应力保持为 850 MPa,应力比  $R=0.1$ ,加载频率为 2 Hz。试验温度为 350 ℃,采用热电偶监控标距段的温度变化范围控制在正负 1 度以内。

## 2 结果及分析

### 2.1 喷丸压力对热处理后生成再结晶组织的影响

原始 DZ4 合金的扫描电镜微观组织见图 1a 所示。箭头所指为合金的定向凝固方向。发生再结晶后的 DZ4 微观组织如图 1b—d 所示。从图 1b 中可见,

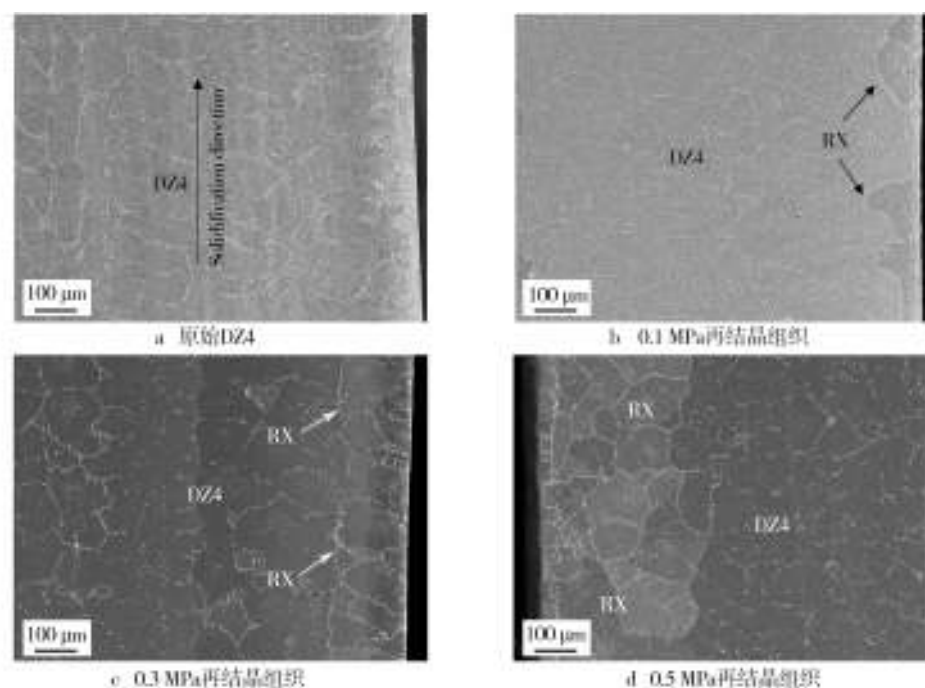


图1 DZ4 的扫描电镜微观组织

Fig. 1 SEM microstructures of DZ4 alloy: a) raw DZ4, b) DZ4-RX (0.1 MPa), c) DZ4-RX (0.3 MPa), d) DZ4-RX (0.5 MPa)

在 0.1 MPa 下喷丸变形后热处理生成的再结晶为离散的再结晶晶粒,且为单层晶粒。在 0.3 MPa 和 0.5 MPa 下喷丸变形后热处理生成连续的再结晶层,厚度分别为 150 ~ 200  $\mu\text{m}$  和 280 ~ 300  $\mu\text{m}$ ,且再结晶层由多层晶粒组成,如图 1c—d。这说明喷丸压力会直接影响所获得的再结晶微观组织。对于 0.1 MPa 喷丸处理,由于材料的塑性变形存储能不足,故而未能形成连续的再结晶组织。另外,本研究采用 1220  $^{\circ}\text{C}$  下进行热处理,此时  $\gamma'$  沉淀相已经完全溶解,因此图 1b—d 中未观察到胞状再结晶组织<sup>[13]</sup>。根据 DZ4 合金的再结晶规律<sup>[13]</sup>,在  $\gamma'$  沉淀相完全溶解的情况下,再结晶晶粒内微观组织(如  $\gamma'$  尺寸等)与基体 DZ4 接近。

## 2.2 再结晶对 DZ4 疲劳性能的影响

图 2 为不同再结晶的 DZ4 合金试样在循环载荷 (850 MPa,  $R=0.1$ ) 下的疲劳寿命与原始 DZ4 合金试样的比较。原始 DZ4 合金的疲劳寿命以相应的水平虚线表示,不同的再结晶试样以数据点表示,横坐标表示生成再结晶所采用的喷丸压力 (MPa)。可以看出,0.1 MPa 下喷丸和热处理所得离散再结晶晶粒对于疲劳寿命降低最为明显,仅为原始 DZ4 合金疲劳寿命的 20% ~ 25%。0.3 MPa 下喷丸和热处理所得连续再结晶层使得疲劳寿命降低约 40% ~ 50%。再结

晶层使得疲劳寿命降低,与文献中对 DZ4 的报导<sup>[2]</sup>一致,在定向凝固合金 DZ40M<sup>[3]</sup>中也观察到类似的结果。值得注意的是,随着喷丸压力的增大,再结晶试样的疲劳寿命呈增大的趋势。0.5 MPa 下喷丸和热处理所得连续再结晶试样的疲劳寿命超过了原始 DZ4 合金的寿命。这在定向凝固或单晶合金中未曾报导。在以往文献中,通常认为再结晶引入了横向晶界,将容易形成沿晶裂纹而使得疲劳寿命大幅降低<sup>[2,5]</sup>,这在部分失效的定向凝固涡轮叶片上也观察到<sup>[11]</sup>。

为便于了解不同温度的影响,本课题组研究了在 25  $^{\circ}\text{C}$  和 400  $^{\circ}\text{C}$  下原始 DZ4 合金和再结晶 DZ4 合金的

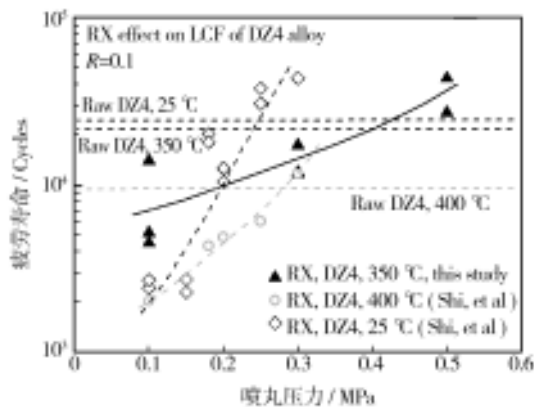


图2 再结晶对 DZ4 合金疲劳寿命的影响

Fig. 2 Effect of recrystallization on the fatigue life of DZ4 alloy



疲劳性能<sup>[6]</sup>。这部分疲劳数据结果也包含在图2中,再结晶疲劳数据点形成的趋势线分别用虚线表示,相应的原始 DZ4 合金平均寿命用水平虚线表示。可见,无论在 25 ℃ 还是 400 ℃ 下,随着喷丸压力的提高,所获得再结晶 DZ4 试样的疲劳寿命均有逐渐升高的趋势,并且最终超过了原始 DZ4 合金的疲劳寿命。这表明,在 25、350 和 400 ℃ 下,通过较高的喷丸压力和热处理获得的 DZ4 再结晶试样均有可能获得高于原始合金的疲劳寿命。从图2中也注意到,原始 DZ4 合金疲劳寿命随着温度的升高而降低。

尽管有关再结晶层提升疲劳寿命的现象在定向凝固/单晶合金中鲜见报导,但在具有较大晶粒的镍基合金 K417<sup>[14]</sup>中有观察到类似的结果。Wang D. L. 等<sup>[14]</sup>通过喷丸和热处理在 K417 合金表面引入 150  $\mu\text{m}$  厚度的再结晶层(再结晶晶粒约 80  $\mu\text{m}$ )而使得合金的疲劳寿命大幅提升,他们将这一增强归因于表层再结晶的晶粒细化、晶界的阻碍作用和喷丸再结晶后

的表面紧致性。这与此处 DZ4 再结晶试样(0.5 MPa)的疲劳性能提升机制是一致的。再结晶层的细小晶粒使得试样表面强度提升,再结晶晶界和孪晶晶界有利于提高疲劳裂纹扩展的阻力<sup>[15]</sup>。

对于不同微观结构的 DZ4 疲劳试样,在疲劳测试过程中对于疲劳裂纹的萌生特征进行了观察。图3为 350 ℃ 下各试样的典型疲劳裂纹特征。原始 DZ4 合金主要起裂于与应力方向垂直的枝晶间碳化物(图3a),裂纹达到一定程度后沿一定晶体学方向扩展,此处为 $\{111\}$ 滑移面<sup>[9]</sup>。对于 0.1 MPa 再结晶试样,再结晶晶界附近碳化物为裂纹萌生源(图3b)。对于 0.3 MPa 和 0.5 MPa 再结晶试样,加载过程未见表面裂纹萌生,断口分析表明裂纹从近表面的再结晶层缺陷处萌生(图3c 和 d),断面上可见明显的晶体学断裂特征。图3a—d 显示出在 350 ℃ 下 DZ4 合金以晶体学断裂模式为主,断裂主要发生在具有较高分切应力的 $\{111\}$ 滑移面上。

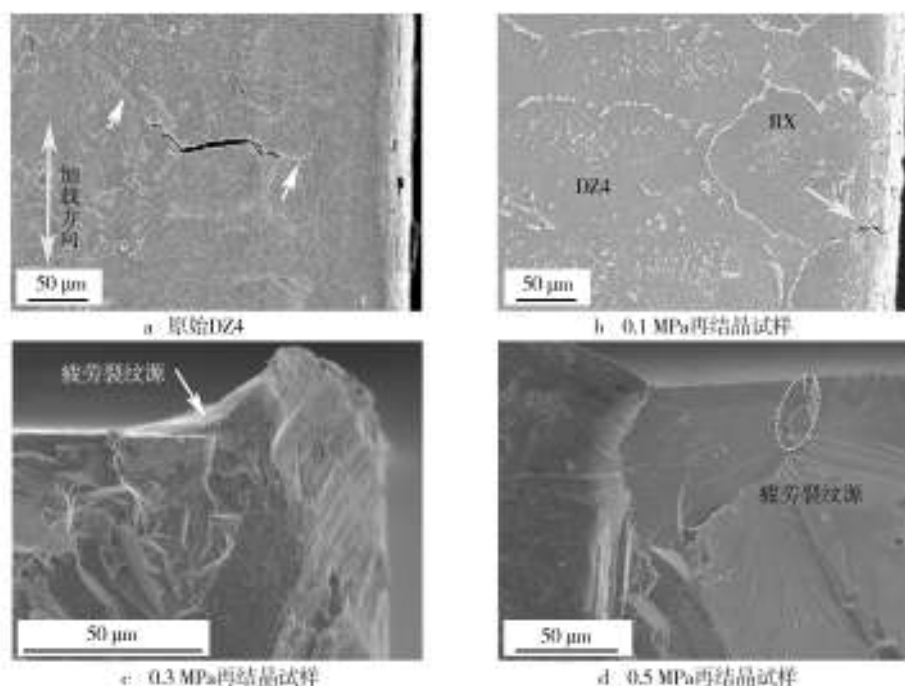


图3 疲劳断裂特征

Fig.3 Fatigue crack feature: a) raw DZ4, b) DZ4 with RX by 0.1MPa, c) DZ4 with RX by 0.3MPa, d) DZ4 with RX by 0.5 MPa

## 2.3 有限元分析

从以上的实验结果中注意到,在 25、350 和 400 ℃ 下,再结晶层对于定向凝固合金体系的疲劳寿命影响都非常明显,而且这一影响密切依赖于再结晶的微观结构特征。再结晶对于定向凝固合金的循环塑性变形的影响是分析其疲劳损伤和寿命预测的基础。

在含再结晶层的 DZ4 合金体系中,再结晶晶粒取向、晶粒大小、再结晶层厚度、碳化物等都会直接影响循环变形中的塑性应变分布,是影响疲劳断裂模式和疲劳寿命的关键因素。因此,需要一个能够考虑再结晶和定向凝固合金的各向异性弹塑性的模型,来对以上重要参数进行考查。晶体塑性模型基于晶体的滑移和孪生来考查塑性变形,可以直观地考虑晶粒取向和

塑性变形等之间的相互影响。因此,本研究采用的是率相关的有限元-晶体塑性模型<sup>[16-17]</sup>:

$$\dot{\gamma}^{(\alpha)} = \dot{\gamma}^0 \operatorname{sgn}(\tau^{(\alpha)} - x^{(\alpha)}) \left| \frac{\tau^{(\alpha)} - x^{(\alpha)}}{g^{(\alpha)}} \right|^k \quad (1)$$

其中,  $\dot{\gamma}^{(\alpha)}$ ,  $\tau^{(\alpha)}$ ,  $g^{(\alpha)}$ ,  $x^{(\alpha)}$ ,  $k$  分别是滑移系  $\alpha$  上的剪切率、分切应力、滑移强度、背应力和敏感指数。滑移强度具有如下的硬化形式:

$$g^{(\alpha)}(\gamma) = \sum_{\beta} h_{\alpha\beta}(\gamma) + \dot{\gamma}^{(\beta)} \quad (2)$$

其中,  $h_{\alpha\beta}(\gamma)$  为硬化模量,会随着剪切应变  $\gamma$  进行演化。具体形式参见文献<sup>[16-17]</sup>。

对含再结晶晶粒的 DZ4 合金进行模拟,见图 4。材料参数选自性能相似的镍基合金,如 PWA1480<sup>[18]</sup>。在拉-拉循环载荷 (850 MPa,  $R=0.1$ ) 的作用下,考查图 4a 体系中的应力和应变分布。对于面心立方晶体,由于 [001] 方向弹性模量最低<sup>[5]</sup>,再结晶晶粒通常具有与基体 [001] 不同的取向,这将会导致再结晶晶粒内具有较高的应力,尤其是再结晶晶界附近以及

再结晶-基体界面附近区域,如图 4b 所示。另外,再结晶晶界处的碳化物会引起明显的局部较高的循环塑性应变,如图 4c 所示,这是图 3b 中再结晶晶界处的碳化物开裂成为疲劳源而降低疲劳寿命的主要原因。对于 0.3 MPa 和 0.5 MPa 的情况,由于再结晶晶粒细化,根据 Hall-Petch 关系<sup>[19]</sup>,公式 (1) 中的滑移系强度  $g^{(\alpha)}$  将会提高,这将会导致表面再结晶层内循环塑性应变  $\Delta\gamma$  的降低,有利于延缓表面再结晶层内的裂纹萌生和扩展。另一方面,再结晶的晶体取向不同仍然可能导致循环塑性应变的局部化。因此,对于连续再结晶层,以上两种机制的竞争决定最终体系中的循环塑性应变演化情况,从而决定某种再结晶组织是否会降低或提升 DZ4 合金疲劳寿命。目前,该晶体模型已加入疲劳参数 FIP 模块,将在后续研究中用于考查微结构和加载因素对于再结晶-定向凝固合金体系的疲劳寿命的影响。

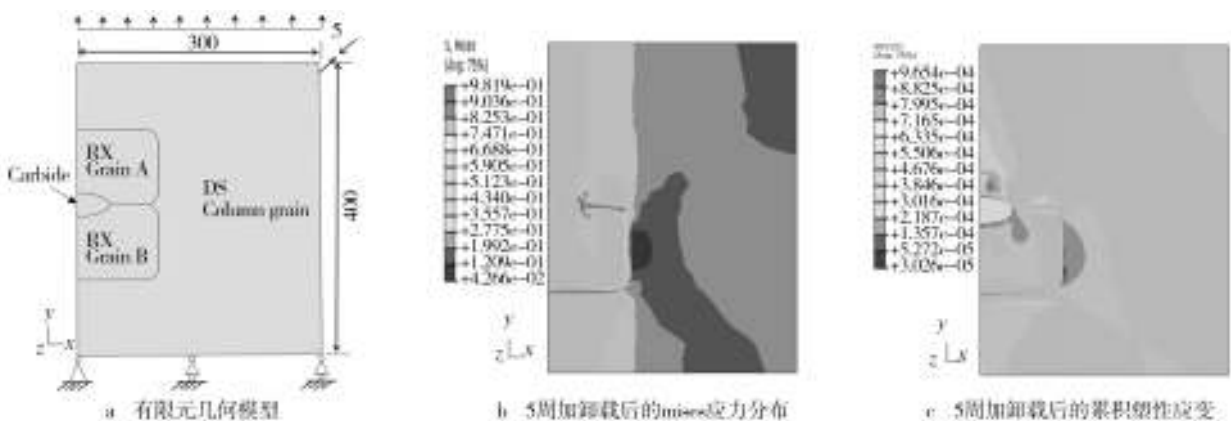


图4 有限元模拟

Fig.4 Finite element simulation: a) geometry model, b) Mises stress after 5 cycles, c) accumulated plastic  $\gamma$  after 5 cycles

### 3 结论

1) 表面喷丸处理后的 DZ4 合金在 1220 °C 固溶处理过程中会发生表面再结晶。再结晶形态和厚度依赖于喷丸压力:在较低喷丸压力 (0.1 MPa) 下热处理后生成再结晶为成非连续晶粒,在较高喷丸压力 (0.3 MPa 和 0.5 MPa) 下变形后热处理生成连续再结晶层,厚度随压力的增大而增加。

2) 离散再结晶晶粒 (0.1 MPa 喷丸和热处理) 对 DZ4 合金疲劳性能降低非常明显。0.3 MPa 喷丸和热处理后的连续再结晶层使疲劳性能降低约 30% ~ 50%, 0.5 MPa 喷丸和热处理后的再结晶使 DZ4 合金

疲劳性能获得提升。

3) 在 25、350 和 400 °C 下, DZ4 再结晶试样均有可能获得高于原始合金的疲劳寿命,这一疲劳性能的提升与再结晶层的晶粒细化、晶界/孪晶界对裂纹阻碍、表面紧致性增强有关。晶体塑性模型可用于分析再结晶晶粒微结构特征和碳化物等重要因素对疲劳寿命的影响,有助于解释以上实验现象。

### 参考文献

- [1] ZHANG W F, LI Y J, LIU G Y, et al. Recrystallization and Fatigue Failure of DS Alloy Blades[J]. Engineering Failure Analysis, 2004, 11(3): 429—437.

- [2] JIA B, LI C G, LI H Y. Influence of Recrystallization Layer at Surface on Fatigue Behaviors of Directionally Solidified DZ4 Superalloy[J]. *Material Engineering*, 2008(6): 64—71.
- [3] ZHAO Y, WANG L, LI H Y, et al. Effects of Recrystallization on the Low Cycle Fatigue Behavior of Directionally Solidified Superalloy DZ40M[J]. *Rare Metals*, 2008, 27(4): 425—428.
- [4] ZHANG B, TAO C H, LU X, et al. Recrystallization of Single Crystal Nickel-based Superalloy[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2009, 16(6): 75—79.
- [5] MA X F, SHI H J, GU J L, et al. Influence of Surface Recrystallization on the Low Cycle Fatigue Behavior of a Single Crystal Superalloy[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2015, 38(3): 340—351.
- [6] SHI H J, MA X F, JIA D W, et al. The Analysis on the Low Cycle Fatigue Behavior of a Directionally Solidified Superalloy with Recrystallized Surface Layers[J]. *Advanced Materials Research*, 2008, 44—46: 43—50.
- [7] BÜRGEL R, PORTELLA P D, PREUHS J, et al. Superalloys 2000[C]//Warrendale: TMS Publisher, 2000: 229—238.
- [8] 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.
- [9] MA X F, SHI H J, GU J L. In-situ Scanning Electron Microscopy Studies of Small Fatigue Crack Growth in Recrystallized Layer of a Directionally Solidified Superalloy[J]. *Materials Letters*, 2010, 64(19): 2080—2083.
- [10] GAO Y K, LU F, YIN Y F, et al. Effects of Shot Peening on Fatigue Properties of 0Cr13Ni8Mo2Al Steel[J]. *Materials Science and Technology*, 2003(19): 372—374.
- [11] 何柏林, 邓海鹏. 表面完整性研究现状及发展趋势[J]. *表面技术*, 2015, 44(9): 140—146.
- HE Bo-lin, DENG Hai-peng. Research Status and Development Trend of Surface Integrity[J]. *Surface Technology*, 2015, 44(9): 140—146.
- [12] 高玉魁. 表面完整性理论与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- GAO Yu-kui. *Surface Integrity Theory and Its Application* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [13] WANG D L, LI J B, JIN T, et al. Recrystallization of Ni Base Superalloy DZ4[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2006, 42(2): 167—171.
- [14] WANG D L, LI J B, JIN T, et al. Fatigue-life Improvement of K417 Alloy by Shot Peening and Recrystallization[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2006, 35(8): 1294—1298.
- [15] MA X F, SHI H J. In situ SEM Studies of the Low Cycle Fatigue Behavior of DZ4 Superalloy at Elevated Temperature: Effect of Partial Recrystallization[J]. *International Journal of Fatigue*, 2014(61): 255—263.
- [16] PEIRCE D, ASARO R J, NEEDLEMAN A. Material Rate Dependence and Localized Deformation in Crystalline Solids[J]. *Acta Metallurgica*, 1983, 31(12): 1951—1976.
- [17] MAYEUR J R, MCDOWELL D L. A Three-dimensional Crystal Plasticity Model for Duplex Ti-6Al-4V[J]. *International Journal of Plasticity*, 2007, 23(9): 1457—1485.
- [18] FENG L, ZHANG G, ZHANG K S. Discussion of Cyclic Plasticity and Viscoplasticity of Single Crystal Nickel-based Superalloy in Large Strain Analysis: Comparison of Anisotropic Macroscopic Model and Crystallographic Model[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2004, 46(8): 1157—1171.
- [19] HALL E O. The Deformation and Ageing of Mild Steel: Discussion of Results[J]. *Proceedings of the Physical Society of London Section B*, 1951, 64(381): 747—753.

(上接第 98 页)

- [11] HUBBARD P, DOWEY S J, DOYEL E, et al. Influence of Bias and in situ Cleaning on Through Cage (TC) or Active Screen Plasma Nitrided (ASPN) Steels[J]. *Surface Engineering*, 2006, 22(4): 243—247.
- [12] GALLO S C, DONG H S. Study of Active Screen Plasma Processing Conditions for Carburising and Nitriding Austenitic Stainless Steel[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2009, 203: 3669—3675.
- [13] CORUJEIRA GALLOA S, DONG H. New Insights into the Mechanism of Low-temperature Active-screen Plasma Nitriding of Austenitic Stainless Steel[J]. *Scripta Materialia*, 2012, 67: 89—91.
- [14] AHANANGARANI S H, MAHBOUBI F, SABOUR A R. Effects of Various Nitriding Parameters on Active Screen Plasma Nitriding Behavior of a Low-alloy Steel[J]. *Vacuum*, 2006, 80: 1032—1037.
- [15] SHEN L, WANG L, WANG Y Z, et al. Plasma Nitriding of AISI 304 Austenitic Stainless Steel with Pre-shot Peening[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2010, 204: 3224—3227.