

# 孔几何结构对DD6单晶高温合金氧化行为影响

胡春燕<sup>1,2,3</sup>, 刘新灵<sup>1,2,3</sup>, 陈星<sup>1,2,3</sup>, 刘昌奎<sup>1,2,3</sup>, 陶春虎<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

(2. 航空材料检测与评价北京市重点实验室, 北京 100095)

(3. 中国航空发动机集团 材料检测与评价重点实验室, 北京 100095)

**摘要:** 利用场发射扫描电子显微镜 (FESEM)、能谱仪 (EDS)、X射线衍射 (XRD) 以及 ABAQUS 有限元等方法, 研究了孔几何结构对 DD6 单晶高温合金在 1050 °C 氧化行为的影响。结果表明: 在 45° 和 90° 两种角度下, 平均氧化速率随着气膜孔间距的变化规律较一致, 均为  $0.75 > 0.95 > 0.55 > 0.39$  mm, 气膜孔间距对单晶合金氧化行为的影响比孔角度的影响更为显著; 在相同气膜孔间距下, 45° 比 90° 的氧化程度相对严重一些。有限元分析表明, 孔内壁氧化层生长主要受温度场影响, 而孔表面氧化层生长主要受氧化膜脱落应力的影响; 随着气膜孔间距增大, 应力抵消区域逐渐减小, 脱落应力不断增大, 并在 0.75 mm 时达到峰值, 此时氧化膜脱落最为严重, 峰值点之后又呈下降趋势。

**关键词:** 单晶高温合金; 电火花加工; 气膜孔间距; 氧化行为; 脱落应力

中图分类号: TG132.3<sup>+</sup>3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2026)06-1573-10

## 1 引言

随着航空发动机向高流量比、高推重比和高涡轮进口温度方向发展, 在涡轮叶片叶身表面特别是进气边设计密布气膜孔成为提高冷却效率的有效途径; 但气膜孔在加工过程中会引入应力集中等不利因素, 破坏叶片的结构完整性, 极易造成叶片气膜孔结构失效<sup>[1-2]</sup>。

国内对于涡轮工作叶片气膜冷却孔的加工主要采用电火花、电液束和飞秒激光等方法。电火花打孔相对传统激光打孔再铸层厚度较薄, 打孔效率较高, 但不可避免会产生再铸层<sup>[3]</sup>。后期国内发展了电液束打孔, 但加工成本较高<sup>[4]</sup>。另外, 在飞秒激光工艺方面开展了一些基础性研究, 然而飞秒激光加工定向凝固高温合金和单晶高温合金的结果不及预期<sup>[5]</sup>。

目前, 国内外学者针对涡轮叶片气膜孔的研究大多集中在孔的分布、几何构型对涡轮叶片冷却和力学性能的影响。李广超等<sup>[6]</sup>研究了气膜孔布局对前缘气膜冷却效率的影响, 分析了在不同动量比下气膜孔间距和径向角变化对径向平均气膜冷却效率的影响。Schmidt 等<sup>[7]</sup>比较了不同结构的复合斜孔在孔间距与直径比 ( $P/D$ ) 为 3.0 和 6.0 时, 气膜冷却效率随动量通量比  $I$  的变化规律。杨卫华等<sup>[8]</sup>研究了气膜孔几何结构及孔排形式对流量系数的影响。卿华等<sup>[9]</sup>分别对带孔和不带孔的镍基单晶合

金平板试样进行了蠕变性能试验研究。Lukas 等<sup>[10]</sup>对不同取向的光滑和带孔的 CMSX-4 单晶合金试样进行了蠕变试验。李磊等<sup>[11]</sup>基于晶体塑性理论研究了不同孔间距下镍基单晶叶片气膜孔的弹塑性行为。

然而, 气膜孔几何结构的设计还直接影响孔的氧化速率, 有的孔径明显变大甚至出现了串孔的现象, 已不能简单用单晶高温合金基体本身的氧化行为来解释。国内外对镍基高温合金的高温氧化行为及不同加工工艺对氧化行为的影响做了大量的研究, 主要集中在合金基体的抗氧化行为, 如高温合金表面氧化、有/无应力施加等基础上, 获得了氧化产物的化学成分及氧化机理等。Younes 等<sup>[12]</sup>研究了两种镍基单晶合金 RR3000 和 CMSX-4 在 1100 °C 时的高温氧化行为。Huang 等<sup>[13]</sup>研究了 DD32 和添加了 4%Re 元素 DD32M 镍基单晶合金在 900, 1050 和 1100 °C 的氧化行为。刘春廷等<sup>[14]</sup>研究了一种含铼单晶高温合金的恒温氧化行为。杨一哲等<sup>[15]</sup>研究了不同激光加工工艺的 DD406 单晶高温合金气膜孔高温氧化行为。

而有关气膜孔几何结构设计对单晶高温合金氧化行为的影响研究鲜有报道, 为此, 本实验选取 DD6 单晶高温合金为研究对象, 采用电火花加工工艺, 模拟真实叶片前缘部位的几何结构, 对比分析不同角度、气膜孔间距对单晶高温合金氧化行为的影响。

收稿日期: 2025-11-18

基金项目: 国家科技重大专项 (J2019-VI-0022-0138); 北京航空材料研究院重点型号攻关基金 (KJSZ240769)

作者简介: 胡春燕, 女, 1983 年生, 博士, 高级工程师, 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095, 电话: 010-62496238, E-mail: fachcy@163.com

## 2 实验

实验材料为北京航空材料研究院提供的 DD6 单晶合金,试样晶体取向为[001],按照标准制度进行热处理,所有毛坯均采用 X 光劳厄衍射法进行晶向检查,其偏角控制在 10°之内。名义化学成分(质量分数,%)为:Cr 4.3, Co 9, Mo 2, W 8, Ta 7.5, Re 2, Nb 0.5, Al 5.6, Hf 0.1, C 0.006,其余为 Ni。

氧化板型试样的尺寸形貌如图 1 所示,试样尺寸为 30 mm×10 mm×1.5 mm,每个试样上孔的数量均为 43。采用电火花工艺进行加工,孔的角度为 45°和 90°,设计 4 种气膜孔间距分别为 0.39、0.55、0.75 和 0.95 mm,孔直径均为 0.4 mm。

恒温氧化试验采用静态增重法,试验温度为 1050℃,氧化时间为 600 h,每隔 25 h 取出样品观察和称重后,再放入炉中继续进行氧化和称重,每个数据为 3 个平行试样氧化增重的平均值。

利用 NOVA NANOSEM 450 型的场发射扫描电子显微镜(FESEM)对不同试样氧化膜表面及截面形貌进行观察和分析,并用能谱仪(EDS)和 X 射线衍射(XRD)对氧化产物进行分析。结合 ABAQUS 有限元软件建立氧化试验模型,并分析不同孔分布对 DD6 单晶合金氧化行为的影响。

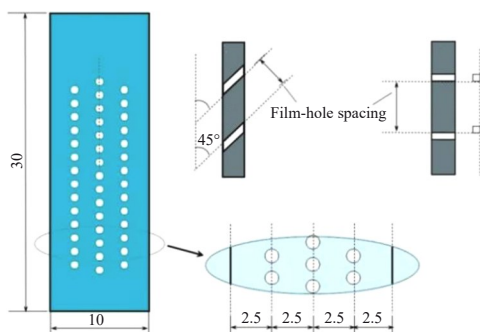


图 1 带气膜孔结构氧化试样的示意图

Fig.1 Schematic diagram of the oxidized sample with film-holes

## 3 结果与分析

### 3.1 氧化动力学曲线

孔角度为 45°和 90°,不同气膜孔间距的单晶试样在 1050℃下的氧化动力学曲线见图 2a 和图 2b。可以看出,氧化动力学曲线基本遵从抛物线规律,氧化初期增重较快,随着氧化过程的持续进行,氧化增重变得缓慢,但随着孔表面和孔内壁的氧化膜不断发生脱落,氧化增重随着时间的延长仍然在不断增加。而孔角度为 45°、气膜孔间距为 0.75 mm 试样在 500 h 之后出现氧化增重下降的现象,可能是由于氧化皮的脱落量较大,脱落量大于新生成的氧化产物,文献[16]中也出现了类似现象。

根据 HB 5258-2000《钢及高温合金的抗氧化性测定试验方法》<sup>[17]</sup>,平均氧化速率  $K'$  和氧化皮脱落量  $G'$  的计算公式为:

$$K' = \frac{m_4 - m_5}{600S} \quad (1)$$

$$G' = (m_4 - m_6 - \Delta m) / S \quad (2)$$

式中,  $m_4$  为试验后试样与容器的总质量;  $m_5$  为 25 h 试验后试样与容器总质量;  $m_6$  为试验前试样与容器总质量;  $\Delta m$  为试验前后试样的质量差;  $S$  为试样表面积。

不同试样的平均氧化皮脱落量和氧化速率曲线分别见图 3a 和图 3b。可以看出,在两种不同角度下,平均氧化皮脱落量和氧化速率随着气膜孔间距的变化规律较一致,均为 0.75>0.95>0.55>0.39 mm,其中 0.95 与 0.55 mm 的氧化程度较接近;相对而言,气膜孔间距对 DD6 单晶合金氧化程度的影响比孔角度的影响更为显著。

### 3.2 氧化产物的组成与分析

#### 3.2.1 氧化膜表面形貌

图 4 和图 5 分别为不同孔分布单晶试样的氧化膜表面形貌。可以看出,孔角度为 45°和 90°,气膜孔间距为 0.75 mm 的试样氧化程度均相对较严重,试样表面氧化膜脱落严重,在入口侧孔边缘的氧化膜较厚,氧化物颗粒尺寸较大。

孔角度为 45°、气膜孔间距为 0.75 mm 的试样氧化膜

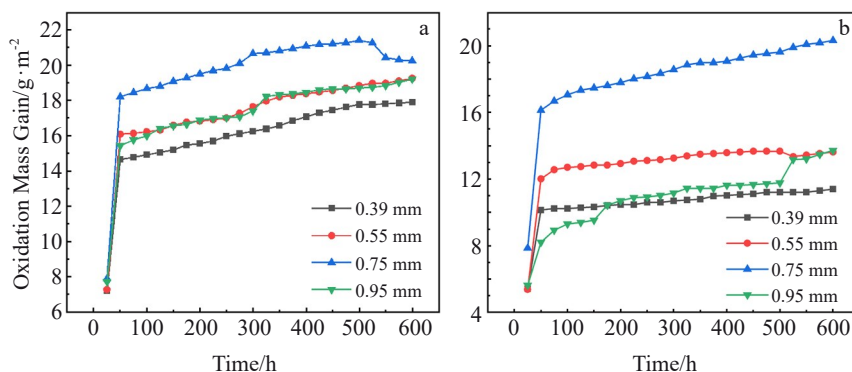


图 2 孔角度为 45°和 90°不同气膜孔间距试样在 1050℃下的氧化动力学曲线

Fig.2 Oxidation kinetics curves of samples with different film-hole spacing at 1050 °C: (a) punching angle of 45°; (b) punching angle of 90°

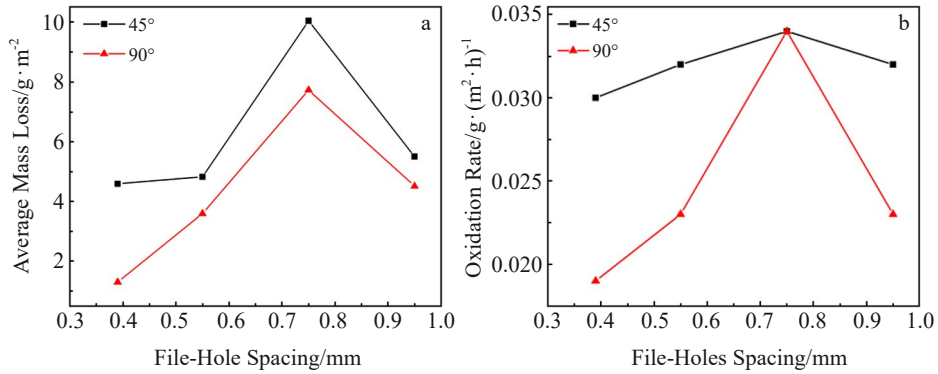


图3 不同试样的平均氧化皮脱落量和氧化速率

Fig.3 Average mass loss of oxide scale detachment (a) and oxidation rate (b) of samples with different film-hole spacing

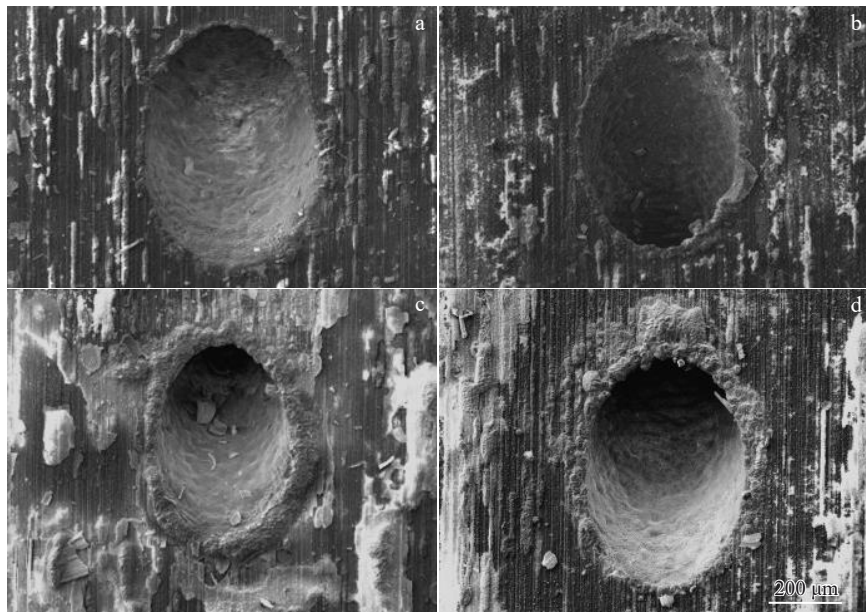


图4 孔角度为45°不同气膜孔间距试样的表面氧化膜形貌

Fig.4 Surface oxidation morphologies of samples with different film-hole spacing at punching angle of 45°: (a) 0.39 mm, (b) 0.55 mm, (c) 0.75 mm, and (d) 0.95 mm

表面形貌见图6a。结合EDX分析可知,表面凸起的氧化物为尖晶石氧化层 $\text{NiCr}_2\text{O}_4$ 和少量的 $\text{NiO}$ ,在氧化严重处有部分致密的 $\text{NiO}$ 生成(图6b);孔边缘氧化物高倍下呈尖晶石状,主要为 $\text{NiO}$ (图6c);最外层氧化层有少量 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,表明氧化膜生长的规律为先生成表层氧化物 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,在此基础上进一步生成三层氧化物(图6d)。在此基础上继续氧化,表层氧化物逐渐增多,由于热膨胀应力出现氧化膜脱落现象,缺少对氧元素向内扩散的阻碍,导致 $\text{NiO}$ 和 $\text{NiCr}_2\text{O}_4$ 的大量生成, $\text{NiO}$ 逐渐致密,晶粒变大(图6e)。

### 3.2.2 氧化膜截面形貌

孔角度为45°,不同气膜孔间距的试样入口侧孔边缘和孔内壁的截面形貌见图7和图8。可以看出,入口侧孔边缘的氧化膜厚度增加相对孔内壁更加明显,氧化膜发生了不同程度的剥落,不同试样孔边缘氧化膜厚度规律为 $0.75 > 0.95 > 0.55 > 0.39$  mm,与之前的氧化增重规律

较一致。随着气膜孔间距的增加,孔边缘氧化膜厚度逐渐增加,在0.75 mm时厚度最大,之后氧化膜厚度逐渐减小(图7)。

而孔内壁氧化膜较为连续致密,厚度相对较薄,孔内壁氧化膜厚度规律为 $0.95 > 0.75 > 0.55 > 0.39$  mm,表明两者的影响因素也存在差异,但孔内壁氧化膜的生长与脱落对氧化增重的影响相对孔边缘的影响较小(图8)。

孔角度为90°,不同气膜孔间距的试样入口侧孔边缘和孔内壁的截面形貌见图9和图10。可以看出,入口侧孔边缘的氧化膜厚度比孔内壁更明显,不同试样孔边缘氧化膜厚度规律也为 $0.75 > 0.95 > 0.55 > 0.39$  mm;与孔角度为45°不同的是,入口侧孔边缘的氧化膜厚度更大,氧化层剥落程度相对较轻,最外层的 $\text{NiO}$ 晶粒较为粗大(图9)。而孔内壁的氧化膜厚度较薄,氧化膜厚度规律

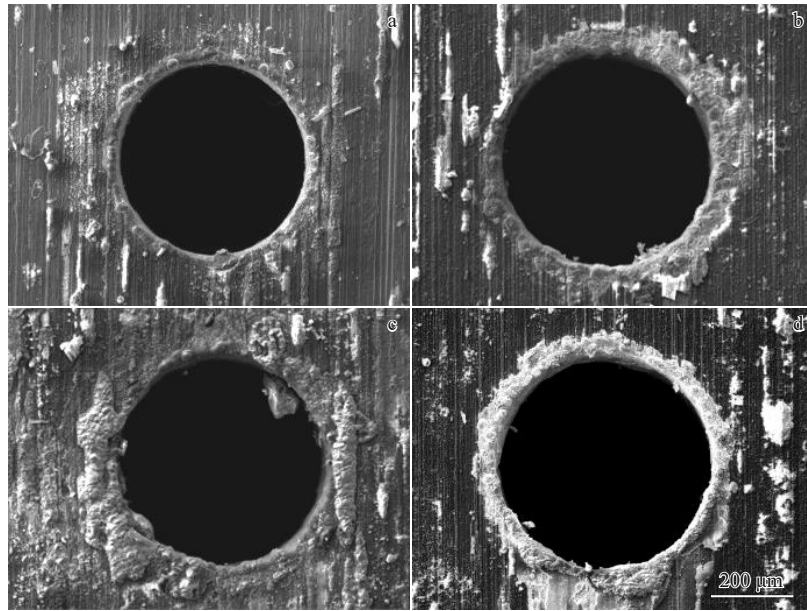


图5 孔角度为90°不同气膜孔间距试样的表面氧化膜形貌

Fig.5 Surface oxidation morphologies of samples with different film-hole spacing at punching angle of 90°: (a) 0.39 mm, (b) 0.55 mm, (c) 0.75 mm, and (d) 0.95 mm

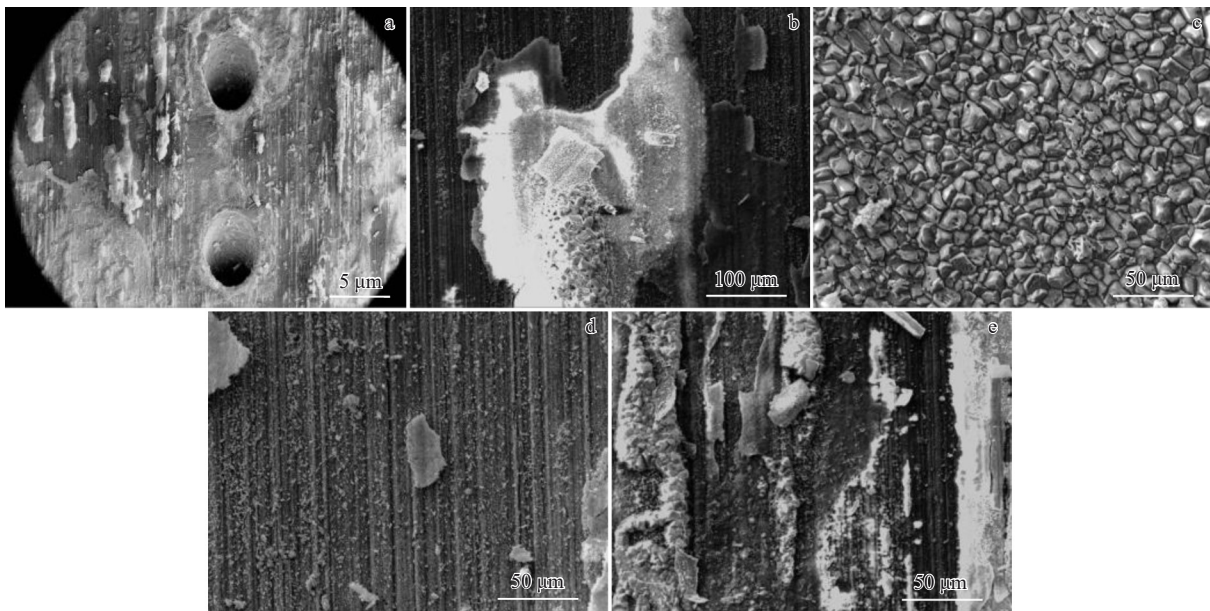


图6 气膜孔间距为0.75 mm 试样表面氧化形貌

Fig.6 Surface oxidation morphologies of sample with film-hole spacing of 0.75 mm: (a) low-magnification morphology, (b) spinel oxide layer, (c) NiO, (d) a small amount of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and (e) NiO and NiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

也为0.95>0.75>0.55>0.39 mm(图10)。

相同气膜孔间距时,孔角度为45°比90°试样的氧化程度相对严重一些,主要是由于45°孔呈椭圆形,孔边缘的氧化程度不均匀,导致孔边缘氧化层容易脱落,且孔内壁暴露出的面积更大一些,进一步加快了氧化程度。

孔角度为45°、气膜孔间距为0.39 mm单晶试样孔内壁的氧化膜截面形貌见图11。结合能谱EDX分析结果

可知,氧化膜主要由3层构成,最外层A为由(Ni, Co)O组成,中间层B厚度较均匀,由NiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>,NiAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>,CoTaO<sub>4</sub>等尖晶石化合物组成,靠近基体的最内层黑色连续的氧化层C为Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,有效的阻止O元素向内扩散。与基体紧挨着的D层为γ'相贫化层,其中Al含量较低是因为Al向外扩散,形成了致密的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>层。

### 3.2.3 氧化产物XRD分析

孔角度为45°和90°,气膜孔间距为0.39、0.75 mm试

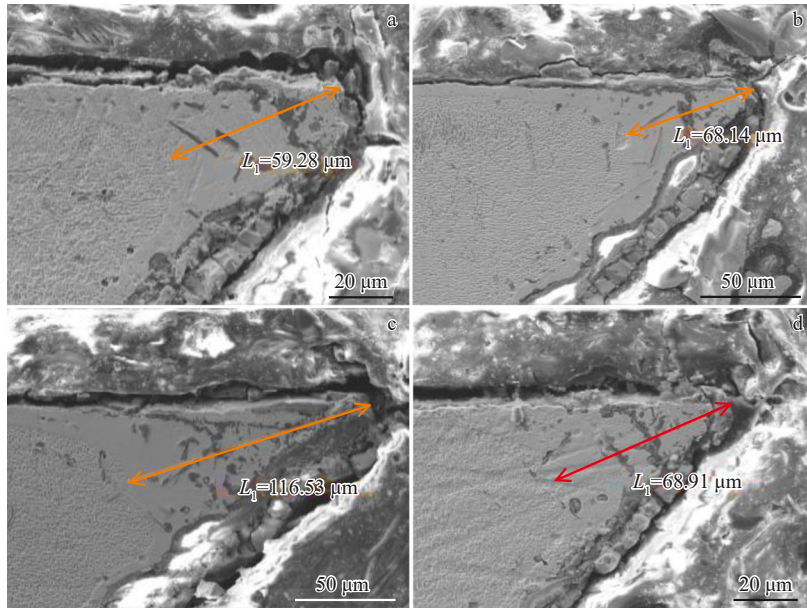


图7 不同试样入口侧氧化膜截面形貌(孔角度为45°)

Fig.7 Cross-sectional oxidation morphologies on the inlet side of samples with different film-hole spacing (punching angle of 45°): (a) 0.39 mm, (b) 0.55 mm, (c) 0.75 mm, and (d) 0.95 mm

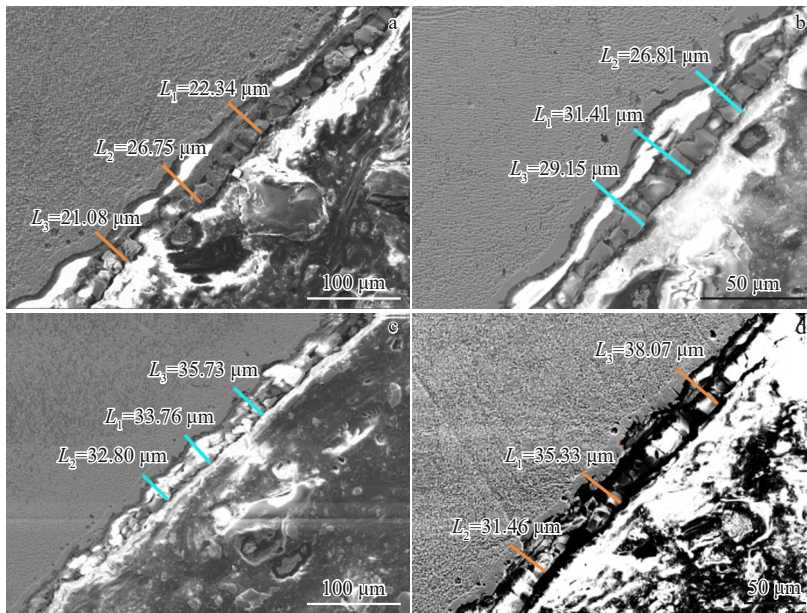


图8 不同试样孔内壁氧化膜截面形貌(孔角度为45°)

Fig.8 Cross-sectional oxidation morphologies on the inner walls of hole of samples with different film-hole spacing (punching angle of 45°): (a) 0.39 mm, (b) 0.55 mm, (c) 0.75 mm, and (d) 0.95 mm

样氧化膜表面的XRD分析结果见图12。可见4种样品氧化膜表面的成分相似,均为NiO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CoTaO<sub>4</sub>和NiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>,但峰值存在一定差异。

在相同孔角度下比较,气膜孔间距为0.75 mm试样均比0.39 mm的峰值明显升高,可见孔分布对氧化程度和氧化产物的生成有一定的影响。此外,在同样气膜孔间距的情况下比较,孔角度为45°试样的氧化程度比90°的较为严重一些,与图3反映的规律一致。

## 4 有限元分析

### 4.1 网格划分及材料参数

根据氧化试样的尺寸,建立有限元分析的三维几何模型,并进行网格划分,为了得到较为精确的孔周应力,对孔边网格进行了加密,网格采用线性减缩积分单元C3D8R,划分网格后的模型如图13所示。

根据文献[17]可知,镍基单晶合金的刚度矩阵为:

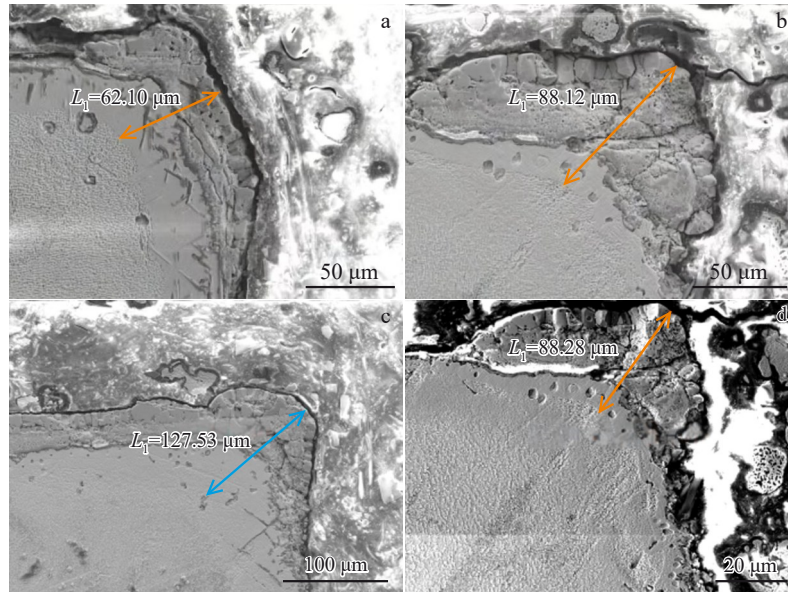


图9 不同试样入口处氧化膜截面形貌(孔角度为90°)

Fig.9 Cross-sectional oxidation morphologies on the inlet side of samples with different film hole spacing (punching angle of 90°): (a) 0.39 mm, (b) 0.55 mm, (c) 0.75 mm, and (d) 0.95 mm

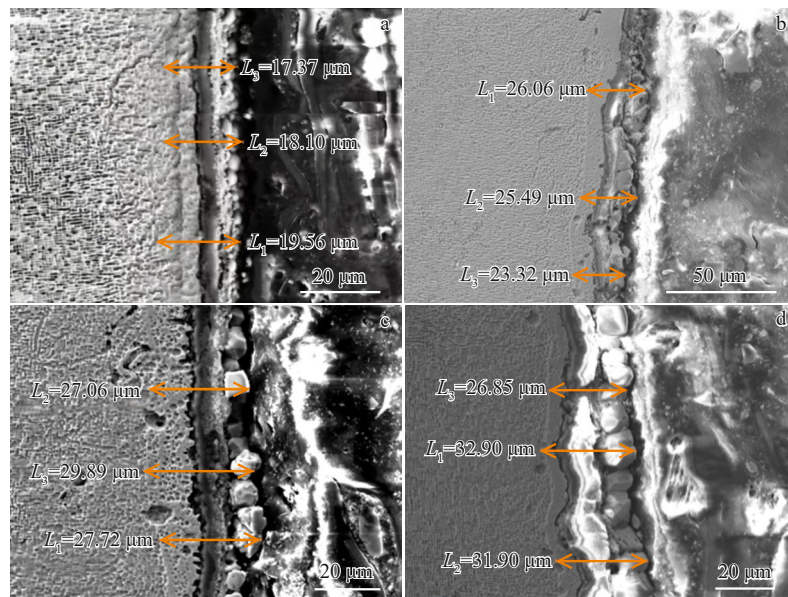


图10 不同试样孔内壁氧化膜截面形貌(孔角度为90°)

Fig.10 Cross-sectional oxidation morphologies on the inner walls of hole of samples with different film-hole spacing (punching angle of 90°): (a) 0.39 mm, (b) 0.55 mm, (c) 0.75 mm, and (d) 0.95 mm

$$[C] = \begin{bmatrix} \frac{E(\mu - 1)}{(2\mu - 1)(\mu + 1)} & \frac{-E\mu}{(2\mu - 1)(\mu + 1)} & \frac{-E\mu}{(2\mu - 1)(\mu + 1)} \\ \frac{-E\mu}{(2\mu - 1)(\mu + 1)} & \frac{E(\mu - 1)}{(2\mu - 1)(\mu + 1)} & \frac{-E\mu}{(2\mu - 1)(\mu + 1)} \\ \frac{-E\mu}{(2\mu - 1)(\mu + 1)} & \frac{-E\mu}{(2\mu - 1)(\mu + 1)} & \frac{E(\mu - 1)}{(2\mu - 1)(\mu + 1)} \end{bmatrix} \begin{matrix} G \\ G \\ G \end{matrix} \quad (3)$$

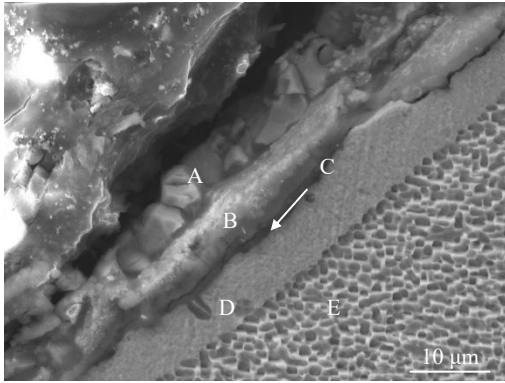


图11 氧化膜截面形貌(孔角度为45°)

Fig.11 Cross-sectional morphology of oxide film (punching angle of 45°)

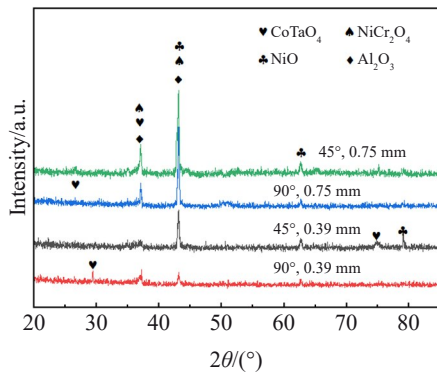


图12 不同试样表面氧化产物XRD图谱

Fig.12 XRD patterns of oxidation products on the surface of different samples

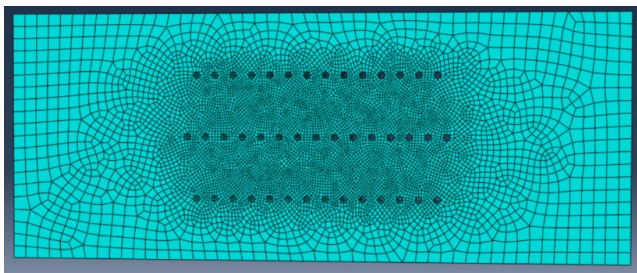


图13 有限元网格划分

Fig.13 Schematic diagram of finite element meshing

其中： $[C]$ 为刚度矩阵； $E$ 为晶轴方向上拉压弹性模量； $G$ 为晶轴方向上剪切弹性模量； $\mu$ 为晶轴方向上泊松比。

部分材料参数可在文献[18]中查得，查阅文献后得到DD6镍基单晶合金为正交各项异性材料。在1050℃时， $E_{[001]} = 69.5 \text{ GPa}$ ，泊松比 $\mu = 0.399$ 。根据文献中的经验公式：

$$\frac{1}{G} = \frac{3}{E_{[111]}} - \frac{1 - 2\mu}{E_{[100]}} \quad (4)$$

其中 $E_{[100]} = 130 \text{ GPa}$ ， $E_{[111]} = 189 \text{ GPa}$ ，得到剪切模量 $G \approx 77$

GPa。将此材料常数代入式(3)中可以得到DD6材料的刚度矩阵。

#### 4.2 氧化试验模型的建立

通过COMSOL有限元软件建立温度场，采取循环氧化的方式进行氧化试验，试验过程参考HB 5258-2000。添加固体与流体传热，将试验腔内的温度设置为恒温1323.15 K，腔体隔绝外界传热，如图14a所示。记录300 h内氧化膜的厚度变化，如图14b所示。氧化膜厚度与时间的关系曲线，观察到其形状为抛物线，且与试验结果相拟合，如图14c所示。

#### 4.3 孔分布对孔内壁氧化膜厚度的影响

将氧化动力学曲线作为物理场，在恒温箱中模拟孔角度为90°、4种不同气膜孔间距试样的氧化行为，模型如图15a所示，得到不同气膜孔间距试样的氧化膜厚度。可见随着气膜孔间距的增加，孔内壁氧化膜的厚度逐渐增加，模拟结果与试验结果的规律一致，数据较为接近(图15b)。

孔周围的温度随不同气膜孔间距的变化趋势见图16。可以看出，随着气膜孔间距的增大，单位面积孔的数量减少，孔周的温度场逐渐升高，导致孔内壁氧化膜厚度增大，孔内壁氧化膜厚度规律为 $0.95 > 0.75 > 0.55 > 0.39 \text{ mm}$ ，与试验结果一致，表明孔内壁氧化膜厚度主要受温度场影响。

#### 4.4 孔分布对孔边缘氧化膜脱落的影响

DD6单晶合金氧化分为3个阶段，第1阶段是形成单一的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜；第2阶段是形成三层氧化层；第3阶段，较厚的氧化层会出现明显的剥落现象。随着氧化时间的进一步增加，三层氧化物再次在剥离区域上形成，但由于Al的消耗，此时内 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 不连续，氧化程度加剧，氧化层易从此处发生剥落。氧化膜的发展呈现出萌生→生长→界面空位聚集→剥落→萌生的规律<sup>[15]</sup>。在DD6氧化的第3阶段，由于 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 膜的热膨胀系数与合金基体不匹配、金属和氧化层之间出现热膨胀局部不匹配等因素导致氧化膜发生脱落<sup>[19-20]</sup>，氧化膜脱落后，缺少对O元素的阻挡能力，氧化程度会进一步加重。

入口侧孔边缘的氧化膜厚度增加比孔内壁更明显，氧化膜出现了明显的剥落，不同试样孔边缘氧化膜厚度规律为 $0.75 > 0.95 > 0.55 > 0.39 \text{ mm}$ ，与氧化增重规律较一致。而孔内壁的氧化膜较为连续致密，厚度较薄，剥落程度较轻，孔内壁氧化膜厚度规律为 $0.95 > 0.75 > 0.55 > 0.39 \text{ mm}$ ，表明氧化增重随不同气膜孔间距变化的主要影响因素为孔边缘氧化膜的脱落应力。

氧化层生长会在合金基体和氧化膜界面处产生应力，成为生长应力<sup>[21]</sup>。某一气膜孔处的应力不仅会影响该孔周围的应力状态，也会影响到其他孔处的应力状态，称为应力耦合叠加效应。图17为利用Abaqus仿真模拟

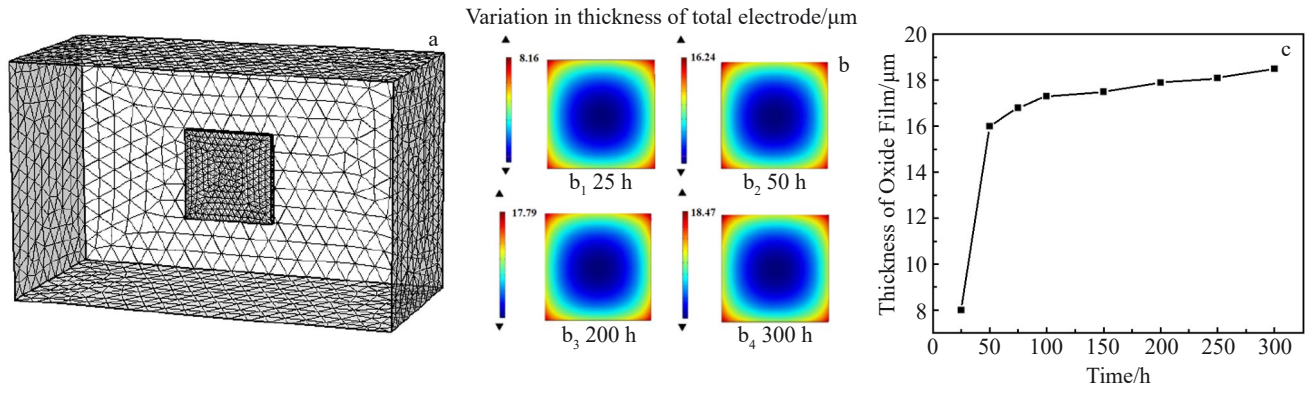


图 14 氧化试验模型及氧化动力学曲线

Fig.14 Model of oxidation test: (a) COMSOL constant temperature box, (b) thickness of the total electrode at different time, and (c) oxidation kinetics curve

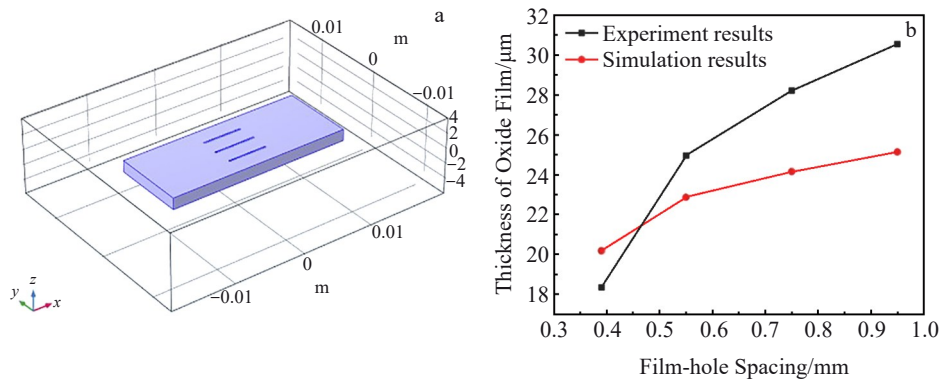


图 15 氧化试样模型及模拟结果对比

Fig.15 Model of oxidized sample (a) and comparison between simulation and experiment results (b)

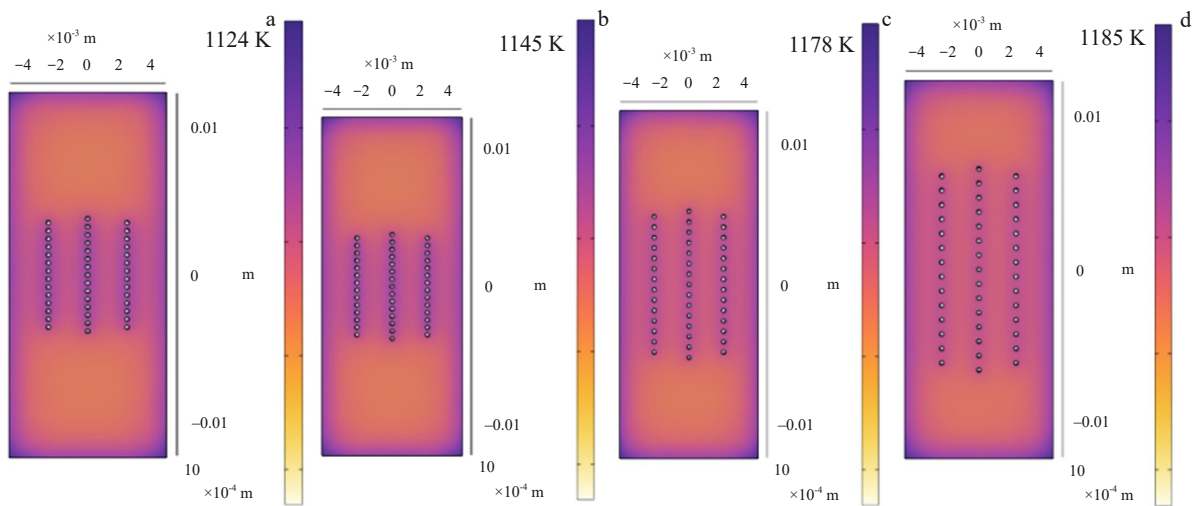


图 16 孔周围的温度随不同气膜孔间距的变化

Fig.16 Temperature variation around the hole with different film-hole spacing: (a) 0.39 mm, (b) 0.55 mm, (c) 0.75 mm, and (d) 0.95 mm

不同气膜孔间距试样的应力分布图,由图 17 可知,随着气膜孔间距的增大,高应力区的耦合叠加效应逐渐减弱。孔与孔之间存在应力抵消区域,在 0.39 mm 时抵消范围最大,孔表面脱落应力影响最小,随着气膜孔间距增大,

应力抵消区域逐渐减小,脱落应力不断增大,并存在一个应力抵消的临界值,而 0.75 mm 与这个临界值最为接近。因此,在气膜孔间距为 0.75 mm 时,氧化膜的脱落情况最为严重,脱落应力最大,脱落后导致氧化进一步加剧。

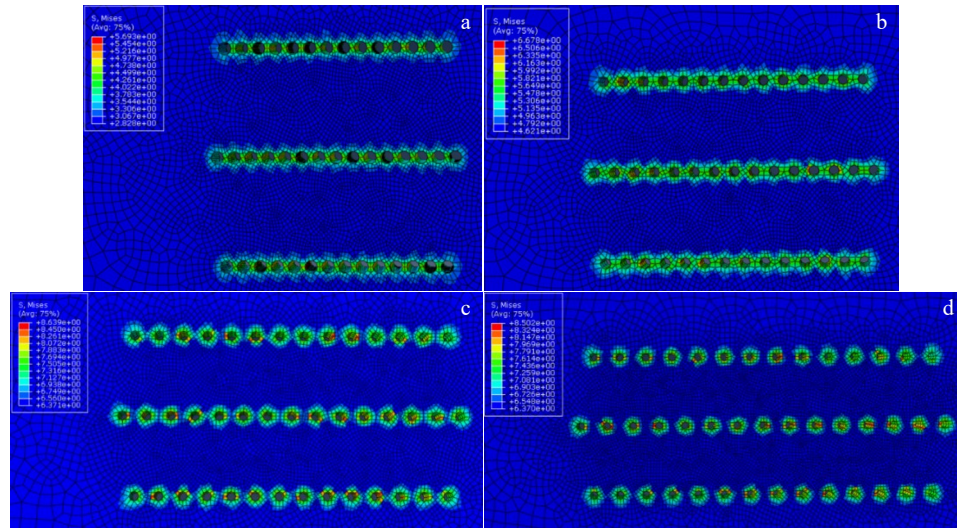


图17 不同气膜孔间距试样的应力分布图

Fig.17 Stress distribution maps of samples with different film-hole spacing: (a) 0.39 mm, (b) 0.55 mm, (c) 0.75 mm, and (d) 0.95 mm

## 5 结论

1) 在 $45^\circ$ 和 $90^\circ$ 两种角度下,平均氧化皮脱落量和氧化速率随着气膜孔间距的变化规律较一致,均为 $0.75 > 0.95 > 0.55 > 0.39$  mm,气膜孔间距对DD6单晶合金氧化程度的影响相比孔角度的影响更为显著。

2) 在相同气膜孔间距下, $45^\circ$ 比 $90^\circ$ 的氧化程度相对严重一些,由于 $45^\circ$ 孔呈椭圆形,孔边缘的氧化程度不均匀,导致孔边缘的氧化层容易脱落,且孔内壁暴露的面积更大,加快了氧化程度。

3) 孔内壁氧化层生长主要受温度场影响,随着气膜孔间距的增大,单位面积孔的数量减少,孔周温度场逐渐升高,导致孔内壁氧化膜厚度增大,孔内壁氧化膜厚度规律为 $0.95 > 0.75 > 0.55 > 0.39$  mm。

4) 孔表面氧化层生长主要受脱落应力的影响,随着气膜孔间距增大,应力抵消区域逐渐减小,脱落应力不断增大,并在0.75 mm时达到峰值,此时氧化膜脱落最为严重,峰值点之后又呈下降趋势。

### 参考文献 References

- [1] Li Zhenwei(李振威), Wen Zhixun(温志勋), Wang Ping(王平) et al. *Failure Analysis and Prevention*(失效分析与预防)[J], 2023, 18(1): 1
- [2] Zhang Jingang(张金刚), Liu Xinling(刘新灵), Chen Xing(陈星) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2025, 54(11): 2777
- [3] Liu Xinling(刘新灵), Wu Xuecheng(吴学诚), Li Zhen(李振) et al. *Failure Analysis and Prevention*(失效分析与预防)[J], 2023, 18(1): 21
- [4] Hu Chunyan(胡春燕), Liu Xinling(刘新灵), Tao Chunhu(陶春虎) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工

程)[J], 2019, 48(10): 3190

- [5] Liu Xinling(刘新灵), Tao Chunhu(陶春虎), Liu Chunjiang(刘春江) et al. *Materials Review*(材料导报)[J], 2013, 27(11): 117
- [6] Li Guangchao(李广超), Zhu Hui ren(朱惠人), Bai Jiangtao(白江涛) et al. *Journal of Propulsion Technology*(推进技术)[J], 2008, 29(2): 153
- [7] Schmidt D L, Sen B, Bogard D G. *ASME Journal of Turbo Machinery*[J], 1996, 118: 807
- [8] Yang Weihua(杨卫华), Ma Guofeng(马国锋), Zhang Jingzhou(张靖周) et al. *Journal of Propulsion Technology*(推进技术)[J], 2005, 26(5): 413
- [9] Qing Hua(卿华), Jiang Hepu(江和甫), Wen Weidong(温卫东). *Journal of Aerospace Power*(航空动力学报)[J], 2007, 22(5): 773
- [10] Lukas P, Preclik P, Cadek J. *Materials Science and Engineering A*[J], 2001, 298: 84
- [11] Li Lei(李磊), Hou Naixian(侯乃先), Ao Liangbo(敖良波) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(3): 519
- [12] Younes C M, Allen G C, Nicholson J A. *Corrosion Engineering, Science and Technology*[J], 2007, 42(1): 80
- [13] Huang L, Sun X F, Guan H R et al. *Surface & Coating Technology*[J], 2006, 200: 6863
- [14] Liu Chunting(刘春廷), Sun Xiaofeng(孙晓峰), Ma Ji(马继) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(8): 1404
- [15] Yang Yizhe(杨一哲), Yang Zhao(杨昭), Zhao Yunsong(赵云松) et al. *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2022, 42(2): 29
- [16] Hou Guichang(侯贵昌). *High Temperature Oxidation Performance of Microcrystal Repair Coatings for Single Crystal Superalloy*(单晶高温合金微晶修复涂层的高温氧化性能研究)[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2023
- [17] AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials. HB 5258-

- 2000[S], 2000
- [18] Zhang Xiaoxia(张晓霞), Zhou Baizhuo(周柏卓). *Aeroengine*(航空发动机)[J], 1997(1): 6
- [19] Yang Baohua(杨保华). *Manual of Material Data in Engine Design*(航空发动机设计用材料数据手册)[M]. Beijing: Aviation industry press, 2010
- [20] Pei Haiqing(裴海清). *The High-temperature Oxidation and Thermal Fatigue Behaviors of Nickel-based Single Crystal Superalloy*(镍基单晶高温氧化及热疲劳行为研究)[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019
- [21] Akhtar A, Hook M S, Reed R C. *Metallurgical and Materials Transactions A*[J], 2005, 36: 3001

## Effect of Hole Geometric Structure on the Oxidation Behavior of DD6 Single-Crystal Superalloy

Hu Chunyan<sup>1,2,3</sup>, Liu Xinling<sup>1,2,3</sup>, Chen Xing<sup>1,2,3</sup>, Liu Changkui<sup>1,2,3</sup>, Tao Chunhu<sup>1,2,3</sup>

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

(2. Beijing Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Beijing 100095, China)

(3. Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Aero Engine Corporation of China, Beijing 100095, China)

**Abstract:** The isothermal oxidation behavior of DD6 single-crystal superalloy with different hole geometric structure at 1050 °C was studied using field emission scanning electron microscope, energy dispersive spectroscope, X-ray diffractometer, and ABAQUS finite element method. The results show that at two angles of 45° and 90°, the average oxidation rate varies with the film-hole spacing, both being 0.75 mm>0.95 mm>0.55 mm>0.39 mm. The effect of film-hole spacing on the oxidation mass gain of single-crystal superalloys is more significant than that of hole angle. At the same film-hole spacing, the degree of oxidation at 45° is relatively more severe than that at 90°. Finite element analysis shows that the growth of the oxide layer on the inner wall of the hole is mainly affected by the temperature field, while the growth of the oxide layer on the surface of the hole is mainly affected by the detachment stress. As the film-hole spacing increases, the stress cancellation area gradually decreases, and the detachment stress continues to increase, reaching its peak at 0.75 mm. At this time, the oxide film detachment is most severe, and after the peak point, it shows a downward trend.

**Key words:** single-crystal superalloy; electrical discharge machining drilling; film-hole spacing; oxidation behavior; shedding stress

---

Corresponding author: Hu Chunyan, Ph. D., Senior Engineer, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, P. R. China, Tel: 0086-10-62496238, E-mail: fachcy@163.com