

引文格式: 孙洪元, 马德新, 龚晓毅, 等. DD5 高温合金单晶叶片振动频率的试验研究 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(17): 81-87.

SUN Hongyuan, MA Dexin, GONG Xiaoyi, et al. Experimental investigation on vibration frequency of DD5 superalloy single crystal blades[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(17): 81-87.

DD5 高温合金单晶叶片振动频率的试验研究*

孙洪元^{1,2}, 马德新^{1,2}, 龚晓毅², 赵运兴^{1,2}, 员莹莹², 魏冰²

(1. 中南大学粉末冶金研究院, 长沙 410083;

2. 深圳市万泽中南研究院有限公司, 深圳 518045)

[摘要] 利用第二代单晶高温合金 DD5, 在工业设备条件下批量制备了两种结构的单晶叶片铸件, 并对它们的振动频率进行了测量和分析。结果表明, 叶片的振动频率随着一次晶向偏离角增大而显著提高, 但受二次晶向偏离角的影响很小; 叶身结构是决定叶片振动频率的另一重要因素, 但对叶片总重量的影响并不显著。为严格控制叶片的振动频率, 在设计上应进一步优化叶身结构, 在铸造过程中应尽量减少叶片的一次晶向偏离。

关键词: 高温合金; DD5; 单晶叶片; 振动频率; 结晶取向

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.17.081



孙洪元

工程师, 博士研究生, 研究方向为单晶高温合金冶金缺陷与检测技术。

经过几十年的发展, 航空发动机工作时涡轮前进气口温度越来越高, 推重比进一步增大, 这对涡轮叶片的合金材料及其制造工艺提出了更高的要求。相比于高温合金等轴晶和

定向晶叶片, 单晶高温合金叶片具有更出色的蠕变持久性能和热机械疲劳性能^[1-3], 如等轴晶合金 K417 在 850 °C/500 MPa 下的持久时间为 30 h^[4], 二代单晶合金 DD6 在同样条件下持久时间约为 500 h^[4], DD6 持久性能是 K417 的 17 倍。因单晶高温合金具有更优异的力学性能^[5], 越来越多的单晶叶片被应用到航空发动机与燃气轮机高低压涡轮工作叶片和导向叶片中^[6-8]。其中镍基单晶高温合金为面心立方结构, 材料物理特性具有各向异性, 即弹性模量、泊松比等参数均具有方向性, 结晶取向的偏离将直接影响叶片的疲劳强度和振动等性能^[1,9]。

目前, 关于结晶取向对高温合金单晶叶片振动频率影响的研究较少。陶仙德等^[10]研究了结晶取向对 DD3 单晶叶片固有频率的影响, 采用有限元法分析了该叶片的前 6 阶静频和

45000 r/min 工作转速下该叶片的前 6 阶振动频率在相应结晶取向范围内的变化规律, 发现第二欧拉角对该叶片的低阶固有频率影响较大, 但该研究未涉及实测数据。张根等^[11]研究了晶轴偏转(结晶取向偏离)对 DD6 合金带冠叶片频率特性的影响, 采用有限元分析方法, 对 DD6 单晶带冠叶片进行静应力和模态分析, 获得了不同偏转角下叶片固有频率及叶冠间挤压力的变化规律, 但未将固有频率与结晶取向之间的关系进行量化分析。张江伟等^[12]以某型号航空发动机高压涡轮转子叶片为研究对象, 对其叶冠进行改型分析, 发现叶冠改型后叶片各阶固有频率均略有降低。王瀚艺^[13]对某故障涡轮叶片进行延展改型并通过 ANSYS 有限元进行验证, 发现改型后的叶片成功避开了原叶片发生故障时的频率。

鉴于目前有关叶片结晶取向和

* 基金项目: 深圳市海外高层次人才资金(KQTD2015032716463668)。

叶片结构对振动频率影响方面的研究并不充分,本文对两种结构的DD5合金低压涡轮转子叶片振动频率进行测量研究,对影响因素进行探讨,可为叶片结构的设计与振动频率控制提供基础数据。

1 试验方法

本研究采用的合金材料为第二代单晶高温合金 DD5,合金成分见表 1。

本研究制备的产品为某型航空发动机带冠低压涡轮转子叶片,改型前为 A 型结构,改型后为 B 型结构(图 1),两者的高度、叶冠结构和榫齿至缘板的结构完全相同,设计重量也相同。不同的是 A 型叶片的叶身带有排气窗口,而 B 型叶片没有。另外, A 型叶片实际重心位置比 B 型叶片的更靠近榫齿, B 型叶片的扭角在 A 型叶片基础上进行了调整。

用常规的熔模法制备叶片浇注用陶瓷型壳,所有单晶叶片均采用德国 ALD 公司的真空定向凝固炉(VIM-IC/DS/SC)铸造而成。单晶叶片均按以下不同工艺进行标准热处理:固溶热处理为 1300 °C,保温 2 h+氩气冷却;1 次时效处理为 1120 °C,

保温 4 h+氩气冷却;2 次时效处理为 1080 °C,保温 4 h+氩气冷却;3 次时效处理为 900 °C,保温 4 h+氩气冷却。对叶片采用完整的机械加工、喷丸、涂层等成品叶片加工工序。

采用加拿大 Proto 公司的劳厄晶体衍射仪(LAUE COS XRD)对两种单晶叶片的一次与二次晶向偏离角(分别记为 β 和 α)进行检测,如图 2 所示^[11]。根据技术标准要求,一次晶向偏离角($\beta < 15^\circ$)的单晶叶片作为晶向合格产品,对二次晶向偏离角 α 未作要求。

如图 3 所示^[11],分别将 A 型与 B 型叶片的榫头采用专用夹具刚性夹紧(夹紧力固定),然后固定到定制的专用振动台上,采用敲击共振法对叶片一阶弯曲振动频率(简称振动频率)进行检测。

2 结果与讨论

2.1 A 型叶片振动频率

对 68 件 $\beta < 15^\circ$ 的 A 型叶片,按照 β 值从小到大的顺序测量振动频率,结果如表 2 所示。该型叶片振动频率的要求值为 (395 ± 20) Hz,测量结果显示有 18 件叶片超出规格上限值 415 Hz。该型叶片外形尺寸和壁

厚尺寸等均满足设计要求,但出现了高达 26.5% 的频率超标的报废叶片,需要分析原因并进行改进。

从表 2 可以看出,超标的频率主要分布在 β 值较大的区域。在 $\beta < 7.5^\circ$ 的前 43 件叶片中,仅有 3 件的频率超标,超标率为 7.0%;而在 $7.5^\circ < \beta < 15^\circ$ 范围的后 25 件叶片中,却有 15 件频率超标,超标率高达 60%。可见当 β 值增大时,不仅叶片机械性能逐渐变差,频率超标率更是显著增大,严重影响单晶叶片的成品率。因此需要加强对单晶铸件定向凝固工艺的控制,尽可能减小一次晶向偏差。

2.2 B 型叶片振动频率

B 型叶片为 A 型叶片的设计改进版,去掉了尾缘排气窗口,并调整了叶型尺寸。对 44 件 $\beta < 15^\circ$ 的 B 型单晶叶片进行振动频率测量,结果如表 3 所示。该型叶片振动频率要求值与 A 型叶片一样,为 (395 ± 20) Hz。从表 3 可以看出,仅有 β 值最大的 44 号叶片的频率较高,超出规格上限 415 Hz。

通过对比表 2 和表 3 发现, B 型叶片中的频率超标率仅为 2.3%,比 A 型叶片的 26.5% 的平均频率超标率低了约 1 个数量级。实际上 B 型叶片的频率平均值约为 405.9 Hz,低于

表 1 DD5 合金的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of DD5 alloy (mass fraction)

%

C	Al	Co	Cr	W	Ta	Mo	Hf	Re	B	Ni
0.050	6.16	7.42	6.85	4.97	6.52	1.52	0.15	3.03	0.004	余量

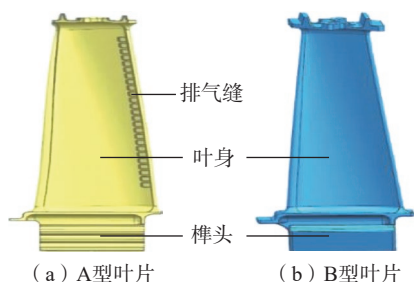


图 1 两种结构叶片的外形示意图

Fig.1 Schematic image of two structural blades

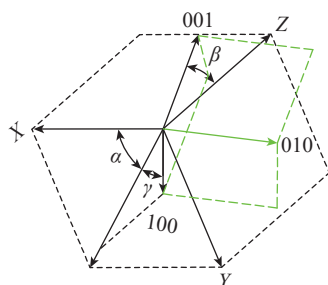


图 2 一次与二次结晶取向偏离角示意图^[11]

Fig.2 Schematic image of primary and secondary crystal orientation deviation angles^[11]

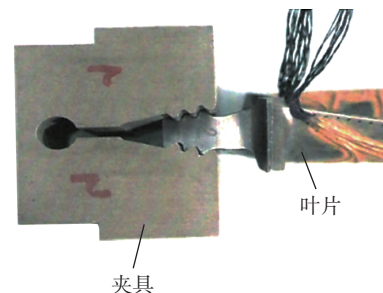


图 3 叶片测频装夹^[11]

Fig.3 Clamping of vibration frequency measurement for blades^[11]

A型叶片的频率平均值(约413 Hz),更接近标准要求值(395±20) Hz。这说明B型叶片在结构上有利于降低频率,能够实现较高的频率合格率。

2.3 影响叶片振动频率的相关因素

叶片无阻尼自由振动方程为^[14]

$$[M]\{\ddot{q}\} + [K]\{q\} = 0 \quad (1)$$

$$[M] = \sum [M]^e = \sum \iiint \rho [N]^T [N] dv \quad (2)$$

$$[K] = \sum [K]^e = \sum \iiint ([B]^e)^T [D][B]^e dv \quad (3)$$

式中, $[M]$ 为总质量矩阵; $[K]$ 为总刚度矩阵; $\{q\}$ 为节点位移矩阵; $[N]$ 为

形状函数矩阵; $[B]^e$ 为应变-位移矩阵, $[D]$ 为弹性矩阵。

设解的形式为

$$\{q\} = \{\Phi\} \sin \omega t \quad (4)$$

式中, $\{\Phi\}$ 为振幅列向量,是时间 t 的函数; ω 为频率。将式(4)代入式(1)得

$$[K]\{\Phi\} - \omega^2 [M]\{\Phi\} = 0 \quad (5)$$

求解式(5),即可得到叶片的各阶固有频率。

从式(5)可以看出,频率 ω 主要与叶片的总刚度矩阵 $[K]$ 和总质量矩阵 $[M]$ 相关。

表2中A型叶片频率平均值约

为413 Hz,接近规格上限,超标率高,可能是由于刚度矩阵偏大或者重量矩阵偏小。

对于叶片的刚度,一方面叶片结构会对其产生影响;另一方面,在叶片结构一定时,影响刚度的主要为弹性模量(结晶取向、内部组织等影响弹性模量),经金相检测分析比较叶片内部组织无明显差异,所以推测结晶取向为影响频率的重要因素,包括一次晶向偏离角 β 和二次晶向偏离角 α 。

对于重量矩阵,有两个方面的影响因素,即重量大小和重量分布。

表2 A型叶片振动频率测量结果

Table 2 Vibration frequency of blade type A

序号	频率 ω /Hz	$\beta/(\circ)$	$\alpha/(\circ)$	重量/g	序号	频率 ω /Hz	$\beta/(\circ)$	$\alpha/(\circ)$	重量/g	序号	频率 ω /Hz	$\beta/(\circ)$	$\alpha/(\circ)$	重量/g
1	412	2.3	76.0	243.2	24	406	5.1	73.9	249.5	47	405	8.5	55.6	247.4
2	406	2.7	23.1	247.8	25	409	5.1	28.3	248.2	48	410	8.7	12.7	245.1
3	408	2.8	16.7	246	26	412	5.1	2.8	243	49	411	9.0	2.5	245.7
4	416	3.0	62.7	249	27	411	5.1	70.7	244.3	50	411	9.2	3.1	246.3
5	409	3.1	24.2	249.4	28	407	5.3	58.4	247.1	51	419	9.6	84.1	246.3
6	408	3.1	35.5	243.7	29	407	5.4	61.0	244.7	52	424	9.8	36.0	243.9
7	410	3.2	4.9	246.8	30	410	5.4	44.1	248.6	53	411	10.1	78.3	247.5
8	416	3.4	80.1	242.8	31	411	5.6	20.9	242.5	54	421	10.2	12.0	244.6
9	402	3.8	15.0	249.1	32	411	5.6	71.5	246.9	55	413	10.2	12.9	243.5
10	417	3.8	36.1	243.1	33	414	5.7	50.0	247.9	56	423	10.5	50.0	246.6
11	405	4.0	65.6	247.5	34	410	6.1	71.8	242	57	419	10.5	50.4	244.3
12	413	4.0	12.7	246.8	35	405	6.1	13.1	246	58	414	10.7	51.2	242.2
13	414	4.1	86.8	245.7	36	404	6.1	58.6	244.5	59	425	10.9	48.3	245.8
14	410	4.2	66.3	249	37	407	6.2	36.1	247.2	60	418	11.1	23.1	242.2
15	404	4.3	2.4	248.4	38	409	6.4	33.5	247.3	61	416	11.2	5.0	244.8
16	411	4.7	86.8	243.1	39	413	6.4	18.7	245.8	62	424	11.3	33.0	248
17	409	4.7	46.9	248.4	40	408	6.6	6.6	245.5	63	429	11.8	14.0	245.7
18	404	4.8	20.8	245.6	41	412	6.9	43.5	244.6	64	411	12.1	12.6	247.7
19	410	4.8	84.3	247.6	42	412	7.2	43.3	242.1	65	426	12.7	88.8	243.5
20	408	4.9	41.0	249.1	43	410	7.4	20.0	247.3	66	419	12.8	82.8	248.6
21	408	4.9	82.8	247	44	414	7.8	44.1	247.7	67	414	12.8	51.9	242.6
22	413	5.0	22.3	247.5	45	418	8.2	68.2	246.2	68	426	13.8	27.4	248.2
23	408	5.0	57.6	242.8	46	421	8.3	53.9	245.4	平均	413	6.9	42.3	245.9

表3 B型叶片振动频率测量结果
Table 3 Vibration frequency of blade type B

序号	频率 ω /Hz	$\beta/(\circ)$	$\alpha/(\circ)$	重量/g	序号	频率 ω /Hz	$\beta/(\circ)$	$\alpha/(\circ)$	重量/g	序号	频率 ω /Hz	$\beta/(\circ)$	$\alpha/(\circ)$	重量/g
1	406.0	0.9	69.5	241.3	16	402.0	4.8	36.2	242.5	31	408.0	6.8	64.3	239.1
2	403.0	1.3	24	239.3	17	403.0	4.9	82.8	242.8	32	407.0	6.9	1.1	236.7
3	403.0	1.7	61.8	241.9	18	402.0	5	34	240.7	33	415.0	7.8	36.2	243.2
4	404.0	1.8	80.5	242.2	19	406.0	5	13.1	237	34	403.0	7.9	87.7	241.9
5	402.0	1.9	66.2	240.8	20	405.0	5.3	69.8	241.9	35	409.0	8	2.1	237.7
6	400.0	2.1	63.9	241	21	404.0	5.4	70.1	239.6	36	414.0	8.1	48.1	243.3
7	407.0	2.2	19.2	241.1	22	410.0	5.5	48.8	238.2	37	407.0	8.2	89.4	234.9
8	402.0	2.4	32.2	240.6	23	406.0	5.6	69.9	240.5	38	415.0	8.9	60.7	239.5
9	405.0	2.8	44.1	242.9	24	405.0	5.8	35.1	242.1	39	402.0	8.9	79.6	240
10	409.0	3.5	18.1	238.1	25	403.0	5.8	47.5	241.9	40	404.0	8.9	23.2	241.2
11	405.0	4	30	238.9	26	405.0	5.9	19.2	242.8	41	408.0	10	20.7	241.9
12	398.0	4.2	89.3	238.7	27	406.0	6	27.9	241.1	42	415.0	10.9	67.9	238.8
13	401.0	4.4	30.4	240.2	28	405.0	6.2	46.9	239.8	43	409.0	12.2	74.7	242
14	404.0	4.4	46.3	241.7	29	403.0	6.5	32.1	239.9	44	422.0	12.4	1.3	242.5
15	400.0	4.4	22	242.2	30	407.0	6.7	36.9	239.1	平均	405.9	5.7	46	240.5

2.4 振动频率的相关性分析

采用 QI Macros 软件对 A 型和 B 型两种结构叶片的频率与一次晶向偏离角 β 、二次晶向偏离角 α 、重量的相关性进行分析,分析结果如表 4 所示。

可以看出, A 型和 B 型叶片频率与一次晶向偏离角 β 的相关性系数分别为 0.652 和 0.615, p 值均为 0, 具有显著相关性, 并且呈正相关; A 型和 B 型叶片频率与二次晶向偏离角 α 的相关性系数分别为 0.093 和 -0.227, p 值均大于 0.05, 基本不具有相关性。A 型和 B 型叶片频率与重量的相关性系数分别为 -0.197 和 -0.017, p 值均大于 0.05, 基本不具有相关性。

2.5 一次晶向偏离角 β 与振动频率的关系

分别将 A 型叶片 (68 个) 与 B 型叶片 (44 个) 的振动频率测量数据, 以一次晶向偏离角 β 为横坐标, 振动频率 ω 为纵坐标, 绘制成散点图, 如图 4 所示。

表4 A型和B型叶片振动频率与一次晶向偏离角 β 、二次晶向偏离角 α 和重量的相关性
Table 4 Vibration frequency of blade type A&B correlated with primary orientation β , secondary orientation α and weight

类别	相关系数		p 值	
	A 型叶片	B 型叶片	A 型叶片	B 型叶片
频率&一次晶向 (偏离角 β)	0.652	0.615	0	0
频率&二次晶向 (偏离角 α)	0.093	-0.227	0.451	0.138
频率&重量	-0.197	-0.017	0.107	0.913

注: $p \leq 0.05$ 代表显著相关。

拟合得到的线性方程见式 (6) 和 (7), 拟合后关系式的决定系数 R^2 分别为 0.434 和 0.378, 发现频率与 β 呈线性正相关, 与表 4 得出的结论一致。

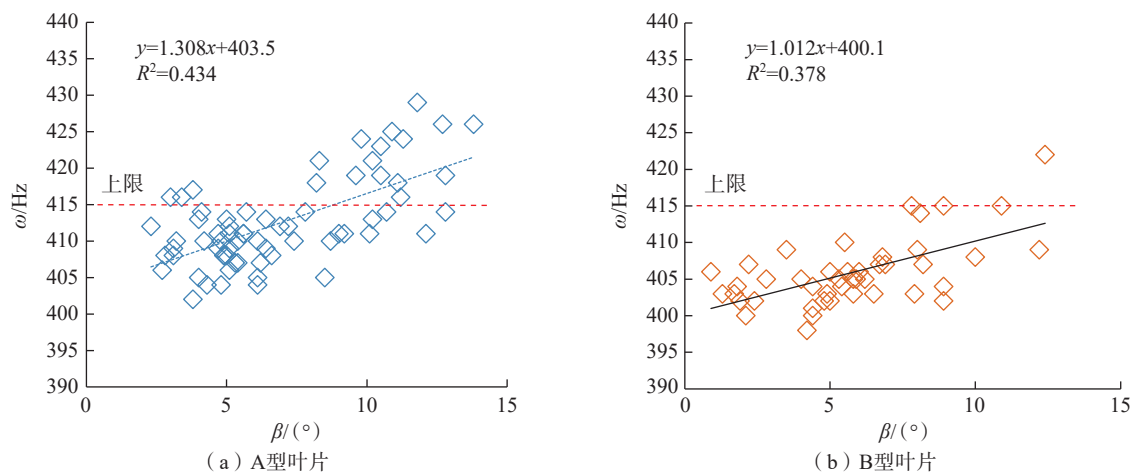
$$y_A = 1.308\beta_A + 403.5 \quad (6)$$

$$y_B = 1.012\beta_B + 400.1 \quad (7)$$

按式 (6) 和 (7) 计算, 在一次取向为 10° 时, A 型与 B 型叶片的振动频率分别为 416.6 Hz 和 410.2 Hz。可以看出, 通过降低叶片的一次晶向偏离角 β 可以解决单晶叶片振动频率

超出设计上限的问题。按表 2 和表 3 数据, 如果将一次结晶取向偏离角的控制范围由 $\beta < 15^\circ$ 改进为 $\beta < 10^\circ$, A 型叶片频率超标率将由 26.5% 降到 13.5%, 而 B 型叶片则全部合格。

由式 (6) 计算得到, A 型叶片在一次晶向偏离角 β 由 0 增加到 15° 时, 振动频率由 404.9 Hz 提高到 423.1 Hz, 增加了 4.5%; 由式 (7) 计算得到, B 型叶片在一次晶向偏离角 β 由 0 增加到 15° 时, 振动频率由 400.1 Hz 提高到 415.2 Hz, 增加了 3.8%。

图4 A型与B型叶片振动频率 ω 与一次晶向偏离角 β 的关系Fig.4 Relationship between vibration frequency ω and primary orientation deviation angle β of blade type A and B

张根等^[11]采用ANSYS有限元法对DD6合金的某型带冠叶片也进行了类似分析,结果为一次晶向偏离角 $\beta=15^\circ$ 时的频率比 $\beta=0$ 时的大5%,与本文研究结果接近,说明振动频率随一次晶向偏离角的增加而不断提高,如图5所示。

图6^[15]为Wells模型和Voigt模型得到的杨氏模量与一次晶向的关系图,可以看出,一次结晶取向在 $0\sim 15^\circ$ 变化时,杨氏模量均呈现接近线性增加。由于叶片的刚度同样随着杨氏模量的增加而增加,所以推测振动频率随着一次晶向的增大而增大,本质上是由杨氏模量的变化引起的。

2.6 二次晶向偏离角 α 对振动频率的影响

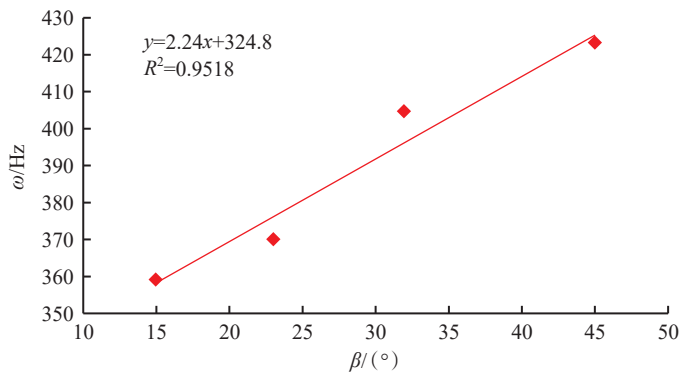
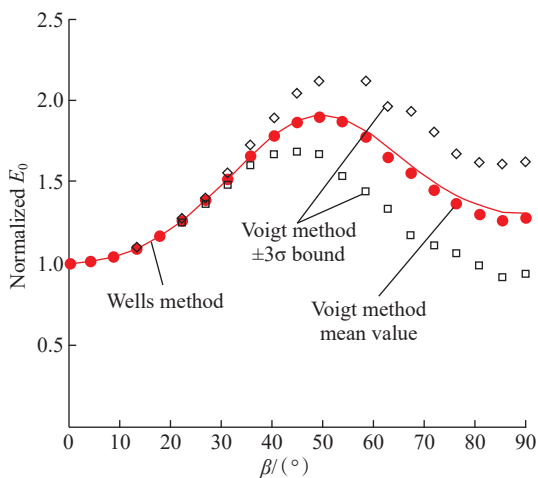
分别将A型叶片(68个)与B型叶片(44个)的振动频率测量数据,以二次晶向偏离角 α 为横坐标,振动频率为纵坐标,绘制成散点图(图7),发现数据较发散。将A和B型叶片频率测量数据与二次取向偏离角 α 进行拟合,拟合后关系式的决定系数 R^2 分别为0.0099和0.0517,发现无明显相关性,说明二次取向不是影响振动频率的主要因素。

2.7 重量大小与重量分布的影响

分别以A型叶片(68个)与B型叶片(44个)的涂层重量为横坐

标,振动频率为纵坐标,绘制成图8,拟合得到关系式的决定系数 R^2 分别

为0.0428和0.0003。根据式(5)得出叶片的振动频率与重量有着密切

图5 某DD6叶片振动频率 ω 与一次晶向 β 的关系^[11]Fig.5 Relationship between vibration frequency ω and primary orientation deviation angle β of a DD6 blade^[11]图6 杨氏模量与一次晶向的关系^[15]Fig.6 Relationship between Young's modulus and primary orientation deviation angle^[15]

关系,但从图 8 来看,随重量增大 A 型叶片振动频率仅有小幅度下降,而 B 型叶片振动频率无明显变化。A 型和 B 型叶片的重量控制较严格,波动范围分别为 242~249.5 g 和 234.9~243.3 g,约 3% 的重量变化未引起振动频率的明显变化。特别是叶片的重量主要集中在厚大的榫头部位,但进行振动试验时榫头被专用夹具夹紧,被敲击振动的主要是空心薄壁的叶身部位。由于各个叶片在叶身部位的重量差别较小,所以不会引起叶身振动频率的明显变化,也就无法证明叶片重量大小与振动频率的相关性。

为了排除一次取向偏离角 β 的

干扰,将表 2 和 3 中 $\beta < 10^\circ$ 的叶片测量数据进行统计,得出 A 型与 B 型叶片平均重量分别为 246.1 g 和 240.5 g,而两者的平均振动频率分别为 410 Hz 和 405.2 Hz,也就是说,重量较大的 A 型叶片的振动频率也较大,但似乎与常识不符。根据上面所述,叶片的重量主要集中在不参与振动的厚大榫头部位,所以叶片的振动频率并不取决于叶片的总重量,而是与参与振动的叶身本身的结构和重量等因素有关。A 型叶片叶身的尾缘开有一列排气缝,比起具有封闭尾缘的 B 型叶身减轻了重量,也使得叶身的重心更靠向被夹紧固定的榫头,这些因素都使得 A 型叶身的振

动频率增大。

3 结论

(1) 单晶叶片的一次晶向偏离角 β 对振动频率值 ω 有显著影响, ω 值随 β 值的增大而显著增大。但二次晶向偏离角 α 对叶片振动频率的影响较小。

(2) 叶片的振动频率与叶身的结构密切相关,但叶片总重量对其影响不显著,这是因为重量集中的厚大榫头部位并不参与振动。

(3) 为了有效控制叶片铸件的振动频率,在设计上应该优化叶身结构,在铸造过程中尽量减少一次晶向的偏离。

参考文献

- [1] 岳珠峰, 吕震宙, 杨治国, 等. 晶体取向的偏差和随机性对镍基单晶叶片强度与蠕变寿命的影响[J]. 航空动力学报, 2003, 18(4): 477-480.
- [2] YUE Zhufeng, LÜ Zhenzhou, YANG Zhiguo, et al. Influence of deviation and randomness of crystallographic orientations on the strength and life of nickel-base single crystal superalloy turbine blades[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(4): 477-480.
- [3] LAMM M, SINGER R F. The effect of casting conditions on the high-cycle fatigue properties of the single-crystal nickel-base superalloy PWA 1483[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2007, 38(6): 1177-1183.
- [4] WAN J S, YUE Z F. A low-cycle fatigue life model of nickel-based single crystal superalloys under multiaxial stress state[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 392(1-2): 145-149.
- [5] 颜鸣皋. 中国航空材料手册: 第 2 卷[M]. 第 2 版. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [6] YAN Minggao. China aeronautical materials handbook: volume 2[M]. 2nd ed. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [7] REED R C. The superalloys: Fundamentals and applications[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [8] 梁春华, 李晓欣. 先进材料在战斗机发动机上的应用与研究趋势[J]. 航空材料学报, 2012, 32(6): 32-36.

LIANG Chunhua, LI Xiaoxin. Application and development trend of advanced materials

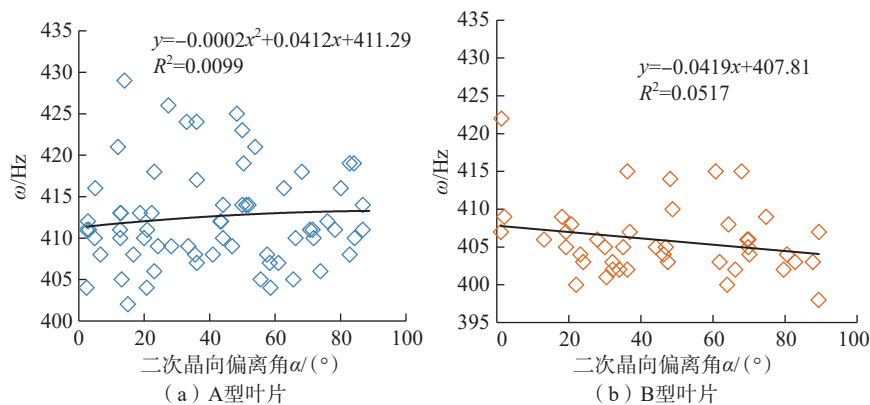


图 7 A 型与 B 型单晶叶片振动频率与二次晶向的关系

Fig.7 Relationship between vibration frequency ω and secondary orientation deviation angle α of blade type A and B

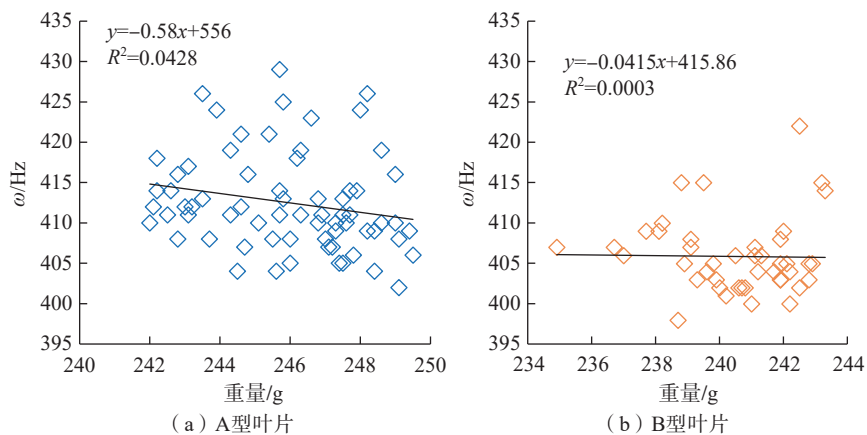


图 8 A 型与 B 型叶片振动频率与重量的关系

Fig.8 Relationship between vibration frequency ω and blade weight of type A and B

for fighter engine[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2012, 32(6): 32–36.

[7] 董志国, 王鸣, 李晓欣, 等. 航空发动机涡轮叶片材料的应用与发展[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(S2): 455–457.

DONG Zhiguo, WANG Ming, LI Xiaoxin, et al. Application and progress of materials for turbine blade of aeroengine[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011, 23(S2): 455–457.

[8] 刘巧沐, 黄顺洲, 刘佳, 等. 高温材料研究进展及其在航空发动机上的应用[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2014, 27(4): 51–56.

LIU Qiaomu, HUANG Shunzhou, LIU Jia, et al. Progress and application of high temperature structural materials on aero-engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2014, 27(4): 51–56.

[9] 于庆民, 岳珠峰, 刘永寿, 等. 镍基单晶合金叶片振动特性分析[J]. 航空发动机, 2005, 31(3): 30–34.

YU Qingmin, YUE Zhufeng, LIU Yongshou, et al. Vibration characteristics analysis of nickel-base single crystal blades[J]. Aeroengine, 2005, 31(3): 30–34.

[10] 陶仙德, 高德平, 尹泽勇. 晶向对DD3单晶叶片固有频率的影响[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1999, 12(1): 44–47.

TAO Xiande, GAO Deping, YIN Zeyong. Effect of crystal orientation on natural frequency of DD3 single crystal blade[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 1999, 12(1): 44–47.

[11] 张根, 李龙, 高原. 晶轴偏转对DD6带冠叶片频率特性的影响[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2018, 31(5): 31–34, 50.

ZHANG Gen, LI Long, GAO Yuan. Influence of crystal axis deflection on frequency characteristic of DD6 shrouded blade[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2018, 31(5): 31–34, 50.

[12] 张江伟, 李斌. 航空发动机高压涡轮转子叶片叶冠改型分析[J]. 机械制造, 2021, 59(9): 44–46, 74.

ZHANG Jiangwei, LI Bin. Modification analysis of blade crown of aero-engine high-pressure turbine rotor blade[J]. Machinery, 2021, 59(9): 44–46, 74.

[13] 王瀚艺. 基于模态共振分析的某

故障涡轮叶片改型设计[J]. 机械设计与制造, 2019(2): 131–133, 137.

WANG Hanyi. Retrofit design of turbine blade based on modality and resonance analysis[J]. Machinery Design & Manufacture, 2019(2): 131–133, 137.

[14] WEN Z X, MAO H Z, YUE Z F, et al. The influence of crystal orientation on vibration characteristics of DD6 nickel-base single crystal superalloy turbine blade[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(2): 372–377.

[15] KANEKO Y. Study on vibration characteristics of single crystal blade and directionally solidified blade[C]//Volume 6: Structures and Dynamics, Parts A and B. Vancouver: ASMEDE, 2011: 931–940.

通讯作者: 马德新, 教授, 博士, 研究方向为铸造高温合金。

Experimental Investigation on Vibration Frequency of DD5 Superalloy Single Crystal Blades

SUN Hongyuan^{1,2}, MA Dexin^{1,2}, GONG Xiaoyi², ZHAO Yunxing^{1,2},
YUAN Yingying², WEI Bing²

(1. Powder Metallurgy Research Institute, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Wedge Central South Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518045, China)

[ABSTRACT] In the present work, two types of single crystal (SC) blades using second generation superalloys DD5 were directionally solidified under industrial conditions. As one of the important material properties, the vibration frequency of the blades were measured and analyzed. It was found that clearly higher vibration frequency was exhibited in the blades with larger primary orientation deviation. In comparison, it was little affected by secondary orientation deviation. Another important factor influencing the vibration frequency is the airfoil constitution, instead of the total weight of a blade. In order to strictly control the blade vibration frequency, the airfoil constitution should be further optimized in the design, and the deviation of the primary crystal orientation of the blades should be minimized during the casting process.

Keywords: Superalloy; DD5; Single crystal blade; Vibration frequency; Crystal orientation

(责编 晓月)