

# GH140 合金在民航发动机上使用可靠性的分析

黄福祥 董云国 刘吉祥 张绍维

## 一、前言

铁基高温合金GH140,作为一种燃烧室材料,已在我国军用航空发动机上经过了长期的使用考验,证明它具有综合性能良好、使用可靠、价格便宜等优点,因而在我国航空发动机生产中获得了广泛的应用。

军用发动机由于使用条件比较恶劣,因而使用寿命都比较短,少则几百小时,多则上千小时。相对说来,民航发动机的寿命就要长得多。铁基高温合金中采用部分铁取代镍,由于铁降低了合金元素在奥氏体中的溶解度,因而铁基高温合金的组织稳定性比起相应的镍基合金要差些。对使用寿命较长的民航发动机来说,材料在使用过程中的组织稳定性显得更为重要。GH140合金的基体是Fe-37Ni-20Cr固溶体,含有总量约5.5%左右的W、Mo、Al、Ti等强化元素,合金化程度不算太高。但在高温下长期使用过程中,由于温度和应力的作用,将促使固溶体的分解而析出第二相,并使合金的物理机械性能发生一定变化。

随着我国社会主义建设事业的发展,民用航空将逐步采用国产飞机和发动机。为了探讨GH140合金在民用航空发动机上长期使用的可靠性,我们选择了一个使用时间较长的航空发动机燃烧室火焰筒,直接从上面取样进行了组织性能分析,为合金走向民用积累了数据。本文简要介绍如下。

## 二、材料和方法

供试验用的火焰筒是一个涡桨型发动机火焰筒,最大外径约620毫米,高度约520毫米,已在台架上经过了2080小时的长期试车。火焰筒呈环形(图1),由正面环、外环和内环组成。外环共分五段,内环共分六段,每段均用1.5毫米厚的GH140板材制造,其化学成分和机械性能均符合板材技术条件要求。

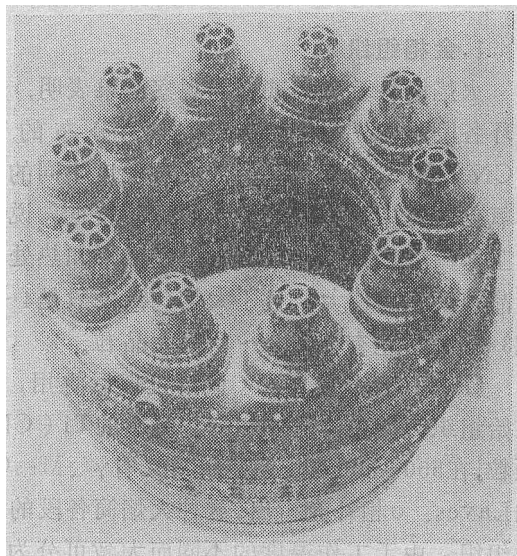


图1 火焰筒外貌

根据火焰筒的工作条件和各段取样的实际可能性,从火焰筒的第二内、外环,第三、第四外环和第五内环各段上切取了金相、拉伸、持久和热疲劳试样,进行了组织性能的分析试

验。由于火焰筒各段高度的限制,各种性能试样均为非标准试样。对比试验结果表明,各种非标准试样在各温度下的拉伸和持久强度与标准试样大致相同,而延伸率则低些。

性能试样从火焰筒各段切取和加工后,在使用状态直接测定拉伸、持久和热疲劳性能。试验均按标准方法进行,拉伸试验温度为20、500、700、800℃,持久试验条件为700℃×24公斤/毫米<sup>2</sup>和800℃×8公斤/毫米<sup>2</sup>,热疲劳试验温度为800~20℃,循环140次后测定裂纹长度和试样宽度。

金相试样用10%草酸水溶液或5%HF+10%甘油+85%水电解腐蚀后观察显微组织和晶粒度。草酸溶液能较清晰地显现固溶状态的奥氏体晶界,而HF溶液则能较好地显现在550~800℃长期使用后的显微组织,不显现奥氏体晶界。少数试样则制成复型在透射电镜下进行了高倍观察。

### 三、试验结果

#### 1. 金相组织

火焰筒各段金相试样的观察结果表明,内外环各段基体材料中都有正常均匀分布的Ti(CN)夹杂。各段材料的表面有程度不同的沿晶氧化,其中第二内环和第四外环较重,说明其工作温度较高。火焰筒各段经成形和热处理后晶粒度普遍偏大,且不大均匀,一般是4~6或3~5级,还有个别2~3级大晶粒。

GH140合金经1080℃固溶处理后使用,其原始组织为奥氏体基体和均匀分布的Ti(CN)颗粒,在550~800℃长期使用后又有 $\gamma'$ 、 $M_{23}C_6$ 和Laves、 $\sigma$ 相补充析出。这种火焰筒各段的显微组织,由于工作温度的不同而大致可分为三类。一种类似于固溶状态的金相组织,奥氏体晶界清晰干净,除Ti(CN)颗粒外无第二相析出(图2),火焰筒各段前端气膜孔附近多具有这类组织,说明此处工作温度较低(在550℃以下)。第二类组织是在晶界有连续链状的 $M_{23}C_6$

C<sub>6</sub>析出,晶内除少量Ti(CN)颗粒外,还有一些高度弥散的 $\gamma'$ 相质点(图3),第三外环和第五内环的后端,以及第四外环多数部位均具有这类组织,这种组织与合金在550℃左右时效2000小时后的组织状态类似。第三类组织是 $M_{23}C_6$ 在晶界呈连续或断续链状,并在局部聚集长大成块状,晶内除Ti(CN)颗粒外有针状

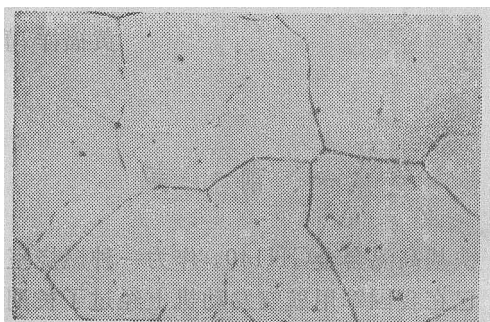


图2 奥氏体+Ti(CN),10%草酸电解腐蚀

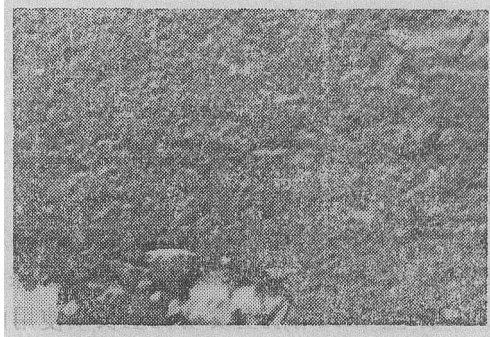
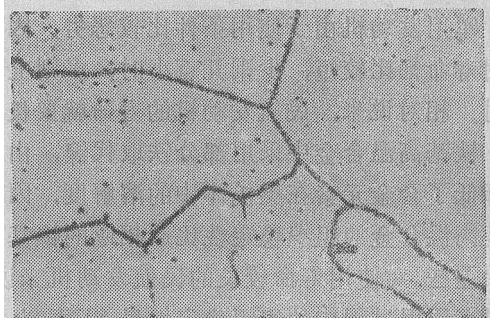


图3 晶界连续链状 $M_{23}C_6$ (a),晶内高度弥散的 $\gamma'$ 质点和Ti(CN)颗粒(b),5%HF/甘油电解腐蚀

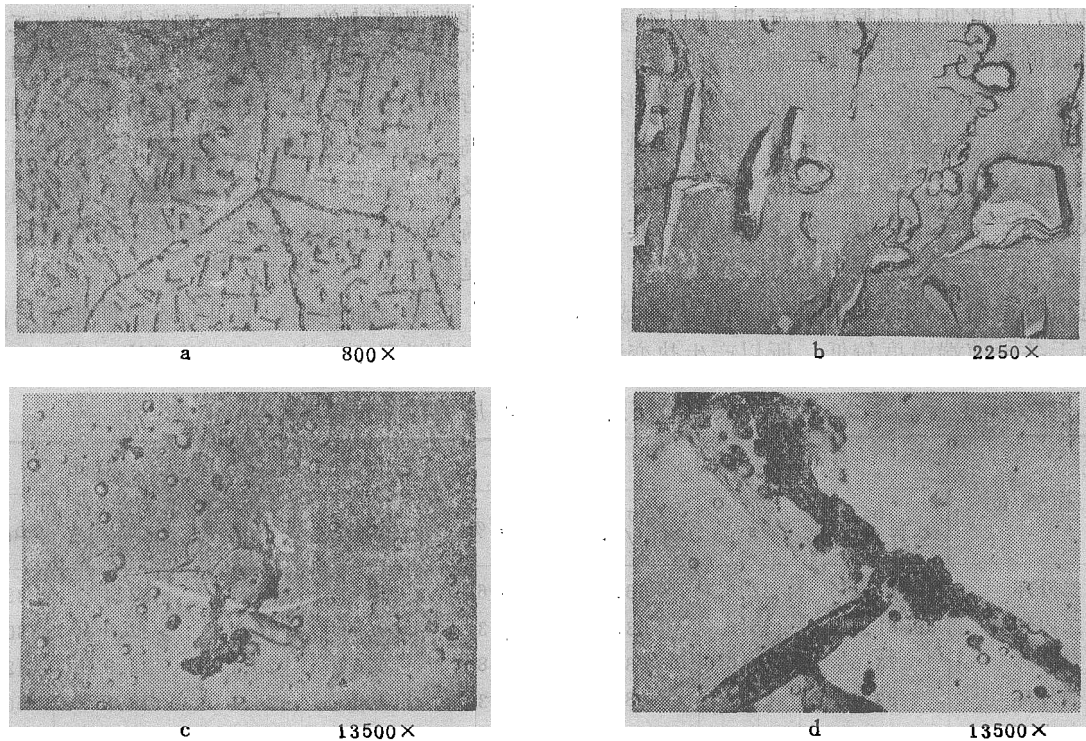


图 4 晶界连续或断续链状 $M_{23}C_6$ ，晶内针状和块状 $\sigma$ 和Laves相 (a、b)，  
晶内和针状相附近 $\gamma'$ 相质点 (c、d)

和块状 (点状)  $\sigma$  和 Laves 相补充析出 (图 4a、b)，其中以  $\sigma$  相为主，由于工作温度的不同，针状相有多少长短的差别；在电镜中观察时也有一些  $\gamma'$  相质点，但尺寸稍大，而在针状相附近  $\gamma'$  质点尤为密集 (图 4c、d)，这可能是因为析出 FeCr 型  $\sigma$  相的结果， $\sigma$  相附近 Ni、Al、Ti 等元素相对富集，因而析出的  $\gamma'$  相增多。在第二内、外环的后端以及第四外环的局部具有这类组织，这是火焰筒上工作温度较高的部位，这种组织与合金在  $700^\circ\text{C}$  左右时效 2000 小时后的组织状态类似。

## 2. 机械性能

从火焰筒各段取样测定了经长期使用后的拉伸、持久、热疲劳和反复弯曲性能，试验结果见表 1~3。

拉伸性能：火焰筒各段经长期使用后，与原始板材相比，拉伸强度都有所提高，延伸率则有所下降，其中第二内、外环和第四外环的

强度提高较多，塑性下降较大，第五内环的变化最小。另一个特点是，火焰筒各段经长期使用后都在  $700^\circ\text{C}$  有一个低塑性点，延伸率一般保持在 20% 左右，其中第二内环最低 (约 15% 左右)。

持久性能：火焰筒各段经长期使用后的持久强度，和原始板材相比，一般都有较大幅度的提高，而持久破断延伸率，则保持原始板材的下限水平。持久强度的提高，对减小或消除火焰筒的翘曲变形，是十分有利的。

火焰筒长期使用后机械性能的变化和第二相的析出有关，其中  $\gamma'$  和  $M_{23}C_6$  的析出起强化作用，使合金的拉伸和持久强度提高，塑性下降，而针状的  $\sigma$  和 Laves 相则同时降低强度和塑性，但是以  $\gamma'$  相的强化占主导地位。另外材料的晶粒偏大，也是合金持久强度较高，塑性偏低的原因之一。

热疲劳性能：火焰筒裂纹一般均产生在进

气孔边, 因此加工热疲劳试样时缺口多数开在各段的前端(气膜孔的一端), 少数开在后端, 以便比较。试验条件为800~20℃循环140次后测定缺口部位的裂纹长度和宽度增量。由表3可见, 火焰筒各段的前端, 由于气膜冷却温度较低, 无第二相析出, 经长期使用后其热疲劳强度还保持着原始板材固溶状态的水平, 而增宽值普遍增大, 主要是材料晶粒偏大造成的, 但由于各段前端温度较低, 所以产生热变形的

可能性是较小的。反之, 有些段(如第二内、外环)的后端由于温度较高, 经长期使用后热疲劳强度有所降低, 而抗热变形的能力却大为提高。热疲劳强度下降与晶界形成块状碳化物以及针状相的析出有关。火焰筒各段后端温度较高, 但无孔眼等缺口, 因此生成裂纹的可能性是较小的。

反复弯曲性能: 第四外环长期使用后的反复弯曲断裂次数为12次, 说明其工艺塑性还是

表 1 火焰筒使用2080小时后的拉伸性能

| 取 样 部 位 | 20℃                              |              | 550℃                             |              | 700℃                             |              | 800℃                             |              |
|---------|----------------------------------|--------------|----------------------------------|--------------|----------------------------------|--------------|----------------------------------|--------------|
|         | $\sigma_b$<br>公斤/毫米 <sup>2</sup> | $\delta_5$ % | $\sigma_b$<br>公斤/毫米 <sup>2</sup> | $\delta_5$ % | $\sigma_b$<br>公斤/毫米 <sup>2</sup> | $\delta_5$ % | $\sigma_b$<br>公斤/毫米 <sup>2</sup> | $\delta_5$ % |
| 第二外环    | 82.0                             | 32.8         | 66.7                             | 28.6         | 49.1                             | 18.7         | 32.4                             | 33.8         |
| 第二内环    | 81.7                             | 35.0         | 63.8                             | 25.3         | 49.5                             | 14.4         | 32.8                             | 30.5         |
| 第三外环    | 73.6                             | 40.6         | 63.8                             | 30.8         | 60.6                             | 20.1         | 32.9                             | 42.0         |
| 第四外环    | 83.2                             | 29.2         | 68.1                             | 23.3         | 54.8                             | 24.1         | 29.1                             | 50.7         |
| 第五内环    | 75.9                             | 40.1         | 56.2                             | 34.9         | 46.8                             | 20.6         | 28.0                             | 43.9         |
| GH140板材 | 70.4                             | 42.0         | 57.2                             | 38.7         | 42.8                             | 52.1         | 25.9                             | 66.4         |

表 2 火焰筒使用2080小时后的持久性能

| 取 样 部 位 | 700℃×24公斤/毫米 <sup>2</sup> |              | 800℃×8公斤/毫米 <sup>2</sup> |              | 晶 粒 度<br>级 |
|---------|---------------------------|--------------|--------------------------|--------------|------------|
|         | 持 久 寿 命<br>小时:分           | $\delta_5$ % | 持 久 寿 命<br>小时:分          | $\delta_5$ % |            |
| 第二外环    | 150:17                    | 9.3          | 204:00                   | —            | 4~6(3)     |
| 第二内环    | 289:00                    | 9.0          | 265:40                   | 19.5         | 3~5(2)     |
| 第三外环    | 321:40                    | 8.0          | 126:38                   | —            | 4~6(3,2)   |
| 第四外环    | 89:40                     | 20.2         | 230:45                   | 17.2         | 3~5(2)     |
| 第五内环    | 283:00                    | —            | 191:22                   | 18.0         | 3~5        |
| GH140板材 | ~100                      | 6~32         | ~100                     | 18~45        | —          |

表 3 火焰筒使用2080小时后的热疲劳性能

| 取 样 部 位 | 开 缺 口 部 位 | 试 验 温 度<br>℃ | 循 环 次 数<br>次 | 裂 纹 长<br>毫 米 | 增 宽 值<br>% |
|---------|-----------|--------------|--------------|--------------|------------|
| 第二外环    | 前 端       | 800~20       | 140          | 0.49         | 13.35      |
|         | 后 端       | 800~20       | 140          | 0.90         | 0.44       |
| 第二内环    | 前 端       | 800~20       | 140          | 0.46         | 13.0       |
| 第三外环    | 前 端       | 800~20       | 140          | 0.53         | 13.5       |
| 第四外环    | 前 端       | 800~20       | 140          | 0.39         | 2.1        |
| 第五内环    | 前 端       | 800~20       | 140          | 0.51         | 12.65      |
| GH140板材 | 前 端       | 800~20       | 140          | 0.50         | 5.52       |

较好的。

总之,这种火焰筒各段经长期使用后,拉伸强度都有所提高,塑性则有所下降,延伸率一般还保持在20%左右;持久强度仍保持或远远超出原始板材的水平;热疲劳性能则与板材固溶状态的水平大致相似。

#### 四、讨 论

GH140合金在军用发动机火焰筒上的长期使用实践证明,工作温度是决定火焰筒工作可靠性的首要因素,当工作温度在800℃以上时,各种使用故障大量出现,当温度在800℃或更低时,火焰筒可以长期可靠地工作,各种故障大为减少。

这种火焰筒的工作温度分布比较均匀。虽然主燃区火焰中心温度高达2200°K,但由于有效地采用了气膜冷却,据资料介绍火焰筒外环的外表面温度,在掺混区附近(从第二内、外环开始往后)为460~570℃,主燃区附近(第二内、外环以前)最高为780℃。这与我们根据火焰筒经长期使用后的组织状态所判断的结果是一致的。这样的温度范围对GH140合金来说是安全工作温度,火焰筒经2080小时长期使用后基本没有故障,还可继续使用下去。

合金使用过程中机械性能的变化是组织变化所引起的,而组织状态的变化则主要取决于使用温度。GH140虽然是固溶强化合金,但含有5.5%左右的W、Mo、Al、Ti等强化元素,因而具有一定的时效倾向性,从合金在等温时效过程中析出相数量和硬度变化的曲线(图5)可见,合金在550℃的时效过程进行得比较缓慢,400小时以后才达到较大的硬化,1000小时以后组织变化趋于稳定。合金在550℃工作时析出的第二相是 $\gamma'$ 和 $M_{23}C_6$ ,分别分布在晶内和晶界,这两个相都起强化作用,使合金强度有较大提高,塑性下降的幅度则较小,因此对合金的使用是有利的。在700℃时效时, $\gamma'$ 以很快的速度析出,硬度很快出现峰值; $\gamma'$ 相的析出造

成Laves和 $\sigma$ 相析出的有利条件,这两种相降低合金的强度和塑性;60小时后 $\gamma'$ 相稍有回溶,200小时后又补充析出 $\sigma$ 和Laves相,硬度有所下降;因此在700℃使用过程中,同时进行着两类不同相的强化和弱化作用,但是 $\gamma'$ 和 $M_{23}C_6$ 的强化作用占主导地位,400小时后硬度逐渐上升,1000小时后硬化速度有减缓的趋势,说明组织变化渐趋稳定,合金在700℃使用过程中的组织变化,总的说来对合金的使用是有利的。合金在800℃时效过程中析出 $\gamma'$ 、 $M_{23}C_6$ 和 $\sigma$ 相,但随着时间的增长 $\gamma'$ 逐渐回溶, $M_{23}C_6$ 则聚集长大成块状, $\sigma$ 相逐渐增多,这对合金的长期使用是不利的,但由于 $\sigma$ 相析出数量不多,700小时后又开始回溶,因此对合金性能的不利影响是有限的。

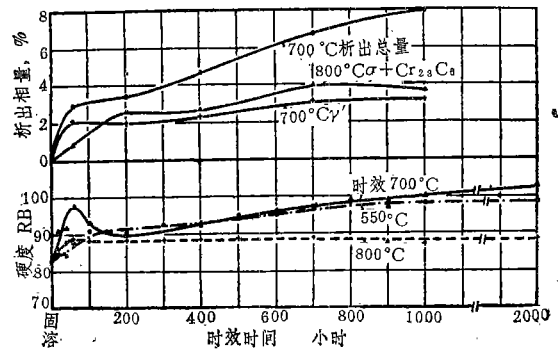


图5 GH140合金在等温时效过程中析出相数量和硬度的变化

燃烧室的使用寿命主要取决于火焰筒。而限制火焰筒寿命的主要故障是裂纹和翘曲变形,这两种故障是由于蠕变和低周疲劳(热疲劳)的相互作用引起的<sup>[1]</sup>。为了减少火焰筒的翘曲变形故障,主要应提高材料的高温强度(屈服点、持久和蠕变强度)。目前在国外的一些航空发动机上已采用高强度的时效合金来制造火焰筒,并取得了良好的效果,将来还可能采用氧化物弥散强化的高温合金和陶瓷材料<sup>[1]</sup>,这些材料的塑性都是很低的。

火焰筒上生成裂纹的主要原因是热疲劳和振动,由于火焰筒取样的限制未进行疲劳试验。

但 GH140 合金板材长期时效后的机械疲劳试验表明(表4),合金在550℃时效1000小时后的中温疲劳性能与板材原始状态的水平基本相同;在700℃长期时效过程中,随着时间的增长,合金的高温疲劳性能有提高的趋势;而在800℃时效400小时以后,疲劳性能才有所下降。

目前国内外的航空发动机火焰筒大多用固溶强化的高温合金来制造,这类合金都具有高的高温塑性。高的塑性有利于零件在工作时应力的重新分布。但对火焰筒零件来说,可保证其安全使用的最低塑性水平还没有统一的认识,主要靠经验的积累。目前时效合金已在气膜冷却结构的火焰筒上获得了成功的应用,如在斯贝发动机上制造火焰筒的C263合金在工作温度下的最低延伸率允许 $\geq 9\%$ ,苏联的燃烧室合金ЭП99在800℃时的 $\delta_5$ 为7~10%。可见,GH140合金在这种火焰筒上经长期使用后的塑性水平( $\delta_5 > 15\%$ )并不算是最低的。

目前,国外航空用新发动机燃烧室的平均寿命大约是8000小时<sup>[1]</sup>,这个寿命是指在一定的取样中有50%的燃烧室由于事故或超出了外场维护极限而引起发动机提前拆换的发动机的平均寿命。GH140合金在这种火焰筒上经使用2080小时后基本没有故障,材料的强度储备非但没有下降,反而有了较大的提高,材料塑性储备虽有下降,但还能保证火焰筒的安全工作,这说明GH140合金还具有继续长期使用的潜力。

长寿命发动机的选材,习惯上选用高一级的材料在较低温度下使用,这主要是为了保证零件具有足够的结构强度。但从组织稳定性的角度出发,较低的温度可以延缓或抑制组织变化的进程。在寿命为几百小时的军用发动机上,GH140合金的安全工作温度为800℃,最高可到850℃,但对寿命为几千小时或更长的发动机,合金的工作温度以控制在700℃或700℃以下更为适宜。

表4 GH140合金长期时效后的机械疲劳性能

| 状 态           | 550℃                                |                     | 800℃                                |                       |
|---------------|-------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|-----------------------|
|               | $\sigma_{-1}$<br>公斤/毫米 <sup>2</sup> | N<br>周 次            | $\sigma_{-1}$<br>公斤/毫米 <sup>2</sup> | N<br>周 次              |
| 1080℃×10'空冷   | 37                                  | $1.206 \times 10^6$ | 19                                  | $2.025 \times 10^6$   |
| 时效550℃×1000小时 | 37                                  | $1.019 \times 10^6$ |                                     |                       |
| 时效700℃×400小时  | —                                   | —                   | 19                                  | $4.395 \times 10^6$   |
| 时效700℃×1000小时 | —                                   | —                   | 19                                  | $> 2.695 \times 10^7$ |
| 时效800℃×400小时  | —                                   | —                   | 19                                  | $3.007 \times 10^6$   |
| 时效800℃×1000小时 | —                                   | —                   | 19                                  | $3.227 \times 10^5$   |

## 五、结 论

火焰筒长期使用后的组织性能的分析表明,这种火焰筒的工作温度约700℃和700℃以下。GH140合金在长期使用中析出了 $\gamma'$ 、 $M_{23}C_6$ 、 $\sigma$ 和Laves等相,其中主要由于 $\gamma'$ 和 $M_{23}C_6$ 相的强化作用,使火焰筒各段经长期使用后拉伸强度都有所提高,塑性则有所下降,延伸率最低为15%左右;持久强度保持或远远超出原始板材的水平,热疲劳性能亦与原始

板材的水平大致相似。因此用GH140合金制造的这种火焰筒在使用2000小时后,仍可继续使用下去。

GH140合金可以在民航发动机上制造燃烧室火焰筒推广应用,火焰筒壁的工作温度以控制在700℃或700℃以下较为适宜。

## 参 考 文 献

- [1] A.H.勒菲佛、金如山,八十年代航空燃气轮机燃烧室的发展,国际航空,1981, No. 10, P25.