

高溫燒結材料的研究

(上)

引言

在發動機制造业中，有效功率的提高显然是与工作介質可达到的溫度有关。溫度，就其本身而言，将受到材料耐热性的限制。因此，每一溫度極限的增高必然有賴于發動機性能的改善。早在1945年以前，德国航空研究界就建議通过两种新的燒結材料达到希望的發展。战后，这一工作已引起了普遍的兴趣。

發汗材料

作者曾建議使用与冷却剂有关的松孔結構材料作为耐热材料。在冷却构件的壁板上有許多松孔，冷却剂穿过这些松孔而达于受热表面。冷却剂沿热气流的反方向流动，到达毛細管的出口时便吸收材料的热量。这项建議的基本出發点是，經過表面最小的溶解使冷却剂均匀地分布在受热的表面上，以便使每个微粒都能有效地受到冷却。这种現象类似于生理上熟知的流汗，所以，作者把这样冷却的材料叫做發汗材料。

对噴口結構材料和噴口提出的要求

冲压式噴气飞机尾噴口的材料在高溫燃气溫度下必須是耐热的和耐溫度交变的。热轉換系数高时，溫度将达 3000°K 以上。燃气溫度的上升多达 $1000^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ 以上。現在可以把对材料的要求归納如下：

- 不允许产生磨損或熔融变形。
- 燃气气流中的氧气不允许与外壁發生反应。
- 耐溫度交变性必須充分可靠。

为了满足上述要求，在約 1200°C 的溫度極限內，采用鋼質噴口。耐热陶瓷材料，特別是純氧化物，仅具有很小的耐溫度交变性。

高溫时需要使用冷却噴口。在正确形成噴口的冷却套时，所用材料的良好导热性和大的冷却剂流速都必須适应 2500°C 下的燃气噴射溫度。

根据弗·內格納特的建議，在較高的燃气噴射溫度下进行临界冷却，是有好处的。冷却剂穿过松孔达于受

热表面，并在壁和高溫燃气气流之間蒸發。正如弗·內格納特的試驗指出，这种冷却方法相应地改进了噴口的耐用性。

对于临界冷却噴口以及通过松孔供給冷却剂方面，只有在大量的冷却剂时，才能使冷却剂分布在同高溫燃气接触的表面上。在使用小量的冷却剂时，外層冷却剂可以通过不均匀的压力分布和非軸向平行的气流分布而彼此疏散。均匀冷却的临界層的形成是很重要的，因为，如果因熔融而出現表面不平时，噴口壁上的热轉換急剧增大。这些粗糙的地方便开始迅速破碎。

当冷却剂吸收的大部分热量在整个过程中不消失时，临界層的冷却是十分必要的。

为保險起见，在表面上的每个地方都要求冷却剂的均匀蒸發，并且这种冷却剂必須通过許多均匀分布在表面上的松孔排出。这种作用依赖于多孔状分布的毛細管，通过这些毛細管可以輸送液体。因此，要求在表面上有均匀蒸發，而这与压力分布和噴口的噴射方向无关。实际上，这种松孔燒結材料在化学工业中常用作滤器材料以及在机器制造业中用来制造含油軸承。首先我們曾由耐溫度交变的陶瓷材料制造了噴口（如图1）。鑒于膨脹系数的不同，当噴口工作时，陶瓷——金屬的密封处不密封了。但是，通过金屬材料的轉变，在不利的情况下也可以得到正常工作的噴口。圖2示出了合适孔状噴口（Lochduese）的結構。圖3是拉法尔噴口（Lavalduese）的結構和結構模型。

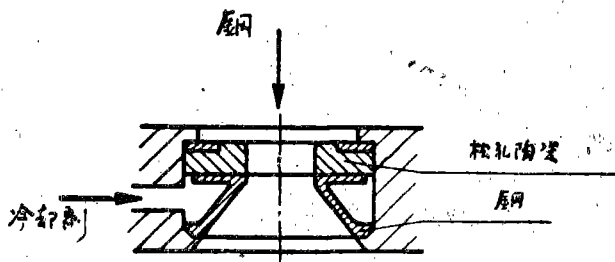


圖1 在通过松孔陶瓷材料輸送冷却剂时使临界層冷却的噴口

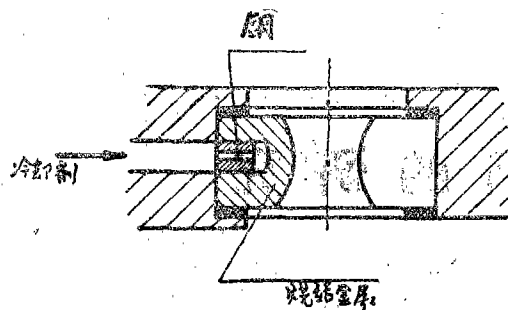
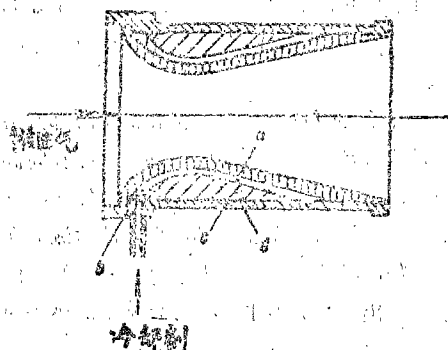
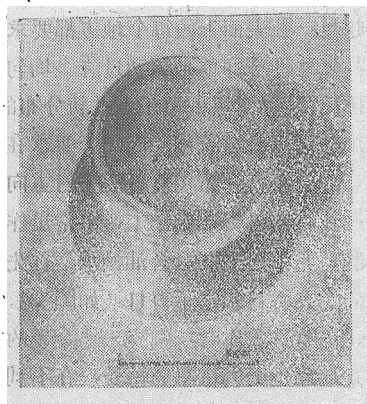


圖2 松孔材料制成的發汗噴口的結構



a—發汗材料噴口；b—分配器環形空間；c—壳体；
d—分成兩部分的



上圖：結構；
下圖：松孔材料構件

圖3 發汗材料制成的拉伐爾噴口 (Lavarduse)

表面冷却的計算

由热轉換系数計算燒結材料必需的渗透性。冷却剂消耗量的上限假设为所有非松孔壁上散发出的热量应当被吸收的冷却剂。發汗材料临界层的冷却示于圖4中。其中 ϑ_1 是冷却剂的初温度， ϑ_2 是高温燃气的温度。在临界层中經冷却剂吸热后，热气流为：

$$W = aF(\vartheta_2 - \vartheta_1)$$

或热气流密度为：

$$w = a(\vartheta_2 - \vartheta_1),$$

式中 a 为热轉換系数 (仟卡/公尺²·小时·度)， F 为表面积 (米²)。

如果应当通过蒸发来冷却的话，那么当由20°C加热到沸点和随之蒸发的温度时，热量 $(i'' - i_{20}^\circ)$ 則被冷却剂吸收。单位时间内流过表面的冷却剂数量为：

$$K(i'' - i_{20}^\circ) = aF(\vartheta_2 - \vartheta_1).$$

若冷却剂的流动密度 $K = K/F$ ，則单位时间内单位面积上流过的冷却剂数量为：

$$K = \frac{a(\vartheta_2 - \vartheta_1)}{i'' - i_{20}^\circ} = \frac{W}{i'' - i_{20}^\circ}$$

为测定噴口出口的热轉換起見，可将噴口看作是弯成圆环状的汽缸内部构件，并可测量横向穿流管段的热轉換。用可比較的試驗条件校驗用規定数据求得的一排管道的橫流管的計算值。用水冷却经过相当成形的鋁噴口，即可求得水值 (Wasserwert)。試驗后所得之值比計算值小12.4%。就进行的試驗看来可以說是一致的。

一排管道的橫流管的热轉換系数 $a = 0.075(\lambda/d)Pe$ 0.75，管直径 d 假设为25公厘。2300°K的导热性可以用外推法求之，假設是0.2仟卡/米·高·度。为了测定柏克萊矢量

$$Pe = wd/a,$$

假設 w 为1000米/秒。导热性可以表示为：

$$a = \lambda/(cp\gamma),$$

在小的压力关系 $cp = 9.1$ 仟卡/克分子略而不計，20个大气压和2300°K时的比重可以用 $\gamma = 2.2$ 公斤/公尺³ 代入計算。所有的值均与类似空气状态的燃气有关 (30克分子重量)。

用这些值可以求得

$$a_{2300^\circ} = 7700 \text{ 仟卡/公尺}^2 \cdot \text{小时} \cdot \text{度}.$$

如果用

$$a_s = \frac{(\vartheta_2/100)^4 - (\vartheta_1/100)^4}{\vartheta_2 - \vartheta_1} C$$

来演算幅射的热轉換，那么以幅射系数

$$C = 5 \text{ 仟卡/公尺}^2 \cdot \text{小时} \cdot \text{度}^4$$

便可得到 $a_s = 700$ 和 $a_{ges} = 8400$ 仟卡/公尺²·小时·度。

假如要求四壁不發热时，則必須用冷却剂吸收与热轉換系数之值相当的热量。在燃气温度为2300°K和燃气压力为20个绝对大气压时，冷却剂吸收的热量为

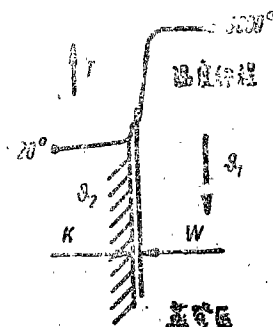


圖4 發汗冷却时的温度行程

$W=0.47$ 仟卡/公分²秒。

为了吸收这种热量，初温度为 20°C 的、220°C 下即行蒸发的和 20 个绝对大气压的冷却剂具有良好的吸热能力，因而能够适应这样的要求（ $i=20^\circ$ ，水=650 仟卡/公斤）。就这些数值而言，必要的冷却剂密度为：

$K=0.72$ 克/公分²·秒。

冷却剂的消耗将是较小的，因为水蒸汽能吸收过量的热。此外还应当估计到，调整冷却剂的临界层同样也可以降低热转换系数。

松孔烧结材料

为使发汗喷嘴适用起见，松孔材料必须在满足下列三个条件下进行焊接和钎焊：

- 要具有足够的抗磨性；
- 要有相当的渗透性；
- 尽可能按普通的方法加工。

通过颗粒形状、颗粒大小、压力和烧结温度的变更，烧结冶金无疑能够适应必需之冷流密度的松孔度和渗透性。同时也必须保证松孔的均匀分布。所采用的松孔金属必定是抗磨的。图 5 中 220 公厘直径和 500 公厘长的松孔零件表明，制造比较大的零件是完全可能的。图 6 是松孔铝。

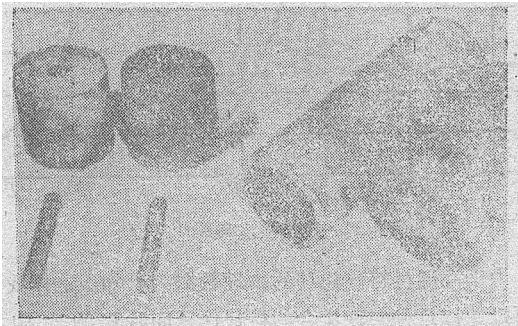


图 5 尺寸较大的松孔钢质部件

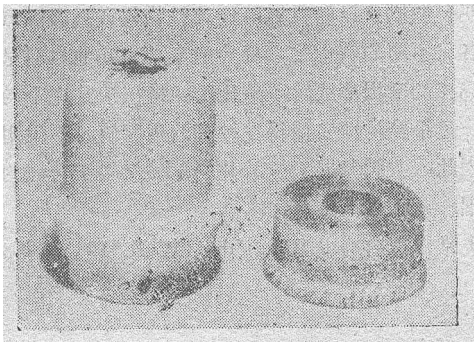
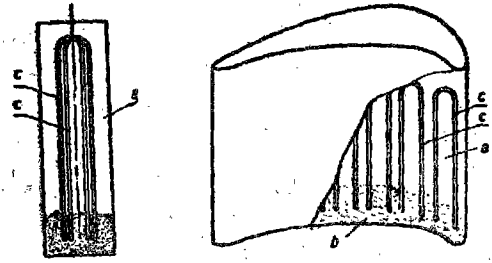


图 6 松孔铝

使用半金属同样是可能的。这种半金属确乎具有它独特的优点。

最后，似乎还应当指出，发汗材料可以用作涡轮叶片材料。由于这种材料的应用，涡轮叶片具有高的抗拉强度。图 7 所示，是一个抗拉的结实材料制成的加肋叶片。



松孔材料嵌
入金属强化

a—材料
b—金属
c—嵌入之金属

图 7 用发汗材料制成的加肋涡轮叶片

半金属

基本试验

我们用发汗材料制成的第一个喷嘴是由陶瓷滤器材料构成的。此种滤器材料是嵌入钢结构中而吻合起来的。经过在高温燃气中的反复试验证明，陶瓷并不是耐温度交变的。我们会希望，用金属与陶瓷材料的混合物提高耐温度交变的性能。在作相应的试验时，我们会同时设法使金属——陶瓷混合物具有金属端头，以获得胜过金属部件的结合可能性。图 8 是由陶瓷滤器材料制成的两面具有纯金属端头的棒材，这就是试验所得出的结果。在中部和端头之间是逐渐纯化的过渡区。在制造时，将粉末分层注入阴模中，然后压制和烧结。将成型的棒材和相应的陶瓷棒材加热到 700°C，随后立即放入冷水中。滤器材料便裂成许多碎片，含金属混合物的棒材却丝毫不变。这个结果刺激了后来叫做半金属的非松孔烧结材料的发展及其在机器制造业中的应用。

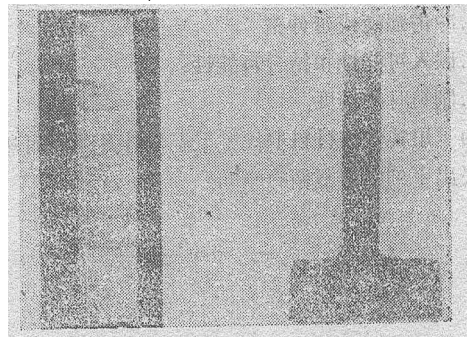


图 8 左：具有金属端头的半金属松孔烧结体；右：连接半金属和钢材的焊接试验

陶瓷材料性脆，容易破裂，对急速交变温度的影响不十分稳定。陶瓷材料的弹性和热力学性能，例如弹性模数、强度、导热能力、膨胀系数等，是与金属材料互不相同的。如果陶瓷材料能够和金属材料结合，这将引起人们极大的注意。反之，烧结金属的性能与金属相近。现在我们将陶瓷和金属的原材料粉末混合。适当选择混合比例后，可以获得介于纯金属和纯陶瓷性能的任意数值。在这种情况下，便可以制造兼有普通陶瓷或烧结金属共同性能的材料。

虽然热力学性能、导热性和各组分的热膨胀系数各不相同，但仍能获得陶瓷与金属的化合物，并没有因急速交变的温度而放松了这种材料的发展。在不同热膨胀的材料制成的连接件间，较大热应力的形成，符合部件的要求。在我们的混合材料中，所有组份均具有最小的微小颗粒，在其间可能会有无限小的位移差。

现在应当试制常用的材料。同时可以把燃气涡轮叶片的发展看作是涡轮工作叶片的试验，这种涡轮工作叶片的负荷是很高的。

基体材料的选择

目前使用的耐热陶瓷材料并不是为机器制造业而发展起来的。其基本上比钢耐热的特殊优点，还必须通过其他一些性能来补充，以便代替耐热钢元件和能够获得一般的结构材料。虽然许多陶瓷材料的耐热性很高，但其温度交变的稳定性仍不能满足燃气涡轮即将提出的要求。此外，对于安装时和钢部件的结合时产生的急剧应力要求有较高的冲击强度，同时，从生产的角度出发还希望有较大的承受变形的能力。在嵌陶瓷入金属结构中时，因膨胀特性的不同而产生困难。从生产角度出发，陶瓷加工的普通精度满足不了机器制造业的较高要求。为了得到适合机器制造业需要的耐热材料，必须改进下列的性能：

1. 耐温度交变性。
2. 冲击强度或延伸率。
3. 嵌入可能性和结合可能性。
4. 制造时的精度。

为了用其他的材料取代燃气涡轮叶片用的耐热钢，必须提出下列应当遵循的原则：

1. 耐温度交变性必须良好，以使叶片的鼓风在高温工作时以及燃料欠缺的情况下不致引起强度的衰减。
2. 在900°C工作温度下，导向叶片的抗拉强度，在其底部至少应当是5公斤/公厘²。
3. 工作叶片的断裂长度必须达到10公厘。
4. 叶片必须保证至少安全工作300小时。

为了判断组合，必须首先测量原材料的强度值，因此在比较抗拉强度时，除以比重（相同横截面之棒材的延伸长度除以其本身之重量）即可确定比较的性能。

在图9中，对钢和氧化铝的组分用虚线表示抗拉强度与温度相关的曲线行程。钢的强度在600~700°C间急剧下降，而氧化铝之强度则在1000°C以上才会下降。图中的实线表示两种材料的延伸长度。两线间的平面是两种材料的混合范围。

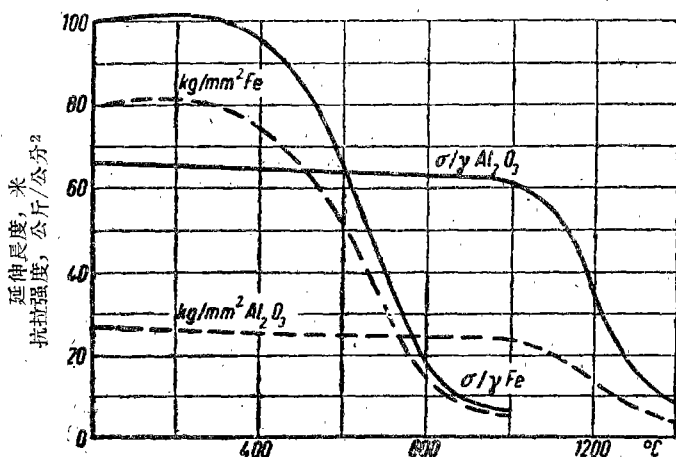


图9 钢和氧化铝的抗拉强度和延伸长度

由于高温材料碳化硅的物理数据为已知，这样我们便可以选择这种与铁化合的材料作导向叶片的结构材料。关于使用各类不同碳化硅的普通取向的试验必须界限分明。我们曾以硬质石墨作比较物体在高温燃气中研究了各种不同的碳化物，并且确定，当其他材料呈显出完全异样的磨损形式时，碳化物的烧损形式完全与石墨相同。这个结构似乎使得在较高的强度值时不采用碳化物。因此，我们发展工作叶片的试验仅限于含铁的坚实氧化铝。（下期待续）

史常仁译自“Jahrbuch der WGL”1955年第332页