有序熔楔和转捩

林同骥 陈仲英 王汝涌 浦 群 周正瑾 阎明山
（中国科学院力学研究所）

提要 本文研究烧蚀表面上的一种尖楔状沟槽，简称熔楔．实验表明，熔楔是边界层转捩区的一种烧蚀现象：在蜂蜡和一些高温材料的球头上，熔楔排列有序，形成规则图象．在所实验的参数范围内，熔楔的条数保持在 20 条左右，不随来流马赫数、球头半径和烧蚀材料类型不同而改变．在分析研究熔楔内部结构和外流条件的基础上，本文提出熔楔形成机理和内外流动模型的设想，并对熔楔的形态、分布以及由它引导出菱形花纹等现象作了解释．

一、引　言

在烧蚀表面上，有时可以看到一些较深的楔状沟槽，我们称之为熔楔，它是一种值得研究的烧蚀现象．

研究这种烧蚀现象，不仅是飞行器防热和气动设计的需要，同时由于烧蚀表面形态在一定程度上起着显示流场的作用，因而对深入认识烧蚀花纹形成机理以及边界层转捩和湍流起因等有所帮助．

不少人[1—4]在实验中发现过熔楔，但细致的研究尚不多见．本文着重通过一系列的实验研究，掌握基本的物理现象，找出控制这些现象的规律．

用低熔点材料进行了一系列实验，发现熔楔是边界层转捩区的一种烧蚀图象．在一定的条件下，熔楔分布有规则，形成整齐的排列，不仅起始点较整齐，而且间距也相差不多．熔楔的条数与来流M数、头部半径无显著关系．

实验结果还表明熔楔是过渡区中出现的较普遍的烧蚀现象，它不仅出现在不同几何外形诸如尖锥、平板和球锥的表面，而且在不同类型的烧蚀材料如融化、升华和碳化材料上都能形成．不仅在外部流动中看到熔楔，在内部流动的烧蚀表面上也有熔楔存在．

在分析实验现象的基础上，本文初步提出解释熔楔特点和熔楔引起菱形花纹的流动模型，为建立工程计算方法提供了基础．

二、熔　楔

图版 I 照片 1(a) 是一个钢尖和蜂蜡后体的锥型模型．可以看到在光滑的锥身上有一个十分醒目的尖楔状沟槽，这就是熔楔．在实验条件下，锥身上大部分表面处于层流状态，烧蚀量很小；但因为某种原因楔内已局部转捩成湍流，热流剧增，烧成深沟．对这种局部转捩的现象，国外有人称之为湍流楔（turbulent wedge），为了将它与没有烧蚀下的局

本文于 1979 年 11 月收到．

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

部转捩区区分，我们把烧蚀表面上的这种尖楔状沟槽称之为熔楔（ablation wedge）．图版 I 照片 1(b) 是平板上的熔楔．

仔细观察熔楔表面，还发现有这样的特点：楔角有一定的范围，一般半楔角在 9°—11° 左右；在楔的前缘往往有一段细沟作先导(图 1)，表示熔楔的发展往往有一段滞后的距离；这种延迟情况在锥面和平板上较为明显，在球头上不太明显．楔内深度也不是均匀分布的，从前后位置看来，在楔开始展开处，深度最大，往后逐渐变小．从左右看来，在发展较好的熔楔的两边下凹较深，造成两条不是很宽但深度较大的侧沟．

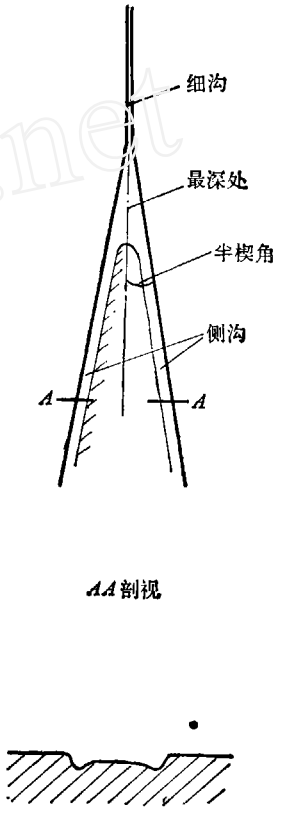


图 1　熔楔的表面特征

来流温度对熔楔的形成发展有影响．当来流温度较低时，表面融熔层流动较慢，熔楔短而不明显；当来流温度较高时，表面融熔层流动较快，熔楔变得又长又大．这表明融熔层粘性对熔楔的增长有影响．粘性较小时，熔楔能延伸较长距离而不致演变成其他形式的图象．

来流压力对熔楔的影响往往反映在雷诺数上．当来流压力较低时，物面处于稳定的层流流动，则没有熔楔发生；当来流压力升高时，在过渡区开始出现熔楔，但数目较少，长度较大，表现为如图版 I 照片 1(a) 那样孤立的大熔楔．来流雷诺数提高，出现熔楔的数目也就增多，逐渐趋向较稳定的有序分布．在雷诺数过高时，它们很快相互汇合变成花纹，形成一片湍流区，同时熔楔变得较短，且不明显．

熔楔的存在相当普遍．除了用蜂蜡材料外，用樟脑和萘制作模型进行试验，同样得到熔楔．除了地面试验的一些低熔点材料外，在一些由高空进入大气层的高熔点材料上，例如在陨石[9]的表面上，也看到了熔楔．在外部流动的烧蚀表面上存在熔楔，在内部流动的烧蚀表面上也有熔楔存在．一些资料报导，在风洞中的橡木和松木[1]这类碳化材料上出现过熔楔，在弹道靶[2,3]和风洞[4]中的塑料这样的融化材料上也出现过熔楔．说明在不同形状、不同材料和不同的流动形式下，烧蚀表面上都可能形成熔楔．

上面叙述的都是具有明显楔状的典型熔楔，在实际情况中因受多种因素的影响，有时熔楔不明显．当雷诺数过高时，熔楔有时退化为湍流区前的一些不很规则的沟，称之为变形熔楔．有时在钝头体头部还会遇到一种较大的凹坑(图版 I 照片 2(a))，数目较少，分布不均，深度随时间发展很快，且只发生在头部，在锥面上没有发现．出现凹坑时的雷诺数一般略低于有序熔楔．可以看到蜂蜡模型上的凹坑与陨石上的凹坑(图版 I 照片 2(b)) 十分相似．

三、有 序 熔 楔

熔楔的分布一般来说是随机的，起始点前后位置不一，左右间隔不一，长度和大小也不同．但是我们发现在一定的条件下熔楔的分布会变得较为有序，这是一个值得注意的

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

现象.

这样的熔楔首先是在球头上发现的. 从图版 I 照片 3(a), 3(b) 中可以看到在球头部离驻点约 40° 的位置上有一圈均匀的熔楔. 它们的起始点整齐,左右间距也相差不多,长度几乎一样,均延伸到肩部,一周的熔楔数约在 20 条左右.

这种整齐排列的熔楔会不会是偶然出现的呢? 为此,我们在来流 M 数分别为 4、5、6、7 的条件下,用头部半径分别为 30 毫米、25 毫米和 15 毫米的蜂蜡球锥模型进行试验,发现在一定的来流压力和温度下都能得到这样一种整齐的图象(见图版 I 照片 4). 这就表明这种有序的熔楔不是偶然发生的,而是一个有规律的现象.

在带有钢尖的蜂蜡锥身上,大多数场合得到的熔楔是前后不太整齐的. 但是我们发现当来流温度提高较多时,例如从 130℃ 提高到 250℃,锥身上的熔楔分布很均匀,且延伸较长,一周的熔楔数约为 15 个(图版 II 照片 5). 这种锥身上熔楔排列较为有序的现象,在经高温风洞烧蚀后的塑料模型上[4]也曾发现.

除了在风洞中用蜂蜡模型得到有序的熔楔,在再入大气层的高熔点材料上也发现有与照片 3(a)、3(b) 非常相象的图象.

以上表明,对外形不同的低温和高温烧蚀材料在地面试验和飞行条件下,有序熔楔的存在有一定的普遍性.

值得注意的是对不同的来流条件、不同大小的球头模型,无论是在风洞中的蜂蜡模型,还是飞行试验中的高温材料模型,有序熔楔条数一周均在 20 条左右. 表 1 列出十次试验所得球头有序熔楔的条数,可见其数目大致不变.

表 1 蜂蜡球锥模型有序熔楔条数

编 号	来流马赫数 M_∞	来流总压 P_0 (公斤/厘米²)	来流总温 T_0(K)	球头半径 R_N (毫米)	烧蚀时间 t (秒)	熔楔条数 N
627	4	15	403	25	23	~20
628	4	20	403	25	19	18
136	5	25	403	25	25	19
146	5	25	403	25	37	19
256	5	25	463	30	13	18
233	6	60	403	25	35	18—19
248	6	70	403	25	38	17—18
246	6	60	403	25	34	20
278	7	80	523	30	20	18
280	7	80	403	30	49	18

四、出 现 条 件

我们通过实验探索有序熔楔出现的规律,发现物面外流的 Re 数与材料两者都起了作用. 对于一种材料来说,控制出现不同烧蚀图象的主要参数是 Re 数.

保持来流温度不变,当来流压力较低时蜂蜡头部处于层流烧蚀,外表烧得较光滑,头部半径越变越大,烧成一个较钝的光头,有时,上面可以看到一些细沟或流纹(图版 II 照片 6(a)). 当来流压力提高,转捩发生在球头部,则表面出现有序的熔楔(图版 II 照片 6(b)).

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

压力继续增高，则熔楔前移、缩短并退化，其后紧接产生鱼鳞坑(图版II照片6(c))．在熔楔前面有一小块较光滑的层流区．

图 2 给出不同的烧蚀图象出现的条件．可以看到在温度不变的条件下，在各种不同的 M 数下，随着来流总压的逐渐提高，球头表面依次产生光头(有时有流纹或细沟)、凹坑、熔楔和鱼鳞坑等各种不同图象．同类图象在图中大致落在一条斜直线上．

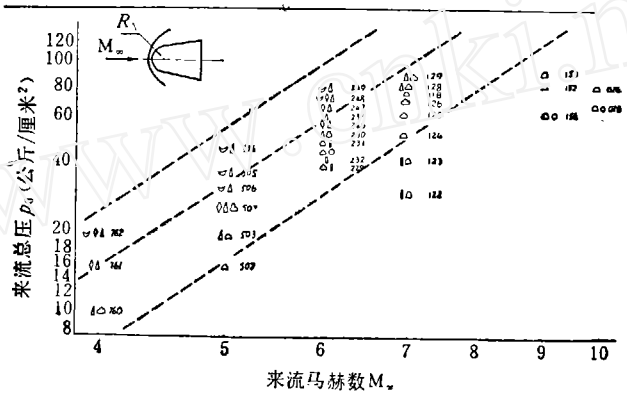


图 2　蜂蜡球头烧蚀图象分布

符号	⌣	◇	Δ	⌂	▯	⌒	○
说明	鱼鳞坑	菱形花纹	熔楔	凹坑	窄沟	光头	丝沟

R_N=25 毫米　　T_0=130℃

当来流总温和模型头部半径不变并为高 M 数时，在图示的对数坐标中等雷诺数线为一族斜直线，它们基本上与通过同类图象的斜直线一致，这就反映了雷诺数对烧蚀图象的控制作用．

来流温度对有序熔楔的形成也有影响．一般说来，对于蜂蜡这样的融化烧蚀材料，温度较高，易使熔楔有序．

既然熔楔是一种边界层转捩区的烧蚀现象，则由熔楔位置还可以判断有烧蚀下的转捩雷诺数．

除了雷诺数外，烧蚀面平滑，材料均匀，不含杂质，是产生有序熔楔的重要条件．因为在过渡区中，表面粗糙容易触发转捩．

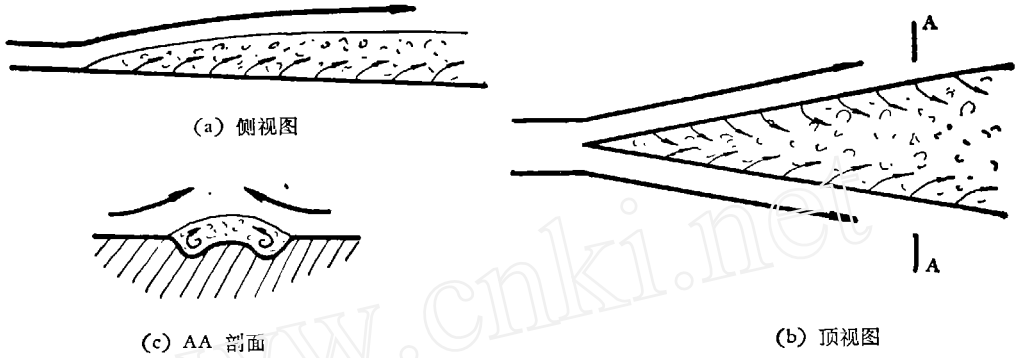
五、形 成 机 理

烧蚀表面为什么会形成熔楔，它为什么会有前述的特点以及为什么熔楔有时排列较有序，这些问题都值得探讨．

从熔楔的尖楔状形态看来，它的形成与湍流斑的增长发展有关．实验表明[5-7]在边界层转捩区中的湍流斑以逐渐增长的湍流团的形式运动，其包络是半楔角约为 11° 的楔形区．湍流区热流比层流区大很多[8]，因而在烧蚀材料上留下了尖楔状的深沟．

在实验中发现平板或锥身上的熔楔往往有一个细沟为前导．这可能与外流为超声速以及烧蚀表面是自然转捩有关，故熔楔有个延迟阶段，与亚声速下用电火花产生的人工转捩[7]不同．

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) 侧视图

(b) 顶视图

(c) AA 剖面

图 3 熔楔流动结构设想图

从实验中可以清楚地观察到融化的液珠流经熔楔时有绕流现象，即液珠经过熔楔侧边向后流走，而不进入熔楔内部. 测量也指出流体流经湍流团时有与绕物体流动相类似的特点. 熔楔内不仅是湍流区，还加上烧蚀产物的引射，绕流更明显. 于是，可以设想在熔楔两边会诱导出一对旋涡(图 3)，在旋涡的作用下熔楔两边烧成较深的沟.

由于这种绕流作用，可以设想边界层底部的亚声速流动在楔的外面加速，因而推迟了该处的转捩，使其继续保持一段层流. 这可能就是熔楔在有序分布时彼此保持一定间距的原因.

对应于同样的雷诺数变化，球头上的轴向位置变化比锥面上要短(图 4)，这使球头上的熔楔较易有序.

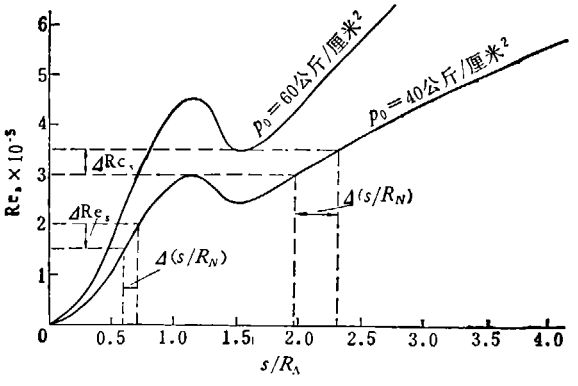


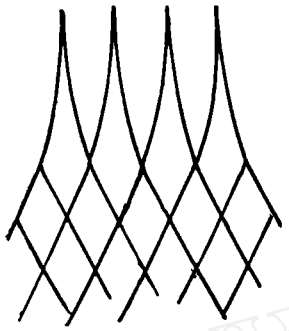
图 4 球锥表面雷诺数分布

$M_\infty=6$ $T_0=403K$ $R_N=25$ 毫米

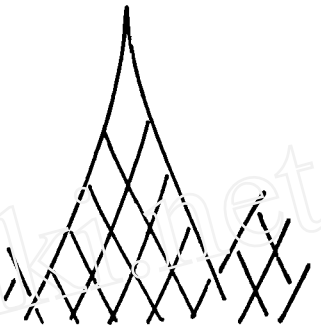
六、熔楔和花纹

实验发现熔楔之后往往紧接着产生菱形花纹. 一般有下列两种情况. 一种是相邻熔楔的两边相交，其交点为菱形花纹起点(图版 I 照片 3(a)、3(b)，图 5(a))，另一种是熔楔的两边演变为花纹的两边，在这个大楔形区内布满花纹(图 5(b)，图版 II 照片 7). 两种情况的共同点即菱形花纹起始于熔楔的两边. 熔楔演变为花纹这一事实也和我们在陨石考察[9]中观察到的陨石气印流纹一致，这说明熔楔和花纹之间存在一定的内在联系.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) 相邻熔楔两边相交交点成为菱形花纹起点



(b) 熔楔两边演变为菱形花纹两边，在大楔形区内布满花纹

图 5　熔楔和菱形花纹示意图

为了探索这一内在联系我们在流动处于将要出现而还没出现菱形花纹这种准稳定状态下进行了插针试验．从表面形态看来(图版 II 照片 8)，插针引起的锥形激波在物面烧出的沟与菱形花纹的两条边十分相似，并且此后接着产生第二道激波，这和菱形花纹一个接一个的现象一致．

根据熔楔两边有烧得较深的沟这一事实，上节提出熔楔两边存在一对旋涡的设想．因此可以认为熔楔的两边是扰动集中的区域．这种扰动在发展的初始阶段埋在边界层流动的亚声速部分，因而不会引起锥形激波．熔楔的楔角与低速实验时湍流楔角度相仿，半角为 11° 左右．而当这种扰动增长到一定程度则影响到超声速流中，于是引起锥形激波，熔楔便变为花纹，角度也与 11° 无关，而由该处外流 M 数所决定．因此，熔楔两边的旋涡可能就是最初引起花纹的一种扰动源．如果熔楔两边的旋涡最终没能增长到引起激波，则这对旋涡就会沿流向慢慢衰减，由熔楔引出一对沟槽．

七、结　　论

1. 熔楔是边界层转捩区中较普遍存在的烧蚀图象．它在不同几何外形、不同材料类型以及地面模拟或飞行试验中都存在．

2. 熔楔有一定形态：半楔角为 9°—11°，略小于亚声速湍流楔半楔角；前面有细沟引导；发展较好的熔楔两边有两条较深的窄沟．以上表明熔楔表面流动有一定的结构．

3. 在一定雷诺数、合适温度和材料较均匀的条件下，球头部和尖锥体上存在有序熔楔．实验发现球头部的熔楔个数与来流马赫数、球头半径以及材料种类无明显关系．

4. 控制各种烧蚀图象出现的主要参数是雷诺数．因此，从有序熔楔发生位置可以推断烧蚀情况下的转捩雷诺数．

5. 由熔楔的形态及分布设想熔楔周围流动有绕流特性；熔楔两边有一对旋涡．由于旋涡的作用使熔楔两边产生较深的窄沟．绕流作用造成熔楔分布有一定间隔．球头部雷诺数变化比锥面快是球头上容易出现有序熔楔的原因．

6. 基于熔楔两边存在窄沟以及菱形花纹起始于熔楔两边的事实，设想菱形花纹最初是由于熔楔两边扰动增大，在超声速外流中产生锥形激波的结果．

最后，感谢北京空气动力研究所有关同志在实验中给予的帮助．

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参 考 文 献

[1] Laganelli, A. L., Nestler, D. E., *AIAA J.*, 7(1969), 1319—1325.
[2] Canning, T. N., Wilkins, M. E., Tauber, M. E., *AIAA J.*, 1(1968), 174—177.
[3] Wilkins, M. E., Tauber, M. E., AIAA Paper, 66—27.
[4] McDevitt, J. B., *J. Spacecraft and Rockets*, 2(1971), 161—169.
[5] Emmons, H. W., Bryson, A. E., JAS (1951), 490—498.
[6] Mitchner, M., JAS (1954), 350—351.
[7] Schubauer, G. B., Klebanoff, P. S., NACA TN 3489 (1955) and NACA Rep. 1289 (1956), see also: Proc. Symposium on boundary layer theory, NPL England (1955).
[8] Klein, E. J., AIAA Paper, 68—376.
[9] 林同骥、陈仲英、王汝涌、蒲明山、周正瑾、吉林陨石雨论文集 (1979).

ABLATION WEDGES AND BOUNDARY LAYER TRANSITION

Lin Tongji Chen Zhongying Wang Ruyong
Pu Qun Zhou Zhengjin Yan Mingshan
(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Abstract

An experimental study was carried out on the ablation wedge, the turbulent wedge on an ablating surface. An interesting phenomenon of orderly distributed ablation wedge pattern was discovered on some spherical noses of wax models as well as on those of some high temperature ablating materials. Test results indicate that this kind of phenomenon occurs at roughly the same Reynolds number and that the number of the orderly distributed wedges on a spherical nose is not affected by the nose radii and the Mach number of the free stream. On the basis of an analysis of the detailed surface striation of the ablation wedge, a preliminary flow model was proposed to explain the wedge distribution and its relationship with the cross-hatching ablation pattern.

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

www.cnki.net

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

www.cnki.net

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net