

# 发汗式主动冷却金属热防护系统主动冷却效率研究

刘 双, 张博明

( 哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150001 )

**摘 要:** 发汗式主动冷却金属热防护系统是一种新型概念, 将发汗冷却方法应用于金属热防护系统中, 用于提高金属热防护系统的热载荷承载能力, 是解决临近空间高超声速飞行器防热问题的有效方法。设计并建立了发汗式主动冷却金属热防护系统的实验模型, 分析了发汗式主动冷却金属热防护系统的基本冷却原理, 测量了同一实验模型分别在有无发汗冷却作用下, 沿厚度方向不同位置测量点的温度响应。结果表明: 在相同的加热条件, 采用发汗冷却方法, 可以使受热蒙皮材料达到相同温度的时间明显滞后; 在发汗冷却作用的过程中, 内部隔热层的温度不会超过水的沸点温度; 采用发汗冷却方法, 可以使同一结构热载荷承载能力至少提高 70%; 通过合理的结构设计, 可以减少受热蒙皮由于热膨胀而引起的结构变形。

**关键词:** 发汗冷却; 主动冷却; 金属热防护系统; 高超声速飞行器

中图分类号: V528 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2011)02-0433-06

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2011.02.031

## Investigation on Transpiration Active Cooling Metallic Thermal Protection Systems

LIU Shuang, ZHANG Bo-ming

( Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China )

**Abstract:** Transpiration active cooling is a new concept for the metallic thermal protection system used to increase the capacity of thermal load-bearing in potential application of hypersonic vehicle. The basic principle of the active transpiration cooling is analyzed. The transpiration cooling metallic thermal protection structure is designed and the experiment is performed. The temperature data measured by test are compared with that of the uncooled structure. Results show that actively cooled structure takes more long time to reach to the same temperature than the uncooled one, the temperature of inner structure is lower than the boiling point temperature of water under that pressure. Moreover, the total thermal load-bearing increases up 70%. Deform of hot skin of the actively cooled structure caused by heat expansion is avoided by using the special shape slots.

**Key words:** Transpiration cooling; Active cooling; Metallic thermal protection system; Hypersonic vehicle

## 0 引 言

临近空间高超声速飞行器由于飞行速度快, 飞行时间长, 主要的巡航区域在大气层内临近空间, 所以面临着极其严苛的气动加热环境。主动冷却热防

护系统是解决临近空间高超声速飞行器防热问题的有效方法。相较于研发新型耐高温材料, 主动冷却热防护系统同时具有主动冷却和热防护系统的两方面的优点: 可以在现有的比较成熟的热防护系统上进行结构改进, 缩短研究和设计的时间; 主动冷却的

冷却能力较强,可以提高现有热防护系统的许用热载荷或者在相同的热载荷作用下,降低对结构和材料的温度要求;主动冷却热防护系统可以进行温度和热流的开环甚至闭环的主动控制,提高系统的防热效率。

发汗冷却是主动冷却的一种具体冷却方式,发汗式主动冷却金属热防护系统是将发汗冷却方法与金属热防护系统相结合,采用水作为冷却剂,直接吸附于金属热防护系统中的隔热层,利用水的相变吸收辐射进入系统内部的热量,达到降低内部结构温度的目的,可以适用于更高数量级的热载荷管理<sup>[1-2]</sup>。

迄今为止,并没有用于实际飞行器的主动冷却金属热防护系统,但是可以查阅到关于主动冷却热防护系统的各种设计方法和设计理念的专利。直到最近,随着金属热防护系统的研究,主动冷却的研究也有了一些研究进展。Rakow 和 Waas 在对流冷却板方面进行了一系列的研究和改进,分别在实验、数值分析、微观角度研究了金属铝泡沫的剪切载荷,设计了对流主动冷却的夹具并进行了热应力的实验研究<sup>[3-5]</sup>。Buursink 和 van Baten 针对 DART 再入舱进行了增强辐射冷却和直接冷却的设计和实验研究<sup>[6-8]</sup>。

本文对发汗式主动冷却金属热防护系统进行了基本原理分析和结构设计,并通过实验对其冷却效能进行了评价。

## 1 基本理论分析

对于传统的金属热防护系统,外部蒙皮承载热载荷,并且尽可能多的向外部空间辐射热量,同时,在外部蒙皮下部放置隔热材料,最小化向内部结构传导的热量,保证内部的结构工作在许用的温度范围内,如图 1(a) 所示。

对于热防护系统,如果实际工作热载荷超过极限热载荷,就需要采用主动冷却的方法增强其能量排散能力。发汗冷却的效果体现在两个方面:在不增加外壁温度的情况下,提高外壁结构所能承载的热载荷。这种效果主要是通过向内部的冷却剂辐射热量,促使其蒸发,随着蒸气的排放,把热量从系统带走。另一方面,对于确定的热载荷,减小了结构在

这一热载荷下的背部最大温度响应。

采用一维模型,传统的热防护系统的能量平衡方程可以表述为下面的形式:

$$\dot{Q}_l = \dot{Q}_s + \dot{Q}_r + \dot{Q}_c \quad (1)$$

式中  $\dot{Q}_l$  为气动热载荷;  $\dot{Q}_s$  为热沉结构所吸收的热量,使结构的温度升高;  $\dot{Q}_r$  是辐射热量;  $\dot{Q}_c$  为通过蒙皮材料向内部和向侧向传导的热量。公式(1)展开可以表示为:

$$\rho_1 c_{p1} d \frac{dT_1}{dt} = q_c \left( 1 - \frac{h_w}{h_s} \right) - \sigma \varepsilon T_1^4 - \sigma \varepsilon_n (T_1^4 - T_2^4) - k \delta_{\text{insul}} (T_1 - T_2) \quad (2)$$

其中,  $C_p$  是热防护系统的比热;  $\rho$  为材料的密度;  $q_c$  是表面在热力学温度零度时传入防热层表面的热流密度;  $h_w$ 、 $h_s$  分别为气体在表面壁温下的比焓和恢复焓;  $\varepsilon$  是表面全辐射系数;  $\sigma$  是斯特潘·波尔兹曼常数 ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ );  $T_1$  是外表面温度;  $\varepsilon_n$  为内表面辐射系数;  $T_2$  是隔热材料中的温度,随  $x$  方向而变化;  $k$  是材料的热导率。

为了简化计算,增加理论的工程应用性,模型作如下假设:忽略侧向导热;同时由于飞行器要减轻各个结构的质量,最小化材料的热容,实现轻质化,因此蒙皮的热沉效应和向内部传导的热量在近似计算中被忽略。金属热防护系统的许用热载荷可以近似为:

$$\dot{Q} = \sigma \varepsilon T_1^4 + \sigma \varepsilon_n (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

对于被动金属热防护系统,为了提高金属热防护系统的热载荷承载能力,增加相同结构热防护系统的许用热载荷,在以下两种条下,可以使进入表面的热流完全由辐射方式散去,如图 1 中(b)和(c)所示。

图 1 中(b)表示的是使隔热材料与外蒙皮贴合,并且内部采用一种理想的隔热材料,使其热导率  $k = 0$ ,则对表面的气动加热完全被辐射项抵消,即:

$$q_c \left( 1 - \frac{h_w}{h_s} \right) = \sigma \varepsilon T_1^4 \quad (4)$$

图 1 中(c)表示的是在外蒙皮与隔热材料之间留有一定的空隙,两者之间仅有辐射传热,如果外蒙皮内表面的辐射系数  $\varepsilon_n = 0$ ,则向内表面的传热为零,在这种情况下也会出现公式(4)所示的情况,即外表面所受的气动热载荷完全被表面辐射散去。

发汗冷却可以达到与上述理想情况相同的效果,发汗冷却的能量平衡方程为:

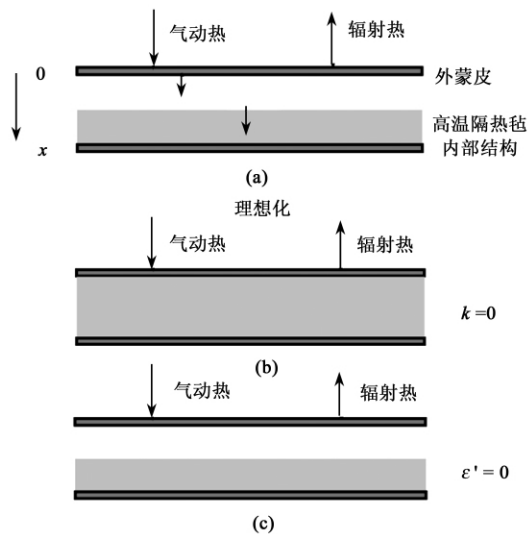


图1 金属热防护系统防热原理简图

Fig. 1 Sketch of thermal protection principle in metallic TPS

$$\dot{Q}_l = \dot{Q}_s + \dot{Q}_r + \dot{Q}_c + \dot{Q}_x \quad (5)$$

与公式(1)相比,主动冷却热防护系统明显的增加了 $\dot{Q}_x$ ,即冷却剂的相变热。冷却剂的相变热的计算公式为:

$$\dot{Q}_x = h_p \cdot m_p \quad (6)$$

式中 $h_p$ 为相变热; $m_p$ 是相变材料的质量。因此,发汗冷却金属热防护系统主要是利用冷却剂的相变潜热吸收辐射进入结构内部的热量。

## 2 材料选择和结构设计

### 2.1 材料选择

材料的选择和研究主要包括受热蒙皮材料的选择、耐高温隔热材料的选择、冷却剂的选择。

蒙皮材料位于系统的最外侧,直接与高温气体接触,承受气动热载荷和压力载荷,同时保护内部的材料和结构。蒙皮材料的选用需要考虑的因素主要有使用温度、刚度、强度、热膨胀率和韧性等,对于原理样件,采用的蒙皮材料为普通302不锈钢板,厚度1mm。

在金属热防护系统中,高温隔热层是极其重要的部件,主要功能是阻挡热量进入内部结构,具有低热导率和低密度的特点。对于发汗冷却金属热防护系统,需要选择的高温隔热材料主要满足两个方面的要求,隔热能力和冷却剂的吸附能力。吸附能力

是指多孔隔热材料必须具备一定的液体毛细吸附能力和液体的毛细传输能力,具体要求为吸附大量冷却剂的能力、有较高冷却剂保持能力、通过毛细作用把冷却剂输送到表面的能力、良好的辐射性能、较好的化学稳定性和较低的残余饱和度。

对于原理样件,采用洛阳耐火材料研究院生产的高铝质隔热毯,长期使用温度为1200℃,型号GNX-1200,其中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的含量为55%, $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 0.35%,其余成分为 $\text{SiO}_2$ ,表观密度80-100kg/m<sup>2</sup>(单位体积的试验材料包括空隙在内的质量),用作高温结构的隔热和冷却剂吸附和传输介质。对高温隔热毯的辐射率进行了实验测量,测量结果是:

$$\varepsilon_{\text{porous}} = 0.78。$$

选用的冷却剂应该具有较低的蒸发温度和较高的蒸发热。单位质量的液体中,水的蒸发热最大,因为在100℃条件下,还有75%的液态时的氢键需要破坏。由于水在较低的温度具有更高的蒸发热,因此0-150℃的温度范围是比较有益的范围。温度过低,处理过程比较困难;温度过高,则会减少外部蒙皮和饱和的多孔渗水层的热量的传递。同时水作为冷却工质具有易于处理,无毒,低成本的优势,是一种理想的冷却剂。

### 2.2 结构设计

冷却结构的设计包括使用不锈钢302作为蒙皮材料和底部支撑结构,尺寸为750×750×1mm。内部选用GNX-1200作为多孔材料层,尺寸为400×400×20mm。水作为冷却剂,渗透到多孔材料中。

为了防止金属蒙皮在高温下的变形,蒙皮与支撑结构之间采用螺栓连接,固定上层蒙皮和下部支撑结构,控制和调节蒙皮和多孔材料层的距离。螺栓在一个角上是固定的,其它角上的螺栓可以在扩展槽内移动。设计扩展槽主要是约束板的平动和转动自由度,允许相对于底部支撑结构的自由膨胀和收缩。实验结果表明,这种设计十分有效,作为蒙皮的不锈钢板在反复多次的实验中没有发生明显的变形。

原理样件主要包括受热蒙皮、支撑结构、隔热材料和底板结构,如图2、图3所示。

## 3 实验

为了研究发汗冷却热防护系统的冷却能力,对

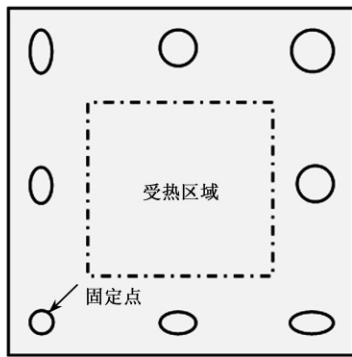


图 2 蒙皮结构示意图

Fig. 2 Sketch of skin

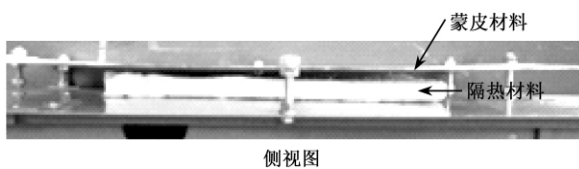


图 3 发汗冷却金属热防护系统原理样件结构简图

Fig. 3 Sketch of construction of principle sample panel  
cooling by transpiration

其进行了高温实验研究。实验在石英灯阵列中进行。石英灯阵列加热功率为 63kW, 辐射工作面积为  $600 \times 600\text{mm}$ , 单位辐射功率为  $20\text{W}/\text{cm}^2$ , 辐射最高温度可以达到 1170K。

采用石英灯阵列上侧加热法, 即热源处于样件的上方, 采用辐射加热的方法提供热量。实验分别测试了同一结构, 如图 4 所示, 在有无发汗冷却作用下各个测量点的温度响应。两者的区别在于高温隔热毯内不含有作为冷却剂的水, 系统单独采用低热导率的隔热毯作被动隔热; 另一种则是高温隔热毯内, 采用自然吸附的方法吸附作为冷却剂的水, 并达到饱和状态, 系统采用了防热-隔热一体化的发汗冷却热防护系统的方式。

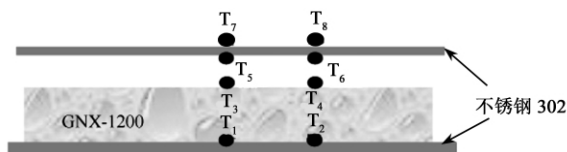


图 4 发汗冷却结构中热电偶的分布示意图

Fig. 4 Distribution of thermocouples

两种系统的热载荷条件相同, 即控制蒙皮温度达到  $500^\circ\text{C}$  后停止加热, 自然冷却至室温。多孔材料层与蒙皮的距离控制在 10mm。

实验中, 采用 K 型耐高温热电偶测量关键点的温度, 采用热流计采集过程热流密度, 热电偶在结构中的布置位置如图 4 所示。

实验测得的温度相应结果如图 5 和图 6 所示。由图 5 可知, 在加热阶段, 所有测量点的温度都升高。但是升温的速率和先后有所不同, 升温是按照  $T_7$ 、 $T_5$ 、 $T_3$ 、 $T_1$  的先后顺序, 同时温度的高低也是按照上述顺序排列。从这些关键点可以看出, 温度是从受热表面开始, 然后受热表面的内表面温度也开始升高, 然后热量辐射到内部隔热层表面, 最后传递到结构内部。结果表明: 在没有发汗冷却作用下, 外层受热蒙皮外表面和内表面以及隔热层表面的升温速率较大, 升温时间很短, 而内部结构层的升温速率较小, 经过一定时间温度才开始上升, 这说明热量也要经过一定的时间延迟到达隔热材料下部的内部结构层。

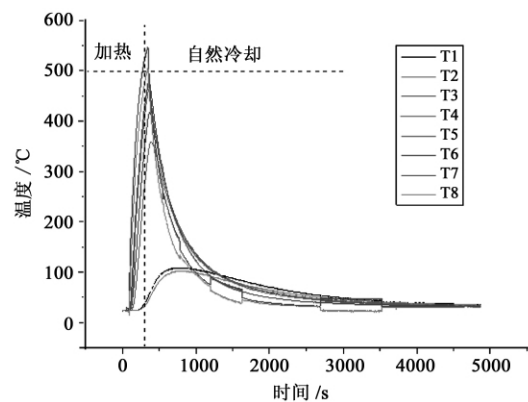
图 5 发汗冷却原理样件的温度-时间曲线  
(没有主动冷却作用)

Fig. 5 Temperature-time profile of uncooling TPS

在上述加热情况下, 外蒙皮外表面温度达到  $500^\circ\text{C}$ , 外蒙皮内表面的温度达到  $480^\circ\text{C}$ , 而蒙皮内外的温度差很小, 在  $20^\circ\text{C}$  之间, 这说明采用较薄的金属蒙皮, 可以降低结构的温度梯度, 使整个金属蒙皮的受热后温度迅速上升。

从图 5 还可以看到  $T_3$  的温度也达到  $350 - 450^\circ\text{C}$  之间, 说明金属蒙皮随着温度的上升, 向内部辐射热量。但由于结构内部没有冷却环境吸收这部分热量, 这部分热量通过隔热材料向内部结构传导, 但从图中可以看到, 内部结构层的温度在  $100^\circ\text{C}$  左右, 说明隔热材料起到热防护的作用。但是这种隔热作用也有一定的延迟, 在外蒙皮停止加热后, 内部结构的温度还继续上升。

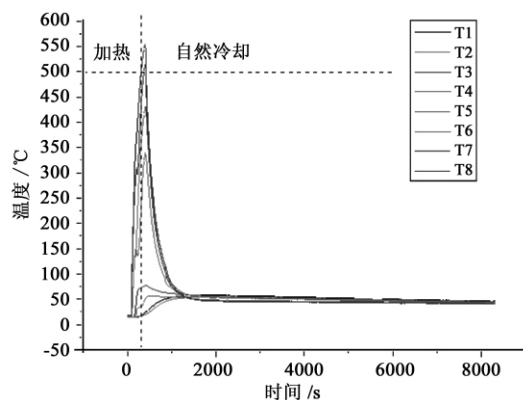


图6 发汗冷却原理样件的温度-时间曲线  
(有主动冷却作用)

Fig. 6 Temperature-time profile of evaporation cooling TPS

与图5相比,可以看到在图6中,内部结构的温度降低了50℃,只达到了50℃左右,这说明发汗冷却方法确实起到了降低结构温度的作用。

图6相对于图5还有个两个明显的变化:一个是T3的温度明显降低,从350-450℃降低到75-50℃之间,降低的温度超过300℃,主要原因是通过蒙皮向内部辐射的热量被发汗冷却内部的冷却环境吸收,即内部充满水的多孔材料层,这部分热量被水蒸发吸收,同时随着水蒸气的排放,热量被从系统中带走,因此多孔材料层的温度没有超过水在常压下的蒸发温度100℃;另一个明显的变化是,图6中的上蒙皮的四个温度点的温度与图5相比,也变化很大,蒙皮的下表面的温度下降近100℃,主要是由于内部冷却环境降低了蒙皮的表面温度,但是也带来了一个问题,即增加了蒙皮的温度梯度,温度梯度的增加会增加材料的热应力,引起材料和结构的变形,这个问题通过结构设计进行,具体方法可以见结构设计部分。

由于图5和图6是在相同的加热功率下加热,因此,主动冷却的冷却效率可以通过图6与图5的蒙皮外表面温度 $T_7$ 达到500℃的时间差来进行评价。把图5与图6的加热区域放大,比较没有采用发汗冷却和采用发汗冷却的 $T_7$ ,如图7所示,可以看到两种结构达到500℃需要的时间不同,发汗冷却结构需要更长的时间才能使蒙皮的温度达到500℃。

从图7可以看出,两种情况蒙皮温度在330℃这个点,产生了差异。在此点之前,两种情况蒙皮的

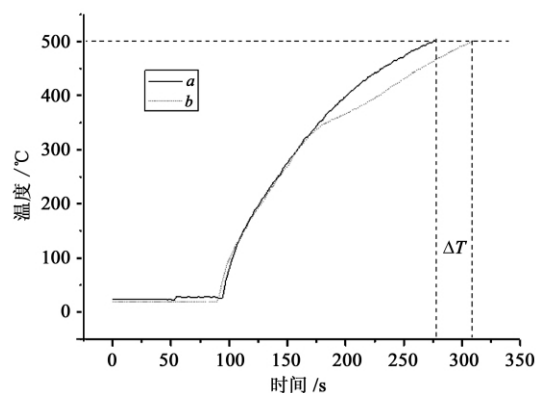


图7 非主动冷却和主动冷却加热阶段的温度-时间曲线

Fig. 7 Compare two temperature profile of cooling and uncooling TPS panel

升温情况几乎完全相同;在此点之后,发汗冷却结构的升温速率要比非发汗冷却结构的升温速率降低,主要是因为内部的冷却环境开始发挥作用,延缓蒙皮温度的升高。在功率一定的情况下,这部分时间做的功可以认为是发汗冷却结构的冷却能力的评价指标,假设系统没有热量的损失,即:

$$W = P \cdot \Delta T = k \cdot Q \quad (7)$$

其中 $P$ 为石英灯阵列的加热功率; $\Delta T$ 为发汗冷却结构与非发汗结构两者蒙皮达到相同温度(500℃)时,两者的时间差,如图7所示。两者的乘积 $W$ 为石英灯阵列对发汗冷却结构多做的功。忽略系统的热量损失,则这部分功完全转化为作用在发汗冷却结构的热能,这部分热能被冷却剂水吸收,表明这种结构的冷却能力。根据具体的实验数据,计算得发汗冷却原理样件的冷却效率超过1.7,表明采用发汗冷却的方式可以使系统的防热能力至少提高70%。研究中样件系统的排热能力为 $145 \pm 10 \text{ KJ} / 0.1 \text{ kg}$ 。

#### 4 结 论

(1) 目前,主动冷却金属热防护系统的研究还比较少见。本文对主动冷却金属热防护系统进行了基本理论分析、材料选择、结构设计和实验研究。

(2) 发汗式主动冷却金属热防护系统可以提高金属热防护系统的热载荷承载能力;或在相同的热载荷作用下,降低结构的温度。为高超声速飞行器热防护系统的设计提供了一种新的方法。可以通过结构设计的改进,解决受热蒙皮变形的问题。

(3) 实验测试了发汗冷却原理样件的冷却能力和效率,结果表明:发汗冷却的热防护方法确实起到了降低结构温度的作用。对于原理样件,发汗冷却使内部结构温度降低了 50℃,整体结构提高热载荷排散能力 70% 以上,每 0.1kg 水可以排散 145kJ 左右的热量。

### 参 考 文 献

- [1] David M B, Suraj P R. Multifunctional structures technology experiment on deep space 1 mission [C]. 16th AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference. Los Angeles: CA, 1997. IEEE 0-7803-4150-3/97.
- [2] Michael O, Janet S. Multifunctional structures: The future of spacecraft design [C]. 5th International Conference on Adaptive Structures. Japan: Sendai, 1994.
- [3] Rakow J F, Waas A M. Size effects in metal foam cores for sandwich structures [J]. AIAA Journal 2004, 42(7): 1331-1337.
- [4] Rakow J F, Waas A M. Thermal buckling of metal foam sandwich panels for actively cooled thermal protection systems [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2005, 42(5): 832-844.
- [5] Rakow J F, Waas A M. Thermomechanical response of metal foam sandwich panels for structural thermal protection systems in hypersonic vehicles [D]. Ph. D Dissertation, University of Michigan, 2005, Ann Arbor, MI.
- [6] Buursink J, Sudmeijer K J. Experiments of large enclosed model of enhanced radiation cooling system for metallic TPS [C]. AIAA 2005-3369.
- [7] Buursink J, Sudmeijer K J. Experimental studies of an enhanced radiation cooling system [C]. Space 2004 Conference and Exhibit. AIAA 2004-5827.
- [8] Buursink J. On the development of a cooled metallic thermal protection system for spacecraft [D]. Ph. D Dissertation, 2005, TU Delft.

作者简介: 刘双(1978-),女,博士生,主要从事飞行器多功能结构、防热结构设计分析方面的研究。

通信地址: 哈尔滨市南岗区一匡街 2 号哈尔滨工业大学科学园 A 栋 501 室(150080)

电话: (0451) 86418172

E-mail: blackeye1999@163.com

(编辑: 沃云峰)