

## 旋转带环中血栓形成的实验研究

钱民全

中国科学院力学研究所

吕恩武

中医研究院西苑医院

血栓形成的机理是人们十分关心的一个问题，但至今仍未完全研究清楚。这是因为血栓的形成涉及到许多不同学科，例如病理生理学、生物化学以及流体动力学等等。

1958年，Chandler设计了一个现使人们称之为Chandler旋转圆环的装置（图1），他以一定的角速度转动塑料圆管制成的圆环（例如有取圆环直径为 $8.1\text{ cm}$ ，圆管内径取 $2.9\text{ mm}$ ，圆环以 $5-50$ 转／分转动的）。使全血在半环中相对塑料管流动，在几分钟之后，在前弯月面附近形成了人工血栓，这种人工血栓经组织学检验证明，其与活体中的血栓具有相同性质的结构。Chandler圆环中人工血栓的形成为研究血栓形成机理提供了一个极为有用的装置。

此后，人们利用Chandler旋转圆环做了大量实验，从不同的角度研究有关血栓的问题。人们利用它来检验抗凝药物对全血形成血栓的影响，对全血或血小板丰富的血浆中血小板聚集的影响，对出血性疾病的影响，对血小板作用的影响，以及对孤立淋巴的影响等等。Gardner还对Chandler圆环内简单的主流以及影响血栓形成时间的参数进行了研究。

在国内，人们也利用 Chandler 圆环来研究一些药物对抗血栓形成的影响，而且在医院里，有的还利用它来检查病人血液形成血栓的时间，以便判断病人的治疗情况以及预报人们血栓形成的可能性。

我们认为不管血栓是在体内还是在体外的 Chandler 圆环中形成，其必与血液流动有密切关系。为此，我们在三、四年前就着手从流体力学方面来探讨血栓形成的流场——作为研究血栓形成机理的一个重要部分。

我们首先研究了有限液柱在直长毛细管中运动的流场，继而直接研究了 Chandler 圆环内流体运动的流场。我们发现，两者的流场既有相似的地方又有区别。在 Chandler 施转圆环形成血栓的前弯月面附近，这里既有主流的迴流，又有二次流，而且，其主流的中心流冲击着前弯月面，但直管中液柱的前弯月面，只有主流迴流并无二次流，但其主流的中心流也冲击着弯月面。我们设想，血栓是否也能在直管段形成，而与二次流无关，我们的这个带环血栓形成实验证明，这种设想是正确的。

我们发展了 Chandler 圆环，把塑料园管接成如皮带一样的形状——我们称之为带环，套在两个塔轮上（图 2）。塑料园管的内径取了 3 mm 或 4 mm，而这两个塔轮是相同直径，各有 8, 10, 12 cm 三种尺寸。其中一个塔轮的转动是由另外的一个轮子通过皮带带动的，而这个轮子又由变速马达通过一套变速齿轮箱控制的。这样，我们可以调节转速范围是很大的，然而在实验时，我们取了相类似于 Gardner 利用

Chandler 圆环的实验转速，例如取线速度从 200—800 厘米／分，这种速度类似人体中能形成血栓的血管中血流速度。

不添加任何抗凝剂的全血取自大白鼠或兔子，立即注入带环中，使血贮有半个以上的带环。然后立即把带环套到两个塔轮上去，按照已经计算好的需要线速度开动由直流电压来控制的直流电动机，其通过齿轮变速箱带动皮带轮和塔轮转动。

血液很快在两个弯月面之间产生高度差，前弯月面下降，后弯月面上升，维持稳定的流动。一般认为在 1 分钟到 1 分半钟时间后血小板凝集成 30 $\mu$ m 大小的凝块，聚集在前弯月面附近，通常称这种现象为“雪暴 (Snow Storm)”，然后触发凝结机理，几分钟以后纤维蛋白原扫进前弯月面附近，形成网状物，逐渐形成血栓本身。当然，这时两个弯月面的高度差进一步增加，随后，由于血栓的松散状态变为密集状态，两个弯月面差又可以减少一些。

实验例子之一：兔子全血约 3.5cc，塑料管内径 4 mm，带环线速度 7.5 cm/sec，或 450 cm/min。转动平稳后的两弯月差 2—3 cm，带环转动几分钟后，取得塑料管内的血栓。

我们的旋转带环形成的人工血栓，由于血液也是通过圆环部分的，那么，血栓的形成是否与圆环部分离心力引起的二次流的影响有关呢？为此，我们注入一段血液柱在带环直线段，随时调整带环的倾角 $\alpha$ ，始终使血液在停留在带环的直线段内与管子相对运动（图 3），结果，我们在直线段中也形成了人工血栓。

实验例子之二。大白鼠全血约 1.5cc，带环线速度 10 cm/sec，管子内径 4 mm，带环转动几分钟后，即取出管中形成的人工血栓。

我们认为，不管是 Chandler 圆环或带环的前弯月面的流场，为颗粒的聚集提供了一个有利的条件，因此分析颗粒的分布必将对了解血栓的形成有很大的意义。对照活体的情况，血栓形成的流体力学条件可能与涡

流引起的迴流和迟滞区的存在有密切的关系。

我们对谈镐生教授几年来一直关心和指导我们的工作，对吴望一教授的指导，对力学所生物物理组和中医研究院的同志们的协助和有益的讨论表示衷心的感谢。

