

血栓模拟物机械性能及切削破碎效果研究

洪丽¹ 吴重军^{1*} 李景文¹ 陈令文¹ 沈斌² 丁庆伟³

1. 东华大学机械工程学院, 上海, 201620

2. 浙江清华长三角研究院, 嘉兴, 314000

3. 上海交通大学医学院附属第一人民医院, 上海, 200080

摘要: 主要对血栓模拟物中红细胞比容进行分析, 研究血栓模拟物的机械性能及切削效果。制备了不同红细胞比容的体外血栓模拟物, 通过压缩实验研究其机械性能, 并结合血栓切削实验装置研究切削速度对其切削效果的影响。研究发现, 模拟物的刚度会随着红细胞比容及储存时间的增加而降低; 同时, 以血清为储存介质保存 10 d 时, 刚度会下降 50% 以上, 而以生理盐水为储存介质保存相同时间, 刚度降幅约为 30%; 另外, 10%~20% 红细胞比容模拟物与人体深静脉血栓样本刚度相近。实验结果也表明, 切削速度在一定范围内提高时有助于对模拟物进行充分破碎, 当切削速度过大时破碎效果几乎不再变化。研究结果可为血栓清除器械的设计与优化提供重要参考。

关键词: 血栓; 机械性能; 血栓切削破碎效果; 机械血栓清除术

中图分类号: TG156

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.02.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Mechanical Properties and Cutting Fragmentation Effectiveness of Thrombus Analogs

HONG Li¹ WU Chongjun^{1*} LI Jingwen¹ CHEN Lingwen¹ SHEN Bin² DING Qingwei³

1. College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai, 201620

2. Zhejiang Tsinghua Yangtze River Delta Research Institute, Jiading, Zhejiang, 314000

3. Shanghai First People's Hospital Affiliated with Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai, 200080

Abstract: The hematocrit of thrombus analogs were analyzed primarily, their mechanical properties and cutting effectiveness were studied. Different hematocrit thrombus analogs were prepared to investigate their mechanical properties through compression tests, and their cutting efficiency was studied using a thrombus cutting experimental setup. It is found that the stiffness of the analogs decreases with increasing hematocrit and storage time. Specifically, when stored in serum for 10 days, stiffness decreases by over 50%, whereas with saline storage over the same period, the decrease is around 30%. Additionally, thrombus analogs with hematocrits of 10% to 20% exhibit stiffness levels similar to samples of deep vein thrombosis. The experiments also indicate that increasing cutting speed within a certain range the fragmentation of the analogs is enhanced, but beyond a certain threshold, further increases in cutting speed does not significantly improve fragmentation. This paper provides valuable insights for the design and optimization of thrombectomy devices.

Key words: thrombus; mechanical property; crushing effectiveness of cutting and breaking; mechanical thrombectomy

0 引言

血栓是人体内血液循环系统中发生凝固形成的固体质块, 会使血管内血液流速变慢甚至完全阻塞血流, 导致上游血管压力增加, 诱发多种疾病。目前, 血管内的栓塞病例逐年增加^[1-2], 以急性缺血性卒中为例, 它在所有卒中病例中占比高

达 85%^[3]。近年来, 机械血栓清除术(mechanical thrombectomy, MT)逐渐应用于血栓相关疾病的治疗中。临床实践证明 MT 的血栓清除率超过 80%^[4-6], 并且具有安全有效、治疗周期短、血栓术后综合症(post-thrombotic syndrome, PTS)发生率低等优点^[7-9]。而在 MT 过程中, 血栓的机械性能会对治疗效果产生直接影响^[10-11]。

由于难以获得真实的人体血栓样本, 体外血栓模拟物(凝块)常被用于评估血栓清除设备的有效性, 并进行临床前测试^[12-14]。为了确保凝块与

收稿日期: 2024-05-28

基金项目: 上海交通大学医工交叉项目(YG2024QNB18); 浙江省自然科学基金(LY23E050002)

真实血栓在组织学上成分相似,通常选择动物血液作为凝块制备的原材料。过去的研究大多通过调控凝血酶浓度^[15-16]、血液供体动物^[17-18]或硫酸钡浓度^[19]等变量制备凝块,并通过拉伸、压缩和压痕等实验研究其机械性能^[10,19-21]。然而,凝块组成中红细胞(red blood cell,RBC)比容(红细胞的体积比)对材料的机械性能具有重要影响,目前国内外对此还缺乏充分研究。

凝块切削过程的研究目前主要集中在切削力等相关内容^[22-24]。也有学者对生物软组织的切削性能进行了研究,例如牛半月板组织^[25]及血管组织^[26]的切削研究,这对 MT 过程中的切削优化具有一定的参考意义,但切削速度对凝块切削影响效果的研究则较为欠缺。

为探究 RBC 比容对凝块机械性能的影响,本文制备了多种不同 RBC 比容的凝块,分析储存时间与储存介质对其机械性能的影响。同时,根据机械血栓清除装置的工作原理制作了简单实验装置,对凝块进行切削,以探究在 MT 过程中切削速度对凝块破碎效果的影响。

1 凝块样品制备

本文采用新鲜猪血,并与 3.2% 的柠檬酸钠溶液按照 9 : 1 的体积比混合,然后在 4 °C 条件下保存备用^[10],所有凝块均在采血后 4 h 内完成制备。首先将血液样本在离心机上以 180 g 离心 10 min,离心结束后血液分为上下两层,将上层富含血小板的血浆(platelet-rich plasma,PRP)收集到单独的容器中。然后将下层血液混合物再次以 2200 g 离心 10 min 后去除上层棕黄色白细胞层,收集下层 RBC。之后将收集到的 PRP 与 RBC 按照不同的体积比进行混合,以获得不同红细胞比容的凝块。共制备了四种凝块,其红细胞比容分别为 0、10%、20% 和 40%,同时也制作了同一血液样本下的全血凝块作为对照。

充分混合 PRP 与 RBC 后,将 2.0% 的氯化钙溶液以 1 : 9 的体积比加入混合液中^[10],然后将混合液样品置于模具中,并在 37 °C 的水浴环境中静置约 4 h,使凝块析出成形(图 1)。同时,将充分静置过后的凝块分为两组,第一组保存在血清

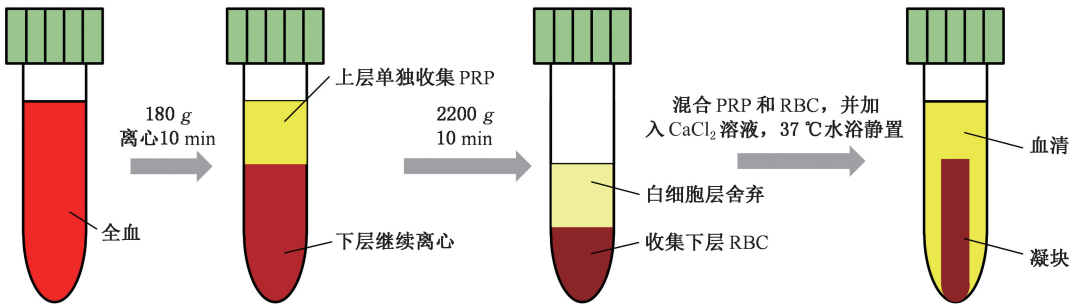


图 1 血栓模拟物制备过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of the preparation process of thrombus simulant

中,第二组保存在生理盐水中。将这两组凝块分别置于 4 °C 的环境中分别保存 1 d、3 d、6 d、10 d,并在每个时间点进行压缩实验,以研究储存时间及储存介质对凝块机械性能的影响。

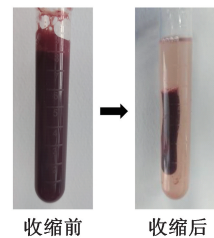
2 凝块收缩率分析

如图 2 所示,在 PRP 与 RBC 的混合液中加入氯化钙溶液后约 10 min,混合液首先发生整体凝固,随后凝块中的交联纤维蛋白网络开始收缩,血清被排出,凝块形成。这主要是因为氯化钙的加入一方面中和了柠檬酸钠的抗凝作用,另一方面也可以激活血液中的凝血因子,促进血液凝结。

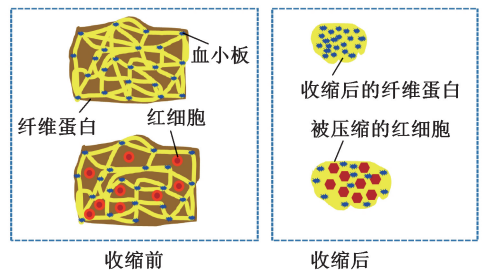
分别在重量天平上测量凝块与排出血清的质量,计算凝块的收缩率 R :

$$R = w_1 / (w_1 + w_2) \quad (1)$$

式中: w_1 为收缩后凝块的质量,g; w_2 为排出的血清质量,g。



(a) 凝块宏观收缩



(b) 凝块收缩微观变化

图 2 凝块收缩过程

Fig.2 Clot retraction process

确保凝块完全收缩^[18]。同时监测血清的颜色,以确保 RBC 已融入凝块中,只有充分收缩的凝块才能用于后续实验中。

收缩结果如图 3 所示,凝块的收缩率与红细胞比容成正相关关系($R^2 = 0.94$),这表明凝块中 RBC 的比容是影响凝块收缩率的主要因素。这主要是因为红细胞的不可压缩性,阻碍了纤维蛋白网络的收缩^[18]。

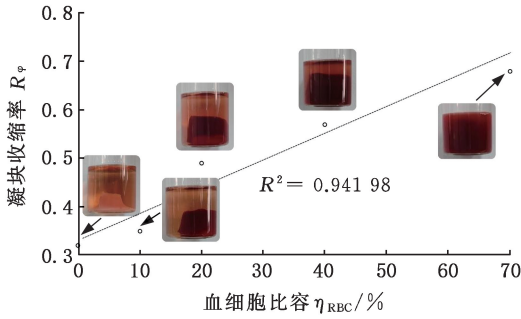


图 3 凝块收缩率

Fig.3 Clot retraction rate

3 凝块机械性能测试

3.1 实验过程

将混合血液样本在圆柱形模具中成形,以确保凝块成形后也呈圆柱状。使用手术刀片切割凝块,使样品高度 h_0 为直径 d_0 的 1/2,凝块样品如图 4 所示。

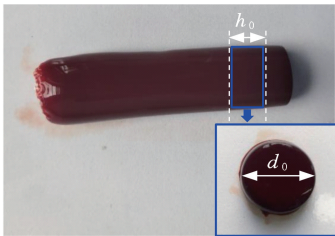


图 4 压缩实验样品准备

Fig.4 Compression test sample

本文通过压缩实验来比较 4 种 RBC 比容凝块的机械性能。与拉伸实验相比,压缩实验无需对样本进行单独夹持,避免了样本在夹持处出现应力集中而最终导致实验失败的问题。压缩实验装置如图 5 所示,将切割好的凝块样品放置在压头和底座之间,同时浸泡在生理盐水中。压缩盘底部覆有 1000 目砂纸,以增大底座与样本之间的摩擦力,避免样本在测试过程中发生滑动。实验前,样本首先在生理盐水中浸泡 30 min,实验中压头以 0.1 s^{-1} 的恒定应变速率将凝块试样缓慢加载至 80% 压缩应变。

凝块的轴向名义压缩应力 σ 为

$$\sigma = F / (\pi r_0^2) \quad (2)$$

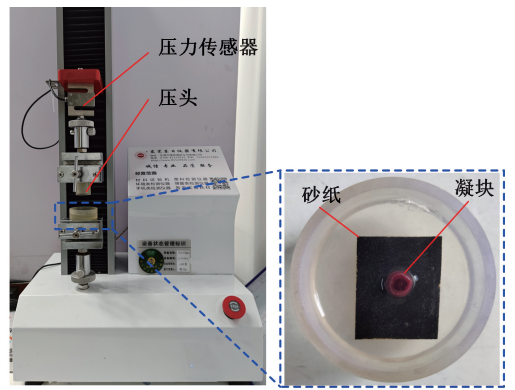


图 5 凝块压缩实验装置

Fig.5 Clot compression test device

式中: σ 为轴向名义压缩应力,MPa; F 为压头下压过程中的加载力,N; r_0 为圆柱试样的初始半径,mm。

轴向名义压缩应变 ϵ 为

$$\epsilon = (h_0 - h) / h_0 \quad (3)$$

式中: ϵ 为轴向名义压缩应变,%; h_0 为样本加载前的未变形高度,mm; h 为样本压缩变形后的高度,mm。

为使实验结果表述更加清晰,压缩实验过程中 σ 和 ϵ 均取绝对值。

3.2 结果分析

本文获取的人体血栓样本(图 6)为深静脉血栓,这类血栓在人体外周血管中十分常见,对血栓性能的研究具有代表性。本文对 10 个人体血栓样本进行压缩,选择应力-应变曲线中应力最小、中值和最大的 3 个样本,分别编号为人体血栓 ① ~ 人体血栓 ③,并与配制的 4 种凝块进行了比较。

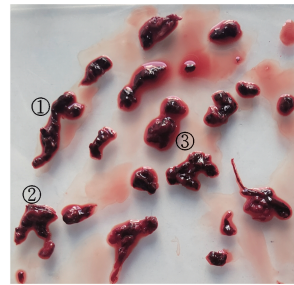


图 6 人体血栓样本

Fig.6 Human blood clot sample

压缩实验结果如图 7 所示,配制的 4 种凝块应力均随应变非线性增大,与人体真实血栓的变化趋势一致,证明这些凝块具有与人体真实血栓具有相似的机械性能。

在 80% 压缩应变下,0% RBC 凝块展示出最大的峰值应力,其次是 10% RBC 凝块和 20% RBC 凝块,而 40% RBC 凝块和全血凝块则表现出较小的峰值应力。当压缩应变小于 50% 时,4 种凝块的应力值差异不明显,然而,当压缩应变超过 50% 时,0% RBC 凝块的应力响应与其他几种

凝块的差异开始增大,这可能是由于 0%RBC 凝块中交联纤维蛋白含量较高,在大应变下,纤维蛋白表现出硬化现象。

根据压缩实验结果,人体血栓②和人体血栓③在应变大于 60%时显示出较大的应力,而人体血栓①则表现出较小的应力,这可能是由于三个血栓样本在体内形成的时机不同,导致其机械性能表现不同。

在 MT 过程中,血栓通常会发生显著变形,即产生较大的应变,因此,很多学者以应力-应变曲线在 75%压缩应变处的切线斜率作为刚度值来研究其力学性能^[11,19,27]。本文同样以压缩应力-应变曲线中 75%压缩应变处的切线斜率作为刚度值来量化比较 4 种凝块与真实血栓的差异(图 8)。具体而言,0%RBC 凝块的刚度为 0.0095 MPa,远大于人体血栓和其他几种凝块。10%RBC 凝块的刚度值为 0.0042 MPa,约为人体血栓刚度的 1.5~3 倍,20%RBC 凝块的刚度值与人体血栓②(人体血栓样本刚度值中位数)基本一致,40%RBC 凝块和全血凝块的刚度值均为 0.0017 MPa,在 4 种凝块中处于最低水平,这主要是因为这两种凝块中红细胞含量较高(全血中 RBC 的含量约为 50%左右)。

尽管 0%RBC 凝块在高应变范围时具有最大的峰值应力,但也观察到全血凝块在低应变范围下应力值较大,这可能是因为 RBC 的不可压缩性在应变较小时起主导作用。

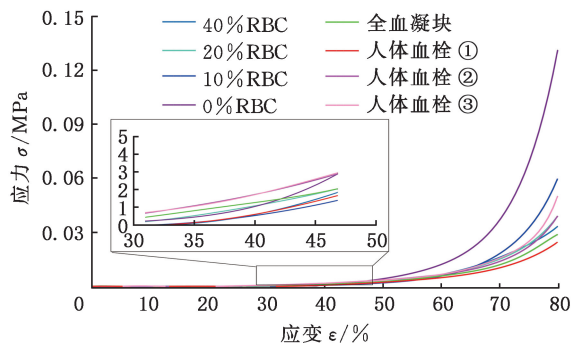


图 7 凝块压缩应力-应变曲线

Fig.4 Clot compression stress-strain curve

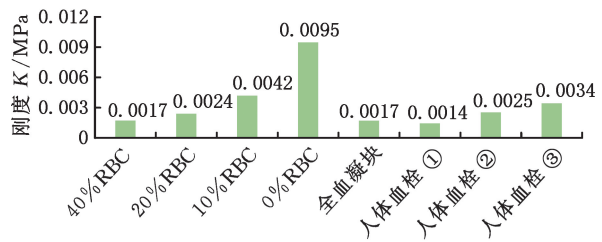
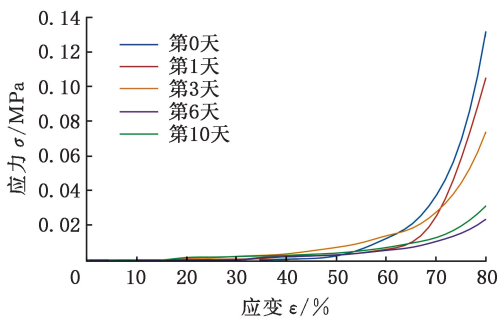


图 8 四种类型凝块及人体真实血栓的刚度值

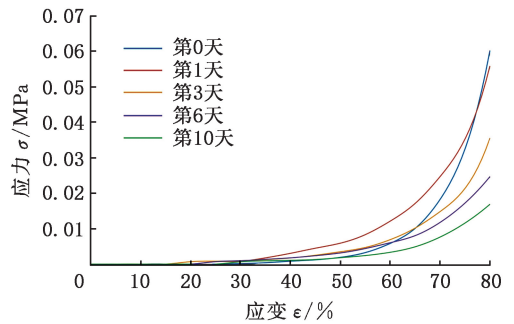
Fig.8 The stiffness of four types of clots and real human blood clots

3.2.1 储存时间对机械性能的影响

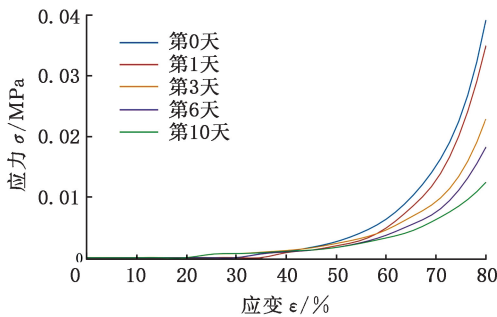
将 4 种凝块分别置于它们自身的血清中,并在 4℃下分别保存 1 d、3 d、6 d 和 10 d,然后在每个时间点对凝块进行压缩试验。随着储存时间的增加,这些凝块的应力-应变曲线(图 9)变化趋势没有明显差异,但刚度值均呈下降趋势(图 10),尤其是 0%RBC 凝块的刚度降幅最为显著。虽然



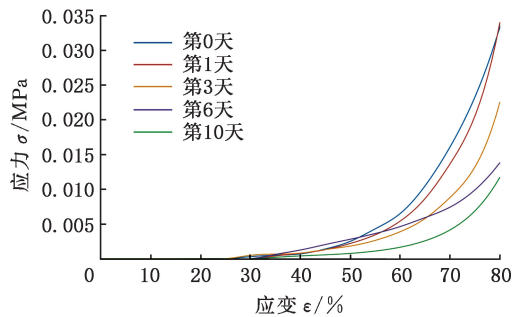
(a)0%RBC 凝块



(b)10%RBC 凝块



(c)20%RBC 凝块



(d)40%RBC 凝块

图 9 不同储存时间下四种类型凝块压缩应力-应变曲线

Fig.9 Stress-strain curves of four types of clots with different storage times

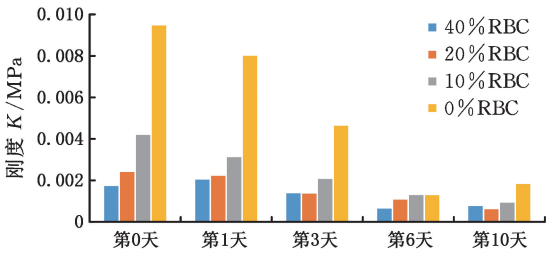


图 10 四种类型凝块在血清中储存不同时间的刚度值

Fig.10 The stiffness of four types of clots stored in serum for different periods of time

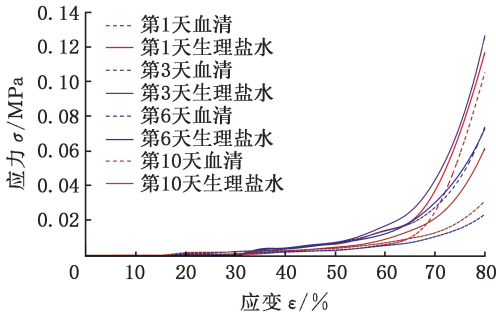
20%和40%RBC凝块的一天储存刚度值略有上升,但变化并不明显,可能是实验中的测量误差所致。总体趋势显示,随着储存时间的增加,凝块内的各成分逐渐失活,从而导致凝块的刚度下降,机械性能变差。

此外,本文还探究了储存温度对凝块机械性

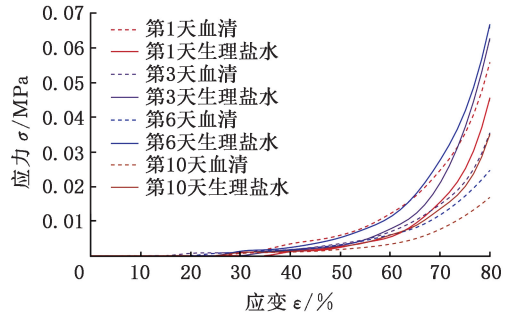
能的影响。实验结果显示,将40%RBC的凝块分别储存于4℃和37℃的血清中,37℃下储存超过24h即会发生分解,故无法进行压缩实验。

3.2.2 储存介质对机械性能的影响

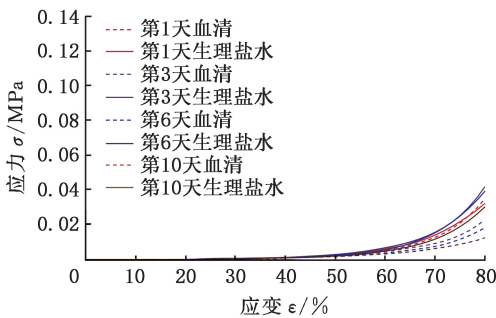
将4种充分收缩的凝块分别置于血清和生理盐水中,在4℃环境中分别保存1d、3d、6d、10d后进行压缩实验。压缩应力-应变曲线(图11)显示,当储存时间和压缩应变相同时,生理盐水中的凝块表现出更大的应力值。随着时间的延长,凝块刚度的降幅更小,且在第三天时刚度出现了一定程度的增大(图12)。因为生理盐水的浓度接近于充分收缩后凝块内物质的浓度,所以形成等渗状态。这种状态在短时间内尽可能地保持了凝块内各种成分的活性,使得凝块能够在较短时间内保持最初的机械性能。



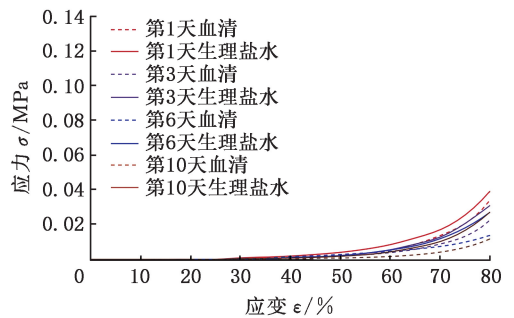
(a) 0% RBC 凝块



(b) 10% RBC 凝块



(c) 20% RBC 凝块



(d) 40% RBC 凝块

图 11 不同储存条件下四种凝块压缩应力-应变曲线

Fig.11 Stress-strain curves of four types of clots under different storage conditions

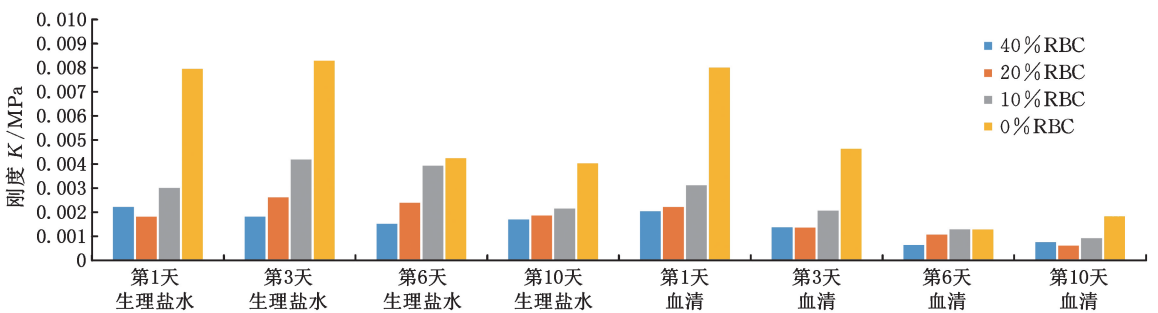


图 12 四种类型凝块分别储存于血清和生理盐水中在不同时间下的刚度值

Fig.12 The stiffness of four types of clots stored in serum and physiological saline at different time points

4 凝块切削破碎实验

4.1 实验过程

根据机械血栓清除设备的工作原理并参考相关专利的技术方案^[28],制作了简易凝块切削实验装置(图 13)。该装置可用于对凝块进行切削破碎,并通过收集分析切削后的碎屑大小,研究切削速度对凝块切削破碎效果的影响。

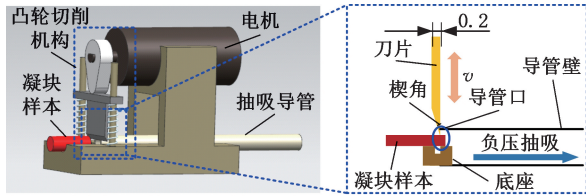


图 13 凝块切削实验装置

Fig.13 Clot cutting experimental apparatus

由压缩实验结果可知,10%RBC凝块比人体血栓样本略硬,因此选用该凝块作为切削实验材料。将凝块样品置于切削平台上,通过恒定的负压将凝块吸入导管,导管前端有一往复运动的刀片,对吸入导管的凝块进行连续切削,最终将大块凝块全部切碎。

本文中使用的切削刀片厚度为 0.2 mm,楔角为 30°。抽吸导管的内径为 3 mm,长度为 1100 mm。凝块的直径为 6 mm,长度为 20 mm。负压抽吸压力为 0.07 MPa。刀片的往复运动频率分别为 4000、5000、7000、8000、10 000、15 000、20 000 次/min。

4.2 结果分析

实验中使用高速相机拍摄了一个切削周期内的凝块切削过程,如图 14 所示。切削过程可分为 4 个阶段:第一阶段,刀片向下运动开始接触凝块;第二阶段,刀片继续向下运动,刀刃处挤压凝块产生变形,但尚未刺破凝块;第三阶段,刀刃刺破凝块,切削过程开始;第四阶段,刀片继续向下运动,凝块中裂纹扩展,直至完全被切断,切削结束。

切削实验结果如图 15 所示,以凝块碎屑的最大截面尺寸作为量化指标,分析切削速度对凝块切削效果的影响,在 MT 过程中,血栓破碎越充分,越易于清除。

如表 1 所示,当切削速度为 4000 次/min 时,最大碎屑的尺寸约 18 mm²,随着速度的增加,碎屑尺寸逐渐减小,当切削速度达到 10 000 次/min 时,碎屑的尺寸约 6 mm²,比 4000 次/min 时减小了约 33%,随着切削速度的进一步提高,最大碎屑的尺寸基本保持不变。

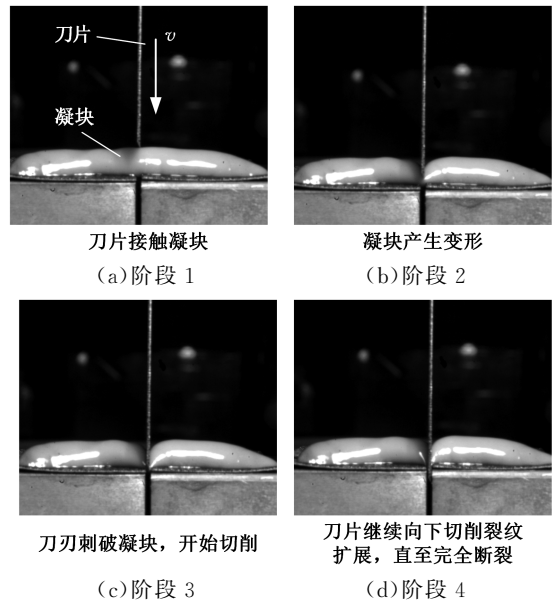


图 14 凝块在切削过程中断裂机理

Fig.14 The clot cutting process

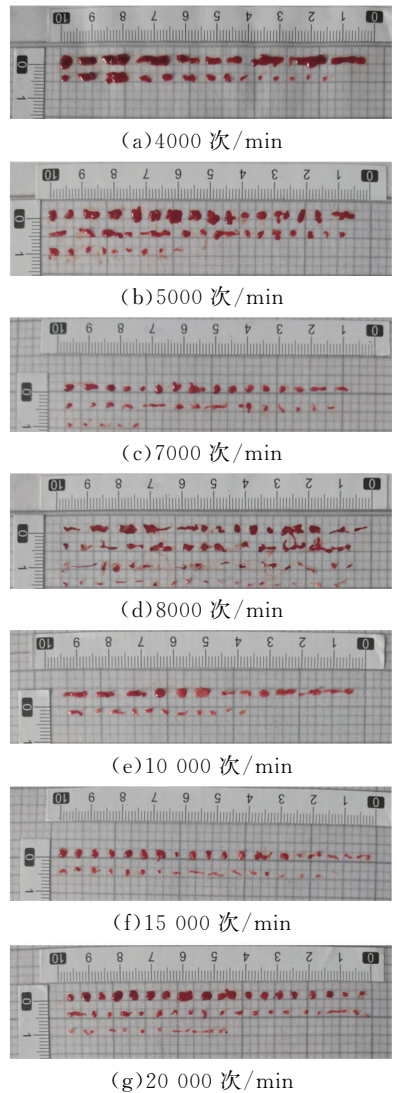


图 15 凝块在不同切削速度下被切削后的碎屑
Fig.15 The debris of clot after cutting at different cutting speeds

切削速度增加时,4 mm² 以上碎屑的占比也在逐渐减少。当切削速度达到 15 000 次/min 时,4 mm² 以上碎屑的比例约 9%,继续增加切削速度时,这一比例不再变化。

实验结果表明,适当提高切削速度有助于更好地破碎凝块。当切削速度超过 15 000 次/min 后,凝块碎屑的最大尺寸和平均尺寸不再变化。这是因为在恒定负压抽吸下,单位时间内被吸入导管口的凝块体积保持恒定。随着刀片往复运动速率的增加,单位时间内切削凝块的次数越多,凝块碎屑的尺寸越小。此外,凝块是黏弹性材料^[29],随着切削速度的进一步增大,凝块的应变速率加快,内部交联纤维蛋白的硬化作用增强,凝块更难被有效切碎,从而使得碎屑尺寸在一定范围内保持稳定。也有研究指出,机械血栓清除设备运行过程中,5000~10 000 r/min 的转速是较为合理的,转速过高时溶血现象会更加明显^[30],极易导致其他并发症。

表 1 凝块碎屑尺寸统计

Tab.1 The statistics of clot debris size

	实验序号						
	1	2	3	4	5	6	7
切割速度/ (次·min ⁻¹)	4000	5000	7000	8000	10 000	15 000	20 000
最大碎屑/ mm ²	17	11	8	9	6	6	7
4 mm ² 以上 碎屑占比/%	58	48	15	18	22	9	9

5 讨论

压缩实验显示,人体血栓的应力随应变的变化呈现非线性趋势,这与前人研究结果一致^[31-32]。凝块的压缩过程中变现出应变硬化响应,与之前文献中报道的数据趋势类似^[18,33]。

压缩实验也显示,所有凝块均表现为非线性超弹性材料。在低应变($\epsilon < 50\%$)下,凝块表现出较小的应力;而在高应变($\epsilon > 50\%$)下,显著发生应变硬化。全血凝块因含有约 50% 的红细胞,在低应变下表现出较高的刚度,其他几种凝块的刚度则较低。

应变超过 50% 时,0% RBC 凝块的刚度显著增加,达到最大值(80% 应变时),几乎是人体血栓的 4~5 倍,这种变化主要由交联纤维蛋白含量决定,在充分收缩后,其含量接近 100%,交联纤维蛋白对凝块的机械性能有显著的影响^[34-35]。

在机械清除血栓的过程中,相关器械通常会导致血栓显著变形,因此在 MT 过程中,交联纤维蛋白是影响清除效果的关键因素^[36]。本文发

现从患者体内获取的人体血栓样本之间的应力-应变曲线存在差异,可能由多种原因引起。抽吸患者体内血栓可能已经发生严重变形,从而影响其机械性能;另外,血栓形成的时间差异也可能导致机械性能上的差异。

本文观察到,延长储存时间对于存放在 4 °C 下的血清中的凝块的机械性能具有显著影响,这与其他学者的研究结果^[18] 基本一致。另外,储存温度对凝块机械性能也有显著影响。实验结果显示,40% RBC 凝块在 37 °C 下存放超过 1 d 后会完全崩解,无法进行压缩实验。

尽管外表看起来延长储存时间对凝块的影响不大,但通过压缩实验发现,长时间储存会降低凝块内部成分(如 RBC)的活性,导致其承受应力的能力下降。同时,将凝块保存在 4 °C 的生理盐水中能够减缓因储存时间延长而导致的应力减小。因为生理盐水的浓度与凝块中红细胞的溶质浓度较为接近,有助于在较长时间内保持凝块的机械性能。鉴于目前关于凝块最佳储存条件的报道较少,基于本文的观察结果,建议在凝块形成后尽快进行测试,以确保测试结果的准确性。如果需要延长保存时间,建议将其置于生理盐水中,并存放在 4 °C 下,以保持机械性能和微观结构。

6 结论

本文通过压缩实验研究了红细胞对凝块机械性能的影响,并通过切削实验研究了切削速度对凝块切削效果的影响,主要得出了以下结论:

1) 凝块中红细胞比容会对凝块的机械性能产生较大影响,压缩应变较大时,红细胞比容越低,凝块刚度越大。

2) 人体深静脉血栓与凝块的应力-应变曲线具有相同的变化趋势,故两者具有相似的机械性能,其中,10% RBC~20% RBC 凝块与人体血栓样本的刚度值最接近。

3) 随着储存时间的延长,凝块的机械性能会逐渐变差,储存 10 d 后相比刚制备时刚度降低超过 50%。生理盐水为保存介质的凝块,相比血清静置 10 d 后的凝块刚度降低约 30%。实验中还发现,40% 红细胞比容的凝块在 37 °C 环境中保存超过 24 h 即会分解。因此,凝块制备后应存放在低温环境中,并尽快使用,以尽量减少机械性能的影响。

4) 凝块切削实验结果显示,提高切削速度有助于将凝块的破碎,但切削速度增加到一定值后破碎效果提升有限。因此,机械血栓清除设备在

工作过程中,应将转速控制在合理范围内,以确保清除效果并避免相关并发症。

参考文献:

[1] HEIT J A, SPENCER F A, WHITE R H. The Epidemiology of Venous Thromboembolism [J]. *Journal of Thrombosis and Thrombolysis*, 2016, 41 (1):3-14.

[2] HEIT J A. Epidemiology of Venous Thromboembolism[J]. *Nature Reviews Cardiology*, 2015, 12(8): 464-474.

[3] VIRANI S S, ALONSO A, BENJAMIN E J, et al. Heart Disease and Stroke Statistics-2020 Update: a Report from the American Heart Association [J]. *Circulation*, 2020, 141(9):e139-e596.

[4] 李立强, 佟铸, 崔世军, 等. Rotarex 机械血栓清除系统治疗累及膝下腘动脉血栓栓塞病变的疗效观察[J]. *中国现代手术学杂志*, 2023, 27(5):377-380.

LI Liqiang, TONG Zhu, CUI Shijun, et al. Efficacy of Rotarex Mechanical Thrombectomy System for Thromboembolic Lesions Involving Infraknee Popliteal Artery[J]. *Chinese Journal of Modern Operative Surgery*, 2023, 27(5):377-380.

[5] 王海生, 彭喜涛, 梁冰, 等. Angiojet 机械性血栓清除术联合导管接触性溶栓治疗急性下肢深静脉血栓形成患者的效果[J]. *中国民康医学*, 2022, 34(5):16-18.

WANG Haisheng, PENG Xitao, LIANG Bing, et al. Effects of Angiojet Mechanical Thrombectomy Combined with Catheter-directed Thrombolysis in Patients with Acute Deep Venous Thrombosis of the Lower Extremities[J]. *Medical Journal of Chinese People's Health*, 2022, 34(5):16-18.

[6] 王为华. 机械性血栓清除术对急性下肢深静脉血栓形成患者近远期治疗效果及临床预后的影响[J]. *中国实用医药*, 2023, 18(10):41-45.

WANG Weihua. Effect of Mechanical Thrombectomy on the Short-and Long-term Treatment Effect and Clinical Prognosis of Patients with Acute Lower Extremity Deep Vein Thrombosis[J]. *China Practical Medicine*, 2023, 18(10):41-45.

[7] 陈德才, 胡威龙, 王高尚. AngioJet 机械血栓清除术对急性下肢深静脉血栓形成患者的应用效果[J]. *河南医学研究*, 2024, 33(1):105-108.

CHEN Decai, HU Weilong, WANG Gaoshang. Effects of AngioJet Mechanical Thrombus Clearance in Patients with Acute Lower Limb Deep Venous Thrombosis[J]. *Henan Medical Research*, 2024, 33(1):105-108.

[8] SIMONTE G, FINO G, CASALI F, et al. Effectiveness of the Rotarex Excisional Atherectomy System in both Subacute and Chronic Aortoiliac Endograft Thrombosis: an Innovative Option for the Modern Endovascular Surgeon Toolkit[J]. *Journal of Endovascular Therapy*, 2023, 30(6):957-963.

[9] ZHUANG J M, LI T R, LI X, et al. Application of Rotarex Catheter System in Femoropopliteal Artery Stenosis Accompanied with Thrombosis[J]. *Journal of Peking University (Health Sciences)*, 2023, 55(2):328-332.

[10] JOHNSON S, CHUEH J, GOUNIS M J, et al. Mechanical Behavior of in Vitro Blood Clots and the Implications for Acute Ischemic Stroke Treatment[J]. *Journal of Neurointerventional Surgery*, 2020, 12(9):853-857.

[11] BOODT N, SNOUCKAERT van SCHAUURG P R W, HUND H M, et al. Mechanical Characterization of Thrombi Retrieved with Endovascular Thrombectomy in Patients with Acute Ischemic Stroke[J]. *Stroke*, 2021, 52(8):2510-2517.

[12] DUFFY S, FARRELL M, McARDLE K, et al. Novel Methodology to Replicate Clot Analogs with Diverse Composition in Acute Ischemic Stroke[J]. *Journal of Neurointerventional Surgery*, 2017, 9(5):486-491.

[13] LIU Ronghui, HE Hongping, ZHANG Luo, et al. In Vitro Models for the Experimental Evaluation of Mechanical Thrombectomy Devices in Acute Ischemic Stroke [J]. *Interventional Neuroradiology*, 2023, 29(6):759-767.

[14] LIU Ronghui, LYU Bin, MENG Haoye, et al. A Novel Method for Preparing Clot Analogs under Dynamic Vortical Flow for Testing Mechanical Thrombectomy Devices[J]. *Interventional Neuroradiology*, 2023:15910199231182850.

[15] FITZGERALD S T, LIU Y, DAI D, et al. Novel Human Acute Ischemic Stroke Blood Clot Analogs for in Vitro Thrombectomy Testing [J]. *AJNR American Journal of Neuroradiology*, 2021, 42(7):1250-1257.

[16] ZEMZEMI C, PHILLIPS M, VELA D C, et al. Effect of Thrombin and Incubation Time on Porcine Whole Blood Clot Elasticity and Recombinant Tissue Plasminogen Activator Susceptibility [J]. *Ultrasound in Medicine & Biology*, 2022, 48(8): 1567-1578.

[17] HOLLAND C K, VAIDYA S S, DATTA S, et al. Ultrasound-enhanced Tissue Plasminogen Activator Thrombolysis in an in Vitro Porcine Clot Model[J]. *Thrombosis Research*, 2008, 121(5):

- 663-673.
- [18] JOHNSON S, McCARTHY R, GILVARRY M, et al. Investigating the Mechanical Behavior of Clot Analogues through Experimental and Computational Analysis[J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2021, 49(1):420-431.
- [19] CHUEH J Y, WAKHLOO A K, HENDRICKS G H, et al. Mechanical Characterization of Thromboemboli in Acute Ischemic Stroke and Laboratory Embolus Analogs[J]. *AJNR American Journal of Neuroradiology*, 2011, 32(7):1237-1244.
- [20] MALONE F, McCARTHY E, DELASSUS P, et al. The Mechanical Characterisation of Bovine Embolus Analogues under Various Loading Conditions [J]. *Cardiovascular Engineering and Technology*, 2018, 9(3):489-502.
- [21] WEAVER F M, DUFFY S, MACHADO I, et al. Characterization of Strut Indentation during Mechanical Thrombectomy in Acute Ischemic Stroke Clot Analogs [J]. *Journal of Neurointerventional Surgery*, 2019, 11(9):891-897.
- [22] MICHAEL C, PANCALDI F, BRITTON S, et al. Combined Computational Modeling and Experimental Study of the Biomechanical Mechanisms of Platelet-driven Contraction of Fibrin Clots [J]. *Communications Biology*, 2023, 6(1):869.
- [23] TUTWILER V, SINGH J, LITVINOV R I, et al. Rupture of Blood Clots; Mechanics and Pathophysiology [J]. *Science Advances*, 2020, 6(35): eabc0496.
- [24] RAMANUJAM R K, GARYFALLOGIANNIS K, LITVINOV R I, et al. Mechanics and Microstructure of Blood Plasma Clots in Shear Driven Rupture[J]. *Soft Matter*, 2024, 20(21):4184-4196.
- [25] CHEN Zhihua, ZHANG Yue, WANG Chengyong, et al. Understanding the Cutting Mechanisms of Composite Structured Soft Tissues [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2021, 161:103685.
- [26] ENOMOTO T, MAO Xin, SATAKE U. Cutting Performance by Surgical Scissors of Tubular Soft Tissues such as Blood Vessels[J]. *CIRP Annals*, 2021, 70(1):69-72.
- [27] EYISOYLU H, HAZEKAMP E D, CRUTS J, et al. Flow Affects the Structural and Mechanical Properties of the Fibrin Network in Plasma Clots [J]. *Journal of Materials Science Materials in Medicine*, 2024, 35(1):8.
- [28] 沈斌. 血栓去除组件及血栓去除装置;CN216148137U [P]. 2022-04-01.
- SHEN BIN. Thrombectomy Components and Devices;CN216148137U[P]. 2022-04-01.
- [29] SALDÍVAR E, ORJE J N, RUGGERI Z M. Tensile Destruction Test as an Estimation of Partial Proteolysis in Fibrin Clots[J]. *American Journal of Hematology*, 2002, 71(2):119-127.
- [30] GU X L, ZHANG X Y, QIU X J, et al. The Hemolysis Effect of Rotary Cutting Thrombectomy Device; the CFD and Experimental Study [C] // 2021 Design of Medical Devices Conference. Minneapolis, 2021:DMD2021-1007.
- [31] GHEZELBASH F, LIU Shiyu, SHIRAZI-ADL A, et al. Blood Clot Behaves as a Poro-visco-elastic Material[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2022, 128:105101.
- [32] HE Dongjing, KIM D A, KU D N, et al. Viscoporoelasticity of Coagulation Blood Clots[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2022, 56:101859.
- [33] TASHIRO K, SHOBAYASHI Y, HOTTA A. Numerical Simulation of Non-linear Loading - Unloading Hysteresis Behavior of Blood Clots[J]. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*, 2022, 42(4):1205-1217.
- [34] CHANDRASHEKAR A, SINGH G, GARRY J, et al. Mechanical and Biochemical Role of Fibrin within a Venous Thrombus[J]. *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*, 2018, 55(3):417-424.
- [35] TUTWILER V, MAKSUDOV F, LITVINOV R I, et al. Strength and Deformability of Fibrin Clots; Biomechanics, Thermodynamics, and Mechanisms of Rupture [J]. *Acta Biomaterialia*, 2021, 131:355-369.
- [36] FEREDOONNEZHAD B, DWIVEDI A, JOHNSON S, et al. Blood Clot Fracture Properties Are Dependent on Red Blood Cell and Fibrin Content [J]. *Acta Biomaterialia*, 2021, 127:213-228.

(编辑 陈勇)

作者简介:洪丽,男,1995年生,硕士研究生。研究方向为精密制造。吴重军*(通信作者),男,1988年生,副教授、博士。研究方向为精密制造技术、智能制造。E-mail:wcyjnm@dhu.edu.cn.

本文引用格式:

洪丽,吴重军,李景文,等.血栓模拟物机械性能及切削破碎效果研究[J]. *中国机械工程*, 2025, 36(2):342-350.

HONG Li, WU Chongjun, LI Jingwen, et al. Research on Mechanical Properties and Cutting Fragmentation Effectiveness of Thrombus Analogs[J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(2):342-350.