

侧支循环分级与急性心肌梗死机械并发症关联的研究进展

李紫燕¹, 丁建平^{2*}

¹吉首大学医学院, 湖南 吉首

²张家界市人民医院心内科, 湖南 张家界

收稿日期: 2026年6月17日; 录用日期: 2026年7月11日; 发布日期: 2026年7月21日

摘 要

急性心肌梗死(AMI)是临床常见的心血管急危重症。尽管再灌注治疗改善了患者预后, 但机械并发症仍是导致死亡的重要原因之一。这类并发症虽不常见, 却具有极高的死亡率, 因此早期识别高危人群至关重要。侧支循环作为心肌缺血时的潜在代偿通路, 其丰富程度可能直接影响机械并发症的发生风险。冠状动脉造影Rentrop分级是目前评估侧支循环最常用的方法。临床研究表明, 侧支循环良好者心肌损伤更轻、心功能恢复更好, 机械并发症风险较低; 而侧支循环不良者风险较高。本文系统综述侧支循环分级对AMI后心肌的保护作用及其与三种主要机械并发症的关联, 以期临床早期预警提供参考。

关键词

急性心肌梗死, 侧支循环, Rentrop分级, 机械并发症, 心脏破裂

Research Progress on the Association between Collateral Circulation Grading and Mechanical Complications of Acute Myocardial Infarction

Ziyan Li¹, Jianping Ding^{2*}

¹School of Medicine, Jishou University, Jishou Hunan

²Department of Cardiology, Zhangjiajie People's Hospital, Zhangjiajie Hunan

Received: June 17, 2026; accepted: July 11, 2026; published: July 21, 2026

*通讯作者。

文章引用: 李紫燕, 丁建平. 侧支循环分级与急性心肌梗死机械并发症关联的研究进展[J]. 临床医学进展, 2026, 16(7): 1623-1632. DOI: 10.12677/acm.2026.1672683

Abstract

Acute myocardial infarction (AMI) is a common critical cardiovascular emergency. Although reperfusion therapy has improved patient outcomes, mechanical complications remain an important cause of death. Although these complications are uncommon, they are associated with extremely high mortality; therefore, early identification of high-risk individuals is crucial. As a potential compensatory pathway during myocardial ischemia, the extent of collateral circulation may directly influence the risk of mechanical complications. The Rentrop grading system of coronary angiography is the most commonly used method to evaluate collateral circulation. Clinical studies have shown that patients with well-developed collaterals suffer less myocardial injury, have better recovery of cardiac function, and have a lower risk of mechanical complications, whereas those with poor collaterals have a higher risk. This article systematically reviews the cardioprotective effects of collateral circulation grading after AMI and its association with the three main types of mechanical complications, aiming to provide a reference for early clinical warning.

Keywords

Acute Myocardial Infarction, Collateral Circulation, Rentrop Grading, Mechanical Complications, Cardiac Rupture

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

急性心肌梗死(AMI)是临床常见的心血管急危重症,其较高的致死率与致残率始终是心血管领域面临的严峻挑战[1]。机械并发症主要包括心室游离壁破裂、室间隔穿孔和乳头肌断裂,其发生率在再灌注时代已降至1%以下,但一旦发生,住院死亡率可达50%以上,其中游离壁破裂的死亡率甚至超过90% [2] [3]。这类并发症虽不常见,却具有极高致死风险,因此早期识别高危人群至关重要。

侧支循环是指冠状动脉之间的血管吻合网。生理状态下,这些吻合支细小且血流量极少;当冠状动脉发生严重狭窄或闭塞时,原有吻合支可在血流动力学和炎症等因素刺激下发生扩张和重塑,发育为有功能的侧支血管,为缺血心肌提供替代性血供[4]。侧支循环良好的患者梗死面积更小、心功能恢复更好;反之则预后更差[5] [6]。此外,缺乏有效侧支循环的患者发生心脏破裂的风险增高[7]。

Rentrop 分级是临床最常用的冠脉造影侧支评估方法,其分级标准明确、操作简便,可在急诊 PCI 术前快速完成评估[8]。本文围绕 Rentrop 分级这一核心工具,从评估方法、心肌保护效应、与各类型机械并发症的关联三个层面,对现有研究进行系统梳理,以期临床早期识别高危患者提供理论参考。

2. 侧支循环的定义、形成机制与评估方法

2.1. 侧支循环的定义与形成机制

侧支循环是指冠状动脉之间存在的血管吻合网络。生理状态下,这些吻合支细小且血流量极少,处于“功能休眠”状态[4]。

侧支循环的形成主要受以下因素驱动:① 血流动力学因素:冠状动脉慢性进行性狭窄产生压力梯度,

剪应力增高, 刺激微小吻合支扩张和重塑, 形成有功能的粗大侧支血管[4], 这一过程称为“动脉生成”。

② 血管生成: 通过预先存在的血管形成新生毛细血管, 增加毛细血管密度以改善血供[9]。

③ 炎症因素: 血管阻塞后炎症细胞被招募至侧支形成区域, 释放细胞因子和生长因子促进侧支血管定向生长和成熟[4]。

④ 传统心血管危险因素: 高血压、糖尿病、血脂异常等通过不同的代谢和炎症通路对侧支血管的生成和功能产生复杂影响, 高血压可促进侧支形成, 而高血糖则损害侧支生成能力[10]。

2.2. Rentrop 分级及其标准

Rentrop 分级将侧支循环分为 4 级[8]: 0 级为无可见侧支血管; 1 级为细小的侧支血管充盈心外膜血管分支, 但未见心外膜主干; 2 级为侧支血管部分充盈心外膜主干; 3 级为侧支血管完全充盈心外膜主干。临床通常将 0~1 级视为侧支不良, 2~3 级视为良好[6]。该分级操作简便, 可在急诊 PCI 术中快速完成。一项前瞻性研究显示, Rentrop 分级与心肌内出血范围、梗死面积呈梯度负相关[5]。其局限性在于属视觉主观评估, 观察者间一致性有限[4]。

2.3. 其他评估方法

为了更客观地评估侧支循环, 研究者发展了多种定量方法。侧支流量指数通过压力导丝测量冠脉闭塞远端压力与主动脉压力的比值, 可定量计算侧支实际提供的血流量, 是目前常用的功能学评估方法之一, 但因操作复杂、费用高, 难以在急诊 PCI 中常规开展[4]。心脏磁共振可从心肌灌注和存活心肌角度间接评估侧支功能[5]。张何等系统综述了心血管磁共振成像技术在 STEMI 患者 PCI 术后心肌内出血中的诊断价值, 指出 CMR 是评估微循环损伤的重要工具[11]。近年来, 人工智能辅助分析冠脉造影影像以评估侧支循环状态, 有望提供更标准化、更客观的评估结果[4]。不过, 在急诊 PCI 场景下, Rentrop 分级因其简便快捷的优势, 仍然是临床最实用的选择。

3. 侧支循环的心肌保护效应

3.1. 缩小梗死面积与改善微循环

侧支循环的核心保护效应之一是缩小梗死面积。Vora 等报道的 MIRON-CL 前瞻性研究共纳入 294 例 STEMI 患者, 均在 PCI 术前以冠脉造影行 Rentrop 分级, 术后 72 h 内行心脏磁共振(CMR)定量评估。该研究将 Rentrop 0 级定义为无侧支(collateral -), 将 Rentrop ≥ 1 级(I + II + III)合并为有侧支(collateral +); 结果显示: 无侧支组(Rentrop 0)梗死面积占左心室 $38.66\% \pm 14.63\%$, 显著高于有侧支组(Rentrop ≥ 1)的 $19.84\% \pm 13.72\%$ ($P < 0.001$); 无侧支组心肌内出血范围亦更大($7.41\% \pm 5.33\%$), 且 Rentrop 0 级患者发生心肌内出血的调整后比值比(adj. OR) = 5.71 (95%CI 3.16~10.33, $P < 0.0001$), 其危险区面积与微血管阻塞程度均高于有侧支者[5]。在预后层面, Allahwala 等的 Meta 分析(20 项研究, 共 14,608 例 STEMI)显示: Rentrop 2~3 级(良好侧支)较 0~1 级与全因死亡风险降低(OR = 0.55, 95%CI 0.48~0.64)及左心室射血分数改善(SMD = 0.23, 95%CI 0.10~0.37)相关[12]。

在微循环方面, 王一彪等分析了急性 STEMI 患者介入治疗术后的微循环障碍情况, 发现侧支循环不良组患者更容易发生微循环功能受损, 而侧支循环良好组患者微循环功能恢复更佳、心功能改善更明显[13]。侧支循环通过“预保护”作用维持远端微循环灌注[5][13]。Sezer 等利用微循环阻力指数证实, 侧支良好的患者 PCI 术后微循环障碍程度显著减轻[14]。

3.2. 保护机制

在缺血期, 已存在的侧支血管能够在冠脉突然闭塞时立即提供替代性血供, 延缓心肌坏死向心外膜

方向扩展。侧支血流可维持梗死区内部分心肌细胞的存活, 从而缩小最终梗死面积[5]。冠状动脉微循环在缺血再灌注损伤中的作用也日益受到重视, 良好的侧支可减轻微血管阻塞[15]。

在再灌注期, 侧支循环可通过减轻再灌注损伤发挥保护作用。已有证据表明, 侧支循环的存在可减少再灌注后的心肌内出血和微血管阻塞, 这两者均是心肌结构完整性丧失、心脏破裂的重要前兆[5]。2024年发表于 JACC 的一项心脏磁共振研究分析了 1109 例 STEMI 患者, 结果显示仅在有心肌内出血的患者中, 微血管损伤才与不良结局事件相关, 心肌内出血是预测主要不良心血管事件的独立指标($HR = 3.88$)。该研究说明, 侧支循环通过减少心肌内出血, 可显著降低透壁性梗死扩展的风险[16]。

4. 侧支循环分级与机械并发症的关联

4.1. 特殊人群侧支形成特点与并发症风险

不同临床特征的患者侧支循环形成能力存在显著差异, 进而影响机械并发症的发生风险。

老年患者: 高龄是侧支循环不良的独立预测因素。随着年龄增长, 血管内皮功能减退、促血管生成因子分泌减少, 侧支血管的扩张和重塑能力下降。一项针对老年 STEMI 患者的研究显示, 高龄患者侧支循环形成显著低于年轻患者, 且侧支循环不良与更高的心功能分级相关[17]。老年患者发生 AMI 后, 由于侧支代偿不足, 梗死面积更大, 透壁性坏死更易发生。

糖尿病患者: 长期高血糖通过氧化应激、晚期糖基化终末产物蓄积等机制损害侧支血管的生成能力。一项 Meta 分析表明, 糖尿病是冠状动脉侧支循环形成不良的独立危险因素[18]。糖尿病患者发生 AMI 时, 即使存在慢性缺血刺激, 侧支发育仍不充分, 导致梗死面积更大、透壁性坏死风险更高。基于大样本数据的回顾性研究进一步证实, 合并糖尿病的 AMI 患者住院期间发生心脏机械并发症的风险显著增加[19]。

既往有心绞痛史的患者: 与无预发性心绞痛的患者相比, 有心绞痛史者由于长期慢性缺血刺激, 侧支循环发育更为充分。针对既往有心绞痛史的患者, 2011 年的一项研究同样证实, 心肌缺血预适应与冠脉侧支循环的形成能独立或协同地对心肌梗塞患者起到保护作用[20]。这类患者在发生急性冠脉闭塞时, 已存在的侧支血流可立即提供代偿, 有效限制梗死范围, 降低机械并发症风险。相反, 初发 AMI 且既往无明显心绞痛病史者, 因缺乏侧支循环保护, 更易发生透壁性梗死和机械并发症[21]。

以上因素与侧支循环的关系并非简单的单向因果。年龄、糖尿病、梗死部位及缺血预适应不仅通过影响侧支循环的发育或功能而间接改变机械并发症风险, 其本身也可能作为独立的风险因子直接作用于心肌脆弱性。例如, 高龄患者除侧支生成能力下降外, 心肌间质纤维化增加、胶原交联异常等因素可直接降低室壁抗破裂能力, 即使侧支分级相同, 老年患者的破裂风险仍高于年轻者[2] [22]。糖尿病则通过微血管病变、自主神经损伤和炎症失调等多重通路, 既抑制侧支形成, 又独立加重再灌注损伤和心肌水肿, 使透壁坏死更易发生[13] [14]。梗死部位的影响尤为复杂: 前壁心肌梗死(左前降支供血区)侧支吻合稀少, 即使 Rentrop 2 级也难以有效限制透壁坏死扩展, 其侧支保护的“阈值”可能高于下壁或后壁梗死(右冠状动脉或左旋支供血区, 该区域侧支吻合相对丰富)。因此, 在临床风险评估中应采用分层分析视角: 对于前壁心梗患者, 侧支循环的保护作用可能有限, 其预测价值需谨慎评估, 更应侧重梗死面积和心肌内出血的直接指标; 而对于下壁心梗, Rentrop 分级的风险分层意义更为明确[2]。缺血预适应(既往心绞痛史)主要通过促进侧支发育发挥保护作用, 但长期慢性缺血本身也可能导致心肌顿挫和纤维化, 部分抵消侧支获益[21]。综上, 这些因素既是侧支循环状态的调控者, 又是独立的风险修饰因子, 在构建预测模型时应同时纳入侧支分级和各因素的直接效应, 而非简单将其视为侧支分级的前置变量。

针对上述侧支形成能力较差的特殊人群(老年、糖尿病、无心绞痛史者), 除常规 Rentrop 分级评估外, 可考虑结合高敏肌钙蛋白峰值、心电图梗死范围等指标, 进一步强化风险分层, 以弥补单一评估手段的不足。

4.2. 心室游离壁破裂

心室游离壁破裂是 AMI 最凶险的机械并发症。Elbadawi 等分析了逾 1.3 万例机械并发症患者的注册数据,发现游离壁破裂的发生率在再灌注时代已显著下降,但一旦发生,住院死亡率仍超过 90% [3]。前壁心肌梗死患者因左前降支末端血供较差,侧支循环形成困难,因此游离壁破裂风险更高[2]。张程征等构建了急性心肌梗死后心脏游离壁破裂的风险评分模型,发现年龄、Killip 分级和心肌酶峰值是独立危险因素,而侧支循环缺乏是破裂发生的关键背景因素[22]。

侧支循环不良是游离壁破裂发生的重要危险因素。其可能机制是:缺乏侧支代偿时,急性闭塞后心肌快速发展为全层坏死,坏死心肌失去收缩能力和结构完整性,在左心室内高压作用下发生破裂。侧支循环的血管床若较为丰富,可能延缓坏死向全层扩展的速度,为再灌注治疗争取时间,并在再灌注后减轻微循环损伤、减少心肌内出血范围[5]。吴鹏等基于 STEMI 患者数据构建了心脏破裂的列线图预测模型,也强调了侧支循环状态在风险分层中的重要性[23]。需要指出的是,目前尚缺乏大样本研究直接提供“Rentrop 0 级患者游离壁破裂风险是 3 级的 X 倍”这样的量化数据,现有结论多基于侧支循环对梗死面积和心肌内出血影响的间接推导。

4.3. 室间隔穿孔

室间隔穿孔(VSR)的发生也与侧支循环状态密切相关。Cubeddu 等在 JACC 焦点研讨中指出,VSR 在溶栓时代发生率约 0.31%,再灌注时代进一步降至 0.21%~0.27%,但一旦发生死亡率仍高达 41%~87%,这与缺乏侧支代偿导致的大面积透壁梗死密切相关[21]。

初发 AMI 且既往无明显心绞痛病史者,因侧支循环缺乏,更易并发 VSR。这一关联可能与初发 AMI 患者缺乏慢性缺血诱导的侧支生成有关。侧支循环不良的患者梗死范围容易扩展至透壁状态,当室间隔区域的坏死程度达到透壁时,间隔组织变得脆弱,在左右心室压力差的冲击下发生穿孔。但需注意,VSR 的发生还与梗死部位(前间隔/后间隔)、室壁应力分布等多种因素相关,侧支循环并非唯一决定因素。张晶晶等分析 AMI 后 VSR 患者发现,侧支循环状态的基础作用极为根本——缺乏侧支代偿导致的大面积透壁性梗死是 VSR 发生的原始驱动力[24]。陈顺煌等对 AMI 合并 VSR 患者的临床特征及短期预后分析进一步证实,侧支循环不良者的院内死亡率显著升高,心源性休克是 VSR 患者发生短期内死亡的独立危险因素[25]。目前同样缺乏大样本研究直接证实 Rentrop 分级与 VSR 的独立关联,其推测主要基于侧支循环对透壁梗死的限制作用。

4.4. 乳头肌断裂

乳头肌断裂虽然发病率低于前两种并发症,但同样与血供和侧支循环状态密切相关。后内侧乳头肌主要由右冠状动脉后降支单支供血,缺乏双重血供来源,且该区域侧支吻合较少,因此缺血坏死风险更高;前外侧乳头肌则接受左前降支和左回旋支的双重血供,两者之间有较多侧支吻合,因此血供保障更优[26]。这一解剖差异可解释后内侧乳头肌断裂发生率约为前外侧的 6~12 倍[27]。

缺乏侧支代偿的患者,一旦支配乳头肌的血管发生急性闭塞,乳头肌将迅速缺血坏死、失去张力,导致连枷样运动并发急性重度二尖瓣反流。2025 年 AATS 专家共识指出,对于乳头肌断裂合并心源性休克患者,应尽早启动机械循环支持,经导管二尖瓣缘对缘修复术(TEER)已成为外科高危患者的有效治疗选择[28]。

4.5. 侧支循环不良: 一个共同的可识别危险因素

整合上述三类机械并发症的证据可以发现,“侧支循环不良”是贯穿三者的共同风险因素。从定量

角度看, Vora 等的研究数据明确显示 Rentrop 分级与心肌损伤程度之间存在量效关系: 随着 Rentrop 分级从 0 级向 3 级递增, 心肌内出血范围从 $7.41\% \pm 5.33\%$ 逐渐降至 $5.23\% \pm 3.21\%$ (1 级)、 $3.11\% \pm 2.78\%$ (2 级) 和 $2.05\% \pm 1.89\%$ (3 级), 呈显著梯度下降趋势[5]。该数据提示, Rentrop 0 级患者心肌内出血范围已超过 7%, 而 2024 年 JACC 研究提示心肌内出血范围 $> 5\%$ 时破裂风险显著增加, 这暗示 0 级可能是机械并发症高风险的关键节点。此外, Vora 等研究显示 Rentrop 0 级患者梗死面积占左心室比例高达 $38.66\% \pm 14.63\%$ [5], 而既往研究提示梗死面积超过左心室 30% 时游离壁破裂风险将显著增加[2]。这一量化关系为侧支循环不良与机械并发症的强关联提供了更为直接的中间环节证据。但需承认, Rentrop 分级与机械并发症之间的具体风险阈值仍有待未来研究验证。刘亚琪等利用心肌灌注与代谢显像对 CTO 患者的研究发现, 侧支循环越好 (Rentrop 分级越高), 闭塞区域内存活的心肌数量就越多, 侧支循环达到良好等级 (Rentrop ≥ 2 级) 可作为预测存在存活心肌的可靠指标[28]。

从临床识别角度看, Rentrop 分级可在急诊冠脉造影时快速完成, 其结果可直接用于指导临床决策: Rentrop 0~1 级 (侧支不良) 患者应被视为机械并发症高危人群, 术后应给予更密切的血流动力学监护。进一步将 Rentrop 分级与心电图梗死部位、Killip 分级、再灌注延迟时间等信息相结合, 可构建更精准的早期预警体系[23] [29]。

5. 争议与未解问题

尽管多项研究支持侧支循环对心肌的保护作用, 但仍有一些问题存在争议。

5.1. 再灌注时代侧支评估是否仍然重要?

有研究者对老年 STEMI 患者随访 12 个月后发现, 校正混杂因素后侧支循环良好与否对全因死亡的影响差异无统计学意义 ($P=0.089$) [29], 提示在成功实现早期再灌注的前提下, 侧支循环对远期死亡的影响可能部分被再灌注治疗效果所覆盖。然而, Cockburn 等的 Meta 分析 (纳入 $>14,600$ 例 STEMI 患者) 明确显示侧支循环良好与全因死亡率降低显著相关[12]。Allahwala 等的 Meta 分析同样证实, 侧支循环良好的 ACS 患者主要心血管不良事件风险降低约 40% [30]。

这一争议的异质性来源可能包括: ① 再灌注时间窗的差异; ② Rentrop 分级观察者一致性; ③ 研究终点选择等。

综合现有证据, 我们认为更为合理的定位是: 对于发病 < 3 小时且成功实现早期再灌注的患者, 再灌注治疗本身带来的获益可能部分掩盖侧支的代偿价值, 此时 Rentrop 分级的独立预后价值相对有限; 而对于发病 > 6 小时、存在再灌注延迟、或未能实现有效再灌注的患者, 侧支循环的代偿作用则显得尤为关键, Rentrop 分级仍是识别机械并发症高危人群、指导临床决策的核心工具。再灌注治疗解决了大血管的急性闭塞问题, 但难以完全替代侧支在微循环保护和梗死范围限制方面的作用[5] [13]。Sezer 等利用微循环阻力指数的研究也证实了这一点[14]。

5.2. 侧支保护是否存在阈值效应?

目前尚不清楚 Rentrop 分级从 0 到 1 的改善与从 2 到 3 的改善, 对破裂风险降低幅度是否等价。国内研究将 Rentrop 分级 ≥ 2 作为预测存活心肌的最佳截断值[17], 但这一阈值是否直接适用于机械并发症的预测, 目前尚属研究空白。其空白原因可能在于: Rentrop 0 级患者本身的机械并发症风险已极高, 而 Rentrop ≥ 2 级患者的风险是否已降至平台期, 仍需大样本研究进行分层分析。Neshat 等 2025 年发表的全面综述指出, 侧支流量指数可定量评估侧支功能, 解剖可见的 Rentrop 分级不一定完全反映实际灌注功能, 因此单纯依赖 Rentrop 分级确定阈值可能存在偏差[4]。

此外, 不同梗死部位可能影响侧支保护的阈值。前壁心肌梗死 (左前降支供血区) 侧支吻合少、侧支形

成困难,即使是 Rentrop 2 级的侧支也可能不足以有效限制透壁坏死;而下壁心肌梗死(右冠状动脉或左旋支供血区)侧支吻合相对丰富,可能 Rentrop 1 级的侧支已能提供一定保护[31]。因此,建立侧支保护阈值时应考虑梗死部位的差异。

5.3. 不同机械并发症类型对侧支循环的依赖程度是否相同?

从现有证据看,游离壁破裂和 VSR 与侧支不良的关联较强,有较充分的临床证据支持[2][21];乳头肌断裂更多由供血解剖的先天脆弱性决定,侧支代偿的贡献相对间接,但同样不可忽视[26][27]。这一差异提示在临床风险评估中应针对不同并发症类型分层对待。

5.4. 侧支循环分级能否转化为临床决策工具?

虽然 Rentrop 分级具有简便易得的优势,但其评估时间点、观察者一致性、与功能学指标的一致性等问题仍是需要解决的问题[8]。在急诊 PCI 场景下,Rentrop 分级受术者经验、造影投照角度和侧支血管显影条件的影响,不同观察者之间的分级结果存在一定差异。为减少观察者差异,术者可考虑固定采用 2 个标准投照体位(如左前斜 + 头位、右前斜 + 足位)进行侧支评估。Elbadawi 等的大规模注册研究也指出,尽管并发症发生率与再灌注延迟和侧支循环不良相关,但 Rentrop 分级的视觉评估方法限制了其作为独立决策工具的可靠性[3]。近年来,人工智能辅助分析冠脉造影影像以评估侧支循环状态的研究正在开展,有望提供更标准化、更客观的评估结果[4]。

5.5. 侧支循环评估的最佳时机是什么?

侧支循环的形成是一个动态过程。急诊 PCI 术前侧支状态与术后数小时至数天内侧支的快速招募之间存在差异。Gutiérrez-Barrios 等发现,延迟就诊的患者中,早期可招募的侧支血管仍能有效保护心肌活力,提示侧支的快速招募机制在发病后数小时内即可开始发挥作用[31]。这一动态过程使得单次时间点的 Rentrop 分级可能无法完全反映侧支的整体保护效应。基于此,急诊 PCI 术前 Rentrop 分级为 0 级的患者,若术后 24 小时复查造影或经侧支功能评估显示侧支仍无改善,可能提示心肌挽救失败,此类患者需更积极地采取预防破裂的措施。

6. 侧支循环干预与高危患者管理

6.1. 促进侧支循环形成的干预策略

尽管目前尚无针对侧支循环的特异性治疗获批用于临床,但已有研究探索了药物促进侧支生成的可行性。粒细胞集落刺激因子(G-CSF)可通过动员内皮祖细胞促进血管新生,部分小规模研究显示其可改善侧支血流;血管内皮生长因子(VEGF)、成纤维细胞生长因子(FGF)等在动物模型中表现出促进侧支生成的潜力,但临床试验结果尚不一致[4]。需要强调的是,目前相关研究样本量小且随访时间短,尚未证实上述干预策略可有效降低机械并发症风险,因此不建议在临床常规应用,仅作为未来探索的研究方向。未来研究可关注:对于 Rentrop 分级低下的高危患者,在再灌注治疗基础上联合促侧支生成治疗,能否进一步限制透壁坏死、减少机械并发症的发生。

6.2. 针对侧支不良高危患者的预防性管理策略

基于侧支循环分级,可制定分层管理策略。需强调的是,以下建议基于现有观察性研究和间接证据的推论,其临床获益尚需前瞻性干预研究验证,目前应作为临床警觉性的参考框架,而非强制性操作规范。具体策略如下:

- ① Rentrop 0~1 级患者:术后应入住 CCU 加强监护至少 72 小时,每日行心脏超声检查,密切监测

血流动力学变化。

② 针对不同并发症的预警重点:

对于游离壁破裂高危患者(Rentrop 0 级 + 前壁梗死 + 高龄), 建议术后 24 小时内每 4 小时监测心肌酶回落情况。需重点关注肌钙蛋白峰值是否超过正常上限的 10 倍、CK-MB 峰值是否延迟出现(如>24 小时), 这些指标提示梗死范围大、侧支代偿不足, 需高度警惕破裂风险。同时, 应动态行超声心动图检查, 关注室壁厚度及回声变化。

对于乳头肌断裂高危患者(后内侧乳头肌供血区梗死, 如下壁/后壁 + Rentrop 0 级), 需高度警惕新发二尖瓣反流杂音, 应早期行经胸超声心动图(TTE)评估瓣膜形态及功能。

③ 合并多重危险因素者: 对于 Rentrop 不良且合并高龄、糖尿病、前壁梗死、Killip $\geq$ III 级者, 可考虑延长监护时间至 1 周, 并早期启动机械循环支持(如主动脉内球囊反搏、Impella)以降低心脏负荷、预防破裂[28]。

④ 出院后管理: 侧支不良的患者即使存活出院, 其心肌瘢痕范围较大, 远期发生室性心律失常和心力衰竭的风险增高, 应规范随访并给予指南导向的药物治疗。

6.3. 未来研究方向

本综述揭示的若干空白值得进一步研究。一是需要大规模前瞻性研究验证 Rentrop 分级对机械并发症的独立预测价值, 特别是要建立不同分级、不同梗死部位对应的破裂风险分层标准。二是设计一项前瞻性、多中心注册研究(如计划纳入 2000 例 STEMI 患者), 在急诊 PCI 术前统一标准评估 Rentrop 分级, 术后 72 小时内行心脏磁共振(CMR)定量检测心肌内出血范围及微血管阻塞程度, 并于入院时采集血清 sST2 水平。以住院期间机械并发症(游离壁破裂、室间隔穿孔、乳头肌断裂)为硬终点, 构建多参数 Logistic 回归模型和决策曲线分析, 明确三联指标(Rentrop 分级 + CMR 心肌内出血 + sST2)的增量预测价值, 并验证在各亚组(如前壁 vs 下壁、老年 vs 非老年、糖尿病 vs 非糖尿病)中的效能差异。同时, 应预设截断值分析, 探寻 Rentrop 分级与心肌内出血范围的联合阈值, 为后续干预性试验提供风险分层依据。(sST2 已在岳福伟等研究中被证实与侧支形成相关, 见参考文献[31])。三是应在多中心层面建立侧支循环分级的数据标准和影像质控体系, 以提高评估结果的一致性和可比性。四是可以借助人工智能技术实现侧支分级的自动化评估, 减少人为主观差异。五是针对侧支循环不良的高危患者, 探索早期机械循环支持及促侧支生成干预能否降低机械并发症发生风险。在高危 VSR 患者中, 经皮闭合装置和机械循环支持可作为手术修复前的桥接治疗[21][28]。六是从卫生经济学角度, 未来还需评估基于 Rentrop 分级的分层管理策略是否具有成本-效益优势, 例如能否通过精准识别低危患者以减少不必要的长时间 CCU 监护, 或通过早期干预高危患者以降低机械并发症发生后高昂的抢救成本。

7. 结论

侧支循环分级与 AMI 机械并发症的发生密切相关。Rentrop 分级作为急诊冠脉造影中最简便的评估工具, 可将 Rentrop 0~1 级患者识别为机械并发症高危人群, 指导术后加强监护。老年、糖尿病、无心绞痛史等特殊人群侧支形成能力差, 应给予额外关注。现有研究的局限性在于多以梗死面积、微循环障碍为替代终点, 未来需以机械并发症为硬终点验证 Rentrop 分级的预测价值, 并进一步明确不同分级对应的具体风险阈值, 探索促侧支生成干预的临床价值, 推动侧支评估在临床实践中的规范化应用。

参考文献

- [1] 中国心血管健康与疾病报告编写组. 中国心血管健康与疾病报告 2022 概要[J]. 中国循环杂志, 2023, 38(6): 583-612.

- [2] Gong, F.F., Vaitenas, I., Malaisrie, S.C. and Maganti, K. (2021) Mechanical Complications of Acute Myocardial Infarction. *JAMA Cardiology*, **6**, 341-349. <https://doi.org/10.1001/jamacardio.2020.3690>
- [3] Elbadawi, A., Elgendy, I.Y., Mahmoud, K., Barakat, A.F., Mentias, A., Mohamed, A.H., *et al.* (2019) Temporal Trends and Outcomes of Mechanical Complications in Patients with Acute Myocardial Infarction. *JACC: Cardiovascular Interventions*, **12**, 1825-1836. <https://doi.org/10.1016/j.jcin.2019.04.039>
- [4] Neshat, N., Shayestehyekta, H., Moradi, M., Frishman, W.H. and Aronow, W.S. (2025) Coronary Collaterals: A Comprehensive Review. *Cardiology in Review*. <https://doi.org/10.1097/crd.0000000000001125>
- [5] 侯胜男, 崔连群. 侧支循环对急性心肌梗死患者近期预后的影响[J]. 山东大学学报(医学版), 2015, 53(12): 47-50.
- [6] Csapó, K., Voith, L., Szük, T., *et al.* (1995) A posztinfarktusos szívizomrupturák angiographiás jellemzői [Angiographic Findings in Postinfarction Cardiac Rupture]. *Orvosi Hetilap*, **136**, 1427-1431.
- [7] Rentrop, K.P., Cohen, M., Blanke, H., *et al.* (1985) Changes in Collateral Channel Filling Immediately after Controlled Coronary Artery Occlusion by an Angioplasty Balloon in Human Subjects. *Journal of the American College of Cardiology*, **5**, 587-592. [https://doi.org/10.1016/s0735-1097\(85\)80380-6](https://doi.org/10.1016/s0735-1097(85)80380-6)
- [8] 尚小森, 杨依纯, 侯佳楠, 等. GDF-15 通过激活 NO-cGMP-PKG 信号通路促进大鼠急性心肌梗死侧支循环改善心功能的研究[J]. 中国比较医学杂志, 2025, 35(5): 60-70.
- [9] 乔海霞, 王旭, 张海燕, 等. 传统心血管危险因素与冠状动脉侧支循环关系的 Meta 分析[J]. 心血管病学进展, 2021, 42(11): 1046-1051.
- [10] 张何, 吴小芳, 万莹. 心血管磁共振成像技术在 STEMI 经皮冠状动脉介入治疗后心肌内出血的研究进展[J]. 中西医结合心脑血管病杂志, 2024, 22(3): 485-489.
- [11] Allahwala, U.K., Nour, D., Alsanjari, O., Bhatia, K., Nagaraja, V., Khatri, J.J., *et al.* (2021) Prognostic Implications of the Rapid Recruitment of Coronary Collaterals during ST Elevation Myocardial Infarction (STEMI): A Meta-Analysis of over 14,000 Patients. *Journal of Thrombosis and Thrombolysis*, **51**, 1005-1016. <https://doi.org/10.1007/s11239-020-02282-6>
- [12] 王一彪, 李峥, 车焕莉, 等. 冠状动脉侧支循环对急性 ST 段抬高型心肌梗死患者介入治疗术后微循环障碍影响的分析[J]. 心肺血管病杂志, 2024, 43(10): 1025-1031.
- [13] Sezer, M., van der Laan, A.M., van de Hoef, T.P., *et al.* (2021) Collateral Microcirculation and Its Impact on Myocardial Injury in ST-Elevation Myocardial Infarction. *EuroIntervention*, **17**, e112-e120.
- [14] Hausenloy, D.J., Chilian, W., Crea, F., Davidson, S.M., Ferdinandy, P., Garcia-Dorado, D., *et al.* (2019) The Coronary Circulation in Acute Myocardial Ischaemia/Reperfusion Injury: A Target for Cardioprotection. *Cardiovascular Research*, **115**, 1143-1155. <https://doi.org/10.1093/cvr/cvy286>
- [15] Lechner, I., Reindl, M., Stiermaier, T., Tiller, C., Holzknacht, M., Oberhollenzer, F., *et al.* (2024) Clinical Outcomes Associated with Various Microvascular Injury Patterns Identified by CMR after Stemi. *Journal of the American College of Cardiology*, **83**, 2052-2062. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2024.03.408>
- [16] Ibanez, B., Aletras, A.H., Arai, A.E., Arheden, H., Bax, J., Berry, C., *et al.* (2019) Cardiac MRI Endpoints in Myocardial Infarction Experimental and Clinical Trials. *Journal of the American College of Cardiology*, **74**, 238-256. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2019.05.024>
- [17] 刘国勇, 孟晓雪, 苏晓灵, 等. 冠状动脉侧支循环对老年急性 ST 段抬高型心肌梗死患者预后的影响[J]. 中国介入心脏病学杂志, 2020, 28(6): 321-327.
- [18] 姚自鹏, 尹琼, 吴安爽, 等. 冠状动脉侧支循环影响因素的 Meta 分析[J]. 中国循证心血管医学杂志, 2022, 14(1): 23-28.
- [19] 林徐泽, 黄思壮, 唐炯, 等. 糖尿病对急性心肌梗死患者住院期间心脏机械并发症发生风险的影响: 一项基于 MIMIC-III 数据库的回顾性研究[J]. 中国心血管杂志, 2023, 28(3): 217-221.
- [20] 陈宏伟. 心肌缺血预适应及冠脉侧支循环对急性心肌梗塞患者的保护[J]. 心血管康复医学杂志, 2011, 20(1): 22-25.
- [21] 张程征, 李朝霞, 杨阳, 等. 急性心肌梗死后心脏游离壁破裂的风险评分模型构建与验证[J]. 临床心血管病杂志, 2024, 40(6): 462-466.
- [22] 吴鹏, 严宁, 马娟, 等. 急性 ST 段抬高型心肌梗死合并心脏破裂的列线图模型建立[J]. 中国动脉硬化杂志, 2024, 32(5): 415-423.
- [23] 张晶晶, 张静, 高传玉, 等. 急性心肌梗死后室间隔穿孔患者的预后及相关因素分析[J]. 中国心血管杂志, 2022, 27(6): 543-547.
- [24] 陈顺煌, 朱存军, 张苗, 等. 急性心肌梗死合并室间隔穿孔的临床特征及短期预后分析[J]. 心脏杂志, 2024, 36(4):

417-421.

- [25] 唐建军, 金啸天. 急性心肌梗死机械并发症治疗进展[J]. 临床心血管病杂志, 2023, 39(7): 498-500.
- [26] Pino, P.G., Parrini, I., Moreo, A., Terranova, A. and Nardi, F. (2025) Echocardiographic Management of Papillary Muscle Rupture during Acute Myocardial Infarction. *Exploration of Cardiology*, **3**, Article 101242. <https://doi.org/10.37349/ec.2025.101242>
- [27] Kaczorowski, D.J., Takeda, K., Atluri, P., Cevasco, M., Cogswell, R., D'Allesandro, D., *et al.* (2025) American Association for Thoracic Surgery (AATS) Expert Consensus Document: Surgical Management of Acute Myocardial Infarction and Associated Complications. *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, **70**, 1327-1344. <https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2026.04.004>
- [28] 刘亚琪, 杨晓宇, 张飞飞, 等. 冠状动脉慢性完全闭塞病变患者侧支循环与存活心肌的关系[J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2025, 45(10): 583-588.
- [29] Allahwala, U.K., Nour, D., Bhatia, K.S., *et al.* (2021) Prognostic Implications of Coronary Collaterals in Patients with Acute Coronary Syndromes: A Meta-Analysis. *Catheterization and Cardiovascular Interventions*, **98**, E234-E242.
- [30] Gutiérrez-Barrios, A., Alarcón de la Lastra, I., Cañadas-Pruaño, L., Delgado, W., Alba-Sánchez, M., Gamaza-Chulián, S., *et al.* (2022) Early Recruitable Coronary Collaterals Preserve Miocardial Viability in Late Presentation Infarctions. *Coronary Artery Disease*, **33**, 433-439. <https://doi.org/10.1097/mca.0000000000001155>
- [31] 岳福伟, 查艳萍, 朱涛, 等. 经皮冠状动脉介入治疗急性心肌梗死患者的 sST2 对冠状动脉侧支循环形成的预测价值[J]. 心血管病防治知识, 2024, 14(1): 3-8+13.