

• 心脏介入 Cardiac intervention •

电解弹簧圈介入治疗冠状动脉瘘的单中心经验
——可行性、安全性分析

冯 灿, 郭 俊, 冀 涛, 朱嘉琦, 赵仙先

【摘要】 目的 总结电解弹簧圈介入治疗冠状动脉瘘(CAF)的经验。**方法** 回顾性分析 2009 年 7 月至 2014 年 11 月第二军医大学附属长海医院采用电解弹簧圈治疗 40 例 CAF 患者的临床资料,了解电解弹簧圈介入治疗的可行性、安全性及疗效。**结果** 40 例患者经电解弹簧圈介入封堵均获得成功,平均植入弹簧圈(2.33±1.38)枚,未发生手术相关并发症。术中 DSA 造影显示 12 例(30%)残余分流完全消失,28 例(70%)血流明显减少。术后随访 1~65 个月未发生再出血及缺血并发症,无相关血管狭窄、闭塞及瘘腔破裂。**结论** 采用电解弹簧圈介入治疗 CAF 安全有效、疗效显著,长期疗效需进一步随访验证。

【关键词】 电解弹簧圈; 冠状动脉瘘; 介入治疗

中图分类号:R528.1 文献标志码:A 文章编号:1008-794X(2015)-05-0373-05

Interventional treatment of coronary artery fistulas by using Guglielmi detachable coils: analysis of feasibility and safety with single center experience FENG Can, GUO Jun, JI Tao, ZHU Jia-qi, ZHAO Xian-xian. Department of Cardiology, Affiliated Changhai Hospital, Second Military Medical University, Shanghai 200433, China

Corresponding author: ZHAO Xian-xian, E-mail: 13601713431@163.com

【Abstract】 Objective To summarize the experience in treating coronary artery fistula (CAF) by using Guglielmi detachable coils. **Methods** During the period from July 2009 to November 2014 at the Affiliated Changhai Hospital of Second Military Medical University, interventional treatment of CAF by using Guglielmi detachable coils was performed in 40 patients. The clinical data were retrospectively analyzed. The feasibility, safety and effectiveness of this technique were evaluated. **Results** Successful transcatheter closure of CAF with Guglielmi detachable coils was achieved in all 40 patients; the average Guglielmi detachable coils used in each patient was (2.33±1.38) coils. No procedure-related complications occurred. Intra-operative angiography showed that residual shunt completely disappeared in 12 patients (30%) and blood flow was significantly decreased in 28 patients (70%). All the patients were followed up for 1–65 months, neither complications such as recurrent bleeding and ischemia nor stenosis and occlusion of related arteries, or fistula cavity rupture occurred. **Conclusion** The use of Guglielmi detachable coil in interventional treatment of CAF is safe and effective, although its long-term effect needs to be further verified. (J Intervent Radiol, 2015, 24: 373-377)

【Key words】 Guglielmi detachable coil; coronary artery fistula; interventional therapy

冠状动脉瘘(CAF)是一种十分常见的冠状动脉

畸形,也是少见的先天性心血管疾病,其发病率约占所有先天性心脏病的 1%^[1]。CAF 由德国解剖学家 Wilhelm Krause 于 1865 年发现^[2],其特征为冠状动脉未经过毛细血管网而与心腔或大血管(体循环或肺循环)任一阶段直接交通。目前学术界对 CAF 有多种分型,常用 I 型表示单一瘘管型 CAF,II 型表示多重瘘管型 CAF^[3]。大部分 CAF 是先天性心脏病,多起源于右冠状动脉和左冠状动脉前降支,较少涉

DOI: 10.3969/j.issn.1008-794X.2015.05.002

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(81370266)、上海市科学技术委员会基金(134119a0301)

作者单位: 200433 上海 第二军医大学附属长海医院心内科(冯 灿、郭 俊、朱嘉琦、赵仙先); 2000802 上海交通大学附属第一人民医院老年科(冀 涛)

通信作者: 赵仙先 E-mail: 13601713431@163.com

及到旋支^[4],而最常接受 CAF 引流的是右心室(约占 41%),其次是右心房(约占 26%),第三是肺动脉(约占 17%),左心室和上腔动脉分别约占 3%和 1%^[5]。超过 90% CAF 患者表现为左至右分流^[4],约 19%患者会并发动脉瘤,但多数直径较小^[6]。CAF 传统治疗方法为外科开胸手术结扎瘘管,但随着近年先天性心脏病介入治疗的发展与成熟,介入治疗以创伤小、经济安全、疗效确切的特点已成为常规治疗手段。国内报道 CAF 介入治疗所用器材包括弹簧圈^[7]、动脉导管未闭封堵器^[8]和室间隔缺损封堵器等先天性心脏病介入封堵器材,其中弹簧圈是最常见器材之一。附有纤维绒毛的弹簧圈因价廉物美受到欢迎,但缺点是可控性较差,顺应性一般,投放位置要求准确。电解弹簧圈既往较多用于颅内动脉瘤治疗,其相对柔软且顺应性好,投放位置不满意可进一步调整,不易损伤血管,可控性良好;价格虽相对昂贵,但安全性高,已逐渐成为 CAF 治疗的主要器材。本文探讨第二军医大学附属长海医院近年成功采用电解弹簧圈封堵治疗 40 例 CAF 患者,现报道如下。

1 材料与方法

1.1 一般资料收集

介入治疗适应证选择:CAF 引发的病理生理学异常主要是分流导致冠状动脉供血不足及分流动脉压力增加,因此治疗主要针对有一定临床症状且造影提示分流量较大患者。虽然有研究提示所有 CAF 均需要封堵治疗,但实际上临床上一些分流量较小的 CAF,如分流于毛细血管水平的 CAF,及瘘道位于非主干血管且对比剂仅呈云雾状散开而非聚集成团状的 CAF,不产生明显的血流动力学异常,因此无需封堵。选取 2009 年 7 月至 2014 年 11 月收治的 CAF 患者 40 例为研究对象,其中男性 29 例,女性 11 例,年龄 32~83 岁,平均 59.4 岁;临床表现大多为胸闷胸痛(75%),少数为头晕晕厥(5%)、心脏杂音(2.5%)等;部分患者伴发高血压(37.5%)、冠心病(17.5%)、糖尿病(12.5%)、心房颤动(12.5%)、心力衰竭(7.5%)。所有患者均接受心电图、胸部 X 线片、心脏彩色超声及腹部超声检查。

1.2 介入治疗方法

患者取平卧位,常规消毒皮肤,铺手术巾和手术单,用 2%利多卡因作局部麻醉,穿刺右侧桡动脉,置入 6 F 桡动脉防漏鞘管;经鞘管送入 5 F 冠状动脉造影导管,分别于 LAO 45°和 RAO 30°投影位,加头位和足位,行左、右冠状动脉 DSA 造影,发现瘘

道后制定封堵策略;一般送入 6 F JL4 导引导管至左冠状动脉口,经此导管送入 Runthrough NS 导丝至左冠状动脉前降支或回旋支远端(视瘘位置而定),送入另一 Runthrough NS 导丝至左冠状动脉-肺动脉瘘血管,通过微导管交换送入电解弹簧圈至 CAF 处作封堵,再以造影明确封堵情况及左右冠状动脉血流是否受到影响;封堵后密切观察心电图和生命体征 15 min,如心电图、生命体征无明显变化则退出导管、导丝,拔出鞘管,用无菌纱布敷盖,以桡动脉压迫器压迫右桡动脉穿刺点。术后 24 h 内复查血常规、尿常规、心肌酶谱,术后 24 h、1、3、6 个月及 1 年随访时作心脏彩色超声、胸部 X 线正位片、心电图检查,之后每年 1 次心脏彩色超声、心电图检查,了解介入封堵并发症(感染性心内膜炎、溶血、穿刺处血管损伤)、心肌缺血相关症状、血栓相关临床表现、心电图 ST-T 改变、心肌酶学改变、残余瘘、复发瘘、心律失常等情况。术中常规肝素化,术后阿司匹林 100 mg 服用 3 个月。

2 结果

2.1 入院检查结果

40 例 CAF 患者经心脏彩色超声检查显示,3 例表现为心功能不全(射血分数<55%),2 例可见异常血液分流,2 例表现为室间隔增厚,1 例伴发室间隔缺损,其余患者未见明显异常;心电图检查显示,2 例患者伴发左前分支传导阻滞,2 例伴发房颤,1 例表现为陈旧性下壁心肌梗死,其余患者未见明显异常;胸部 X 线片检查显示,2 例心影增大,1 例表现为右侧胸腔积液,其余患者未见明显异常表现。

2.2 造影所见

DSA 造影显示,40 例 CAF 患者瘘管类型分别为前降支-肺动脉型(30%)、混合型(30%)、回旋支-肺动脉型(20%)、右冠状动脉-肺动脉型(5%)、第一对角支-肺动脉型(5%)、左主干-肺动脉型(5%)及其它型(5%)。

2.3 造影结果分析

40 例 CAF 患者经电解弹簧圈介入治疗均获得成功,术中 DSA 造影显示 12 例(30%)残余分流完全消失,28 例(70%)血流明显减少。术后 24 h 复查心脏彩色超声均未发现异常血流信号,无心内膜炎、溶血、心肌缺血相关临床表现,无心律失常、血栓相关临床表现,心电图 ST-T 改变以及心肌酶学改变。

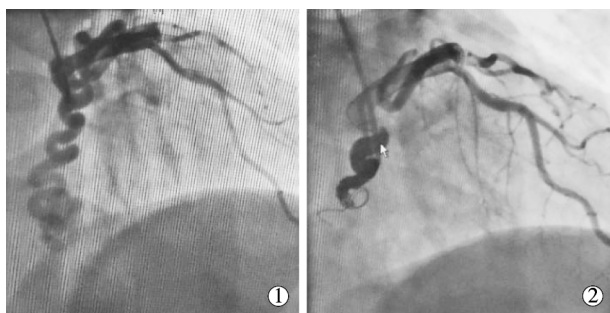
40 例 CAF 患者分别植入电解弹簧圈 1~7 枚不等,平均(2.33±1.38)枚。植入弹簧圈策略主要依据

患者瘘道直径大小及植入后血流改变而定。

3 例因术后再发胸闷再次接受 DSA 造影,考虑为畸形发育的血管较粗大、单次手术无法完全封堵所致,故均予以再次介入治疗,植入电解弹簧圈后 DSA 下血流明显减少,术后未再发胸闷胸痛症状。

2.4 随访结果分析

40 例 CAF 患者经电解弹簧圈封堵栓塞成功后,均未发生手术相关并发症。术后随访 1~65 个月均未发生再出血及缺血并发症,无相关血管狭窄、闭塞及瘘腔破裂。术后即刻未获完全封堵的 28 例患者中 12 例于术后 6 个月接受冠状动脉 CTA 检查,提示 CAF 完全封堵,考虑是弹簧圈植入后血流减慢并在瘘管形成血栓而达到完全封堵的缘故。所有患者随访中均无血栓栓塞事件发生,证明电解弹簧圈植入治疗 CAF 安全、可行和有效(见图1)。



①术中 DSA 造影示冠状动脉旋支-右心室 CAF; ②电解弹簧圈植入后造影示血液残余分流完全消失

图1 电解弹簧圈封堵治疗 CAF 造影图像

3 讨论

CAF 诊断比较困难,多数患者以胸痛收治入院^[5]。表现为无冠心病史却出现典型的心绞痛症状^[9],其原因往往在于瘘管引起冠状动脉盗血^[10]。持续性心脏杂音通常为 CAF 典型体征,需要与动脉导管未闭、肺动静脉瘘管、主动脉窦瘤破裂、主动脉-肺动脉窗、内乳动脉-肺动脉瘘和体循环动脉瘘等作鉴别诊断;收缩期和舒张期杂音可出现渐强或渐弱表现,但一般在舒张期响度更大;其听诊特点为进入右心房的瘘管杂音在胸骨缘附近响度最大,引流入肺动脉的瘘管杂音在胸骨左缘第二肋间响度最大,而引流入左心室的瘘管杂音在心尖部响度最大^[4]。少部分患者无临床症状^[11],大部分未成年患者 17 岁前无明显临床症状,但超过 25 岁后往往因心绞痛、充血性心力衰竭、心内膜炎、动脉瘤破裂及肺动脉高压等临床症状而就诊^[12]。

X 线平片诊断 CAF 较特异征象是心脏异常搏

动膨突影,此影可能为异常扩张、迂曲的冠状动脉。本组患者胸部 X 线平片均未见明显异常,考虑系胸片对 CAF 诊断灵敏度较低缘故。超声检查无创、费用低廉,可用作临床初步诊断手段。心脏超声检查可探及明显扩张的冠状动脉,分流口处可探及连续性双期杂音。利用微泡增强的声学造影检查有助于明确 CAF 位置及冠状动脉扩张程度。但经胸超声有很大局限性,往往因较差的声窗条件及复杂的三维构型无法探及瘘口远端血流^[13]。多平面经食管超声可更精确地显示 CAF 起源、走行及引流位置的全程图像。冠状动脉造影依然是诊断 CAF 的金标准,能够清楚地显示冠状动脉血管和瘘管起源、形态、走向等信息,是施行介入治疗的前提。新型影像学检查手段如 MRI 和多排螺旋 CT,可作为冠状动脉造影的重要辅助诊断手段^[5]。MRI 多平面重建可清楚显示冠状动脉走行及瘘管流入口和流出口,多排螺旋 CT 可清楚显示冠状动脉远端及侧支血管,能够在短时间内获得冠状动脉三维图像,且具有良好的时间分辨率和空间分辨率,尤其是对一些结构复杂扭曲的 CAF 患者的重建效果更佳^[14],可配合冠状动脉造影供术前评估参考^[15]。

美国心脏病学院(ACC)/美国心脏协会(AHA)2008 年版指南建议,对所有较大型 CAF 均予以手术干预,不考虑是否有症状存在^[2];对小到中型 CAF,仅在症状情况下给予干预治疗。然而多数研究认为,当前技术条件下手术风险远小于病变进展所带来的各种并发症,为了防止后期潜在并发症,即使 CAF 患者无症状,也应给予介入封堵治疗^[5]。国外文献报道,超过 90% CAF 患者能够通过介入方式进行治疗^[12],且疗效及预后均与外科手术类似^[4]。介入治疗技术成功的关键是发现瘘口,并根据解剖类型(瘘口大小、形态、起源、分布及单发或多发)、冠状动脉走行、有无相关侧支血管选择合适的输送途径和栓塞材料,封堵瘘口,防止心肌缺血及瘘口遗漏。同时在介入治疗时,可使用气球膨胀试验进行模拟封堵,以判断是否会在封堵后发生心肌缺血^[16]。另外,引流入左心房的瘘管较接近左冠状动脉和旋支,操作中难度大于引流入右心房瘘管,治疗中需小心谨慎操作^[12]。本研究中 40 例患者均为左向右分流,未涉及引入左心房瘘管。

CAF 介入治疗适应证主要包括:①单发型 CAF,不伴发需要手术矫正的其它心脏畸形;②瘘管易于安全到达、能够清晰显影;③少数情况下冠状动脉 1 支或多支形成与心腔相连的多发性微小血

管网,可用带膜支架进行封堵。禁忌证为:①较短及走行非常自由的通路,如左冠状动脉引流至左心腔的瘘管,尝试栓塞时封堵材料有进入体循环,甚至冠状动脉循环的风险^[17];②需栓塞的冠状动脉分支远端有侧支发出,该处心肌组织供血正常;③受累及的冠状动脉极度迂曲;④右心导管提示右向左分流,重度肺动脉高压;⑤封堵术前 1 个月内患有严重感染等^[18]。

目前 CAF 治疗方法主要有圈式封堵器、Amplatzer 蘑菇伞封堵器、可脱卸式球囊、动脉导管未闭封堵伞、带膜支架堵塞术,其中圈式封堵器是应用最广泛的 CAF 介入器材,适用于小-中型 CAF 患者。目前较常使用的电解弹簧圈与其它封堵器相比,有易控性好、安全经济等优点,且便于移位、再次植入和取出^[19],其较好的成血栓特性使完全封堵率大大提高。电解弹簧圈有多种直径及长度可供选择,使用时通常选用大于瘘管直径最大处 20%~40%的电解弹簧圈^[18]。Armsby 等^[18]报道采用电解弹簧圈治疗 28 例 CAF 患者,均取得良好疗效。

介入治疗 CAF 中需要慎重考虑的问题是冠状动脉血管扩张。CAF 可能伴有冠状动脉瘤样扩张、湍流和血管钙化,血管壁结构异常改变易引起血管破裂或夹层出现。与封堵器定位困难相比,血管损伤或夹层的危险更难以避免。意识到这些潜在危险存在,迅速识别并及时处理,对于避免危及正常冠状动脉十分重要,因为即使 CAF 被完全封堵,冠状动脉扩张,甚至并存的冠状动脉瘤也可能长期存在,可能会导致冠状动脉血栓形成、心肌损伤及远端栓塞。若使用的封堵器为可控性材料,栓塞试验和封堵过程可相继完成,而不必单独行堵塞试验。介入治疗并非完全无风险,其最常见并发症为介入材料引起的栓塞^[20]。Armsby 等^[18]报道 1 例 CAF 患者冠状动脉广泛病变,瘘管自左冠状动脉流入肺动脉,介入治疗过程中因电解弹簧圈引起左冠状动脉损伤并致死。CAF 介入治疗还有其它常见并发症,如心律失常、冠状动脉夹层、术后残余分流、溶血、封堵器脱落、异位栓塞、瓣膜损伤、感染性心内膜炎、外周血管并发症和冠状动脉痉挛^[17]等。出现冠状动脉痉挛时,可予以硝酸甘油冠状动脉内或舌下含服治疗^[17]。

关于 CAF 外科手术治疗和介入治疗,目前尚缺乏严格的随机多中心对照研究,但介入治疗以经济、创伤小和疗效好而被广泛应用于临床。内科医师和胸心外科医师仍需进一步合作,以确保不同类

型 CAF 患者得到最佳治疗;介入治疗技术和设备仍需不断完善,以适应不同解剖结构及各种类型 CAF,并取得更好疗效。随着 MRI、冠状动脉 CT 等无创检查的广泛应用,对 CAF 自然病程及术后并发症等进行更为深入的研究和分析,将有利于解决 CAF 治疗适应证问题。本研究证明,电解弹簧圈治疗 CAF 安全有效、疗效显著;不足之处则为随访时间仍较短,病例数较少,长期疗效尚待进一步随访验证。

[参考文献]

- [1] Abusaid GH, Hughes D, Khalife WI, et al. Congenital coronary artery fistula presenting later in life [J]. J Cardiol Cases, 2011, 4: e43-e46.
- [2] Jama A, Barsoum M, Bjarnason H, et al. Percutaneous closure of congenital coronary artery fistulae: results and angiographic follow-up [J]. JACC Cardiovasc Interv, 2011, 4: 814-821.
- [3] Chiu CZ, Shyu KG, Cheng JJ, et al. Angiographic and clinical manifestations of coronary fistulas in Chinese people: 15-year experience [J]. Circ J, 2008, 72: 1242-1248.
- [4] Gowda RM, Vasavada BC, Khan IA. Coronary artery fistulas: clinical and therapeutic considerations [J]. Int J Cardiol, 2006, 107: 7-10.
- [5] Canga Y, Ozcan KS, Emre A, et al. Coronary artery fistula: review of 54 cases from single center experience [J]. Cardiol J, 2012, 19: 278-286.
- [6] Urrutia-S CO, Falaschi G, Ott DA, et al. Surgical management of 56 patients with congenital coronary artery fistulas [J]. Ann Thorac Surg, 1983, 35: 300-307.
- [7] 余志庆,周爱卿,高伟,等.冠状动脉瘘介入治疗的若干问题探讨 [J]. 介入放射学杂志, 2006, 15: 134-136.
- [8] 肖云彬,陈智,黄希勇,等.动脉导管未闭封堵器在冠状动脉瘘介入治疗的应用 [J]. 介入放射学杂志, 2014, 23: 853-856.
- [9] Kidawa M, Peruga JZ, Forsy J, et al. Acute coronary syndrome or steal phenomenon: a case of right coronary to right ventricle fistula [J]. Kardiologia, 2009, 67: 287-290.
- [10] Stierle U, Giannitsis E, Sheikhzadeh A, et al. Myocardial ischemia in generalized coronary artery-left ventricular microfistulae [J]. Int J Cardiol, 1998, 63: 47-52.
- [11] Said SA. Current characteristics of congenital coronary artery fistulas in adults: A decade of global experience [J]. World J Cardiol, 2011, 3: 267-277.
- [12] Ceresnak S, Gray RG, Altmann K, et al. Coronary artery fistulas: a review of the literature and presentation of two cases of coronary fistulas with drainage into the left atrium [J]. Congenit Heart Dis, 2008, 2: 208-213.
- [13] Kimura M, Shiraishi J, Ito D, et al. Usefulness and Limitation of Transthoracic Echocardiography in the Diagnosis of Large Coronary Artery Fistula [J]. Echocardiography, 2010, [Epub ahead

- of print].
- [14] Joshi JK, Beache GM, Slaughter MS, et al. Coronary artery fistula: 64-slice computed tomographic delineation and correlation with multiplane transesophageal echocardiography and surgical findings[J]. Echocardiography, 2012, 29: E69-E71.
- [15] Lin YC, Tsai YT, Lin CY, et al. Coronary artery fistula detected by 64-slice multidetector computed tomography: case report[J]. Heart Surg Forum, 2010, 13: E198-E199.
- [16] Zhao G, Jin H, Wu H. Successful closure for a case of congenital coronary artery fistula using a patent ductus arteriosus occluder [J]. Cardiol Young, 2011, 21: 97-100.
- [17] Fischer G, Apostolopoulou SC, Rammos S, et al. Transcatheter closure of coronary arterial fistulas using the new Amplatzer vascular plug[J]. Cardiol Young, 2007, 17: 283-287.
- [18] Armsby LR, Keane JF, Sherwood MC, et al. Management of coronary artery fistulae. Patient selection and results of transcatheter closure[J]. J Am Coll Cardiol, 2002, 39: 1026-1032.
- [19] Munawar M, Siswanto BB, Harimurti GM, et al. Transcatheter closure of coronary artery fistula using Guglielmi detachable coil [J]. J Geriatr Cardiol, 2012, 9: 11-16.
- [20] Qureshi SA, Tynan M. Catheter closure of coronary artery fistulas [J]. J Interv Cardiol, 2001, 14: 299-307.

(收稿日期:2014-12-15)

(本文编辑:边 皓)

• 病例报告 Case report •

经皮椎间盘髓核切吸术联合外引流术治疗腰椎间盘突出合并硬膜外脓肿 1 例

肖全平, 吴春根, 顾一峰, 王 涛, 程永德

【关键词】 经皮椎间盘髓核切吸术; 引流术; 椎间盘感染; 硬膜外脓肿

中图分类号:R681.53 文献标志码:D 文章编号:1008-794X(2015)-05-0377-02

Percutaneous lumbar discectomy together with external drainage for the treatment of intervertebral disc infection complicated by epidural abscess: report of one case XIAO Quan-ping, WU Chun-gen, GU Yi-feng, WANG Tao, CHENG Yong-de. Department of Radiology, Sixth People's Hospital, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200233, China(J Intervent Radiol, 2015, 24: 377-378)

Corresponding author: WU Chun-gen, E-mail: chungeng.wu@gmail.com

【Key words】 percutaneous lumbar discectomy; external drainage; intervertebral disc infection; epidural abscess

病史摘要

患者,男,50岁,以“腰部疼痛伴双下肢疼痛5月余”于2013年10月5日入住我科。5个月前患者因腰部酸胀不适行针灸治疗后出现腰部及双下肢疼痛,2013年9月10日腰椎间盘CT平扫,示L4-5椎间盘膨隆,腰椎退行性变;腰椎MRI示L4-5椎间盘突出及腰椎椎体结核不能排除,ECT示L4、L5椎体放射性异常浓聚,考虑转移。经保守治疗后疼痛无缓解。近1个月来发热,最高体温达39℃,翻身困难,双下肢放射痛及感觉异常,无法正常行走,提重物、咳嗽时症状加

重,平卧、休息时减轻,大小便功能正常。既往2010年曾行直肠癌切除术,2011年因肠梗阻行造瘘术。入院查体:患者神清、气平、痛苦面容,平卧位,无法翻身,心肺(-),L4、L5椎体棘突明显压痛,叩痛(+),左下肢直腿抬高试验50°(+),右下肢直腿抬高试验40°(+),双侧巴氏征(-)。入院后复查腰椎MRI增强示椎间盘感染合并硬膜外脓肿形成可能;腰椎CT示椎间盘炎可能,血常规白细胞 $14.3 \times 10^9/L$,中粒细胞百分比0.887,C反应蛋白90 mg/L,红细胞沉降率100 mmol/L。于入院1周后行DSA和透视引导下L4-5椎间盘髓核摘除抽吸术、外引流管置入引流术并穿刺活检术,术中患者取左侧卧位,常规消毒铺巾局麻,DSA和透视引导下定位,经皮穿刺入L4-5椎间盘内,经正侧位确认后,逐级扩张置入直径1.4~8.4 mm椎间盘穿刺工作套管,用环锯开窗,用髓核钳反复钳

DOI:10.3969/j.issn.1008-794X.2015.05.003

作者单位:200233 上海交通大学附属第六人民医院放射科

通信作者:吴春根 E-mail: chungeng.wu@gmail.com