

水排山

上 冊

A. И. 維謝洛夫 著
白善書 譯

冶金工業出版社

矿 山 排 水

(上 册)

A. И. 維謝洛夫 著
白 善 書 譯

冶 金 工 業 出 版 社

緒 言

在十七世紀和十八世紀初叶，在俄罗斯，矿井排水所采用的設備是最簡單的往复式水泵和揚水輪。为了驅动这些設備，当时利用的是人力、畜力、风力和水力。

由于蒸汽机的发明，在十八世紀，挑水技术得到了大大的改善。

俄罗斯第一个科学院院士 M. B. 罗蒙諾索夫 (Ломоносов) (1711—1765年)，头一次对当时的排水裝置做了叙述，並提出了他自己設計的一些新穎的排水工具〔1〕。

A. A. 薩布鲁科夫 (Саблуков) 在1835年发明了一种离心式水泵，发明者将其称之为“揚水机”。

在电动机发明之后，十九世紀末叶，开始采明結構已逐漸改进了的离心式水泵。

偉大十月社会主义革命以前，矿山排水設施，主要还是采用往复式水泵，离心式水泵用得很少，而且多半是外国制造的。

在偉大十月社会主义革命之后，由于煤井和矿山的改建，才开始在矿山排水裝置中使用离心式水泵。

在1925年，苏联制出了整体壳式多級离心式水泵；1928年制出了 KMH 型分段壳式多級离心式水泵。从1932年起掌握了 KOM 型多級分段壳式离心式水泵的制造技术；而从1936年起，加里宁工厂已掌握了螺壳式水泵的制造技术。

1942年，A. Я. 波多普里戈尔 (Подопригор) 工程师曾設計出一种矿井用 AHH 型分段壳式离心式水泵，現在这种水泵正被广泛用来装备苏联各矿区的矿井和矿山的排水裝置。

疏干大量含水的矿床时，广泛采用的水泵有两种：电动机装在地面上的 AHT 型深井潛水式水泵和跟电动机一起沉入水中的 ДМАН 型深井水泵。

在开凿矿井时，用特制的立式离心式吊泵排水。

到現在为止，排水水泵站通常都設在开采层的水平上，而它們的水仓低于水泵站；現在已開始把水泵站設在开采层以下。在這種情況下，水仓或者設在水泵站的水平上，或者高于水泵站。在用后一种方法配置水泵站和水仓时，可保證水泵在起動前充滿水。这样就可提高排水效果，並且可以采用級数少，每級压头大和轉数大的离心式水泵。从而也就大大降低了水泵的造价，甚至在水泵排水量不大的情況下也能提高它們的效率。

战后，在采矿和采煤企业中，开始在矿山排水裝置上广泛推行自动化，这样就大大縮減了排水的費用。

为驅动排水裝置的大型离心式水泵，一般都采用轉速1450和2975轉/分的、鼠籠型或繞綫型高压感应电动机，以及同步电动机。

矿山机器制造厂制造的分段壳式离心式水泵，由于效率不高，每一級的压头也低，致使运转費用增大並要求加大排水裝置的外形尺寸，結果将消耗过多的金属来制造这种水泵，这样也就增加了排水裝置在使用、修理和安装上的困难。

必須为矿山和煤井設計出一种排水量大、压头大、級数少而每級压头大（100—200公尺）的离心式水泵。

机器制造厂应当扩大生产适用于排水裝置的螺壳形离心式水泵，同时还必須特別注意使承受水泵中未平衡的部分軸向力的止推軸承結構可靠。

在一些企业中，排水裝置常常是在沒有对其排水量进行經常檢查的情況下工作。这样就会使排水效果非常低，而且需要过多地消耗电力。尚未很广泛地采用机械化方法清理水仓，这样就会弄脏水泵，磨損离心式水泵和降低它們的效率。

如果能够采用潛水式水泵站和跟电动机一起沉入水中的潛水式深井离心式水泵，对排水裝置排水量进行經常性的檢查，改进水仓的結構和使清理工作机械化，將可保證煤井和矿山中的排水裝置經常无故障地工作。

在为进一步提高水泵制造技术的斗争中，科学具有巨大的作

用。在发展苏联科学和技术的同时，我們的学者們还应把本国和外国学者們的巨大貢獻运用到水泵製造的理論和实际中去。

彼得堡科学院院士 A·埃列尔和 A·伯努利早在十八世紀就已經創立了水力学基础。

B. П. 舒霍夫于1897年創立了直联式蒸汽往复式水泵的理論。

Н. Е. 茹科夫斯基教授創立了叶片的施渦理論，这一理論已成為所有离心式和軸流式机器的設計的基础。水管中水的水力冲击理論是茹科夫斯基的卓越著作。

M. M. 費道罗夫院士制定了排水裝置、排水管道最合理的直徑的選擇方法，並且創立了帶曲柄連桿傳動裝置的往复式水泵的閥的理論。

A. П. 格尔曼院士制定了矿山渦輪机的設計原理，並根据类型特性曲綫导出了渦輪机压头方程式。此外，他还制定了往复式水泵空气室的理論。

Г. Ф. 普罗斯庫拉院士創立了离心式水泵的旋渦理論。

應該指出，外国学者們在这方面也做过一些工作，例如：关于渦輪机中水运动現象的理論研究（斯托道里、庫哈尔斯基、布傑曼、普弗列捷尔等）、汽穴現象的研究（湯姆等）、叶柵的實驗研究（普兰特里）、离心式水泵的研究（赫尔別尔和烏英頓）。

在本書中，作者力图根据对采矿工业工程技術人員最有用处的文献資料和采矿企业的工作經驗，总結一下矿山排水方面現有的理論和实际資料。

本書是根據 А. И. 維謝洛夫著 “Рудничный водоотлив” (МЕТАЛЛУРГИЗАТ 斯維爾德洛夫斯克1956年版) 一書譯出的。暫分上下冊出版：上冊包括原書第一章至第六章，敘述矿山湧水及防止湧水的方法，礦水的組成及清除其中機械雜質的方法，矿山排水用各種往復式水泵、螺旋式水泵和离心式水泵，對离心式水泵的原理和結構敘述得最詳細；下冊包括水管道及其防腐方法，排水裝置的電氣設備和自動控制，排水水泵站和排水系統，壓力揚水器和壓力抽水器，矿山和水平層的排水方法，檢查測量儀器，以及排水裝置安裝和使用方面的問題。

本書適用於採礦企業和設計機關的工程技術人員；因對水泵結構和維護使用方法敘述甚詳，所以也可供矿山排水裝置操作和維修人員參考。

目 录

前 言	1
第一章 礦山湧水量及影响湧水量的因素	1
礦山排水裝置的用途和排水量	1
岩石性質和地質产状的影响	2
降水量的影响	5
地面水庫和淹沒礦山的影响	8
礦山含水量和可能湧水量的計算	9
第二章 防止向礦山湧水的方法	16
防止湧水的措施	16
經降水鑽孔从地表排出矿床地下水	17
矿床地下疏水法	29
矿井掘进时的疏水工作	39
露天开采时防止地下水的措施	42
針狀過濾管裝置	45
露天煤矿矿內廢石場的排水	50
矿井防水牆	52
楔形防水牆的計算	61
防止大量湧水和淹沒矿井的措施	63
第三章 礦水的性質及影响礦水性質的原因	69
中性水、碱性水和酸性水	69
影响礦水酸性的因素	70
烏拉尔銅矿	70
煤矿床	74
礦水对金屬的侵蝕性	75
酸性礦水的中和	78
礦水中气体的排除	80
礦水在水倉中澄清	84

水倉的計算和合理的佈置方式	86
不淤塞的水倉的計算	90
水倉的機械化清理	90
第四章 往復式水泵理論簡述	97
往復式水泵的分類	97
曲柄連桿傳動水泵的吸水和排水	97
水泵的理論和實際排水量、功率和效率	102
按示功圖計算水泵指示功率	105
水泵基本尺寸的計算	106
間接傳動的往復式水泵的結構	107
直聯式水泵的結構	115
第五章 螺旋式水泵	117
螺旋式水泵的結構和工作原理	117
水泵的理論排水量	122
水泵吸水的條件	122
螺旋式水泵的計算原理	122
螺旋式水泵的結構	126
第六章 礦山离心式水泵	129
离心式水泵的結構和動作原理	129
叶片数无限的理想的离心式水泵	134
速度平行四邊形	134
水泵的理論压头埃列尔方程式	135
水泵的理論特性曲綫	137
水泵的理論排量	140
叶片数有限的理想的离心式水泵	141
水泵的旋渦理論的概念	141
叶片数有限的离心式水泵的理論特性曲綫	145
离心式水泵中的損失	145
离心式水泵的功率和效率	150
吸水高度 汽穴現象	150

軸向壓力及其平衡方法	153
軸向壓力的卸除方法	156
水泵的理論和實際特性曲綫	161
水泵的通用特性曲綫	163
水泵的比轉數（比速系數）	165
水泵管網的特性曲綫	166
水泵穩定工況的條件	167
工作輪尺寸和轉數的變化對水泵工況的影響	170
離心式水泵的並聯工作	172
水泵的串聯工作	177
離心式水泵的調整	180
分段殼式離心式水泵的結構	184
單級螺殼離心式水泵	194
多級螺殼離心式水泵	205
深井離心式水泵	224
離心式吊泵	238
潛水式深井水泵	244
輔助用途的水泵	251

第一章 礦山湧水量及影響湧水量的因素

礦山排水裝置的用途和排水量

礦山排水裝置的用途，是把流進礦山中的水排出礦山——或則升揚到地面上，或則沿巷道引出（如果巷道是以平窿與地表通連的話）。

假如礦床含水很多，有時須預先疏干礦床，其方法是把深井水泵放到專門打的鉆孔中，從其中把水抽出來。

、礦山排水裝置應保證礦山的連續工作，湧水量增大時礦內工作人員的安全和排水作業的經濟。為了滿足上述要求，必須正確地選擇排水裝置的排水量和型式。

排水量不足的水泵裝置，會使礦山中各項工作由於巷道或整個水平的暫時淹沒而經常停滯，這就會給工業造成很大的損失。排水量過多的排水裝置，則需要較大的基礎投資，而這筆開支是要以折舊費的形式計入礦石成本的，因而也就提高了所採每噸有用礦物的成本。因此，必須特別注意正確選擇排水量相當、而且型式適宜的排水裝置。

在選擇裝置的排水量時，首先要知道湧水量和礦水的性質。湧水量就是礦井內所有階段上在單位時間內匯集的水量。所謂礦水，指的是滲入礦山巷道並影響礦床的剝離和開採工作的地下水和地表水。水中含有酸、鹼或大量礦物鹽和雜質，這些都會縮短水泵裝置的壽命，因而必需有大量的備用水泵裝置。所以在設計新的，改建和開採現有的礦山和礦井時，必需詳細研究湧水情況。新礦床湧水情況的研究，應與礦床的勘探同時進行，為的是在研究礦床的特徵時就能制好這個礦床的水文地質圖，只有很好的了解礦山的水文地質情況，才能正確地採取防止礦水的措施和防止水大量涌進井巷。

当靠近扁豆形砂岩体掘进井巷时，常常发生水大量涌进巷道的现象，有时还发生带出含水泥砂的现象。在“安娜”矿（北捷克斯洛伐克），砂子经过粘土复层衝进了在距地面100公尺深处开掘的巷道。在两天之内，容积达90000立方公尺的巷道就被砂子充满。与此同时，地面上的建筑物由于岩石的下陷而开始倒塌〔2〕。

水从鑽孔中湧出来，对于矿山巷道是极为危险的。在謝利查罗沃煤矿管理局的矿井中，在从巷道内往矿层底板打下去的鑽孔中湧出了高压头的水，淹没了全部巷道。

大量的水湧进巷道，也与采矿工作进行的不正确有关。由于不正确地进行采矿工作，陷落可能延及地表，以致出现裂缝和漏斗，水便会经过这些裂缝和漏斗进入矿内。

在多溶洞的岩石中，井巷可能发生突然的湧水现象，而防止这种现象是有极大困难的。在水溶性岩石厚度较大的地方，可能有深的溶洞。

在所有情况下，只要预料到可能发生突然的大量湧水现象，在选择排水装置的排水量时就应当考虑到这个情况。为防备突然的大量湧水，一般是設置具有必需排水量的备用水泵机组。有时构筑防水牆来保护巷道和排水装置，以防淹没。

岩石性質和地質产状的影响

岩石具有孔隙度，其数值按岩石中孔隙的体积与岩石体积之比来确定，並以百分数表示。有些岩石的孔隙度极小，这样的孔隙度，不允許正常压力的水沿孔隙流动。有的岩石则有很大的孔隙——裂缝和空洞，水可以沿这样的孔隙自由地渗透过去。

孔隙度小的岩石，被認為是不透水的。有的岩石，水可以沿其孔隙自由通过，这样的岩石就被認為是透水的。

孔隙度在5%以下的岩石，为少孔隙的；5%至20%的，为一般孔隙的；20%以上的，为多孔隙的。土壤、泥煤和黄土的孔隙度，甚至能大于70%。

岩石的水容量，可以理解為岩石吸水和容水的能力。水容量用岩石體積的百分數來表示。岩石的水容量與岩石的孔隙度、毛細管作用和節理有關。火成岩和水成岩的水容量約等於1%，粘土——30~50%，而砂——36~42%。

岩石從下方吸水的能力，叫做毛細管作用。只有那些孔隙微小的岩石才有毛細管作用，水借助於重力作用和分子引力作用得以存在於岩石孔隙中。在粗孔隙岩石中具有重力，而在細孔隙岩石中則具有分子引力。在淤泥岩中和在白堊中，水可能因受毛細管作用而上升3公尺。

滲入巷道中的水量及水的滲透特性，首先與岩石的孔隙度、水容量、透水性、可溶性和毛細管作用等有關。

按可溶性程度的不同，岩石可分為易溶、難溶和不溶於水的三種。

評定礦床的含水性時，首先要知道上述的岩石性能。

砂的孔隙度為30~35%。為水飽和的細粒砂，叫做流砂；流砂沖入巷道是非常危險的，因為它可能成為人員死亡和整個或部分礦山損失掉的原因。粘土的孔隙度有45~50%。粘土是不透水層。堅硬岩石的孔隙度和水容量均較小。

在疏松的岩石中，對湧水量發生影響的是導水性、毛細管作用和岩石中水的靜壓力。

在堅實的岩石中，對巷道中湧水量發生影響的是可溶性、可塑性、硬度、堅實性和節理。在開采易溶的岩鹽和鉀鹽時，必須採取措施使井巷與地下水隔絕。

在厚的石灰岩層中，常常遇到由於岩石被水溶解而生成的溶洞。在基澤爾礦區、在北烏拉爾的西坡上，在莫斯科近郊煤田以及在列寧格勒油母頁岩礦田，都普遍存在着溶洞。在烏拉爾東坡上開采鋁土礦時，也遇到溶洞水。

所有存在於岩石中的水，都叫做地下水。地下水又分為表土水、土壤水和層間水。表土水含在地表中；土壤水含在地表以下第一個不透水層中；而層間水則被不透水層與地表隔開。

岩石中承受极大流体静压力的地下水，叫做受压水。而没有压力的，则叫做自由水。

含水岩石的产状，以及顶板和底板岩石的特性，对渗入矿山中的地下水数量有极大影响。依含水条件的不同，透水层和不透水层可能有各种各样的交替情况。

透水层和不透水层在极大的长度内相互交替着；其埋藏情况也很不一致：有的几乎是水平的，有的有很大的坡度。在成水平状态埋藏的岩层相互交替的情况下，上层多含有土壤水；而在较深的，为不透水夹层复盖着的含水层中，含有层间水。假如在不透水层中没有裂缝，而且它们也不与巷道或钻孔相遇，那末含水层中的水就不会进入矿山。

如果巷道和厚度很大而又为不透水夹层所隔绝的含水层相遇，则可能招致矿山突然淹没的危险。当含水层有坡度时，水将带压力进入巷道中。当工作面内的工作进行到预期的含水层时，必须采取专门预防措施：在工作面前钻孔；构筑防水墙等。假如含水层与不透水层交替，并具有通向地表的出口，而且坡度很大，那么土壤水便易于往深处渗透。当在这样的岩石中有裂缝时，水就可能进入巷道，使涌水量急剧增大。这种含水层的储水量取决于其本身的厚度、透水程度、延伸面和水源范围的大小。

假如水在疏松的含水层（比如，砂）中的流动，可以比做在砂过滤器中的流动的话，那末在有裂缝的岩石中，就更类似在管子中的流动。在石灰岩、白云石、结晶片岩和砂岩中常常遇到裂缝，而且它们还有这样的特点：即，当岩层成水平状态埋藏时多为垂直的裂缝，当岩层倾斜时多为倾斜裂缝。大量裂缝的存在，可以认为是这些岩石含水的原因。

假如岩层有升起、错动、被断层切断等情况，可以预料岩石已强烈破碎，有极多的伸展到极深处的裂缝和孔隙，同时即使在深层岩石中也有强烈的透水性，在这种情况下便可能发生突然的涌水现象。这种现象，在顿巴斯、在基泽尔和叶戈尔申斯克煤田、在烏拉尔和在庫茲巴斯的安熱羅蘇其斯克矿区都曾发现过。

进入深部的結晶岩石及變質岩石巷道中的水，是来自斷口区，因此对后者应建立經常的監督。受压水在含水层中流动的条件，取决于含水层所在区域的地質构造形状。含水层埋入的深度越大，其中水的压力也越大。

降水量的影响

大多数矿区地下水的主要来源是雨雪水。降落的雨雪水越多，土壤水的水位就越高，並且压力也越大。而这些水则在压力影响下开始向深处渗透。春季融雪之后和晚秋降雨之后，都可以观察到土壤水上升的现象；因此，在这样的季节里湧水量有所增长。

在苏联北部和中部，因为那里冬季的气候很稳定，所以土壤水的上升和下降也是稳定的。最低的土壤水位在三月，跟着便有两次猛烈的春季水位上升。第一次上升发生在融雪时期，而第二次则取决于当地总的春汛情况。在夏季，土壤水位虽然降落，但不会低到三月最低水位。夏季的暴雨几乎不会使水位上升，只有連綿數星期的足雨才能使土壤水位少許上升。秋季水位上升开始的时间不同，視降雨情况而定。在結冻和冬季降臨之前水位达到最高值，但通常大大低于春季水位。

在苏联西部和南部，因为那里冬季的气候很不稳定而且少雪，同时降了的雪常常是立刻融化，所以，土壤水水位的升降也是不稳定的。

卡拉干达和頓巴斯煤田矿井的含水量各不相同，这说明气候对矿山含水量是有影响的。卡拉干达煤田各矿井的平均含水系数，大約比頓巴斯各矿井的小三分之二。这只是因为卡拉干达降水量較小的緣故。

在頓巴斯煤田和莫斯科近郊煤田的許多矿井中，在阿尔泰的多金屬矿井中和在許多其他矿山中，春季湧水量都增加30~40% [2]。

降水量的絕大部分都是落入那些离地表不太远的井巷中。随

着巷道深度的增加，降水量对巷道涌水量的影响逐渐减小，甚至于不起什么作用。在那些地面被许多谷地和洼地截割开的矿山上，在洪水期内，巷道的涌水量有很大增加。在顿巴斯的这样的矿井中，涌水量的波动达到全年平均涌水量的100~200%；而根据别的资料〔3〕，春季涌水量可能增加500%以上。下面介绍一些煤田的春季涌水量的平均增长系数〔3〕：

斯大林煤矿管理局所属煤田	1.5
阿尔条莫夫斯克煤矿管理局所属煤田	1.4
伏罗希洛夫格勒煤矿管理局所属煤田	1.6
顿巴斯无烟煤矿管理局所属煤田	1.8
罗斯托夫煤矿管理局所属煤田	1.8
莫斯科煤矿管理局所属煤田	1.2
图拉煤矿管理局所属煤田	1.2
列宁格勒煤矿管理局所属煤田	1.4
乌克兰煤矿管理局所属煤田	1.5
油母页岩矿总局所属矿床	3.5

有时候，地表的水经过旧的矿井、探井、钻孔等的井口，以及陷口和裂缝渗入矿山。所以应当采取措施，以消除类似现象。

在没有厚的含水层的矿床中，巷道的涌水量取决于透水基岩的露头程度和表面沉积层的厚度。表面沉积层乃是防止地面水渗入地表以下岩层中去的良好隔水层。根据有用矿物岩石露出地表的总面积，可以看出矿床的露头程度。在节理相同的情况下，巷道的含水量与岩石的露头成正比。

在矿田周围形成的降落漏斗，直径达数百公尺，有时可达数千公尺。

观察证明，自多裂缝砂岩中涌出的水，从300公尺深度以下开始迅速减少；而600公尺以下则完全停止涌水〔2〕。在顿巴斯，最深的斯莫良卡煤井（在715公尺水平上）完全没有水。

在顿巴斯各矿山上，通常自陷落的地面涌进矿井的水，占总涌水量的10~30%。莫斯科近郊煤田的许多褐煤矿床没有涌水现

象，所以那里采煤不用排水。在頓巴斯和卡拉干达，也有許多矿井不用排水。在巴赫木特斯克盆地的大多数盐井中，都是不用排水的。

鑽进矿山的水只是雨雪量的一部分，因为一部分要在降落后蒸发掉，另一部分順地面流入河湖等天然水庫，只有一部分滲入地下。滲入岩石深处的水量多少，取決于：当地的地势、降水特征、岩石性質、岩石产状、植物生长情况及其气候等等。

对基泽尔煤田的水文地質进行的研究証明，在那里的降水量（平均每年为 750 公厘）中有 40% 进入岩石深处，也就是說滲入系数为 0.4。頓巴斯的降水量平均約为 500 公厘，而滲入系数为 0.2 [3]。根据另外的一些观察，在其他地区，假如矿山深度大于 76 公尺，則滲入系数約为 0.25 [4]。当矿山較浅时，滲入系数均在 0.244—0.558 的限度內。在表 1 中載有各个不同地区的滲入系数。

表 1

各个不同地区的滲入系数

地 区 特 征	平 地	一 般 斜 坡
森林地区、多礫石土壤、多石或砂質地区……	0.55~0.75	0.15~0.65
耕地和林木不多的地区……	0.45~0.65	0.35~0.65
草地和牧场……	0.35~0.55	0.25~0.45
露头岩石……	0.30~0.55	0.20~0.40

对于地表复盖着可以使水透入地下巷道的砂-礫石岩层或砂質岩层的矿床，可根据面积和降水量計算其湧水量。利用下列方程式可大概地計算出湧水量：

$$Q_n = K_f \cdot h \cdot Q \text{ 公尺}^3/\text{年}, \quad (1)$$

式中： Q_n ——流入矿山中的水量，公尺³/年；

h ——矿山所在地的年雨雪量，公尺；

Q ——矿山采矿工作包括的面积，公尺²；

K_1 ——水渗入系数。

地面水庫和淹沒矿山的影响

在有湖泊、河流、池塘、排水沟和沼泽的地区，假如矿山的岩石有裂缝与这些水庫沟通，或者含水岩石露出于水庫内和水庫与矿井水相通，就会增加矿山的涌水量。在河谷下的巷道的特征，就是充水性最大。譬如，从菲列波夫卡河中就有大量的水流入里傑爾斯克矿〔2〕。因为有沙尔塔什湖，所以增加了别列佐夫砂矿矿井的涌水量。頓巴斯伏罗希洛夫煤矿管理局的“苏塔干”矿井，因为它的巷道在白河的河谷下通过，每小时就从这条河涌进400—500立方公尺的水〔3〕。

地下水是否与河水相通，可以根据水的温度来发觉。如果地下水源的温度没有变化，而河水温度有波动，那就没有根据认为它们之间有联系。观察水的温度，可以帮助我们判断有没有水冲进矿山。假如汇入水源的水的温度迅速下降，可以预料，供给这个水流的水源将迅速干涸。矿体的水位下降是很快，以致从上面流下的冷水都来不及吸收周围岩石的热量。有时候，河流会使土壤水位升高和使矿山的涌水量发生变化。但是，在较多的情况下，土壤水可能渗进河床，而河中的水由于河床被淤泥和有机物质充塞却不能流进土壤。

如果在开采着的矿山附近有被淹沒了的矿山，则前者的涌水量也可能增加。例如，在排出伏罗希洛夫矿山（烏拉尔）中的水时，作者就曾观察到邻近的捷尔任斯基矿山的水位大大降低。假如附近有較深的开采着的矿山，而且那里的巷道数量又很多，那末較淺的矿山的涌水量就会减小。譬如，在卡拉塔銅矿（深255公尺）排完水之后，掘进輔助矿井（深170公尺）时，就没有再进行排水。

在岩石中有寬0.05—0.1公厘的裂缝，就是以使水渗入。水沿这样的裂缝渗入，並在水进入巷道的出口附近的矿柱中形成陡峭