

# 岩石掘进机译文集

科学技术文献出版社

## 前 言

遵照伟大领袖和导师毛主席“深挖洞，广积粮，不称霸”的教导，结合岩石掘进机设计、制造、试验与研究工作的需要，我们组织国内有关单位共同翻译出版了这本《岩石掘进机译文集》，供国内有关科研、设计、生产单位及大专院校的工人、技术人员、教师、工农兵学员及情报资料人员参考。

岩石掘进机是用来掘进交通隧道，水工隧洞及矿山巷道的一种施工机械，一般具有全断面破碎岩石、装载与运输几种功能，此种机器的雏形在上一世纪即已出现，但只是到本世纪50—60年代才得到较迅速的发展。和一般钻眼爆破掘进法相比，具有机械化程度高，施工安全，超挖量小，掘进速度快及效率高等优点，因而有一定发展前途。

本译文集是今年4月份由上海煤矿机械研究所与我们共同提出初步选题方案，经征求有关单位意见后，于6—10月份翻译了四十篇外文资料，内容包括：一、综述（第1—5篇）；二、破岩理论与刀具寿命（第6—14篇）；三、保持掘进机方向（第15—22篇）；四、掘进机轴承（第23—25篇）；五、通风与除尘（第26篇）；六、掘进工程实例（第27—31篇）；七、其他（包括斜井掘进，石渣运输，新技术应用，电气设备及冲击式掘进机等）（第32—40篇）。

参加本译文集译校工作的单位有：一机部机械科学研究院机电研究

---

所情报室, 洛阳轴承研究所; 煤炭部情报所, 煤炭科学研究院情报资料室, 上海煤矿机械研究所情报组, 铜川矿务局科技处, 抚顺矿务局科技处情报组; 水电部科技情报所, 上海水工机械厂, 郑州施工机械设计室; 铁道部科学技术情报研究所工务室, 铁道科学研究院西南研究所隧道译丛编译组, 中国人民解放军有关单位; 冶金部长沙矿山研究院情报室; 苏州非金属矿山设计院; 北京钢铁学院矿山机械教研组, 四川矿业学院, 西安矿业学院, 山东矿业学院, 阜新煤矿学院及本所重庆分所矿业组, 在此对他们的大力协助, 深表感谢。在发稿前, 我们曾对照每篇原文进行了校阅, 限于政治与业务水平, 错误不当之处仍会不少, 希予批评指正。

由于本译文集系译自国外科技资料, 希读者本着“**洋为中用**”的方针, 有选择有批判地加以参考和利用。

中国科学技术情报研究所

1976年12月

# 目 录

|                                          |       |
|------------------------------------------|-------|
| 1. 当代与未来的掘进机 (美国) .....                  | ( 1 ) |
| 2. 硬矿岩的采掘机械的现状和前景 (东德) .....             | ( 8 ) |
| 3. 隧道掘进机的现状与实用化 (日本) .....               | (17)  |
| 4. 岩石掘进机 (苏联) .....                      | (26)  |
| 5. 硬岩的机械化掘进 (西德) .....                   | ( 37  |
| 6. 隧道掘进机的刀具寿命——事故原因和今后的改进 (日本) .....     | (43)  |
| 7. 盘形滚刀的钝度和磨损 (美国) .....                 | (52   |
| 8. 用盘形滚刀破岩 (澳大利亚) .....                  | (60)  |
| 9. 切槽间距在隧道掘进机运用中的重要性 (美国) .....          | (70)  |
| 10. 隧道掘进机的研究, 实尺岩石切削试验研究装置的研制 (美国) ..... | (79)  |
| 11. 通过实验室与现场隧道钻掘研究的比较来改进硬岩掘进 (美国) .....  | (93)  |
| 12. 岩石切割刀具上作用力的监视 (英国) .....             | (97)  |
| 13. 盘形滚刀式隧道掘进机的特性 (日本) .....             | (104) |
| 14. 掘进机掘进和硬岩的力学性能 (澳大利亚) .....           | (113) |
| 15. 隧道掘进机的自动调向装置 (日本) .....              | (116) |
| 16. 隧道掘进机方位检测装置 (日本) .....               | (122) |
| 17. 矿用掘进机倾角自动检测仪 (苏联) .....              | (123) |
| 18. 激光仪 (英国) .....                       | (125) |
| 19. 联合掘进机在垂直面上运动的自动控制系统的研究与试验 (苏联) ..... | (126) |
| 20. 用“隧道激光”系统控制隧道掘进机 (美国) .....          | (128) |
| 21. 激光导向的全断面掘进机 (瑞士) .....               | (133) |
| 22. 自动化隧道掘进机 (西德) .....                  | (136) |
| 23. 德马克掘进机刀盘轴承 (西德) .....                | (137) |
| 24. 采用大型轴承使小直径隧道掘进机得以实现 (美国) .....       | (138) |
| 25. 两台大型掘进机及其轴承 (西德) .....               | (140) |
| 26. 机械化掘进中的通风与除尘问题 (西德) .....            | (145) |

|                                            |       |
|--------------------------------------------|-------|
| 27. 法国阿尔卑斯山区一隧洞的机械化掘进 (西德) .....           | (148) |
| 28. 掘进机在瑞士水工隧洞建设中的应用 (苏联) .....            | (153) |
| 29. 日本直径 4.8 米隧洞掘进机的性能和掘进实况 (日本) .....     | (157) |
| 30. 实现煤矿快速开拓的新型掘进机 (美国) .....              | (180) |
| 31. 全机械化的巷道掘进——用掘进机掘进一条岩石巷道 (西德) .....     | (186) |
| 32. 用两段扩孔法掘进斜井 (瑞士) .....                  | (190) |
| 33. 石碴快速运输 (美国) .....                      | (197) |
| 34. 关于岩石破碎与岩层掘凿的报告——第三届国际岩石力学会议 (日本) ..... | (201) |
| 35. 对于坚硬岩石综合应用热削弱与机械破碎的研究 (美国) .....       | (211) |
| 36. 高压水射流掘进机设计原理 (英国) .....                | (221) |
| 37. 隧道掘进用水炮的研制和试验 (美国) .....               | (234) |
| 38. ИВМ 型联合掘进机的新电气设备 (苏联) .....            | (246) |
| 39. 蒂森 12/35 型全断面硬岩掘进机 (英国) .....          | (249) |
| 40. 冲击式掘进—现有经验调查 (英国) .....                | (251) |

# 当代与未来的隧道掘进机

**摘要：**目前的隧道掘进机竞相掘凿圆形岩石隧道，压强高达1760公斤/平方厘米（25000磅/平方吋），直径可达6.10米（20呎）。这类掘进机掘进隧道比传统方式速度快50%到100%，并在永久性隧道的衬砌中表明非常节约。可以设想，未来的隧道掘进机将能截割非圆形的断面，可对付压强高达2460公斤/平方厘米（35000磅/平方吋）的各种地层，掘进断面直径达10.3米（35呎）。这样，在岩石的破碎、材料的运输和顶板的临时支护等方面就需要大力发展。

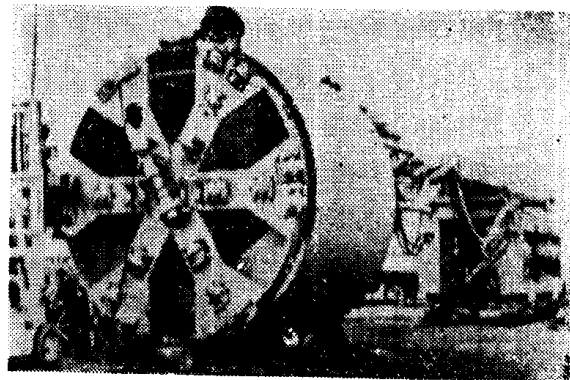
人们愈益认识到，人员的集中需要更多的地下设施，这点已引起了用机械方法掘凿隧道的很大兴趣。由于需要快速运输系统、希望减少不雅观的高架的快车道数量、需要更多的停车设施、民防的要求以及都市地面不动产成本高等原因，都对于改进地下挖掘技术显示出较大的需要。

在地壳的浅层或者数百英尺高的山上，将开掘很多土木工程隧道。由于地壳结构并非一致，因此，需要采用多种掘凿方法，有时甚至在同一隧道中也是这样。本文将主要讨论所谓“硬岩”隧道的掘进，“硬岩”大体是适用于比配制好的熟石膏坚硬得多的任何岩石。而不涉及松软地层隧道这个很重要的领域，尽管在这里，盾构掘进（图一）是一种十分先进的技术。在美国，这种盾构已造出六十套以上。

岩石隧道是用钻眼、爆破以及用隧道掘进机进行掘凿的。1954年第一台成功的隧道掘进机在美国南达科他州的奥阿赫坝用于掘凿松软地层的隧道，其直径是7.93米（26呎）。它仍然是美国目前使用的最大的岩石掘进机。一台更大的詹姆斯·斯·罗宾斯隧道掘进机则被盖伊·弗·阿特金逊公司用于巴基斯坦的曼格拉坝，掘凿直径是10.98米（36呎）。

南达科他州的掘进机是从连续式煤层钻机借鉴来的技术基础上研制出来的。煤炭工业现在使用着上千台的联合采煤机，其中大多数是第二次世界大战以后发展起来的。第一台南达科他州掘进机是由罗宾斯公司为承包商（米特里）制造的。它通常被称做米特里掘进机。这台掘进机是首先用割刀掏槽，切槽形成后再用盘刀碎裂槽与槽之间留下的岩石。这种方法现仍然被一些煤层掘进机所采用。甚至在米特里隧道掘进机制出以前，美国陆军工程兵团已经在支持研制一种用于奥阿赫页岩的岩心钻进装置或是一种掏槽装置。此截槽是用类似于大型链锯的一台采煤机截割的。

当米特里隧道掘进机正在研制期间，在美国的西弗吉尼亚州、西德和荷兰也正在竖井掘凿



图一：带有直径4.06米（13呎4吋）的刀盘的松软地层隧道掘进盾构

方面各自研制了适合于软硬岩石的凿井机。而平巷掘进机在英国也有所发展。荷兰人和西德人当时正在掘凿直径为7.93米（26呎）的煤矿竖井（图二）。此外，西德人当时也正在研制第一台贯通煤矿井下主要大巷的天井钻机。一个西德研制者沙尔兹吉特尔曾试图制造一台从底下向上钻孔的竖井钻机。西德人巴德却应用一种滚刀的独特原理制成了一台竖井钻机，这些滚刀是围绕中心旋转轴以一种行星动作转动的。在英国、西德和瑞士对隧道掘进机的一种新探索中正在修改和试验这种原理。后边将会予以说明。



图二：荷兰式的直径7.93米（26呎）的竖井旋转扩孔钻头

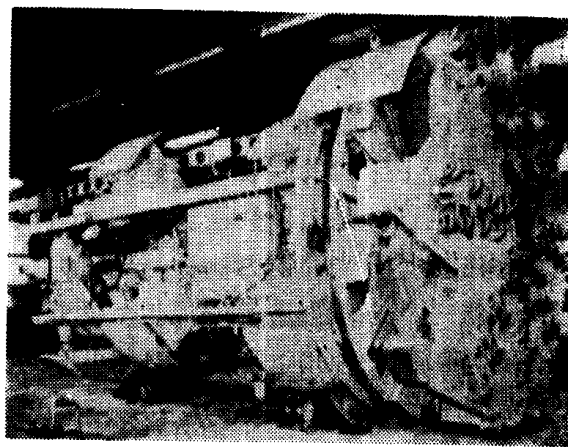
在本世纪五十年代，西弗吉古亚州的齐尼思在休斯刀具公司的协助下，研制了两台钻凿直径为1.83米（6呎）的矿井钻机。这两台钻机都使用滚刀，并且第一台是岩心钻。

在本世纪五十年代末，休斯公司制作了一台试验性的平巷掘进机。并且用它证明可用相当大的直径掘凿抗压强度大于2460公斤/平方厘米（35000磅/平方吋）的坚硬岩石。然而这毕竟是试验性的。大约在同期或者在本世纪六十年代早期，罗宾斯把他的一些盘刀联合在一起，去掉割刀，加大推力，使机器的设计合理化，成功地掘凿了一些强度大约为844公斤/平方厘米（12000磅/平方吋）的岩层。这是首次应用盘形滚刀作为原始刀具所进行的大直径岩石掘进。稍晚一些，德拉沃的克·西·考克斯在休斯公司的协助下，证明了在一个尖的或者圆锥形的刀盘上的盘形滚刀，就能够以张力破碎更多的岩石，从而减少了所需的功率和推力。

于是制作了若干台直径从2.03米（80吋）到6.10米（20呎）的掘进机（图三）。隧道掘进机逐渐地被用于掘凿比较坚硬的岩层，目前，在芝加哥正在被用于强度为1547公斤/平方厘米（22000磅/平方吋）的石灰岩。在樅树铜矿正掘凿抗压强度超过2109公斤/平方厘米（30000磅/平方吋）的一些岩层。然而在可以认为掘进机在土木工程隧道中要它用于如此坚硬的岩层，还必须等到刀具的成本降低到今天所估计的程度的时候。

应当指出，虽则抗压强度对于用来估计岩层的可钻性来说是最好的岩石特征，但仍非决定性的。即使在显然均匀的岩石中，特别由于天然裂缝的存在，要精确地测定其抗压强度也是困难的。同样抗压强度的岩层将根据它的脆性和其他因素而采用不同的掘凿方法。强度为1406公斤/平方厘米（20000磅/平方吋）的石灰岩通常比同样强度的较坚韧的（脆性小的）片岩容易钻凿。岩石的成分也会影响刀具的寿命和成本。含有大量石英的岩石比主要含有较少磨蚀作用的，例如象方解石一样的矿物，对刀具的磨损更快。

在美国有四家岩石隧道掘进机制造厂，在欧洲有三家。大多数岩石掘进机从隧道壁锚具至少提供每米直径74405公斤（50000磅/呎）的推力。劳伦斯制造公司的掘进机靠一个锚固装



图三：在巴尔特（BART）隧道已经掘进2379米（7800呎），日进度18.3米（60呎），直径为6.1米（20呎）的硬岩掘进机

置的拖拉作用获得其推力的大部份，这个锚固装置安装在一个61厘米（24吋）的超前钻好的导洞中。尽管罗宾斯掘进机的刀盘略呈卵形或碟形，然而大多数掘进机的刀盘实质上仍是一个平面。刀盘的每分钟转数大约是  $80/D$ （ $D$  为直径的呎数），回转马力大约是  $50 D$ （ $D$  同上），并且大多数掘进机还有100~150马力的辅助功率。它们都使用电能，并且都将部分电能转变为液压能以发出推力，有的掘进机则用液压马达来驱动旋转。

一种英国的“麦卡尔平”掘进机利用在一个可移动刀盘上的行星装置，从而可以截割任何形状断面的平巷。这种刀盘象老式的西德巴德竖井钻机一样，对刀具有些拉的作用。由于刀具的磨损快以及穿凿迟缓，因而要用于强度大、韧性强、有磨蚀作用的岩石，须慎重考虑。瑞士的沃尔麦耶和哈贝格尔掘进机具有类似的装置，然而在该国家和别的地方没有被广泛地采用。这不仅是由于上述的原因，也由于他们的机械结构复杂所致。此外，按照这个原理，西德的克虏伯掘进机在西德也只作了一些实验性的运转。

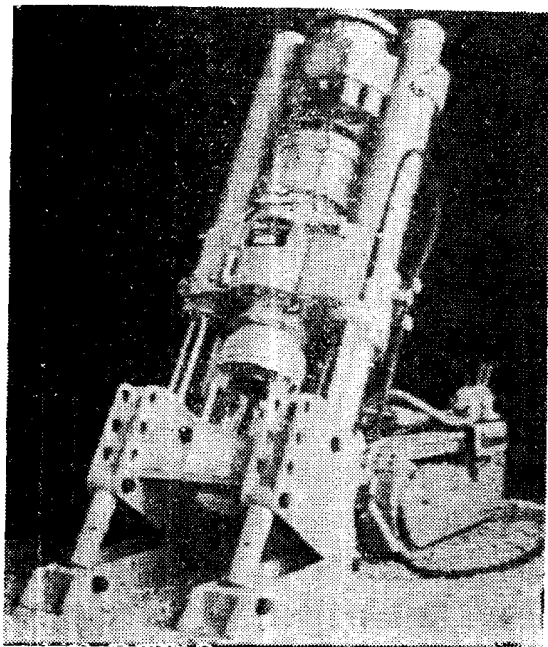
一些人在分析带行星装置的掘进机以后指出，刀具既用于切削，而且有一个拖拉作用。他们还指出，一些刀具从预先钻好的孔中作径向切削，这样它们只需要较小的推力，或者说它们是用张力而不是用压力来切削岩石。然而，严格考查起来，还不能证实这种说法，原因是，首先必须花费时间钻凿导洞，然后岩石在径向冲击下受压被切削下来。受到冲击的大部分岩石对来自东、西或是南、北的冲击反应一样。主要的区别是岩石的抗冲击力必须被机械的径向冲击所克服，而受正面冲击的岩石的抗冲击力则被机械对巷道壁的界面所克服。如果说有优点的话，那也是有疑问的，也许可以用一台简单得多的机械，通过同时包括更多面积的正面的冲击而显示出其优越性。

可能会看到，全部带齿滚刀起着一种切削的作用。那些更为常见的非行星运动的旋转滚刀没有如同用于坚硬岩石的行星刀具那样多的自行破坏的拖拉作用。只有在非常松软的地层里，某些拖拉作用才是符合需要的。巴德—麦卡尔平行星式方案，有一个很好的优点是能够截割合乎运输隧道需要的马蹄形断面。

几乎全部使用滚刀的隧道掘进机都备有一种或几种盘形滚刀。有的在在一根轴上装一把盘形滚刀，有的在每根轴上装三或四个盘形滚刀。轴的直径从22.9厘米到38.1厘米（9吋到15吋）不等。有的采用钢质刀刃，有的采用烧结的碳化钨银片作为刀齿或磨损面。有的有可供更换的刀架，以致轴承或者切割面可予更换。原始的捷尼（Zeni）岩石掘进机所用的齿式刀具目前很少用于岩石掘进。然而，当机器进入较为坚硬的岩石中工作时，一些型式的齿式刀具仍可恢复使用。

如前所述，西德人早在本世纪五十年代就已经研制天井钻机，它们在沉积岩中钻孔，孔径大约为91.4厘米（36吋）。天井钻机通常是在深矿井中在不同水平的大巷之间钻掘竖井或者斜井的。在这篇有关掘进机的讨论中，之所以提到天井钻机是因为它们的发展要影响到坚硬岩层的隧道掘进。这种天井钻机装置钻凿20.3~30.5厘米（8—12吋）的小孔联结两条大巷，另一端安装一个1.52米（60吋）的钻头，反向扩孔，让钻屑落入底部大巷。在本世纪五十年代晚期，休斯公司用这个方案，在密执安州克利夫兰·克里夫斯铁矿的非常坚硬的岩石中打了直径1.52米（60吋）的孔，充实了欧洲人当时的设计。罗宾斯和其他公司随后制成了五十多台这种钻机（图四）。这种机器证明只要给以足够的推力和功率，最坚硬的岩石也能够以61或91厘米/小时（2或3呎/小时）的合理推进速度钻进。刀具的成本据目前报导是10.5~15.8美元/立方米（8~12美元/立方码），或许更高一些。这样高的成本加上相当低的钻进速度，几乎排除了掘进机用于坚硬岩层的可能。因为在这样的岩层中，用钻眼爆破大约和采用

机械钻进是一样快的，或许稍微便宜和更可靠些。但需要提到，隧道掘进机在抗压强度大约是703公斤/平方厘米（10000磅/平方吋）的砂岩中，已每小时掘进5.19米（17呎），而且刀具的成本据报导少于1.308美元/立方米（1美元/立方码）。



图四：进入岩石巷道中钻小孔并牵引一个直径1.52米（60吋）的钻头向上扩孔的天井钻机

目前的隧道掘进机仅在它们的导向方式上略有不同。有些掘进机在掘进时能够改变方向，而另一些掘进机则在每个冲程终了再重新定向。如果需要连续曲线的巷道，用后一种方法可以缩短冲程。无论怎样，多数的隧道掘进机有良好的导向控制，并且掘出的一条隧道与设计路线和坡度的偏差在1.59厘米（5/8吋）以内。不同的隧道掘进机的冲程长度是在0.46米（1.5呎）到1.53米（5呎）的范围内。

所有的隧道掘进机的制造厂家都为安装环形支撑梁提供了机具，这个环形支撑梁支在机器的上方或者周围，并且距工作面的距离大体在1.53米（5呎）以内。这些机具还没有一个是完全自动化的，并且大多数相当粗笨。为改进留下相当大的余地。

位于刀盘外缘的铲斗铲起掘下的石渣，卸入胶带运输机上，转运到掘进机后面的矿车内。少数的像麦卡尔平之类的掘进机则除外。任何多头的掘进机，如麦卡尔平的，将碎落的石渣，或者是犁到横向牵引的运输机上，再卸到纵向胶带运输机中部运至后部，或者是用扫雪机或采煤机上的回转臂收集到中央运输机上。这样的收集装置在需要装卸有锐利棱角的、坚硬的和磨蚀性大的石渣时，维护量就很大。一种劳伦斯掘进机使用一台螺旋运输机，而不用胶带运输机运出石渣。在有可能的地方，机器的胶带运输机宽度最小应是762毫米（30吋），以便处理在进度很快时的尖峰负载，以及运出工作面或者顶板冒落下来的大块岩石。

隧道掘进机的制造厂家和承包商必须相当关注的是，后配套运输机要有足够的运输能力，以及使等候矿车所耽误的时间最少。然而，隧道掘进机使用到现在，半数以上缺乏足够的矿车供应设施。除了极好的工作之外，由等车而耽误的可用时间曾占百分之四十以上。早期的隧道掘进机的后配套运输机长度是18.3米（60呎）到45.8米（150呎）。现在很多正在制造的运输机长度是91.5米（300呎），或者更长，并且跨在双轨上。正在设计一种为小型隧道掘进服务的长而扁的矿车，以致在运输机下面可储备一列空车，靠在正在装载的列车旁，避免因等车而耽误时间。

直到目前，还没有一家岩石隧道掘进机制造厂或用户研究出一种砌碛和掘进同时进行的成功方法。在拥挤的巷道途中成型的复杂性，运进混凝土要不干扰石渣的运出，并产生附加热量，这到目前还是难以解决的问题。

归档保存的专利研究表明，一个多世纪以前，人们就曾梦想一台隧道掘进机。英国和美国在上一世纪使用过这种机器，但是直至1953年以前，还没有那一台太大地超出原始阶段。现代的岩石隧道掘进机方案是花了将近二十年的工夫才发展到目前这种状态。在过去的十年内，除了激光导向之外，隧道掘进机没有什么重大的革新。然而配套设备，诸如运输机和调

车装置，已经改进了，使隧道掘进机有了工作可靠性。但是刀具、转速和推力形式与技术一般地大体和1960年的设计是相同的，并且仍是1955年那个时期的构思。这种情况在当时的专利和某些看来似乎是“空想家”的技术论文中已有所反映。

这表明了，在这个领域，用我们现存的探索，至少花了十五年的时间才获得了一个从设计到完全认可的方案。最初十年的大量时间是用来说服大部份用户相信岩石掘进机的设想是可行的。对那些已经确认了这种岩石掘进机可以工作的人来说，仍然有一些人不承认掘进机已经“获得成功”。还有一些人现在虽然在隧道掘进机的原理上相信了，但是对它的局限性却有着不现实的评价。

隧道掘进机的使用存在着一些局限或限制，然而有一些正在被消除或者改进。在目前，小于203厘米（80吋）的隧道掘进机已不予制造。因为机器把洞子占据太多，难以维护和进行顶板支护。隧道掘进机用于掘凿大多数直径超过9.15米（30呎）的隧道是不经济的。因为掘进每立方米（相当于0.765立方米）的成本是随直径的增加而减少，可是使用常规方法比使用掘进机减少得较快。然而至今还没有人真正知道隧道断面尺寸对于开挖成本或隧道掘进机的机械要求的精确影响。

贾瓦制造公司证明了哪种掘进机能够在商业上竞争，并在抗压强度超过1406公斤/平方厘米（20000磅/平方吋）的圣路易斯石灰岩石上作了掘进。卡威德分公司准备在抗压强度超过2109公斤/平方厘米（30000磅/平方吋）的岩层中试验它的机器。经验表明，掘进机不应考虑用于长度短于3.22公里（2哩）的隧道，因为高的基本投资（大约为常规隧道掘进的二倍）不能因短而勾消。而且随着所用机器的利用率愈高，不应自动地采用这一限制。对造一台隧道掘进机而言，机器的利用率有助于克服大约十个月的由设计到生产的长时间的缺点。

已经写了不少有关隧道掘进机的优点。在那些能够使用机械的地方，有一个明显的例证，就是主要的支护钢材能够削减几乎一半。由于消除了超挖，永久衬砌所需的混凝土经常可减少一半。这两项节约对于企业主和承包商来说，在许多情况下，抵偿了隧道掘进机的折旧大部份。此外，用隧道掘进机掘进比常规掘进因事故浪费的时间也大约少百分之十。

到目前，使用隧道掘进机节约的总劳动量仍然比预计的少。虽然掘进工减少了大约百分之七十五，但是铺设轨道和处理高速度掘出的石渣却需要较多的工人，所以净节约大约只有百分之十五。

当然预言二十年或三十年之内的隧道掘进机，是不可能下任何准确的断语的。如果不看得太严格的话，那也是一个很好的尝试。通过评价已经报导的研究计划，可以得到一些结论，基于这些考虑来作出以下的估计。希望能促进制造厂家、承包商或隧道设计人员提出类似的想法，对这个有很大利害关系的技术的发展有所帮助。

就未来的隧道掘进机来说，“未来”必须予以规定，如果“未来”是指下一个二十年，那么它将是指目前掘进机的一个很大的改进。如果“未来”是指公元2000年，那么它又将是一个用机械的、热力的或甚至用高压水射流的联合装置来破碎岩石。

1990年的掘进机仍将使用滚刀切割岩石。一个凸形的或者凹形的切削头可以在较弱的张力状态下切割更多的岩石，而不象现在这样在压力状态下切割。它将能够自动地进行顶板支护，可以是喷射混凝土或者塑料；支护装置可以由钢带组成，贮存时是弯曲的，经过成型而用于现场；它将完全免除粉尘；还能预感岩层不好或水灾；可以遥控，以便操作人员很少暴露在未支护的顶板下面。多数控制是由一台计算机来处理的，计算机反应给激光导向和改变

推力、转速、避免故障的其他电子设备。永久性的支护将可以在掘进机后面几呎之内安装。

将供应一种装置来扩大掘进机掘出的圆形断面的隧道，使其成为普通大小的矩形断面隧道，如城市地下停车场和快速通过站那样的。

处理石渣的固体输送管道不能代替运输车辆，车辆将继续需要运送器材和人员。轨道运输或车辆运输，或二者都比胶带便宜，也不象管道那样需要从矿浆中破碎或分离固体物料。1990年的隧道矿车将很不同于1970年的样子，它将是细长的和可弯曲的。因而可适应于不同形状和大小的隧道。它们可以装上充气的轮胎，以二倍或三倍于今天的轨道运输速度(16.10公里/小时)在专门的预制车路上行驶。每辆车都可以有自己的驱动装置，由人驾驶或无人驾驶。1990年的隧道掘进机将能在曲率半径等于五倍隧道直径的弯道上转弯，与其相比，目前的隧道掘进机转弯的曲率半径大约等于二十倍的隧道直径。它将能在坡度为二十度的坡道上向下运动，与其相比，目前能向下运动的坡度大约为十度。

目前的隧道掘进机的月进度为915米(3000呎)或者稍高一点，只相当于1990年低的平均生产进尺。目前的月进度超过1830米(6000呎)的罕见的高记录，到1990年将会经常被达到。在稳定地层中，日进61~91.5米(200~300呎)将是平常的。

1990年掘进机的机械部分的重量将只有目前的百分之六十，按吨量计接近 $0.6D^2$ ( $D$ 为直径的呎数)。而电气、粉尘和温度控制装置以及自动化顶板支护装置的重量的重量将可以抵消机械部分所减少的重量。工作的运费大概仍是今天这种状况。掘进机贸易将有一个很大的发展。公路隧道和引水隧道设计将要标准化，这样，目前的一台掘进机从设计到投产的时间将减少到三到四个月，而不是1970年的十到十二个月。

1990年的隧道掘进机依然不能掘凿比重大的、破碎的和坚硬的岩层，对于这样的岩层和断面直径超过10.70米(35呎)的坚硬岩层的隧道，钻眼、爆破仍然作为标准的开拓方法。

1990年的隧道掘进机的刀具将能以1.83米/小时(6呎/小时)的进度掘凿抗压强度为2460公斤/平方厘米(35000磅/平方吋)的坚硬岩层，刀具的成本小于5.2美元/立方米(4美元/立方码)。若以7.6米/小时(25呎/小时)的进度掘凿抗压强度小于1406公斤/平方厘米(20000磅/平方吋)的岩层，刀具的成本则小于65美分/立方米(50美分/立方码)。

刀具的使用期将由目前的平均100小时(性能好的)延长到300工作小时。机械的可靠性和备用设备也将要有所改进，以致机械的利用率将由现在的百分之六十提高到百分之八十五。这样，刀具大约一月更换两次。大批生产费用的节约导致刀具成本的减少，使得产品价格便宜，以致装备或者增加一台6.1米(20呎)的掘进机的全套刀具，其成本比所需的大约40000~70000美元(取决于岩石类型)减少百分之二十。

这样就可能会制造一批隧道掘进机，在适当强度的各类岩层中，竞相掘凿直径为10.7米(35呎)的隧道。还会有一种掘凿直径为1.52米(60吋)的岩石隧道掘进机，但不会有更小的。

一项集中研究的成果能够把1990年的掘进机提前到1980年生产，而把2000年的掘进机提前到1990年。

表一列出的是有关估算机械化掘进隧道的一些很粗略的指标。

表 一  
粗略估算掘进机掘进隧道指标的经验公式：

| 项 目                   | 单 位  | 一九七〇年值                           | 一九九〇年值 |
|-----------------------|------|----------------------------------|--------|
|                       |      |                                  | 一九七〇年值 |
| 功 率                   | 马 力  | 50D                              | 0.7    |
| 机 器 重 量               | 磅    | $D^2 \times 10^3$                | 0.8    |
| 最小曲率半径                | 米    | 20D                              | 0.25   |
| 转 速                   | 转/分  | 80/D                             | 1      |
| 推 力                   | 磅    | $5 D \times 10^4$                | 0.6    |
| 最大钻进速度                | 呎/小时 | $2/S \times 10^{-5} - 3 \leq 25$ | 1.5    |
| 班 进 度                 | 呎/班  | $4 \times \text{最大钻进速度}$         | 1.5    |
| 切割费用 / 码 <sup>3</sup> | 美 元  | $0.50 + (S \times 10^{-4})^2$    | 0.6    |
| 机 器 成 本               | 美 元  | $5 D \times 10^4$                | 1.2    |

注：D—直径，呎  
S—岩石抗压强度，磅/平方呎

### 参 考 文 献

1. Bennett, N.B., III. Mole Versus Conventional: A Comparison of Two Tunnel Driving Techniques. 46th Annual Meeting of Committee on Engineering Geology.
2. Bruce, W.E., and Morrell, R.I., principles of Rock Cutting Applied to Mechanical Boring Machines, Proc. Second Symposium on Rapid Excavation Sacramento State College, Oct. 1969.
3. Harder, P.B., Giant Mole speeds Mangla's Five Diversion Tunnels. Roads and Streets, March 1965.
4. Hirschfield, R.C., Possible Use of Tunnels for High-Speed Transportation in the Northeast Corridor. Conference on Economic Geology, Univ. of Massachusetts, Jan. 1966.
5. Howard, T.E., Rapid Excavation. Scientific American, Nov. 1967, pp. 74-85.
6. Robbins, R.J., and Anderson, D.L., Machine Bored Tunnel and Raises: Their Application to Underground Mining. Mining Engineering, July 1967, pp. 156-160
7. Sperry, P.E., River Mountains Tunnel., Proc. Second Symposium on Rapid Excavation, Sacramento State College, Oct. 1969.
8. Williamson, T.N., et al., Excavation. A report for U.S. Army, Dec. 1963.
9. Williamson, T.N., Large Shaft Drilling for Coal Mines. Mining Congress J., Mar. 1968.
10. Williamson, T.N., Hard Rock Tunnel Driving on the Moon? Mining Engineering, July 1965, pp. 147-151

铜川矿务局科技处 译自 Highway Research Record Number 339,  
Symposium: Rapid Excavation, 1970, 19—25

原文作者: Williamson T.N., (旧金山, 雅各布斯协会)

# 硬矿岩的采掘机械的现状和前景

## 1. 引言

目前和未来的地下回采作业和掘进作业范围要求采用合理而有效的岩石破碎方法。除了已知的钻孔和爆破方法以外，在以往的15年内，机械化的采掘机械用于较硬的矿岩层证明是成功的而且首先在隧道掘进和平巷掘进中达到了惊人的功效。

在1960至1969年期间的431,000公里平巷中，只有大约150公里平巷是完全用机械化掘进。表1综合示出了世界各国在过去十年内掘进了的和最近十年内大体估计的巷道掘进数据①。

这些少量的数据说明，目前在坚硬矿岩中采用平巷掘进机的颇有希望的发展才刚刚开始。

表1 全世界的平巷掘进数据

| 经营部门 | 1960年至1969年期间            |                                        |                          | 1970年至1979年期间            |                                        |                          |
|------|--------------------------|----------------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------------------|--------------------------|
|      | 长度<br>公里·10 <sup>3</sup> | 掘进量<br>米 <sup>3</sup> ·10 <sup>6</sup> | 费用<br>美元·10 <sup>6</sup> | 长度<br>公里·10 <sup>3</sup> | 掘进量<br>米 <sup>3</sup> ·10 <sup>6</sup> | 费用<br>美元·10 <sup>6</sup> |
| 采矿部门 | 417.7                    | 3625.8                                 | 18166                    | 607.4                    | 5356.7                                 | 25549                    |
| 运输部门 | 2.3                      | 161.9                                  | 5219                     | 5.1                      | 432.3                                  | 19068                    |
| 供水部门 | 3.9                      | 73.0                                   | 1650                     | 3.5                      | 68.5                                   | 2794                     |
| 其他部门 | 7.1                      | 51.3                                   | 1550                     | 12.4                     | 174.0                                  | 6721                     |
| 总计   | 431.0                    | 3912.0                                 | 26585                    | 628.4                    | 6031.5                                 | 54132                    |

## 2. 发展现状和功率

抗压强度为800至1000公斤/平方厘米而且琢磨性很大的矿物的完全机械化开采，至今仍然局限于少量使用。曼斯费尔德的国营“威廉·皮克”联合企业的桑格赫依斯采区用刮刨机的工作面开采方法正在完全机械化地开采抗压强度为590至850公斤/平方厘米的含铜板岩。多年以来在南非金矿中一直试用着装带有扁平截齿形刀具的回采机，其刀具在抗压强度大于2,000公斤/平方厘米的岩石中截深达25厘米②。

目前在苏联、加拿大以及美国的钾矿和岩盐矿开采中使用钻削式回采机（PK10型，Goodman连续式钻削型，Marietta-Miner A1012型）。使用目前制造的最大的地下回采机，即一台额定功率为1100千瓦的Marietta-Miner A1012型回采机时，在每班为1.5至2.5小时的纯截割时间的条件下，采出430吨/小时的钾石盐③。平巷掘进机在目前的发展阶段中已被

优先用于掘进隧道和水工隧洞。平巷直径为2米（DEMAG TVM20-23H型）至11.2米（Robbins 341型\*）。Robbins 341型平巷掘进机，其重量为1100吨，对工作面前壁的最大压力为5,000Mp.,是目前所制造的最大的平巷掘进机。哈贝格公司根据沃耳麦耶（Wohmeyer）原理设计了一台平巷掘进机（哈贝格870型），这台平巷掘进机在1500千瓦的额定功率的情况下掘进直径7.25米的平巷，每小时能碎落44.1立方米的、抗压强度为1,000公斤/平方厘米的矿岩或者碎落38.0立方米的、抗压强度为1750公斤/平方厘米的矿岩。纯截割功率应为1,000千瓦。

为了掘进水工隧洞和供水管道，阿特拉斯·科普科公司研制了非圆形断面的掘进机。FF1321型小型全断面掘进机通过铣切刀盘的摆动，截割仅为1.3×2.1米的断面。备有4个铣切刀盘的FF4826型全断面掘进机通过成对安置的截割机构的偏转来掘进4.88×2.6米的巷道。

由维尔特公司制造的装有硬质合金滚片的滚刀的掘进机已开始在奥地利在抗压强度约4,000公斤/平方厘米的最坚硬的花岗岩中掘进平巷。掘进380米平巷以后，由于切削刀具的费用太高，调整了掘进工作④。掘进机可以在多曲线巷道（R=80米）中进行掘进而且借助激光器射线来保持方向。从经济观点出发，目前的平巷最小长度确定为600至800米。

回采功率和掘进功率取决于切削刀具的型式、矿岩强度以及掘进机的额定功率。

表2列出完全机械化开采不同抗压强度的矿岩时的若干结果⑤。

表2 采掘功率

| 采掘功率<br>(立方米/小时)      | 矿岩名称       | 抗压强度<br>(公斤/平方厘米)     | 采掘机械型号                                         | 额定功率<br>(千瓦) | 单位功率<br>(千瓦/立方米)            |
|-----------------------|------------|-----------------------|------------------------------------------------|--------------|-----------------------------|
| 9.6...14.4<br>30      | 铁矿石<br>钾   | 500...950<br>800      | Twin-Borer 2-BT-2<br>Goodman<br>Cont.-Borer    | 191<br>368   | 0.05 —0.075<br>0.08         |
| 10 ...17<br>33.0...40 | 石灰岩<br>褐铁矿 | 200...420<br>50...150 | Twin-Borer<br>辊式截装机                            | 191<br>100   | 0.05 ...0.09<br>0.33 ...0.4 |
| 84.8<br>17.3          | 页岩<br>—    | 350<br>1000           | Robbins 104/120<br>840 Habegger<br>φ3.8...4.2米 | 294<br>470   | 0.29<br>0.037               |
| 5.7                   | 石灰岩        | 1500                  | Robbins 74<br>φ2.2米                            | 124          | 0.046                       |
| 1.8                   | 片麻岩        | 2400...2800           | Wirth TB-1-214<br>φ2.2米                        | 198          | 0.009                       |

### 3. 切削刀具

#### 3.1 切削刀具的种类

使用采掘机械来破碎矿岩时，采用各种截割工具（即各种截割刀具）可截割其强度为1000至1200公斤/平方厘米的矿岩，采用沃耳麦耶式掘进机可碎落抗压强度至1500—1700公

\*编者注：应为Robbins 371型，其重量为225吨，推力272吨

斤/平方厘米的矿岩。

图1示出了一台装有4个碎岩刀盘的沃耳麦耶式平巷掘进机。

用切槽和楔形刀具从岩层中碎落强度高和琢磨性大的矿岩。为了减少磨损和提高开槽作用，在矿岩上滚压的刀具可以镶嵌齿、硬质合金球齿或硬质合金片。图2示出装有盘形滚刀的德马格型隧道掘进机。

机械破碎矿岩的另一个方法正处在试验阶段。基契京报道了有关用ΠK 3型平巷掘进机在砂岩( $\sigma_D=600$ 至800公斤/平方厘米)中的试验，这台平巷掘进机用金钢石刀具截割7-8毫米宽和250毫米深的槽并用一种冲击式刀具破碎大约250毫米宽的矿岩带。

值得注意的是：破碎的单位能量消耗仅为0.06至0.16千瓦时/立方米。这就达到了4.2至7.1立方米/小时的破碎能力的要求。在实验室里利用高压水射流(最大压力为72000公斤/平方厘米)截割所有各种类型的矿岩。由于可达较高的能力密度，水射流有其连续破碎的有利条件。其缺点是它的单位能量消耗<sup>⑧</sup>比用功率大的机械要高达100倍。加热方法、化学方法以及物理方法在硬岩的回采工程和掘进工程中的应用至今尚未超出试验阶段。

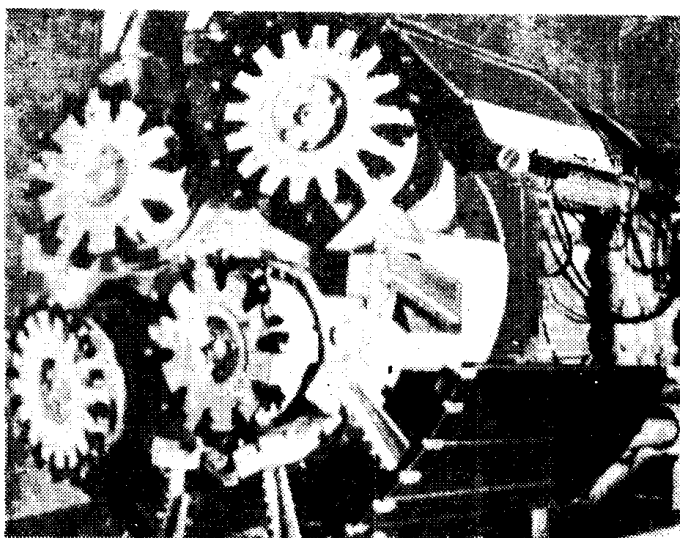


图1 装有碎岩刀盘的平巷掘进机

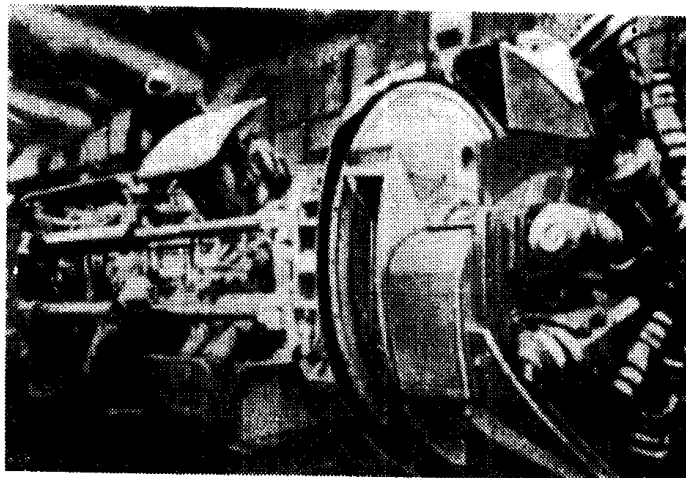


图2 装有盘形滚刀的平巷掘进机

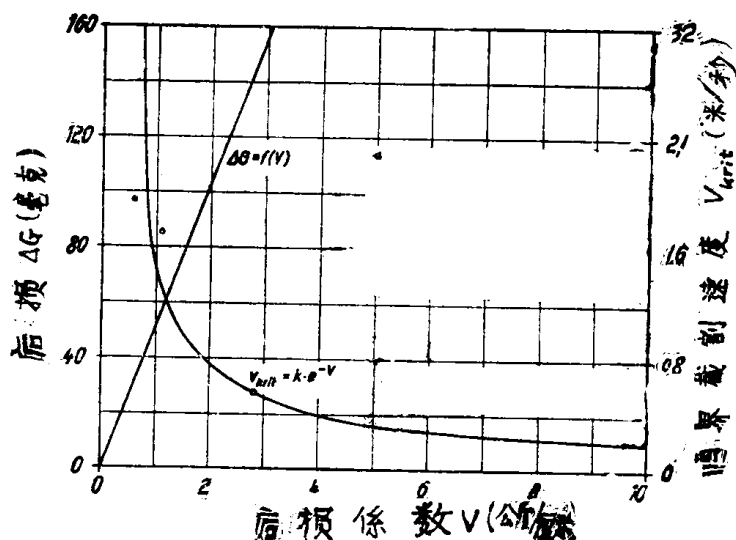


图3 刀具磨损和临界截割速度与磨损系数的关系

图中  $V=q \cdot d \cdot \sigma_z$  公斤/厘米； $q$ =石英含量%； $d$ =石英粒度，厘米； $\sigma_z$ =岩石抗拉强度 公斤/厘米<sup>2</sup>；  
曲线是根据Schimazek[6]的测定

方法、化学方法以及物理方法在硬岩的回采工程和掘进工程中的应用至今尚未超出试验阶段。

### 3.2 刀具的磨损

刀具的磨损(通过每单位时间内材料的磨蚀来表征)按照新的研究是与矿岩强度、石英含量以及石英粒度的乘积成正比<sup>⑥</sup>。临界截割速度则随着磨损系数的增加而按幂级减少(图3)

## 4. 矿岩的物理、技术以及经济 数据之间的数理-统计关系

通过对有关用各种刀具机械化地碎落矿岩的采掘机械的无数零星情报资料的评定, 找出矿岩的物理、技术以及经济的数据间的通用共同关系。用回归计算和相关计算证明, 变数的不同关系可以通用形式的幂函数

$$y = k^{\pm} \pm f \cdot x^n \quad (1)$$

来表示。式中, 因数 $f$ 为用对数坐标表示的, 围绕回归直线的零星情报的平均方差范围。

通过许多技术上的以及矿岩物理影响的数据部分地求得方差范围, 这类方差范围总计为十位数幂和高次幂。在探讨这些关系时可以确定在回采机和掘进机之间没有重大区别, 由此根据机械化破碎矿岩的观点提出了共同探索的依据。

### 4.1 刀具的消耗量与矿岩抗压强度的关系

对于工作面回采和平巷掘进中机械化采掘方法的经济性来说, 单位刀具消耗量和单位刀具费用均具有决定性意义。如果分析一下本文所列的一些数值, 可以归纳并确定, 刀具消耗量和刀具费用是随着矿岩抗压强度的增大而增加。对于截割刀具, 则:

$$\text{刀具消耗量 } MV_s = 1.181 \times 10^{-4} \pm 0.399 \cdot \sigma_D^{0.983} \quad (\text{刀具把数/立方米}) \quad (2)$$

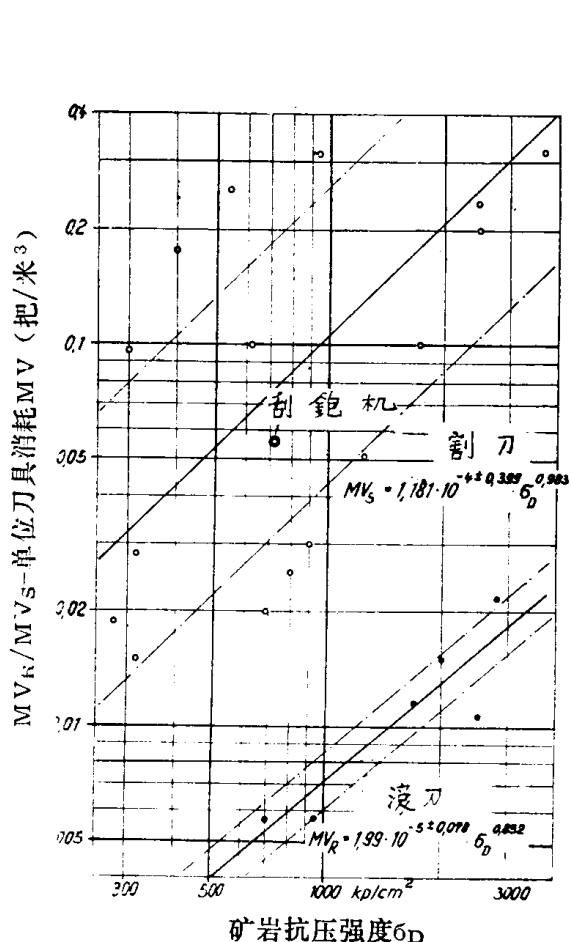


图4 单位刀具消耗量与矿岩抗压强度的关系

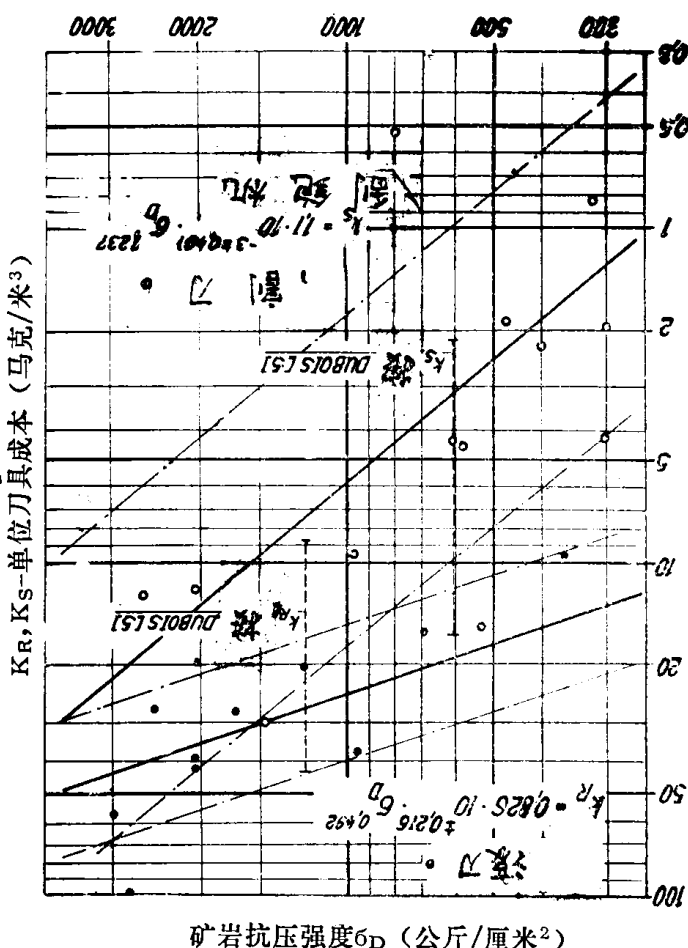


图5 作为矿岩抗压强度函数的单位刀具费用

图4示出每立方米碎落岩石的截割刀具消耗量与抗压强度的关系。由于石英组份和截割条件各不相同,所得各个结果是围绕所标示的回归直线显著地分散。

为了比较主要在平巷掘进机上所取得的数据,特地列出了在桑格郝依斯铜矿中采用刮刨机开采法时的刀具消耗量。

滚刀的消耗量,在相同的岩石条件下由于刀具与矿岩之间相对速度比较小的缘故,因而要小10—20倍。回归方程为:

$$\text{刀量消耗量 } MV_R = 1.99 \times 10^{-5} \pm 0.078 \cdot \sigma_D^{0.852} \quad (\text{滚刀把数/立方米}) \quad (3)$$

此外,石英粒度以及截割条件对刀具磨损的影响减小了,为此虽然共同尺寸较小,在图4表示围绕回归直线的较小方差。

## 4.2 刀具费用与矿岩抗压强度的关系

截割式和开槽刀具的单位刀具费用(马克/立方米)的对比是容易了解的,对于截割刀具来说,从图5中可以看到,单位刀具费用随着矿岩抗压强度增大而可能增加:

$$\text{刀具费用 } k_s = 1.1 \cdot 10^{-3} \pm 0.497 \cdot \sigma_D^{1.237} \quad (\text{马克/立方米}) \quad (4)$$

滚刀的单位费用在许多较小的范围内是随着矿岩抗压强度的增加而增加,但是在整个使用范围内平均超过了截割刀具的单位费用。费用函数:

$$\text{刀具费用 } k_R = 0.826 \cdot 10^0 \pm 0.216 \cdot \sigma_D^{0.492} \quad (\text{马克/立方米}) \quad (5)$$

尽管如此,当矿岩抗压强度超过1200/平方厘米时,使用滚刀还是经济的,因为刀具脱落量基本上较小,而更换刀具时采掘机械的停车时间较短。由巴伦德申<sup>④</sup>提出的全断面巷道掘进方法时的非琢磨矿岩的可加工性能极限为4700公斤/平方厘米的抗压强度。对于琢磨矿岩来说,则极限为4000公斤/平方厘米。

## 4.3 能量消耗

碎落一个单位体积的矿岩的单位能量消耗基本上确定回采机的效能、尺寸以及费用等。原则上可以确定,单位能量消耗

(以吨时/立方米计)是随着截割断面 $A_S$ 的增大而下降,如同奎肖对含铜板岩的测量结果<sup>⑤</sup>一样。共同使用关系式:

$$\omega = \text{常数} \cdot A_S^n \quad (\text{以吨时/立方米计}) \quad (6)$$

式中,指数 $n$ 基本上受截割几何学的影响(图6)。

莫斯科“斯科钦斯基”矿业研究所的科研工作人员拉隆和格拉特曼已经证明20平方厘米以下的截割断面的单位能量消耗降低的可能性。一般说来,当矿岩抗压强度增加时,则证明单位能量消耗也增加。值得注意的是有这样一种看法:单位能量消耗并不是与矿岩抗压强度成比例地增长,而是按照指数小于1的幂函数递增(图7)。按实验室测量时

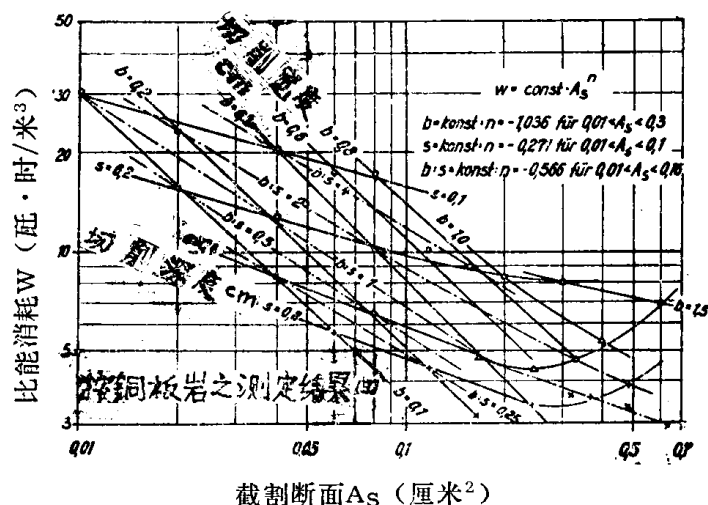


图6 截割含铜板岩时的单位能量消耗与截割断面及截割几何学的关系