

THE OPERATIONAL MECHANICS OF THE ROCK
BIT

牙轮钻头工作力学

马德坤 著



石油工业出版社

• PETROLEUM INDUSTRY PRESS

| | |
|-----|--------|
| 登录号 | 087450 |
| 分类号 | TE921 |
| 种次号 | 004 |

牙轮钻头工作力学

马德坤 著



200480737

石油工业出版社

(京) 新登字 082 号

内 容 提 要

本书是作者及其同志们以多年的研究成果为基础写成的一部专著。本书以回顾与展望牙轮钻头的发展情况入手, 主要介绍了牙轮钻头几何学、牙轮钻头运动学、牙轮钻头轴承系统、牙轮钻头实验研究和新设计方法等。可作为设计、研究、使用牙轮钻头的科技人员的参考书和有关专业研究生教学用书。

牙轮钻头工作力学

马德坤 著

*

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 32 开本 $8\frac{1}{8}$ 印张 2 插页 179 千字 印 1—1500

1994 年 2 月北京第 1 版 1994 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-0952-8 / TE · 890

定价: 7.60 元

序

牙轮钻头是石油钻井的重要工具，其性能和质量对钻井速度和成本影响很大。50年代中期石油工业着手在上海组织牙轮钻头生产，从材料、制造工艺、建立钻头试验架三个方面做了大量工作。由于种种条件的制约，在钻头试验架也就是岩石破碎力学方面的进展有限。80年代初，从国外引进牙轮钻头生产技术时，供方也不提供设计技术。因此，在井底条件下的岩石破碎力学研究就成为我们建立钻头设计技术，能够独立自主发展新型号的牙轮钻头的关键。

西南石油学院马德坤教授自80年代初期以来即集中主要精力从事牙轮钻头运动学、破岩机理等方面的研究工作。经过十年的努力，建立了比较完善的钻头试验架，实现了定量描述牙轮钻头在工作条件下对岩石的破碎量，从而可以做到优化牙轮钻头的齿型及布齿，寻求最佳的钻头性能。在这项研究过程中形成了一套实验方法、设计准则、设计方法和电算软件。这项研究成果经过初步的现场实践已经取得了良好的钻井效果。把这项研究成果进一步投入实践并加以完善，将使我们具备针对地层的岩石特性设计最适合的牙轮钻头的的能力，这肯定将进一步提高钻井效率。

《牙轮钻头工作力学》这本书就是马德坤教授的研究成果，无疑其中包括了马教授的同事们及各协作单位的努力。由于领导机关没有给西南石油学院提供充足的资金，致使建立的牙轮钻头实验台架是在地面条件下工作，不具备在井下

温度和压力条件下做实验的能力。这也就是说实验条件和牙轮钻头在井底的实际工况并不完全相同，这也就是要推动此项研究工作进一步发展要解决的一个问题。

本书是中国石油工业界第一本在牙轮钻头工作力学方面的专著，是专项研究的成果。我祝贺这本书的出版，并期望其修订再版。

李天相

94/6/22

前 言

牙轮钻头是石油钻井的主要工具。它的寿命长短、性能是否适合所钻地层，对于钻井工程的质量、速度和成本都有重要影响。因此它一直是钻井业和石油机械业密切注意的对象。国内外许多单位对牙轮钻头的设计、制造和使用都做过大量的研究开发工作，使牙轮钻头问世以来不断地得到革新和发展。可是长期以来人们对牙轮钻头工作机理研究得不充分，留下相当大的科学研究空白区，因而钻头设计和使用技术不得不处于主要依赖经验的状况。这种状况限制了牙轮钻头技术发展的速度。

对于起步较国外先进厂晚半个世纪，又走了 20 多年以仿造为主的路，缺少自行设计钻头经验的我国钻头制造业来说，要从加速积累自己的经验这条路上去追赶国外同行是难以做到的。作者深感要使我国牙轮钻头以较快速度赶超世界先进水平，必须摆脱对经验的过分依赖，深入系统地研究其工作机理，提出过一些设想^[1, 2]。要研究牙轮钻头的几何学、运动学、动力学和岩石破碎力学，总起来称之为“钻头工作力学”。

十多年来，在中国石油天然气总公司（原石油工业部）和所属各司局领导的关怀和支持下，作者所在的西南石油学院机械系钻头研究室全体同志团结奋斗，并同国内外许多单位合作配合，攻克了一个又一个的技术难关，完成了 14 项部级重点科研项目，2 项与国外合作项目，还有不少院、局

级项目和根本没有正式立项的“项目”。这些成果综合起来，终于建立了一套比较完整的中国式牙轮钻头技术体系。说它比较完整，是因为包括了牙轮钻头的基本理论、破岩机理、设计原理、设计方法、专门的实验技术和实验设备，以及供设计、计算、绘图和实验用的近百个电子计算机程序，而且这些内容都是成龙配套的，形成了一套完整的系统技术。说它是中国式的，因为它的思路、策略和方法都不同于国外各家工厂和研究单位现行的体系。我们的这套独特的技术体系已经通过了专家鉴定，正式确认为具有世界先进水平，并在初步的应用中取得了良好的效果。

本书就是叙述上述成果的主体部分。为了使读者看到牙轮钻头工作力学现有水平的全貌，我们在书中也简要介绍了一些国外研究人员的有关的成果。本书的主要对象是从事钻头的设计、研究、制造和使用工作的工程技术人员和有关专业的师生。

由于作者的科技和文字水平都十分有限，书中疏漏和错误之处肯定不少，恳请读者指正。

作者还要衷心感谢十多年来与我们密切合作的四川石油管理局、成都石油总机厂、江汉钻头厂、北京石油勘探开发研究院钻井所、四川大学、重庆大学、胜利石油管理局钻井研究院、中国石油天然气总公司科技情报研究所和美国 Tulsa 大学钻井研究室等单位，以及西南石油学院机制教研室、力学教研室、钻井研究室等兄弟教研室的同志们。他们对本书作了许多直接、间接的贡献。

目 录

| | |
|-----------------------------------|-------|
| 第一章 绪论 ····· | (1) |
| 第一节 牙轮钻头发展简史与展望····· | (1) |
| 第二节 牙轮钻头科研和设计水平的发展····· | (8) |
| 第二章 牙轮钻头几何学 ····· | (14) |
| 第一节 传统的牙轮钻头几何学····· | (15) |
| 第二节 现代牙轮钻头几何学基本方程····· | (31) |
| 第三节 啮合间隙的精确计算····· | (42) |
| 第四节 井壁下端的过渡区····· | (52) |
| 第五节 牙爪下部几何学····· | (56) |
| 第三章 牙轮钻头运动学 ····· | (73) |
| 第一节 传统的牙轮钻头运动学····· | (73) |
| 第二节 牙轮钻头牙齿速度基本方程····· | (80) |
| 第三节 牙轮的转动····· | (89) |
| 第四节 触底齿数····· | (102) |
| 第五节 牙齿在井底的运动轨迹和钻头的 横向刮削作用····· | (108) |
| 第六节 牙齿的加速度····· | (126) |
| 第四章 牙轮钻头的轴承系统 ····· | (133) |
| 第一节 轴承摩擦副系统····· | (134) |
| 第二节 轴承的磨损分析····· | (142) |
| 第三节 密封圈····· | (158) |
| 第四节 压力平衡及储油补偿系统····· | (166) |

| | |
|-----------------------------------|-------|
| 第五章 牙轮钻头与岩石相互作用的实验研究 ····· | (184) |
| 第一节 单齿垂直压入试验····· | (185) |
| 第二节 整体钻头钻进实验····· | (198) |
| 第三节 牙轮钻头牙齿造坑过程的 模拟实验····· | (206) |
| 第四节 井底模式探测与分析的新技术····· | (222) |
| 第五节 牙轮钻头的侧切与井斜····· | (231) |
| 第六章 牙轮钻头新设计方法体系 ····· | (243) |
| 第一节 新设计方法基本内容····· | (243) |
| 第二节 新设计方法的特色····· | (247) |
| 参考文献 ····· | (250) |

第一章 绪 论

第一节 牙轮钻头发展简史与展望

1909年8月，美国人 Howard R. Hughes 取得第一个牙轮钻头的专利。当时，旋转钻井都用刮刀钻头，只能钻软地层，对于刮不动的硬地层则只能用顿钻。所以，当时有一种旋顿两用钻机，遇软地层就刮，遇硬地层就顿，当然很不方便，生产效率低。发明牙轮钻头的最初思路是想把钻柱的旋转运动转变为牙齿对井底的冲击压碎作用，使旋转钻也能实现以类似顿钻的方式来破碎刮刀刮不动的硬地层。最初的牙轮钻头是把两个单锥形铰刀状的牙轮装在两个与钻杆接头相连的滑动轴颈上，如图 1-1 所示。这种钻头在钻软地层时非常容易被泥包。遇到软硬交替的地层，就需要频繁起下钻来更换刮刀和牙轮钻头。加上其本身寿命低，使用者寥寥无几。

1925年出现了牙齿互相交错啮合着的两牙轮钻头，见图 1-2。这种结构使两个牙轮互相“剔牙”，把牙缝里的泥块、岩屑清除掉而防止泥包，称为“自洁式”或“自洗式”钻头。由于不易泥包，具有了一定的穿透软硬夹层的能力，就可以钻较长井段不必换钻头。于是钻头寿命，首先是牙轮与轴颈间滑动摩擦副的寿命很低，成了制约牙轮钻头广泛使用的主要问题。

1932年和1933年装有滚动轴承的两牙轮和三牙轮钻头相继问世。滚动轴承得以应用的关键，是发明了轴颈内开



图 1-1 最早的牙轮钻头

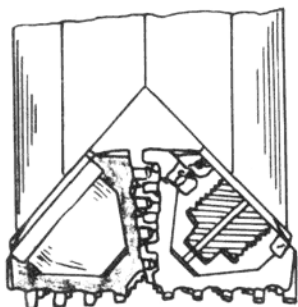


图 1-2 早期的自洁式两牙轮钻头

洞投入滚珠的巧妙办法，实现牙轮的轴向定位。滚动轴承的寿命比滑动轴承长多了。三牙轮钻头与两牙轮相比有很多优点：(1) 在不减少井底覆盖率的前提下，每个牙轮上各齿圈之间的距离增大了，有利于冲洗牙轮，防止泥包；(2) 更充分地利用了宝贵的空间，提高了钻头总的承载能力；(3) 三牙轮钻头有三圈外排齿切削井壁，提高了保径能力；(4) 三牙轮比两牙轮的稳定性好，钻出的井身质量好。

寿命相对延长以后，人们把注意力转向钻井速度。牙轮钻头在中软地层虽然避免了泥包，但机械钻速仍比刮刀钻头慢得多。人们想使冲击压碎作用和刮削作用结合起来增加牙轮钻头的机械钻速。这个新思路导致 30 年代后期两项重大进步——复锥牙轮和移轴式钻头。复锥是用两个不同锥顶角的圆锥面作为牙轮的外廓形状取代原来的单锥。移轴是把牙轮轴中心线从原来与钻头体中心线相交的位置向钻头旋转方

向平移几毫米。这两种新结构使牙齿在压入井底的同时有一定的横向运动，增大了每个单坑破碎岩石的体积，从而加快钻进速度。与此同时，表面强化的发展增加了牙齿的耐磨性。从此开始，牙轮钻头进入了大规模的推广时期。

在此后 20 年左右，滚动轴承、表面强化的钢齿、复锥、移轴或不移轴的三牙轮钻头在上述基本格局不变的情况下发展出许多具体的型号和规格，以适应不同的钻井条件。各型号之间的区别在于齿形的长短钝锐，布齿的千变万化，各种几何形状和尺寸的排列组合。在材料和热处理工艺上也有许多改进，尤其是硬质合金敷焊的应用大大增加了耐磨性。随着型号、规格增多和材料、工艺的进步，牙轮钻头在钻头总使用量中所占的份额也不断上升。在此期间，牙轮钻头传入我国，在玉门、陕北等油田开始应用。

牙轮钻头的下一个重大进步是“喷射式钻头”的出现和推广。原来钻井液循环的作用是携带岩屑、稳定井壁和冲洗牙轮。钻头体中间处有三个水眼对着三个牙轮。1984 年，J.P.Nolley 和 J.R.Eckel 先在刮刀钻头上用小直径喷嘴形成高速钻井液流直接喷射井底，使机械钻速显著增加。接着，很快移植到牙轮钻头上试验，效果也很好。不过，大面积推广使用喷射式钻头在美国是在 60 年代初。在这中间十几年里，一方面，一系列实验研究揭示了井底差压形成垫层阻碍牙齿压入地层，而高速液流能减薄垫层加快钻速的机理；另一方面，硬质合金喷嘴、高压钻井泵、水龙头和管线系统等配套设备发展成熟了。这些主、客观条件具备了，喷射钻头也推广了。由于历史的原因，到 70 年代后期我国才开始推广喷射式钻头，称之为“高压喷射钻井”。

牙轮钻头另一项突破性进步是应用硬质合金齿镶入牙轮

的技术，简称镶齿钻头。有趣的是，早在 1951 年就出现第一支硬质合金镶齿钻头，拖延了 20 多年才得到广泛应用。钢齿钻头在硬的和研磨性地层里钻进的指标太低，而硬质合金耐磨性好，自然产生了用硬质合金做整体牙齿取代钢齿表面敷焊一层硬质合金的思路。鉴于当时硬质合金的韧性和强度尚差，为了防止崩裂，把牙齿做成矮小的球状，专门用来钻极硬和研磨性强的岩石。50 年代初，用这种钻头打燧石层，有几次取得钻头寿命 25~40h，单只进尺 15~30m 的高指标，比钢齿钻头高出十余倍。于是，取得了“燧石钻头”的美名。然而，极硬和研磨性强的岩层在石油钻井中终究不常遇到。在常遇的大多数地层中，矮小硬质合金球齿钻头的机械钻速远不及钢齿。后来，硬质合金韧性好转了，牙齿可以做得较长，也可以做成各种齿形；但是轴承的寿命不长，牙齿即使很耐磨也无用武之地。直到 70 年代初发明了有储油补偿系统和密封环把钻井液隔绝的滑动轴承牙轮钻头，轴承寿命在有限转速下大幅度的延长，以致硬质合金镶齿在一般地层中的寿命与滑动轴承的寿命相接近。从此，硬质合金镶齿才得以大面积推广。

到 70 年代中期，具有硬质合金镶齿、储油补偿和密封系统、滑动轴承和高压射流喷嘴这四种特征的“四合一”钻头成了牙轮钻头的主力品种，一直延续至今。

纵观牙轮钻头发展历史，有两点规律性的认识值得注意：

1. 有了新的认识才有突破性的改进。如认识到切削和压碎两种破岩方式，应用更为有效，才创造出移轴牙轮钻头；认识到井底垫层的危害性，才想出用高速喷射流去清除它；认识到接触疲劳破坏是滚动轴承失效原因，而且没有耐接触

疲劳的材料可供应用，才下决心牺牲转速用较长寿命的滑动轴承，以求较好的综合效果。经过 80 多年许许多多研究者的反复工作，凡是用直观经验判断和简单实验能认识到的东西，都已相当充分地利用过了。现在必须依靠现代科学理论和实验方法进行深层次的研究，才能提高对钻头的破岩过程和失效过程的认识。否则，在没有深入理解存在问题的实质时，就想使牙轮钻头有重大改进，结果很可能落空。

2. 牙轮钻头各零部件的性能要互相匹配才能产生效益。钻头整体失效和各零件的失效是串联关系，往往一件坏了引起全钻头失效。某一件改进了而别的件跟不上就发挥不了作用。但是科学工作只能是一步一步地开展，不可能一举完成全面的大革新。所以我们既要坚持一步步地前进，又要耐心地等待各方面配套之后才见到经济效益。对每一项研究工作都用提高钻头整体性能指标和经济效益来衡量其价值是很不合理的。如果硬要这样做，只能延误钻头技术的发展速度。

展望牙轮钻头今后的发展，要从钻井工艺对钻头的要求和可供挖掘的潜力这两方面来看。首先，钻井工艺对牙轮钻头当前最迫切的要求是提高机械钻速，并相应提高钻头单只进尺。现在一般的 $8\frac{1}{2}$ in“四合一”钻头在中等地层的寿命可达 50h 以上，超过 100h 也不罕见。作为一次性使用的工具已基本令人满意。但在中等地层的机械钻速只有 5m/h 左右，深井段更低。全国镶齿牙轮钻头的总平均机械钻速仅 4m/h 略多一点。在钻机使用费日益增高，钻井工艺的复杂性也不断增长的今天，提高机械钻速，特别是深层的钻速，无论从经济或从技术上看都是迫切需要的。

其次，随着方向井、丛式井和水平井的发展，对钻头提出了一些特殊要求。例如，能适用于高转速井下动力钻具用

的高转速钻头，有造斜或保斜特性的钻头，扩眼钻头等等。

最后，是一些特殊地层用常规钻头钻起来指标太低。要求有针对性的专用钻头，如适用于软硬交替地层，砾石层，深部又硬又塑性大的地层，研磨性特强的地层等等。

如果能使钻头的寿命大幅度增长到值得多次下井的程度，当然也会受到钻井界的热切欢迎。但这并不是很迫切的要求。

从改进牙轮钻头潜在的可能性来看，作者认为以下几方面值得注意：

1.机械钻速是每小时钻头转的圈数乘以钻头每转一圈的破岩量再除以井筒面积。影响钻头每转一圈破岩量的诸因素中有一个很重要的因素，就是钻头牙齿工作面对井底的覆盖率。镶齿钻头的牙齿对井底覆盖率远低于钢齿钻头，所以机械钻速也低。要想增大覆盖率，无非有加大和加密硬质合金齿这两条途径。西南石油学院钻头研究室近年来的研究成果表明，这两条途径遇到同一个障碍，就是相邻镶齿的根端距离不可能进一步靠近。靠得太近了就危及牙轮壳体强度。如能从结构、材料、工艺上想办法攻克这个难关，增加牙齿工作面对井底覆盖率，无疑将使镶齿钻头的机械钻速显著增大。

2.钻头与地层的适应性对机械钻速影响很大。现在牙轮钻头的品种和规格有限，当然不可能与千变万化的地层一一对应。总平均机械钻速远低于少数创纪录的机械钻速，其主要原因就在于此。要想提高钻头与地层总体适应程度，就必须增加钻头的品种规格，这首先就要提高针对地层选择和设计钻头的技术。迄今为止，各钻头厂设计钻头时，都没有针对特定的岩石性质，只能大致定出是第几类岩石用的。事实

上各厂为同一类岩石设计出的钻头性能差别相当大。西南石油学院和各兄弟单位近年来努力研究牙轮钻头破岩机理、设计原理和方法，已为针对地层性质和各种特殊钻井要求设计适用的钻头打下了技术基础。增加牙轮钻头品种规格的另一个障碍是，钻头制造作业线凭借许多专用工夹量具来保证产品质量，这种方式不适合小批量多品种的生产。一条年产万只钻头的作业线，如果每年要更换十几个品种就会难以承受。所以，在我们掌握了先进设计技术的同时，还需开发适于制造小批量多品种产品的高效生产作业线，才能总体提高钻头与地层适应性。

3.提高水力能量的利用率，发挥水力与机械联合破岩潜力还相当大。以比水马力 5 马力/in² 计，8¹/₂in 钻头消耗水功率达 208kW，比旋转钻头消耗的机械功率大六七倍。过去，只认识到喷射流对井底和牙轮的清洗作用。几年前原石油工业部钻井司李克向等同志大力支持水力与机械联合破岩的新理论。近来随着室内研究和现场实践的发展，这个理论已日趋成熟。西南石油学院和重庆大学联合研制成的振荡脉冲射流喷嘴已在 8 个油田试用上千只，普遍使机械钻速大幅度增加。可以预期，提高水力能量利用率以提高钻速的潜力还会进一步被挖掘出来。

4.新材料的应用将会导致钻压和转速的适当增加，从而提高机械钻速和寿命。迄今为止，牙轮钻头主要材料是镍铬类合金钢和硬质合金材料。科学和新型工程材料业的发展使我们看到人造金刚石、其他超硬材料、工程陶瓷、钛合金等新型材料诱人的优越性能。作者相信，引入新型材料将会使牙轮钻头的性能指标有突破性发展。

第二节 牙轮钻头科研和设计水平的发展

牙轮钻头的工作负荷很重，传力达数百千牛，传递机械功率达数十千瓦。它的工作环境也很恶劣，上有数千米弹性杆柱的振动，下有强度高研磨性强的岩石，周围是含有砂粒和腐蚀性物质的高压高温钻井液。而狭小的井眼又限制了钻头的体积。这些条件决定了牙轮钻头成为短寿命的一次性使用钻井工具。

所有机械产品的设计都应包括功能设计和机械设计两大部分。进行钻头的功能设计，首先要深入认识钻头破碎岩石的过程。在此基础上才能合理安排钻头结构，充分利用载荷和功率，达到高效破碎给定类型岩石的目标。钻头的机械设计则首先要进行各零件的受力分析，然后作应力、变形和磨损分析，进而设计各零件的结构、材料、尺寸和工艺要求，使其强度和耐磨性足以维持一定的工作寿命，还要使各零件大致同步失效，达到最佳的综合效果。功能设计和机械设计都作好了，才能充分提高牙轮钻头的两个主要性能指标——机械钻速和寿命。

很遗憾，牙轮钻头的功能设计和机械设计至今都还停留在经验设计阶段，做不到精确定量的科学设计。有人称设计钻头的方法为“试凑试验法”，就是用近似计算和试凑作图法，确定钻头的结构和几何参数，靠试制样品进行钻进试验后，才确定钻头的性能。这种设计方法对于一般通用机器都已成为历史，可是还用在牙轮钻头上。

为什么牙轮钻头的设计水平如此落后呢？关键是没有研究清楚钻头的牙齿与被破碎的岩石之间的相互作用机理。钻头破碎岩石形成进尺，是由许许多多牙齿在井底打出一个个凹