

基于 TRIZ 理论的 PDC 切削齿破岩创新方法研究

张增增^{1,*}, 刘建平¹, 李邦翔¹, 扈洪芝², 高小婷¹

1. 山东理工大学, 建筑工程与空间信息学院, 山东 淄博, 255000

2. 济宁技师学院, 山东 济宁, 255000

摘要: 聚晶金刚石复合片 (PDC) 钻头是现代油气钻井的核心破岩工具, 其性能直接决定钻井效率与成本。随着钻井向深部、复杂地层拓展, 传统圆形平面 PDC 切削齿在硬地层、研磨性地层中暴露出耐磨性不足、抗冲击性差、破岩效率低等突出问题, 构成了一系列相互制约的技术矛盾。本研究旨在将 TRIZ (发明问题解决理论) 中的矛盾矩阵、分离原理等方法系统应用于 PDC 切削齿的破岩优化中。通过将具体工程问题抽象并匹配为 TRIZ 的通用工程参数, 利用矛盾矩阵工具化地导出创新原理, 进而指导创新方案的设计。本文详细阐述了从问题识别、矛盾定义、原理求解到方案生成与评估的全过程, 提出了包括异形齿结构创新、混合布齿策略及仿生抗损设计在内的多维度解决方案。研究证实, 基于 TRIZ 的系统化创新方法能有效突破经验试错的局限, 为 PDC 切削齿乃至石油钻具的持续技术进步提供了一套高效、可复用的理论框架与实践路径。

关键词: TRIZ 理论; PDC 切削齿; 破岩效率; 钻井提速; 技术矛盾

Research on innovative method of PDC cutting teeth for rock breaking based on TRIZ theory

Zengzeng Zhang^{1,*}, Bangxiang Li¹, Jianping Liu¹, Hongzhi Hu², Xiaoting Gao¹

1. School of Civil Engineering and Geomatics, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China

2. Jining Technician College, Jining 272100, China

Abstract: Polycrystalline diamond composite (PDC) drill bit is the core rock breaking tool in modern oil and gas drilling, and its performance directly determines drilling efficiency and cost. With the expansion of drilling into deep and complex formations, traditional circular flat PDC cutting teeth have exposed prominent problems such as insufficient wear resistance, poor impact resistance, and low rock breaking efficiency in hard and abrasive formations, forming a series of mutually constraining technical contradictions. The aim of this study is to systematically apply the methods of contradiction matrix and separation principle in TRIZ (Theory of Invention Problem Solving) to the rock breaking optimization of PDC cutting teeth. By abstracting and matching specific engineering problems into universal engineering parameters of TRIZ, and using the contradiction matrix tool to derive innovative principles, we can guide the design of innovative solutions. This article elaborates on the entire process from problem identification, contradiction definition, principle solving to solution generation and evaluation, and proposes multidimensional solutions including innovative irregular tooth structures, hybrid tooth placement strategies, and biomimetic anti damage design. Research has confirmed that the systematic innovation method based on TRIZ can effectively break through the limitations of empirical trial and error, providing an efficient and reusable

theoretical framework and practical path for the continuous technological progress of PDC cutting teeth and even petroleum drilling tools.

Keywords: TRIZ theory; PDC cutting teeth; Rock breaking efficiency; Drilling speed increase; Technical contradiction

随着油气与矿产资源勘探开发不断向深部、复杂地层进军^[1], 钻遇强度高、可钻性差、磨蚀性强等特点的硬岩的几率增大, 钻井作业面临的地质条件日趋恶劣, 在硬岩中钻井时经常出现钻头寿命短、钻进速度低、经济成本高等问题, 这对钻井破岩工具的效能提出了前所未有的挑战。PDC 钻头因其高耐磨性和高效的剪切破岩能力, 已成为软至中硬地层的主流钻井工具, 其核心破岩单元 PDC 切削齿, 通过金刚石层的超高硬度和耐磨性实现岩石的剪切破碎^[2]。然而, 在坚硬、高研磨性或软硬交错地层中, 常规的圆形平面 PDC 切削齿普遍存在“吃入难”(岩石抗压强度高导致切削齿难以有效侵入)、“磨损快且不均”(尤其是后刀面磨损严重, 导致切削刃迅速钝化)以及“易发生冲击损坏”(地层不均引致的动载)等突出问题^[3]。为提升可靠性和寿命而强化齿体(如加厚基底、减小出露), 又会削弱其切入岩石的能力, 导致机械钻速急剧下降。这种“改善 A 则恶化 B”的典型困境, 本质上是 TRIZ 理论所定义的一系列相互关联的技术矛盾, 仅依靠材料改良或参数优化已难以取得根本性突破。

TRIZ 理论由阿奇舒勒创立, 其核心哲学是: 发明问题的本质是存在矛盾, 而解决矛盾是创新之源。该理论通过对海量专利的分析, 提炼出 39 个通用工程参数和 40 个发明原理, 并构建了矛盾矩阵, 将具体问题抽象化、解决方案原理化, 从而提供了一条系统化、可预测的创新路径。相较于依赖灵感和试错的传统方法, TRIZ 为工程技术人员提供了强大的逻辑化创新工具。将 TRIZ 理论特别是其核心的技术矛盾分析法, 引入 PDC 切削齿的设计优化, 旨在将主观、模糊的工程经验, 转化为客观、可操作的创新流程, 从根本上破解 PDC 齿在性能平衡上的长期难题。

因此, 本文首先深入分析当前 PDC 切削齿面临的关键技术瓶颈, 并运用 TRIZ 理论将其转化为标准的技术矛盾表述。随后, 通过查询矛盾矩阵, 匹配并应用相关的发明原理, 生成具有针对性的创新设计概念。最后, 结合现有实验与现场数据, 对创新方案进行评估与展望, 探索提升 PDC 齿在硬岩中综合性能的根本性解决方案。研究路线遵循“问题抽象—矛盾分析—原理应用—方案生成”的 TRIZ 标准解题流程。

1 TRIZ 理论中技术矛盾分析概述

TRIZ 理论中的技术矛盾分析是一种系统化的创新问题解决方法, 用于识别和解决工程系统中因改进某一参数而导致另一参数恶化的矛盾问题^[4,5]。

对于技术矛盾, 如图 1 所示可以使用 TRIZ 矛盾矩阵来查找对应的发明原理。矛盾矩阵是一个由 39 个工程参数和 40 个发明原理组成的表格。根据改善的参数和恶化的参数, 在矛盾矩阵中找到对应的行列交叉点, 即可得到一组发明原理的编号。查阅发明原理解释, 理解每个原理的含义和应用方法^[6]。

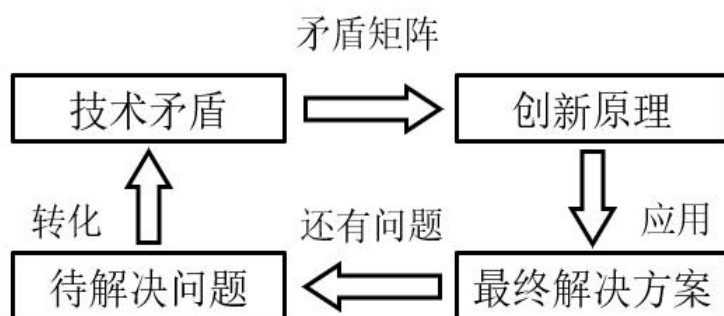


图 1 为技术矛盾的解题模式

Fig 1 presents the solution model for technical contradictions.

2 PDC 切削齿技术现状与矛盾分析

TRIZ 理论强调解决技术矛盾的关键在于准确地识别和描述矛盾。在 PDC 切削齿的设计中，如提高碎岩效率与降低切削齿磨损、提高钻头寿命与降低钻进成本等矛盾。通过 TRIZ 的矛盾分析方法，可以明确问题的本质，可以找出解决这些矛盾的创新方法^[7,8]。

当前，针对 PDC 切削齿的改进研究主要集中在材料、几何形状和布齿方式三个层面。材料方面，致力于提升金刚石层的耐磨性与热稳定性；几何形状方面，出现了锥形齿、非平面齿（如 3D 棘牙）以及仿生非光滑齿面等异形齿；布齿方式上，则发展了交叉刮切、混合布齿（如锥形齿与平面齿混合）及冲击-切削复合等策略。

尽管这些研究取得了显著进展，但背后深层的技术矛盾依然清晰。运用 TRIZ 理论中的矛盾分析法，可将核心问题归纳为以下几对典型技术矛盾：

（1）矛盾一：破岩效率与切削齿强度之间的矛盾。为提高在硬岩中的破岩效率（有益参数：力），需要增大钻压或使切削齿更锋利，但这同时会导致作用在切削齿上的冲击载荷与应力剧增，损害其强度与寿命（恶化参数：强度）。

（2）矛盾二：切削齿寿命与结构复杂性之间的矛盾。为提高寿命，可采用更复杂的抗磨结构（如自旋转齿）或复合功能设计（如预冲击），但这会增加切削齿或钻头系统的复杂性（恶化参数：系统的复杂性）。

（3）矛盾三：侵入能力与耐磨性之间的矛盾。尖锐的齿形（如锥形齿）有利于吃入岩石，提高侵入能力（有益参数：形状），但其尖锐部位往往承受极高应力，耐磨性可能下降（恶化参数：物体的磨损）。

解决这些矛盾，需要超越在矛盾双方之间简单妥协的传统思路。表 1 总结了 PDC 切削齿破岩中的主要技术矛盾分析。

表 1 现有 PDC 切削齿破岩中的主要技术矛盾分析

Tab 1 Analysis of Main Technical Contradictions in Rock-breaking of Existing PDC Cutters			
工程问题描述	欲改善的参数	随之恶化的参数	矛盾本质
为提高破岩速度，需增大切削齿对岩石的入侵能力	14.强度（岩石的抗侵入能力）39.生产率（机械钻速）	11. 应力/压力（齿尖局部应力增大）	攻击性与可靠性的矛盾
为提高耐磨性以延长寿命，需使用更厚更耐磨的金刚石层。	31. 物体产生的有害因素（磨损）	1. 运动物体的重量（齿体质量/惯性增加）10. 力（破岩所需力增大）	寿命与效率的矛盾
为防止在冲击载荷下崩齿，需增加齿体的韧性或缓冲设计。	30. 作用于物体的有害因素（外部冲击）	28. 测量精度（结构复杂化，布齿精度控制更难）	抗冲击性与设计/制造精度的矛盾
为改善排屑和冷却效果，需增大齿前流道空间或水力能量。	29. 制造精度（布齿密度与流道空间冲突）或 23. 物质损失（岩屑清除）	22. 能量损失（水力能量分散）或 33. 可操作性（流道设计复杂）	冷却/清岩与布齿效率的矛盾

3 基于 TRIZ 理论的 PDC 切削齿破岩创新方案求解

3.1 问题定义与资源分析

应用 TRIZ 解决问题，首先需精确界定“最小问题”。本研究的最终目标是：在不过度牺牲可靠性与经济性的前提下，显著提升 PDC 切削齿在硬岩地层中的机械钻速和总进尺。系统可用资源包括：钻压与扭矩（能量）、钻井液（物质与冷却）、岩石本身的裂纹与不均匀性（物质）、切削齿运动中的动能（能量）以及空间（井底未被充分利用的区域）等。创新的关键在于充分利用这些内部和外部资源。

3.2 基于 TRIZ 原理的突破性思考

针对第 2 节提炼的矛盾，查询 TRIZ 矛盾矩阵，可以得到一系列推荐的创新原理。例如，对于“破岩效率-强度”矛盾，推荐的原理包括 No4 不对称原理、No14 曲面化原理、No22 变害为利原理等。将这些通用原理转化为 PDC 切削齿领域的特定解，可引导出具体的研究设计。

3.2.1 基于“空间-时间分离”与“组合原理”的“预损伤-高效切削”复合齿

为提高在硬岩中的破岩效率，需要增大钻压或使切削齿更锋利，但这同时会导致作用在切削齿上的冲击载荷与应力剧增，损害其强度与寿命。通过矛盾矩阵查询，可知改善参数为“39.生产率”、恶化参数为“11.应力/压力”，提出以下创新方案。

该方案旨在解决“破岩效率-强度”矛盾。传统 PDC 齿同时承担压碎岩石和刮切岩石的任务，负荷集中。运用空间分离原理和 No24 中介物原理，设计一种双功能复合齿单元：中心为一个小尺寸的硬质合金或尖锥形 PDC 预损伤齿，外围环状区域为主 PDC 切削齿。其工作原理借鉴了冲击-切削复合的思路，但在单齿尺度上实现：在钻进过程中，中心的预损伤齿首先作用于岩石，产生微裂纹和应力集中，从而“弱化”岩石；随后，外围的主切削齿在已被预处理的岩面上进行刮切，所需力大幅降低，同时主切削齿的受力状态也得到改善。这本质上是将“压碎”和“剪切”两个过程在微观空间和时间序列上进行了分离与重组。

3.2.2 基于“动态性原理”的自适应旋转抗磨齿

为提高寿命，可采用更复杂的抗磨结构（如自旋转齿）或复合功能设计（如预冲击），但这会增加切削齿或钻头系统的复杂性。通过矛盾矩阵查询，可知改善改善参数“31.物体产生的有害因素”

(减少磨损), 恶化参数“36.系统的复杂性”。

该方案针对“寿命-复杂性”及磨损不均的矛盾, 灵感来源于可旋转模块齿专利。运用 No15 动态性原理, 设计切削齿的金刚石层与基体并非刚性固结, 而是在限位机构下具备可控的、微量的周向自适应性。当切削齿工作面因非均质切削力或岩石研磨作用而发生偏磨时, 不均匀的载荷能驱动切削齿发生微小的旋转或姿态调整, 使磨损面得以变换。这类似于为刀具增加了“自锐”或“均磨”特性。结合 No22 变害为利原理, 将原本导致局部剧烈磨损的不均匀力, 转化为驱动齿面旋转、实现均匀磨损的动力, 从而显著延长有效切削寿命。

3.2.3 基于“仿生学”与“曲面化原理”的异形非光滑齿面设计

为提高吃入岩石的能力, 采用尖锐的齿形(如锥形齿), 尖锐的齿形有利于吃入岩石, 提高侵入能力(有益参数: 形状), 但其尖锐部位往往承受极高应力, 耐磨性可能下降(恶化参数: 物体的磨损)。通过矛盾矩阵查询, 可知改善参数“12. 形状”, 恶化参数“23.物质的无效损耗”。

该方案聚焦于优化侵入过程和应力分布, 解决“侵入能力-耐磨性”矛盾。借鉴仿生 PDC 齿的研究, 并应用 No4 不对称原理和 No14 曲面化原理, 对传统 PDC 齿的平面或简单曲面工作端面进行革新。设计具有特定方向性、非对称的微凸起、凹槽或波纹结构的齿面。例如, 设计前倾侧光滑、后侧带微棘齿的齿面, 前进时阻力小利于侵入, 后退或承受反向力时则能增强对岩屑的犁削和排出作用。这种非光滑、异形曲面结构能改变岩石裂纹的萌生与扩展路径, 诱导更多的拉伸破坏(如同锥形齿的作用), 同时优化齿体内部的应力场分布, 减少应力集中, 在提高破岩效率的同时增强抗冲击断裂能力。

4 方案评估与可行性探讨

上述基于 TRIZ 导出的方案, 并非空中楼阁, 其中许多方向已得到行业探索或实验的初步验证, 彰显了 TRIZ 方法的预见性和实用性。

矛盾分析导出的“局部质量”(异形齿)和“维数变化”(混合布齿)原理, 已是当前国内外钻头技术竞争的前沿。斯伦贝谢的 Axe 斧形齿、贝克休斯的 Optimus 尖圆齿, 以及国内“胜利天工”系列异形齿, 均通过改变齿形优化了应力分布和破岩模式^[9], 在硬地层中取得了比常规齿高得多的进尺和钻速。国内一些研究进一步量化了锥形齿与常规齿混合布齿的优势: 通过优化齿间距和齿高差, 混合布齿钻头在砾岩地层的机械钻速和进尺比常规 PDC 钻头提高了 52.38%和 86.87%^[10], 这为“预补偿”和“三维布齿”原理提供了强有力的实验支撑。

虽然全功能“自适应齿”尚处概念阶段, 但“动态化”思想已在钻头整体设计层面体现, 如“切深自调节 PDC 钻头”。高频冲击辅助则与“重载冲击破岩”的机理研究方向一致, 将宏观的钻井工具冲击转变为微观的齿上冲击, 技术融合潜力巨大。

“梯度功能复合材料”是超硬材料领域的研究热点, “多孔阻尼层”概念类似于其他工程领域(如中提到的本质安全复合材料)的吸能设计, 其应用于 PDC 齿焊接界面, 需要解决高温钎焊下的界面结合强度与阻尼性能平衡问题, 是值得深入的材料学与力学交叉课题。

5 结论

本文运用 TRIZ 理论系统分析了 PDC 切削齿在硬岩破碎中面临的核心技术矛盾, 展示了一条从“问题识别”到“方案生成”的结构化创新路径。PDC 切削齿性能瓶颈可被清晰地抽象为几对核心的技术矛盾, 如效率与可靠性、寿命与阻力、抗冲击与复杂性之间的矛盾。通过构建“预损伤-高

效切削”复合结构,在单齿尺度上实现破岩功能的时空分离,降低主切削齿载荷。设计具有自适应微动能力的切削齿,将有害的不均匀磨损转化为实现均匀磨损的驱动力,提升寿命。借鉴仿生学,设计非对称、非光滑的异形齿面,主动引导岩石以更高效的方式(拉伸-剪切复合)破碎,并改善自身受力。

这些方案均源于 TRIZ 的通用解向特定领域解的转换,其共同特点是从改变破岩机理和载荷管理入手,而非单纯追求材料极限。未来的研究应集中于:(1)利用有限元分析和离散元法对上述创新构型进行破岩过程模拟与参数优化;(2)发展相应的增材制造或特种加工工艺,实现复杂结构 PDC 切削齿的精密成形;(3)通过室内台架试验和现场试验,验证新设计的效果,并形成系统的设计准则。将 TRIZ 理论与现代设计仿真、先进制造技术深度结合,是推动 PDC 钻头技术实现跨越式发展的关键。

参考文献

- [1] 祝效华,阳飞龙,刘伟吉.液柱压力下 PDC 齿切削破岩机理[J].石油学报,2025,46(10):1943-1959.
- [2] 刘维,高德利.PDC 钻头研究现状与发展趋势[J].前瞻科技,2023,2(02):168-178.
- [3] 吴泽,席凯凯,赵海超,等.仿生 PDC 齿旋转破岩时的温度场和破岩特性模拟研究[J].石油钻探技术,2022,(2):71-77.
- [4] 刘训涛,曹贺,陈国晶.TRIZ 理论及应用[M].北京:北京大学出版社,2011.
- [5] 马立修,付宏勋,隋琦,等.创新方法基础[M].北京:高等教育出版社,2021.
- [6] 杨霞,孙宁,张晴晴,等.基于 TRIZ 矛盾分析理论的 PAMSZ 创新方法及其应用研究[J].科技创业月刊,2020,33(06):147-153.
- [7] 张同瓚,何祎文,卢绍田,等.基于 TRIZ 理论的多头式螺丝刀设计[J].安徽科技,2023,(08):32-36.
- [8] 咸红旭,乔冠,王利利,等.基于 TRIZ 理论的高压输电线除冰机器人设计与分析[J].机械设计,2025,42(10):93-99.
- [9] 邹德永,潘龙,崔煜东,等.斧形 PDC 切削齿破岩机理及试验研究[J].石油机械,2022,50(01):34-40.
- [10] 王鸿远.锥形与常规 PDC 齿混合布齿破岩机理研究及钻头研制[J].石化技术,2024,31(08):389-391.

基金项目: 山东理工大学创新创业教育改革项目:创新方式(TRIZ)在仿生 PDC 切削齿碎岩中的应用。

^{1,*} **作者简介:** 张增增(1989-),男,博士,讲师,研究方向:本科创新课程改革。E-mail: zhangzengzeng@sdut.edu.cn。