

文章编号: 1004-4051(2025)10-0194-18

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20241788

机械刀具破岩运动复合模式及组合方法

刘春生^{1,2}, 程 硕², 刘若涵^{2,3}, 刘延婷¹, 王 磊², 党振乾²

(1. 黑龙江科技大学机械工程学院, 黑龙江哈尔滨 150022;

2. 黑龙江科技大学安全工程学院, 黑龙江哈尔滨 150022;

3. 黑龙江科技大学电气与控制工程学院, 黑龙江哈尔滨 150022)

摘要: 机械破岩新方法、新机构及破岩过程机理研究, 是复杂煤岩层和硬岩巷道中高效采掘装备亟待解决的关键技术, 刀具结构、组合形式、运动复合模式和破岩方法组合(复合)等是影响采掘装备工作性能的主要因素。提出了刀具运动维度概念, 建立了运动间关联度描述方法及定量算法, 分析了不同结构刀具各维度运动的叠加性与破岩作用有效性; 通过不同结构刀具运动速度与轨迹研究了不同运动模式下刀具作用形式、破岩能量和破岩效力等特征; 阐述了不同结构刀具布置组合方法, 给出了刀具组合形式与运动复合模式的适配关系; 综合刀具结构、组合形式、运动复合模式和破岩方法组合等, 形成与不同岩性相匹配的破岩机构与装备, 并构建了破岩能力与效果的基本评价框架。研究分析表明: 刀具布置组合、运动复合和破岩方法组合与刀具工作特征及破岩技术原理相匹配。破岩作用叠加性、有效性与运动复合模式可工程化是确定刀具运动维度与复合的重要依据; 刀具组合形式及排列规律、组合密度, 以及适配运动复合模式的布置姿态等, 是创新设计高效率低比能耗破岩机构的理论基础; 破岩方法组合应以动作相互协同、破岩能力叠加及装备易工程化等为研制目标。该研究为破岩方法创新设计与研制具有高效率、高可靠和高寿命等破岩性能的破岩工作机构提供了参考依据。

关键词: 机械破岩方法; 机械刀具; 运动复合模式; 刀具组合形式; 运动维度; 破岩作用形式

中图分类号: TD42 文献标识码: A

Composite mode and combination method of rock breaking motion of mechanical tool

LIU Chunsheng^{1,2}, CHENG Shuo², LIU Ruohan^{2,3}, LIU Yanting¹,
WANG Lei², DANG Zhenqian²

(1. School of Mechanical Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China;

2. School of Safety Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China;

3. School of Electrical and Control Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology,
Harbin 150022, China)

收稿日期: 2024-09-08 责任编辑: 刘硕

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(编号: 51974111); 国家自然科学基金青年基金项目资助(编号: 52104130)

第一作者简介: 刘春生(1961—), 男, 汉族, 山东牟平人, 博士生导师, 主要从事煤岩截割破碎理论与技术方法等方面的研究工作, E-mail: liu_chunsheng@163.com。

通讯作者简介: 程硕(1996—), 男, 汉族, 山东邹城人, 博士研究生, 主要从事采掘机械截割破岩基础理论与破碎方法方面的研究, E-mail: chengshuo96@163.com。

引用格式: 刘春生, 程硕, 刘若涵, 等. 机械刀具破岩运动复合模式及组合方法[J]. 中国矿业, 2025, 34(10): 194-211.

LIU Chunsheng, CHENG Shuo, LIU Ruohan, et al. Composite mode and combination method of rock breaking motion of mechanical tool[J]. China Mining Magazine, 2025, 34(10): 194-211.

Abstract: The research on new methods, new mechanisms and rock breaking process mechanism of mechanical rock breaking is the key technology to be solved urgently for efficient mining equipment in complex coal rock strata and hard rock roadways. Tool structure, combination form, motion composite mode and rock breaking method combination (composite) are the main factors affecting the working performance of mining equipment. The concept of tool motion dimension is proposed, and the description method and quantitative algorithm of motion correlation degree are established. The superposition and rock breaking effectiveness of tool motion in different dimensions are analyzed. The characteristics of tool action form, rock breaking energy and rock breaking effectiveness under different motion modes are studied by the velocity and trajectory of different structural tools. The combination method of tool arrangement with different structures is expounded, and the matching relationship between tool combination form and motion compound mode is given. Combining the tool structure, combination form, motion composite mode and rock breaking method combination, the rock breaking mechanism and equipment matching with different lithology are formed, and the basic evaluation framework of rock breaking ability and effect is constructed. The research and analysis show that the tool arrangement combination, motion combination and rock breaking method combination match the working characteristics of the tool and the principle of rock breaking technology. The superposition, effectiveness and motion composite mode of rock breaking are the important basis for determining the dimension and composite of tool motion. The combination form and arrangement law of cutting tools, the combination density and the arrangement attitude of the adaptive motion composite mode are the theoretical basis for the innovative design of high efficiency and low specific energy consumption rock breaking mechanism. The combination of rock breaking methods should aim at the coordination of actions, the superposition of rock breaking ability and the easy engineering of equipment. This study provides a reference for the innovative design and development of rock breaking working mechanism with high efficiency, high reliability and high life.

Keywords: mechanical rock breaking method; mechanical tool; motion composite mode; tool combination form; movement dimension; form of rock breaking action

0 引言

煤炭是我国重要的能源与工业原料,随着浅部煤炭资源逐渐枯竭,越来越多矿井进入深部开采阶段,深部煤层的地质条件(夹矸、断层、顶底板等)及地应力场相比浅部煤层更加复杂,矿山采掘装备破碎硬岩效率低、刀具损耗大、比能耗大等问题愈加突出^[1]。机械破岩(煤)方法作为采掘装备中最常用的方法,机械破岩方法创新对于煤炭资源的安全、高效开采至关重要。机械破岩方法创新,是基于岩石强度、脆性、磨蚀性、岩层赋存等条件的基础研究和工程技术工程化,其目标是提升破岩能力,提高刀具寿命,并行实现技术的工程化性和工艺性;应从理论、技术基础研究出发,到共性关键技术的突破,在已有的截割破岩机理和力学模型的基础上,结合刀具的结构、工作特征,研究刀具及其组合机构破岩的力学关系。创新本质为在可用、能用、好用前提下技术的探究,避免不合理构造、不必要试错、移植式仿制等为了创新而创新的重复性工作。

刀具破岩过程,即刀具与岩石相互作用和接触时,由于岩体表面本身固有缺陷,导致其表面发生接

触损伤,从而形成密实核、挤压楔裂等作用破坏岩石,依据岩石强度准则可将破岩机制分为拉破坏、剪破坏、压破坏、拉剪耦合破坏和压剪耦合破坏等。破岩机制由刀具结构与运动模式决定,相同刀具不同运动模式,或不同刀具采用同一运动模式,形成的破岩机制不同,岩石破碎效果也会有很大的差异。截齿在旋转运动下,岩石以拉伸破坏为主并伴随着挤压和剪切破坏^[2],在冲击运动下,对岩石造成拉剪耦合破坏^[3];滚刀在直线运动下,岩石为压拉耦合破坏^[4],冲击运动下,岩石为压破坏和拉破坏^[5];锥型齿旋转冲击下岩石为拉破坏,扭转冲击运动下岩石受压剪耦合破坏^[6]。基于刀具不同运动下破岩机制不同,刀具运动复合,形成多维度运动,对岩石施加多种形式破岩作用,从而提高破岩能力,如旋转运动与直线运动复合、振动运动与直线运动复合等^[7-8]。机械破岩方法的创新与性能优化,应充分利用岩石强度小的弱势面(拉剪破裂面),形成优势破岩,以寻求刀具结构、组合形式、运动模式及其参数匹配等途径,提升破岩能力、破岩效果和生产效率。

机械破岩方法按刀具结构特征,可分为圆盘刀

类破岩、截齿类破岩及其他机械破岩(钻孔、锯槽分割等),圆盘刀类主要包含具有双楔面的盾构机滚刀、单楔面的碟盘刀、无楔面的圆盘刀,截齿类则包含刀型齿、镐型齿。不同结构刀具存在与其工作特征相对应的破岩形式,常见的有截齿旋转截割破岩、滚刀碾压破岩、齿刃圆盘刀铣削破岩和碟盘刀拉-剪破岩等。破岩机构由单个刀具或多个刀具组合构成,故机械破岩方法创新可从刀具结构、刀具组合形式角度出发。刀具结构的研究多集中于刀具齿刃部分,如对滚刀镶嵌不同齿形齿刃^[9]、依据仿生理论设计PDC齿形等^[10];刀具组合形式研究类型较多,同类刀具组合、异类刀具组合、刀具一次组合、刀具二次组合,以滚刀为例,除传统圆形盾构机外,还存在刀具垂直布置于刀盘圆周面的摆臂矩形断面掘进机、“W”型刀盘盾构机等刀具一次组合形式,马蹄形盾构机、矩形盾构机等刀具二次组合形式^[11-13]。

破岩方法的有机组合(复合),也为提升机械刀具破岩能力的有效措施,分为机械破岩与机械破岩组合、机械破岩与非机械破岩组合两种形式。非机械破岩方法主要包括流体动力破岩、化学效应破岩和热效应破岩,多数方法是对岩石进行预先处理,改变岩体性质或结构,降低岩石强度直接破岩或再利用机械方法进行破岩,大多是通过特殊处理手段降低破岩所需能量,提高破岩效率^[14]。现有研究多聚焦于机械破岩与非机械破岩组合,如超声波振动辅助PDC钻头、激光辅助钻头、水射流辅助截齿或滚刀,通过非机械破岩方法改变岩体物理性质或受力状态,减小刀具破岩载荷,提高破岩性能^[15-18]。

刀具机构及组合形式、运动模式与破岩方法等决定了刀具作用岩石形式,从而影响刀具破岩能力与破岩效果。基于刀具的运动维度、运动速度与轨迹、组合形式及破岩方法组合等角度,分析与总结破岩机构的结构参数与运动参数等关键要素对机构破岩能力和效果的影响,给出不同结构刀具组合、运动复合与破岩方法组合的原则与路径,为研制高性能低能耗的破岩机构提供设计思路与参考依据。

1 刀具破岩运动维度

刀具组合形式与运动复合模式是决定机械方法破岩能力的核心要素。目前机械破岩方法多从刀具布置组合和刀具运动复合两方面进行研究,如图1所示,刀具布置组合包括同类刀具组合、异类刀具组合和重复刀具组合等,形成不同破岩机构;刀具运动复合多以直线运动和旋转运动为基础,附加振动、冲击等运动,形成复合运动模式。不同破岩机构匹配合理复合运动模式才能发挥出最大破岩效能。

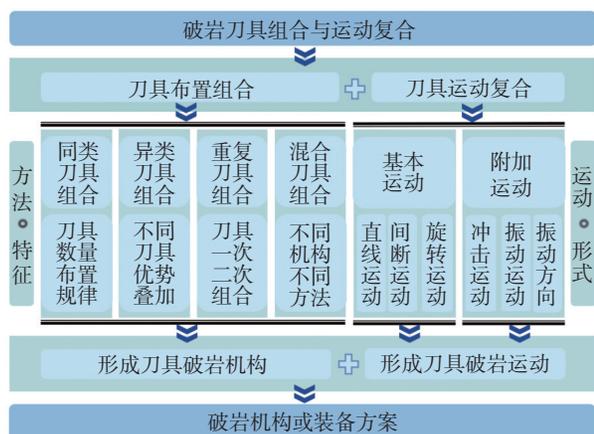


图1 刀具组合与运动复合

Fig. 1 Tool combination and motion composite

刀具复合运动状态可用维度表述,即为复合运动数量,不同维度反映着刀具对岩石不同形式的作用,维度间关联度表征各运动的重叠性与互补性。运动维度亦决定着刀具作用于岩石上的施力形式和方向,体现在工程实际中即不同维度运动有不同的决定性作用,如采煤机牵引运动决定生产能力,滚筒旋转运动决定破岩能力和效果。不同维度运动的关联度越大,各维度运动的作用越同向,显著性越低。刀具运动复合时应充分发挥各维度运动破岩作用有效性,通常运动复合维度越多破岩能力越强,如:具有刨削一维度运动的刨煤机,以及同时具有牵引和旋转二维度运动的滚筒式采煤机、悬臂式掘进机和掘锚机等工作机构,显然后者截割能力强于前者。刀具运动维度与破岩机构复杂性呈正比,但无节制地增加运动维度会影响运动破岩作用有效性和工程化可靠实现。刀具运动维度需要考虑刀具结构形式、各维度运动的叠加性、技术工程化的可行性,如在直线运动的静力刨煤机上叠加一个截齿振动运动,形成二维度复合运动,会带来破岩机构结构复杂、工程化难、可靠性低等诸多问题。

机械破岩方法中刀具运动维度与复合确定应遵循运动的叠加性,避免运动间相互重复与抵消,充分发挥各维度运动对岩石有效作用,考虑刀具运动复合模式工程可实现性,避免机构结构过于复杂,使其具有高可靠性、高寿命等原则。以镐型截齿、滚刀、碟盘刀为例,给出刀具运动学分析研究方法的基础要素——运动维度,分析刀具不同维度运动复合的破岩作用特征。

1.1 截齿破岩运动维度

镐型截齿的一维度运动、二维度运动与三维度运动复合模式,如图2所示。图2(a)截齿只具有牵

引一维度运动(类似刨煤机); 图 2(b)截齿同时具有旋转、牵引的二维度运动(类似滚筒式采煤机); 图 2

(c)为在图 2(b)基础上沿截齿轴线附加振动或冲击运动实现三维度运动复合, 滚筒可进行调高运动。

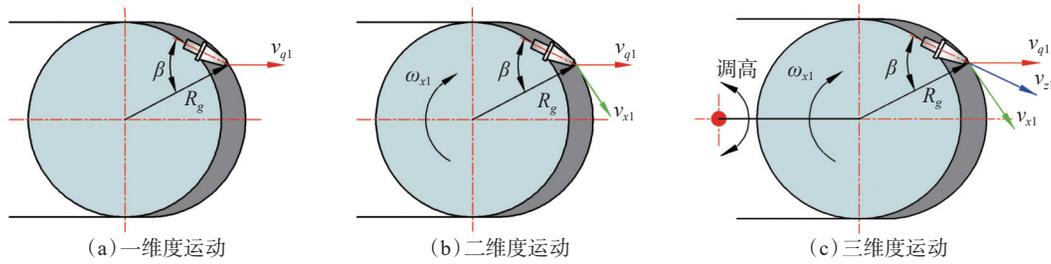


图 2 截齿不同维度运动复合模式
Fig. 2 Pick movement composite mode of different dimensions

不同维度运动速度间具有夹角 $\Delta\phi$, $\cos\Delta\phi$ 可衡量各维度运动关联度, 体现运动叠加的显著性, 关联度系数 K 越大, 各维度运动作用越趋于同向, 反之则各维度运动作用的互补性越显著。由图 2(c)可得各维度运动间的关联度系数 K 及其平均值 \bar{K} 计算见式(1)和式(2), 其曲线如图 3 所示。

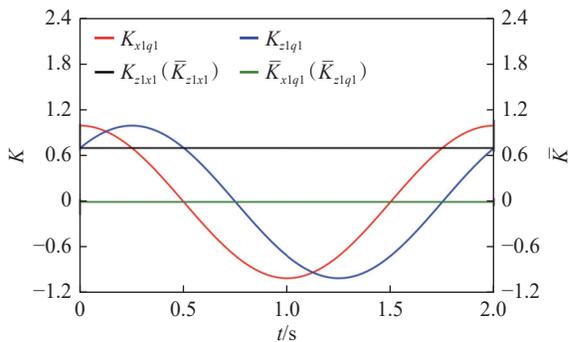


图 3 截齿运动复合 K 和 \bar{K}
Fig. 3 Pick movement composite K and \bar{K}

$$\begin{bmatrix} K_{x1q1} \\ K_{z1q1} \\ K_{z1x1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Delta\phi_{x1q1} \\ \cos\Delta\phi_{z1q1} \\ \cos\Delta\phi_{z1x1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_{x1}t) \\ \sin(\omega_{x1}t + \beta) \\ \sin\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\bar{K} = \int_0^{T_1} \cos\Delta\phi dt / T_1 \quad (2)$$

式中: β 为截齿安装角; ω_{x1} 为截齿旋转角速度; t 为刀具运动时间; T_1 为刀具运动一个周期所需时间; $\Delta\phi_{x1q1}$ 、 $\Delta\phi_{z1q1}$ 、 $\Delta\phi_{z1x1}$ 分别为截齿旋转速度 v_{x1} 与牵引速度 v_{q1} 、沿截齿轴线振动速度 v_{z1} 与牵引速度 v_{q1} 、沿截齿轴线振动速度 v_{z1} 与截齿旋转速度 v_{x1} 间夹角; K_{x1q1} 、 K_{z1q1} 、 K_{z1x1} 分别为截齿旋转运动与牵引运动、沿截齿轴线振动运动与牵引运动、沿截齿轴线振动运动与截齿旋转运动间关联度系数。

由图 3 可知, 截齿旋转一个周期, 截齿旋转、沿轴线振动分别与牵引运动关联度系数均呈正弦曲线规律, 且变化幅度相同, 两曲线相位差由截齿安装角

决定, 其关联度系数 K_{x1q1} 、 K_{z1q1} 在 $[-1,1]$ 间变动, 截齿旋转、沿轴线振动分别与牵引运动间作用互补性相对显著, 截齿旋转、振动与牵引运动间重叠性较低, 截齿多个维度运动均对岩石施加作用, 提高破岩能力、效率。截齿旋转与沿轴线振动运动关联度系数稳定不变, 其关联度亦由截齿安装角决定, 随 β 增大, 两者运动间关联度越高, 作用趋于同向, 后者运动为往复运动, 其振动冲击作用为提升刀具破岩能力关键因素, 当沿截齿轴线振动的频率和振幅较低时, 振动速度明显小于旋转速度, 振动运动近似于截齿破岩时不均匀性产生的波动, 提升刀具破岩能力作用是很有局限的(实践已证明), 对截齿破岩能力提升较小。考虑工程可实现性, 破岩机构实现大幅值振动较为困难, 因此, 附加振动的频率应适当提高, 形成显著的动态破岩作用。

1.2 滚刀破岩运动维度

滚刀不同维度破岩运动复合模式如图 4 所示。图 4(a)为径向进给一维度运动, 形成单一的楔劈作用; 图 4(b)为垂直进给和水平进给复合的二维度运动, 且滚刀均具有自旋转功能, 是盾构机滚刀最基本的运动形式; 图 4(c)所示为在图 4(b)的基础上附加驱动旋转运动的三维度运动。

由图 4(c)可得滚刀各维度运动速度间夹角 $\Delta\phi$, 各运动间关联度系数 K 计算见式(3), 其平均值 \bar{K} 计算见式(2), 其曲线如图 5 所示。

$$\begin{bmatrix} K_{jq2} \\ K_{x2q2} \\ K_{x2j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\Delta\phi_{jq2} \\ \cos\Delta\phi_{x2q2} \\ \cos\Delta\phi_{x2j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sin(\phi_{d0} - \omega_{x2}t) \\ -\cos(\phi_{d0} - \omega_{x2}t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: ϕ_d 为滚刀在初始切入与切入最大厚度时岩石平面接触点处半径间的夹角, $\phi_d=0\sim\phi_{d0}$, $\phi_{d0}=\cos^{-1}(1-h_m R_d^{-1})=\omega_{x2}T_d$; R_d 为滚刀半径; h_m 为滚刀最大切削厚度; ω_{x2} 为滚刀驱动旋转速度; T_d 为滚刀初始位置切入最大厚度一个周期; $\Delta\phi_{jq2}$ 、 $\Delta\phi_{x2q2}$ 、 $\Delta\phi_{x2j}$ 分别为滚刀水平

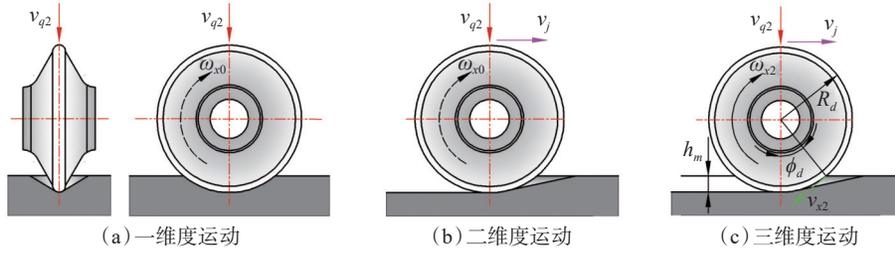


图 4 滚刀不同维度运动复合模式

Fig. 4 Composite modes of different dimensions of hob movement

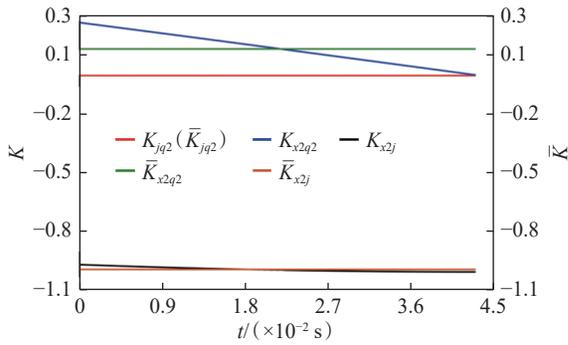


图 5 滚刀运动复合 K 和 \bar{K}

Fig. 5 The hob movement composite K and \bar{K}

进给速度 v_j 与垂直进给速度 v_{q2} 、旋转速度 v_{x2} 与垂直进给速度 v_{q2} 、旋转速度 v_{x2} 与水平进给速度 v_j 间夹角； K_{jq2} 、 K_{x2q2} 、 K_{x2j} 分别为滚刀水平进给运动与垂直进给运动、旋转运动与垂直进给运动、旋转运动与水平进给运动间关联度系数。

由图 5 可知，滚刀从初始位置切入最大厚度的周期内，垂直进给与水平进给运动关联度系数为 0，两者运动不重叠，各运动有效发挥其对岩石作用；驱动旋转分别与垂直进给、水平进给运动的关联度系数均随刀具切入岩石厚度增加逐渐减小， K_{x2j} 为正值且数值相对较小， K_{x2j} 减小幅度较小且为负值（近似为 -1）。可得，顺时针驱动旋转与水平进给运动间具有抵消作用，垂直进给与水平进给运动、垂直进给与驱动旋转运动间对岩石作用互补性显著、有效性较高，旋转破岩、水平进给破岩作用有效辅助垂直进给运动破岩，提高刀具破岩能力与效率。

滚刀分为弧刃滚刀（刀具边缘光滑无齿）、齿刃滚刀（刀具边缘均匀分布牙齿）两种，附加驱动旋转运动对于弧刃滚刀其破岩能力提升不显著，且刀具磨损增大相对较快，通常自旋转代替驱动旋转运动，以减小刀具磨损；对于齿刃滚刀，因齿刃的作用，刀具由碾压破岩变为类似铣削破岩形式，其作用效果提升明显，故此运动复合模式适用于齿刃滚刀，但驱动旋转速度不宜过大，否则齿刃磨损严重，刀具损耗较大。

1.3 圆盘刀破岩运动维度

圆盘刀不同维度破岩运动复合模式如图 6 所示。图 6(a) 只有径向进给运动的一维度运动，图 6(b) 是在图 6(a) 的基础上附加驱动旋转、轴向振动、径向振动、圆周振动或扭摆振动运动的二维度运动，图 6(c) 为公转、驱动旋转和径向进给运动复合的三维度运动^[9]。

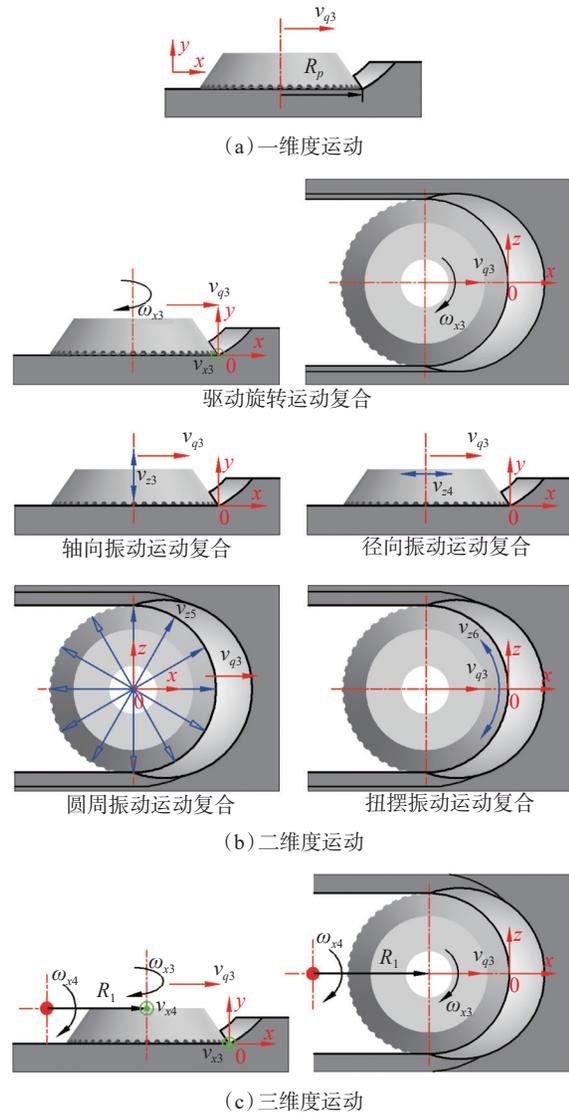


图 6 圆盘刀不同维度运动复合模式

Fig. 6 The motion composite mode of disc cutter in different dimensions

1) 二维度运动。由图 6(b) 可得圆盘刀二维度运动复合时, 各维度运动速度间夹角 $\Delta\phi$, 各运动间关联度系数 K 计算见式(4), 其平均值 \bar{K} 计算见式(2), 其曲线如图 7 所示。

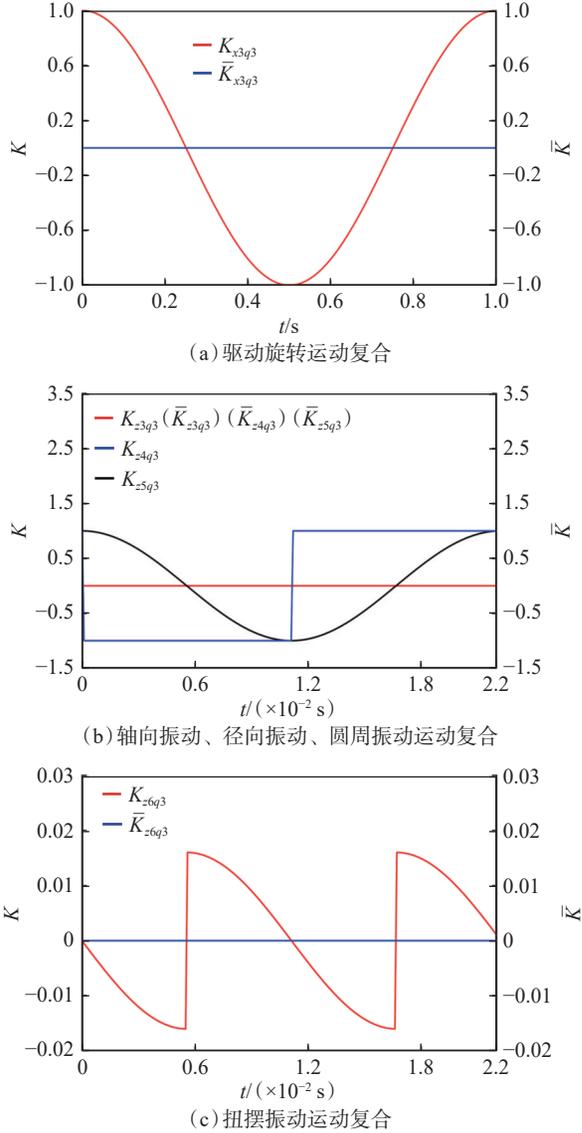


图 7 圆盘刀二维度运动复合 K 和 \bar{K}

Fig. 7 Two-dimensional motion composite K and \bar{K} of disc cutter

$$\begin{bmatrix} K_{x3q3} \\ K_{z3q3} \\ K_{z4q3} \\ K_{z5q3} \\ K_{z6q3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Delta\phi_{x3q3} \\ \cos \Delta\phi_{z3q3} \\ \cos \Delta\phi_{z4q3} \\ \cos \Delta\phi_{z5q3} \\ \cos \Delta\phi_{z6q3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_{x3}t) \\ 0 \\ \cos(\lceil \omega_{z4}t/\pi \rceil \pi) \\ \cos(\omega_{z5}t) \\ \sin((-1)^{\lceil 4t/T_{z6} \rceil} |\sin^{-1}(A_{z6}/R_p) \sin(\omega_{z6}t)|) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: R_p 为圆盘刀半径; ω_{x3} 为圆盘刀驱动旋转角速度; ω_{z4} 、 ω_{z5} 、 ω_{z6} 分别为圆盘刀径向振动、圆周振动和扭摆振动的角频率; A_{z6} 为圆盘刀扭摆振动幅值; T_{z6} 为圆盘刀扭摆振动周期; $\Delta\phi_{x3q3}$ 、 $\Delta\phi_{z3q3}$ 、 $\Delta\phi_{z4q3}$ 、 $\Delta\phi_{z5q3}$ 、 $\Delta\phi_{z6q3}$ 分别为圆盘刀驱动旋转速度 v_{x3} 、轴向振动速度

v_{z3} 、径向振动速度 v_{z4} 、圆周振动速度 v_{z5} 、扭摆振动速度 v_{z6} 分别与径向进给速度 v_{q3} 间夹角; K_{x3q3} 、 K_{z3q3} 、 K_{z4q3} 、 K_{z5q3} 、 K_{z6q3} 分别为圆盘刀驱动旋转运动、轴向振动运动、径向振动运动、圆周振动运动、扭摆振动运动分别与径向进给运动间关联度系数。

由图 7(a) 可知, 圆盘刀驱动旋转运动复合时, 驱动旋转与径向进给运动关联度系数呈正弦曲线规律, 波动周期与驱动旋转周期为正相关, 其关联度系数在 $[-1,1]$ 间变动, 驱动旋转与径向进给运动作用互补性相对显著, 刀具破岩效果与滚刀类似, 对齿刃圆盘刀破岩能力提升显著, 弧刃圆盘刀作用较小, 弧刃圆盘刀通常采用自旋转运动。由图 7(b) 和图 7(c) 可知, 轴向振动运动复合时, 轴向振动与径向进给运动关联度系数为 0, 扭摆振动运动与径向运动相关度系数曲线存在波动, 幅值较小近似为 0, 此两种形式振动复合时运动间叠加性不显著, 均有效发挥各运动破岩作用, 以振动运动损伤岩石, 减小径向进给运动破岩所需能量; 径向振动运动复合时, 径向振动与径向进给运动关联度系数为 1 或 -1, 曲线呈阶梯状, 振动运动与径向进给运动相互叠加或抵消, 对径向进给速度影响较大, 振动频率较大时, 振动速度大于径向进给速度, 刀具对岩石具有振动冲击作用, 有利于刀具破岩; 圆周振动运动复合时, 圆周振动与径向进给运动关联度系数曲线与驱动旋转运动复合类似, 各运动有效作用于岩石, 圆周振动运动复合存在振动冲击作用, 相比驱动旋转运动复合破岩性能较好。

2) 三维度运动。由图 6(c) 可知, 圆盘刀三维度运动复合时, 各维度运动的速度方向夹角 $\Delta\phi$, 各运动间关联度系数 K 计算见式(5), 其平均值 \bar{K} 计算见式(2), 其曲线如图 8 所示。

$$\begin{bmatrix} K_{x3q3} \\ K_{x3q4} \\ K_{x4q3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \Delta\phi_{x3q3} \\ \cos \Delta\phi_{x3q4} \\ \cos \Delta\phi_{x4q3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\omega_{x3}t + \omega_{x4}t) \\ \cos(\omega_{x3}t - \omega_{x4}t) \\ -\sin(\omega_{x4}t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

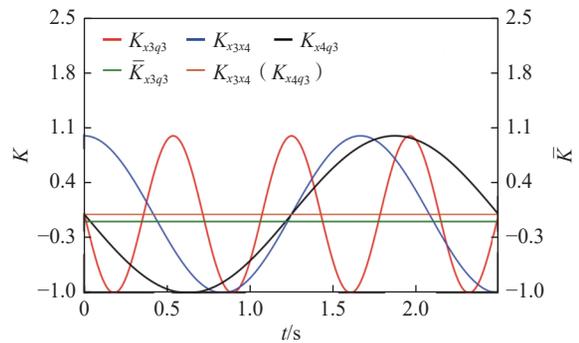


图 8 圆盘刀三维度运动复合 K 和 \bar{K}

Fig. 8 Three-dimensional motion composite K and \bar{K} of disc cutter

式中: ω_{x4} 为圆盘刀公转角速度; $\Delta\phi_{x3x4}$ 、 $\Delta\phi_{x4q3}$ 分别为圆盘刀驱动旋转速度与公转速度 v_{x4} 、圆盘刀公转速度与径向进给速度 v_{q3} 间夹角; K_{x3x4} 、 K_{x4q3} 分别为圆盘刀驱动旋转运动与公转运动、圆盘刀公转运动与径向进给运动间关联度系数。

由图 8 可知, 圆盘刀驱动旋转与公转运动、驱动旋转与径向进给运动、公转与径向进给运动的关联度系数均呈正弦曲线规律, 其幅值相同, 关联系数均在 $[-1, 1]$ 范围内, 可知圆盘刀驱动旋转、公转与径向进给三者运动间作用互补性显著, 同时有效发挥各运动破岩作用, 且公转运动对岩石具有冲击作用, 相比二维驱动旋转运动复合破岩能力更强、破岩效果更好。

2 刀具破岩运动复合速度与轨迹

不同结构形式的刀具应有相匹配的运动复合模式, 包含符合刀具工作特征的基本运动, 以及提升破岩能力的附加运动, 如采煤机牵引和滚筒旋转的基本运动, 附加沿截齿轴向振动或冲击运动的运动复合模式。不同运动复合模式下, 刀具的运动速度方向、轨迹不同, 其破岩机制不同。运动速度与轨迹反映着刀具破岩特征, 速度不仅反映破岩效率还能反映刀具摩擦磨损程度, 影响刀具寿命与能耗, 其方向决定刀具楔入岩石方向角, 数值大小则决定施加的

破岩能量^[20-21]。运动轨迹是运动复合与运动速度的综合体现, 决定着刀具楔入岩石的方式和截割破岩量, 相邻周期轨迹间距反映刀具破岩的效力。刀具结构和运动模式决定了破岩机制和破岩效果, 机械破岩方法的创新, 运动维度、速度与轨迹分析是必要的基础。

2.1 截齿运动复合

由图 2 可知, 截齿三维运动包含一维度运动、二维度运动, 故对截齿施加牵引、旋转和沿截齿轴线振动运动形成的三维运动进行速度和轨迹分析, 运动分析如图 9 所示。

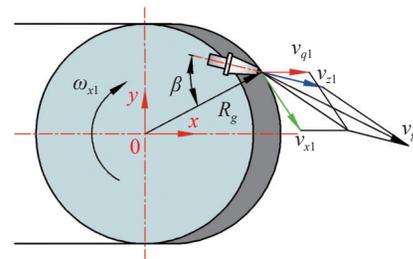


图 9 截齿运动复合分析

Fig. 9 Composite analysis of pick motion

由图 9 可知, 截齿齿尖运动复合的速度和轨迹方程见式(6)和式(7), 截齿齿尖运动复合速度和轨迹如图 10 所示。

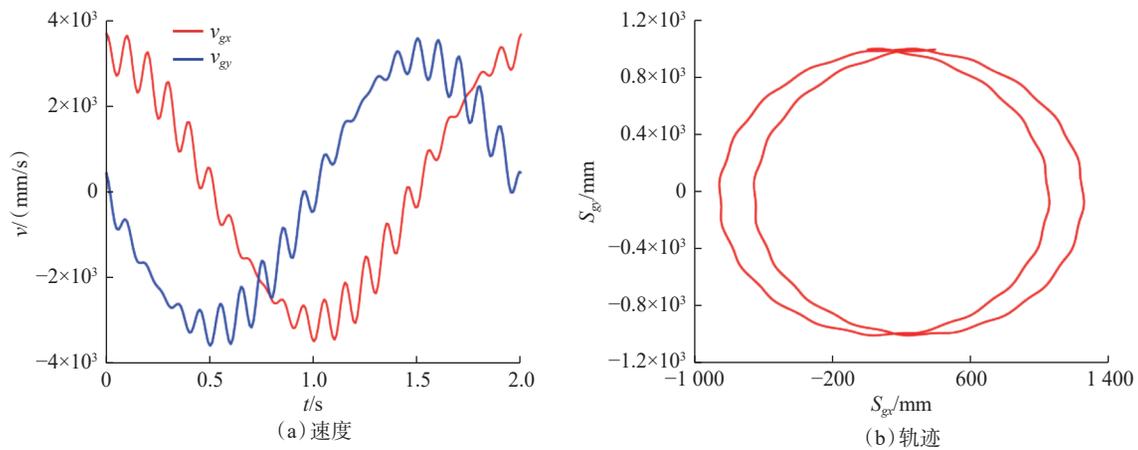


图 10 截齿齿尖运动复合速度与轨迹

Fig. 10 Composite velocity and trajectory of pick tip movement

$$\begin{cases} v_{gx} = v_{q1} + R_g \omega_{x1} \cos(\omega_{x1}t) + A_{z1} \omega_{z1} \cos(\omega_{z1}t) \sin(\omega_{x1}t + \beta) \\ v_{gy} = -R_g \omega_{x1} \sin(\omega_{x1}t) + A_{z1} \omega_{z1} \cos(\omega_{z1}t) \cos(\omega_{x1}t + \beta) \end{cases} \quad (6)$$

$$S_{ij} = \int_0^{T_2} v_{ij} dt \quad (7)$$

式中: v_{gx} 、 v_{gy} 分别为截齿齿尖运动复合 x 方向分速度和 y 方向分速度; R_g 为滚筒半径; A_{z1} 为沿截齿轴线振动幅值; ω_{z1} 为沿截齿轴线振动角频率; S_{ij} 为刀具运

动复合某一坐标轴方向位移, $i=g, d, p$, 分别表示截齿、滚刀、圆盘刀, $j=x, y, z$, 分别表示 x 轴、 y 轴、 z 轴; T_2 为刀具运动轨迹所需时间, $T_2 \geq 2T_1$ 。

由图 10(a) 可知, 截齿齿尖运动复合速度 x 轴分速度、 y 轴分速度整体呈正弦曲线规律, 截齿在 x 轴方向、 y 轴方向变量施加破岩能量, 因截齿沿轴线振动运动的频率和幅值过小(其当量速度小), 速度曲

线上均存在小幅波动,对截齿破岩过程影响较小,对提高破岩能力和效果不显著。由图 10(b)可知,截齿齿尖运动轨迹为螺旋状,存在因截齿沿轴线振动运动产生波动,振动频率与幅值较小,波动幅值较小且分布较稀疏,对刀具破岩能力提升较小。因此,各维度运动的速度、幅值量纲可比性,也是考虑的要素。综合截齿齿尖运动速度和轨迹分析可得,为提升刀

具破岩能力,截齿沿轴线振动运动频率不易过小。

2.2 滚刀运动复合

由图 4 可知,滚刀运动复合模式包含一维度运动、二维度运动、三维度运动,对滚刀二维度运动(水平进给、垂直进给运动复合)及三维度运动(水平进给、垂直进给、驱动旋转运动复合)进行速度和轨迹分析,如图 11(a)和图 11(b)所示。

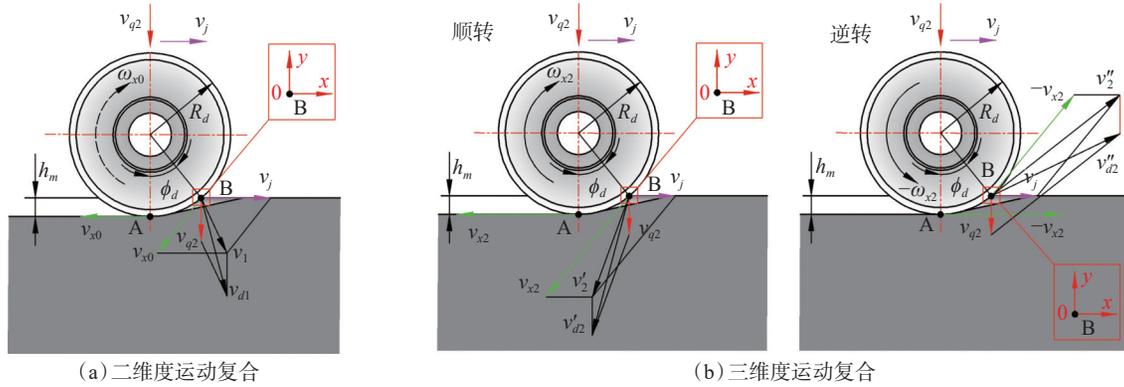


图 11 滚刀运动复合分析
Fig. 11 Composite analysis of hob motion

图 11(a)为二维度运动复合模式,滚刀靠摩擦力自旋转运动,假设 B 点绝对速度 $|v_B|=0$,滚刀水平进给速度 v_j ,可得滚刀自旋角速度 $\omega_{s0}=v_j R_d^{-1}$,滚刀自旋

转线速度 $|v_{s0}|=v_j$ 。依据图 11(a)可知,滚刀二维度运动复合速度方程见式(8),轨迹方程见式(7),滚刀与岩石接触点运动速度和轨迹,如图 12 所示。

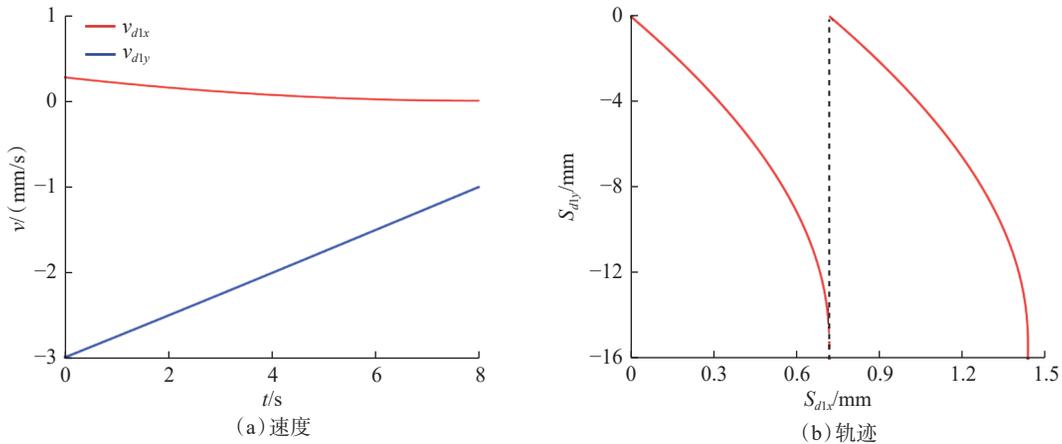


图 12 滚刀二维度运动复合速度与轨迹
Fig. 12 Composite velocity and trajectory of two-dimensional motion of hob

$$\begin{cases} v_{d1x} = v_j - v_j \cos(\phi_d - \omega_{s0}t) \\ v_{d1y} = -v_{q2} - v_j \sin(\phi_d - \omega_{s0}t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: v_{d1x} 为滚刀二维度运动复合 x 轴方向分速度; v_{d1y} 为滚刀二维度运动复合 y 轴方向分速度; v_{q2} 为滚刀垂直进给速度。

由图 12 可知,滚刀二维度运动复合 x 轴分速度、y 轴分速度绝对值呈减小趋势,x 轴分速度绝对值小

于 y 轴分速度,滚刀在 x 轴方向、y 轴方向递减施加破岩能量,且 x 轴施加破岩能量较小;滚刀 B 点运动轨迹呈椭圆弧状,y 轴方向位移远大于 x 轴方向位移,结合速度分析,滚刀主要以碾压形式破碎岩石。

图 11(b)所示为滚刀三维度运动复合模式,滚刀驱动旋转运动方向分为顺时针旋转、逆时针旋转,驱动旋转角速度大小为 ω_{s2} ,线速度 $|v_{s2}|=R_d \omega_{s2}$ 。滚刀三

维度运动复合速度方程式, 滚刀顺时针驱动旋转时计算见式(9), 逆时针驱动旋转时计算见式(10), 轨

迹方程计算见式(7), 滚刀与岩石接触点运动复合速度和轨迹如图 13 所示。

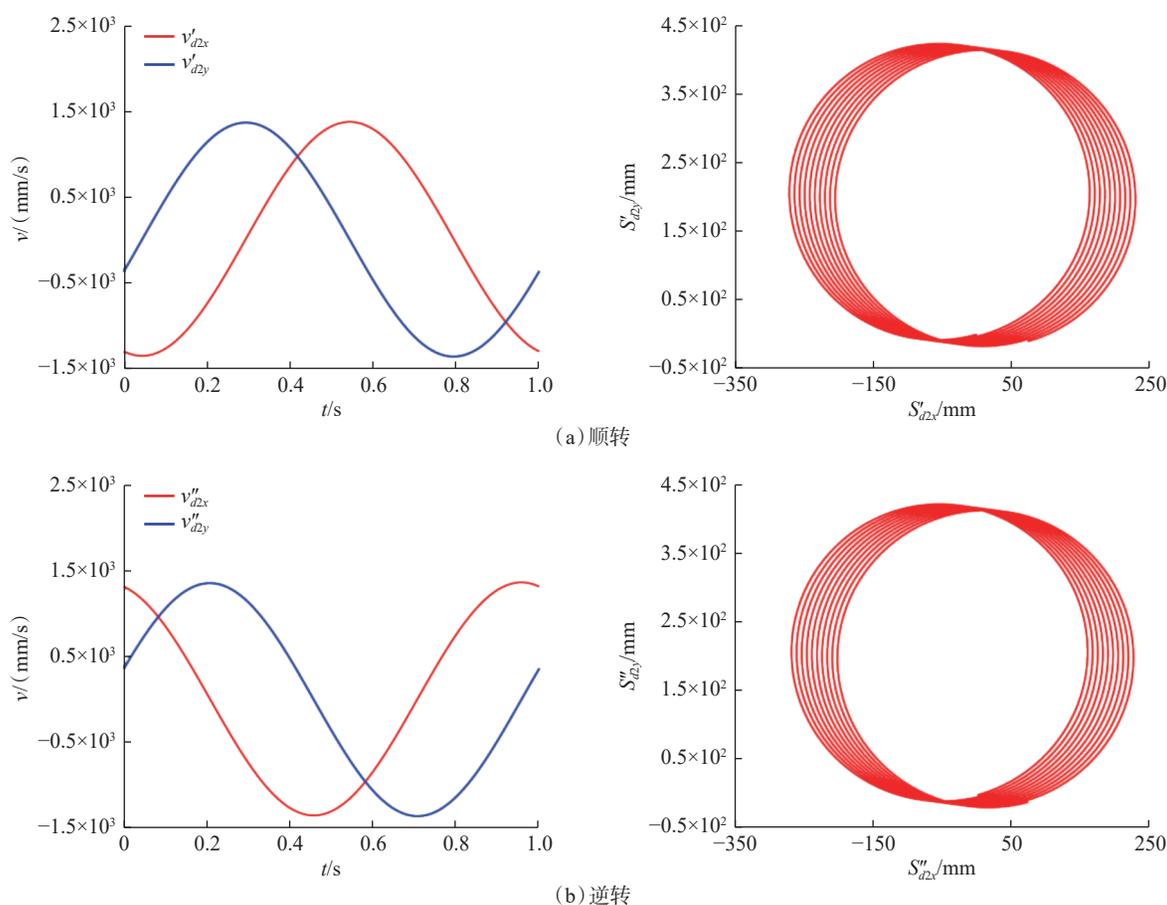


图 13 滚刀三维度运动复合速度与轨迹

Fig. 13 Composite velocity and trajectory of three-dimensional motion of hob

$$\begin{cases} v'_{d2x} = v_j - R_d \omega_{x2} \cos(\phi_d - \omega_{x2}t) \\ v'_{d2y} = -v_{q2} - R_d \omega_{x2} \sin(\phi_d - \omega_{x2}t) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} v''_{d2x} = v_j + R_d \omega_{x2} \cos(\phi_d + \omega_{x2}t) \\ v''_{d2y} = -v_{q2} + R_d \omega_{x2} \sin(\phi_d + \omega_{x2}t) \end{cases} \quad (10)$$

式中: v'_{d2x} 、 v''_{d2x} 分别为滚刀顺时针旋转、逆时针旋转时三维度运动复合 x 轴方向分速度; v'_{d2y} 、 v''_{d2y} 分别为滚刀顺时针旋转、逆时针旋转时三维度运动复合 y 轴方向分速度。

由图 13 可知, 滚刀驱动旋转顺时针或逆时针时, 三维度运动复合 x 轴分速度、 y 轴分速度曲线为波动幅值、频率一致、具有相位差的正弦曲线, 滚刀在 x 轴方向、 y 轴方向错时变量施加同等破岩能量, 其速度数值远大于滚刀二维度运动复合, 故滚刀驱动旋转运动显著提高滚刀施加的破岩能量; 滚刀 B 点运动轨迹呈螺旋状, 以铣削形式破碎岩石。

滚刀二维度、三维度运动复合破岩过程中, 垂直进给运动作用为碾压破碎岩石, 水平进给与旋转运

动复合决定着刀具破岩性能提升效果。结合图 11(a) 和图 11(b) 分析可知, 滚刀二维度运动复合时, 滚刀自旋转线速度与水平进给速度相同, 二者复合运动速度较小, 其作用为减少刀具磨损, 对破岩性能影响不显著; 滚刀三维度运动复合时, 若 $v_{x2} \neq v_j$, 当滚刀顺时针驱动旋转时, B 点处滚刀驱动旋转与水平进给运动复合速度 $|v'_2| = v_j - v_{x2} \cos \phi_d$, 当滚刀逆时针驱动旋转时, B 点处滚刀驱动旋转与水平进给运动复合速度 $|v''_2| = v_j + v_{x2} \cos \phi_d$, 可得滚刀旋转方向不同时, 滚刀运动复合速度差异较大。滚刀(主要为齿刃滚刀)驱动旋转时形成以铣削为主的破岩形式, 驱动旋转的运动速度大小和旋转方向可直接影响复合速度, 复合速度过大时会加剧刀具磨损和粉尘产生, 应合理匹配刀具旋转速度和旋转方向。

2.3 碟盘刀运动复合

碟盘刀与滚刀均属于圆盘刀, 滚刀为双侧对称楔面刀刃, 碟盘刀为单侧刀刃, 二者破岩状态的区别

在于前者刀刃两侧挤压破岩, 而后者是刀刃单侧挤压楔劈破岩, 均不适合高速驱动旋转破岩运动, 在运动复合模式选择中旋转运动可为提升破岩能力的辅助作用, 避免将其作为破岩主运动。碟盘刀运动复合模式应与破岩机构(单碟盘刀破岩机构、多碟盘刀组合破岩机构)相匹配, 其破岩作用具有显著区别。

2.3.1 单碟盘刀运动复合

单碟盘刀运动复合模式如图 6 所示, 可分为一维度运动复合、二维度运动复合和三维度运动复合, 对碟盘刀二维度运动复合速度和轨迹、三维度运动复合速度和轨迹进行分析。

1) 二维度运动复合。依据图 6(b) 可知, 碟盘刀径向进给分别与驱动旋转、轴向振动、径向振动、圆周振动、扭摆振动运动复合速度方程式, 分别对应式(11)~式(15), 轨迹方程同式(7), 碟盘刀运动复合速度和轨迹如图 14 所示。

$$\begin{cases} v_{p1x} = v_{q3} - R_p \omega_{x3} \sin(\omega_{x3}t) \\ v_{p1y} = -R_p \omega_{x3} \cos(\omega_{x3}t) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} v_{p2x} = v_{q3} \\ v_{p2y} = -A_{z3} \omega_{z3} \cos(\omega_{z3}t) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} v_{p3x} = v_{q3} + A_{z4} \omega_{z4} \cos(\omega_{z4}t) \\ v_{p3y} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} v_{p4x} = v_{q3} - A_{z5} \omega_{z5} \sin(\omega_{z5}t) \\ v_{p4z} = -A_{z5} \omega_{z5} \cos(\omega_{z5}t) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} v_{p5x} = v_{q3} - R_p \omega_{z6} \sin^{-1}(A_{z6}/R_p) \sin(\sin^{-1}(A_{z6}/R_p) \sin(\omega_{z6}t)) \cos(\omega_{z6}t) \\ v_{p5z} = R_p \omega_{z6} \sin^{-1}(A_{z6}/R_p) \cos(\sin^{-1}(A_{z6}/R_p) \sin(\omega_{z6}t)) \cos(\omega_{z6}t) \end{cases} \quad (15)$$

式中: ω_{z3} 为碟盘刀轴向振动角频率; A_{z3} 、 A_{z4} 、 A_{z5} 分别为碟盘刀轴向振动、径向振动和圆周振动的幅值; v_{p1x} 、 v_{p2x} 、 v_{p3x} 、 v_{p4x} 、 v_{p5x} 分别为碟盘刀驱动旋转、轴向振动、径向振动、圆周振动、扭摆振动运动复合 x 轴方向分速度; v_{p1y} 、 v_{p2y} 、 v_{p3y} 分别为碟盘刀驱动旋转、轴向振动、径向振动运动复合 y 轴方向分速度; v_{p4z} 、 v_{p5z} 分别为碟盘刀圆周振动、扭摆振动运动复合 z 轴方向分速度。

由图 14(a) 可知, 碟盘刀驱动旋转运动复合时, 在 x 轴方向分速度、 z 轴方向分速度均呈正弦曲线规律, x 轴方向速度数值整体高于 z 轴方向, 其波动频率、幅值相近且存在相位差, 刀具在 x 轴方向、 z 轴方向变量施加破岩能量, x 轴方向破岩能量相对较大; 刀具截割破碎岩石轨迹为螺旋状, 以铣削形式破碎岩石。图 14(b) 为轴向振动运动复合, 刀具在 x 轴方

向匀速进给同时沿 y 轴方向按正弦规律振动, x 轴方向恒定施加破岩能量, y 轴方向变量施加破岩能量; 刀具运动轨迹呈正弦曲线状, 轴向振动运动使刀具沿 y 轴方向振动冲击破碎岩石, 向下振动利于损伤下方岩石, 向上振动利于岩石形成大块崩落, 使破岩机制趋于拉-剪耦合破坏^[8]。图 14(c) 为径向振动运动复合, 刀具仅在 x 轴方向运动, 速度呈正弦曲线状, 由径向进给速度叠加径向振动速度形成, 在 x 轴方向变量施加破岩能量; 刀具运动轨迹即在径向进给运动基础上叠加径向振动运动, 刀具往复碰撞岩石, 以振动冲击作用形式破岩。图 14(d) 为圆周振动运动复合, 在 x 轴方向分速度、 z 轴方向分速度规律与驱动旋转运动复合时类似, 结合图 6(b) 分析, 圆周振动运动对岩石各个角度施加大小相同的振动冲击破岩能量, 径向进给运动沿 x 轴方向施加恒定破岩能量; 刀具运动轨迹呈螺旋状, 径向截割破碎岩石同时对圆周截面施加振动冲击作用。图 14(e) 为扭摆振动运动复合, z 轴方向分速度呈正弦曲线规律, x 轴方向分速度近似匀速运动, 存在小幅波动, 刀具在 x 轴方向近似恒定施加破岩能量, z 轴方向变量施加破岩能量; 依据刀具运动轨迹, z 轴方向上刀具对岩石形成反复揉搓作用, 类似旋进运动破碎岩石。

2) 三维度运动复合。依据图 6(c) 可得碟盘刀径向进给、公转运动和驱动旋转运动三维度运动复合速度方程见式(16), 轨迹方程见式(7), 碟盘刀与岩石接触点运动复合速度和轨迹如图 15 所示。

$$\begin{cases} v_{p6x} = v_{q3} - (R_1 + R_p \cos(\omega_{x3}t - \omega_{x4}t)) \omega_{x4} \sin(\omega_{x4}t) - R_p \omega_{x3} \sin(\omega_{x3}t + \omega_{x4}t) \\ v_{p6y} = 0 \\ v_{p6z} = -(R_1 + R_p \cos(\omega_{x3}t - \omega_{x4}t)) \omega_{x4} \cos(\omega_{x4}t) - R_p \omega_{x3} \cos(\omega_{x3}t + \omega_{x4}t) \end{cases} \quad (16)$$

式中: R_1 为碟盘刀公转半径; ω_{x4} 为碟盘刀公转角速度; v_{p6x} 为碟盘刀径向进给、公转和驱动旋转运动复合时 x 轴方向分速度; v_{p6y} 为碟盘刀径向进给、公转和驱动旋转运动复合时 y 轴方向分速度; v_{p6z} 为碟盘刀径向进给、公转和驱动旋转运动复合时 z 轴方向分速度。

由图 15(a) 可知, 碟盘刀径向进给、公转和驱动旋转运动三维度运动复合时, 在 x 轴方向、 z 轴方向具有分速度, 近似呈正弦曲线规律, 即刀具在 x 轴方向、 z 轴方向变量施加破岩能量。图 15(b) 为刀具运动轨迹, 驱动旋转运动促使刀具以铣削形式破碎岩石, 公转运动与刀具驱动旋转运动具有叠加作用, 且使刀具对岩石产生碰撞冲击作用, 从而提高破岩

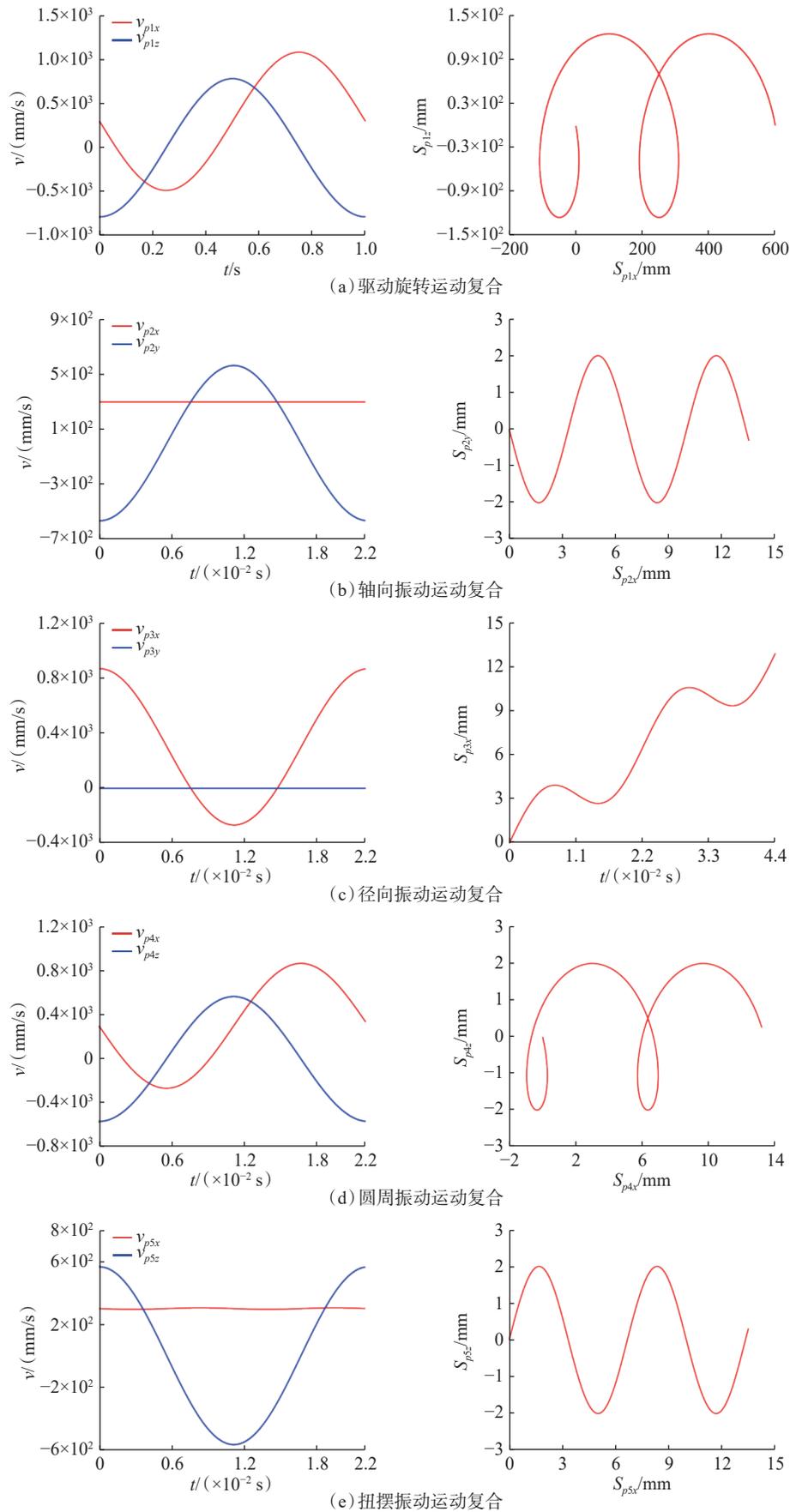


图 14 圆盘刀二维度运动复合速度与轨迹

Fig. 14 Two-dimensional motion composite velocity and trajectory of disc cutter

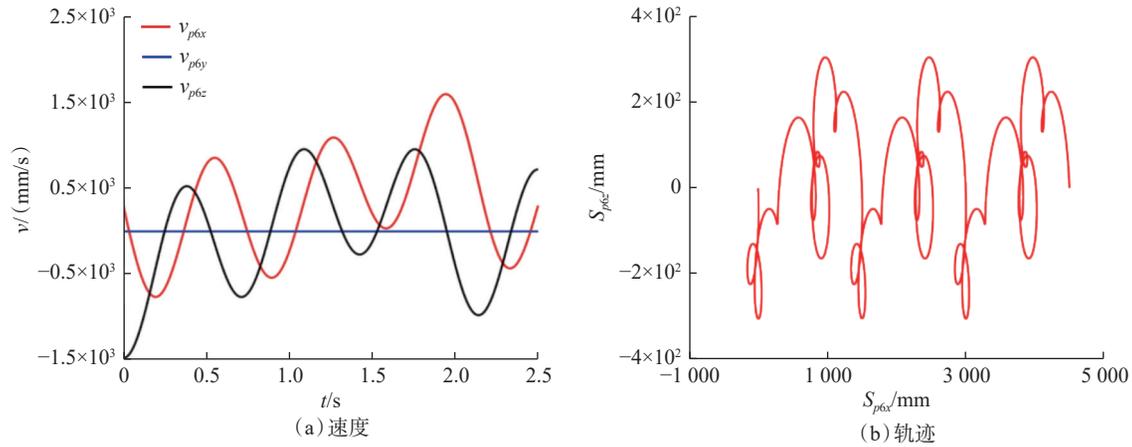


图 15 圆盘刀三维运动复合速度与轨迹

Fig. 15 Three-dimensional motion composite velocity and trajectory of disc cutter

效率。

2.3.2 多圆盘刀组合运动复合

除单个圆盘刀破岩形式外, 还存在多圆盘刀组合破岩形式。如图 16(a) 多个圆盘刀(包括楔面不明显的圆盘刀)布置于大刀盘端面或圆周面, 其运动复合模式为大刀盘驱动旋转、悬臂水平或垂直摆动运动、圆盘刀自旋转或驱动旋转运动。对圆盘刀布置于大刀盘端面的一次组合机构进行二次组合, 构成

具有多个大刀盘的截割头, 运动复合模式为截割头驱动旋转、悬臂水平或垂直摆动运动, 大刀盘驱动旋转运动、圆盘刀自旋转或驱动旋转运动, 如图 16(b) 所示。以圆盘刀端面布置的一次组合形式为例, 进行运动速度与轨迹分析, 如图 16(c) 所示。

由图 16(c) 可知, 圆盘刀三维运动复合由大刀盘驱动旋转运动和牵引运动、圆盘刀驱动旋转运动组成, 则可得圆盘刀三维运动复合速度见式(17), 轨迹方程见式(7)。

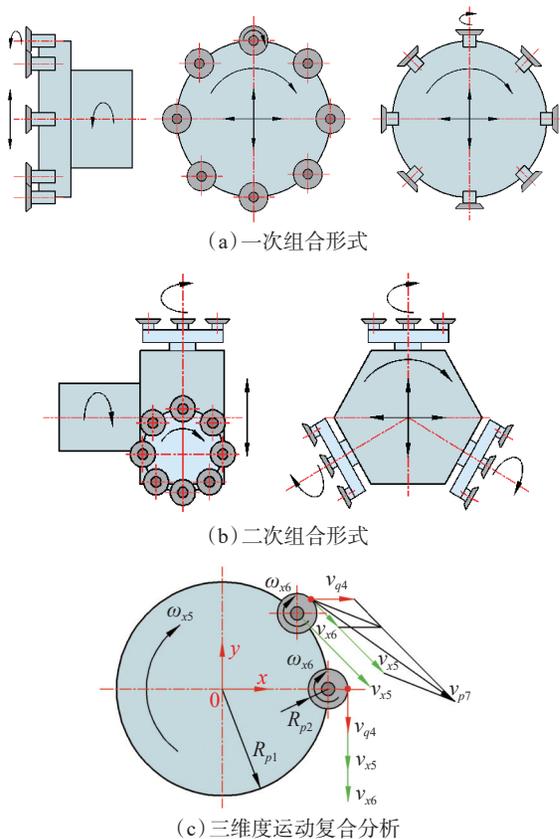


图 16 圆盘刀组合形式与运动复合分析

Fig. 16 Combination form and motion composite analysis of disc cutter

$$\begin{cases} v_{p7x} = v_{q4} - (R_{p1} + R_{p2} \cos(\omega_{x6}t - \omega_{x5}t))\omega_{x5} \sin(\omega_{x5}t) - \\ \quad R_p \omega_{x6} \sin(\omega_{x6}t + \omega_{x5}t) \\ v_{p7y} = -(R_{p1} + R_{p2} \cos(\omega_{x6}t - \omega_{x5}t))\omega_{x5} \cos(\omega_{x5}t) - \\ \quad R_{p2} \omega_{x6} \cos(\omega_{x6}t + \omega_{x5}t) \end{cases} \quad (17)$$

式中: R_{p1} 为大刀盘半径; R_{p2} 为大刀盘中圆盘刀半径; v_{q4} 为大刀盘牵引速度; v_{x5} 为大刀盘驱动旋转速度; v_{x6} 为大刀盘中圆盘刀的驱动旋转速度; v_{p7x} 为圆盘刀运动复合时 x 轴方向分速度; v_{p7y} 为圆盘刀运动复合时 y 轴方向分速度。

圆盘刀三维运动复合模式中, 大刀盘牵引运动为基本运动, 大刀盘与圆盘刀的驱动旋转运动为附加运动, 提升刀具破岩能力, 大刀盘与圆盘刀驱动旋转速度的合理匹配, 决定着刀具破岩能力的提升程度。在 $v_{x5}=v_{x6}$ 、 $v_{x5}<v_{x6}$ 两种参数匹配形式下, 由式(17)和式(7)给出圆盘刀与岩石接触点运动复合速度和轨迹如图 17 所示。

由图 17 复合速度图可知, 一次组合形式下圆盘刀三维运动复合时, 圆盘刀 x 轴方向分速度、 y 轴方向分速度具有不规则波动, 速度数值、波动频率与 v_{x6} 大小呈正比, 在 x 轴方向、 y 轴方向对岩石变量施加破岩能量, 当 $v_{x5}<v_{x6}$ 时, 圆盘刀施加能量变化频率越大, 对岩石振动冲击作用越显著, 越有利于破岩。由

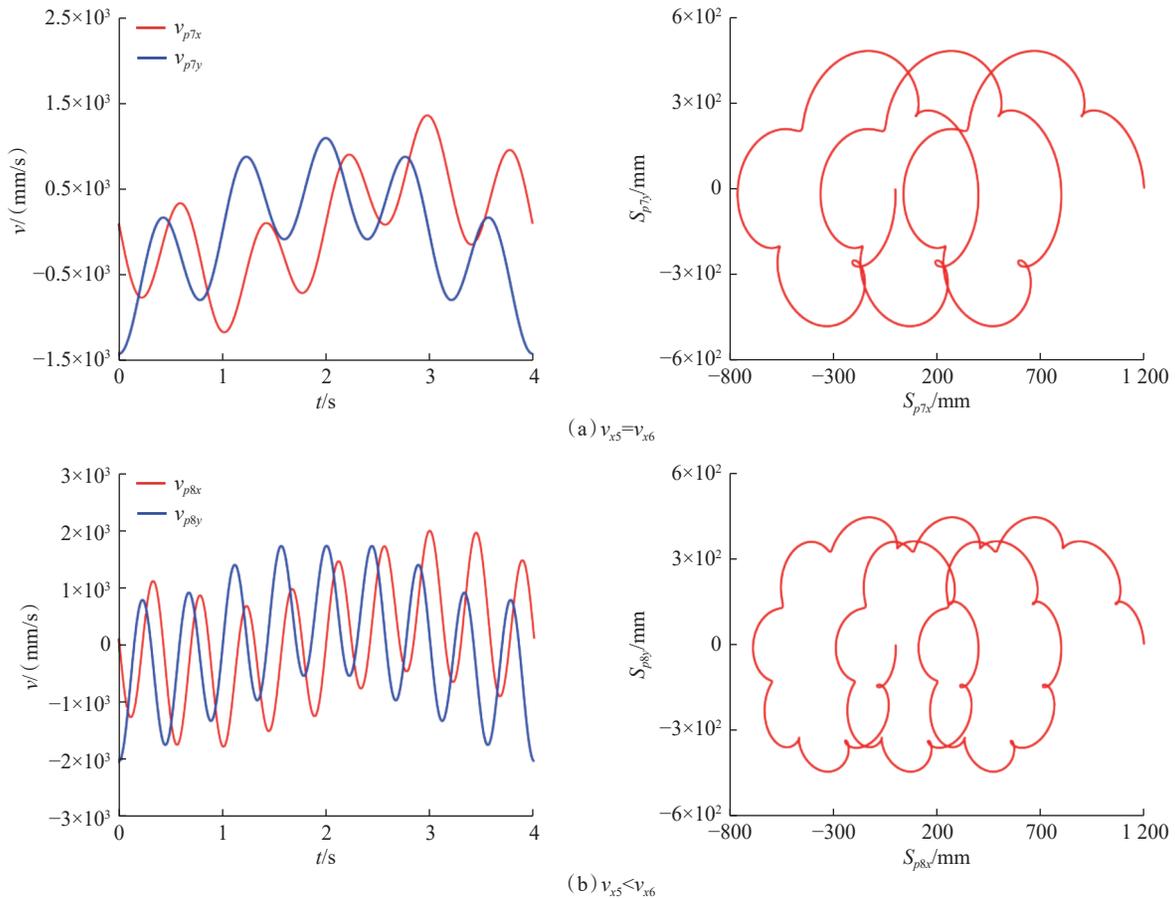


图 17 圆盘刀运动复合速度与轨迹

Fig. 17 Composite velocity and trajectory of disc cutter motion

图 17 复合轨迹图可知, $v_{x5} < v_{x6}$ 相比 $v_{x5} = v_{x6}$ 时, 大刀盘旋转一周过程圆盘刀旋转周期相对较多, 圆盘刀旋转周期数可表征大刀盘旋转一周时圆盘刀对岩石的铣削作用强度, 故圆盘刀驱动旋转速度应适当高于大刀盘驱动旋转速度, 可增大圆盘刀铣削破岩作用提升破岩能力, 但圆盘刀驱动旋转速度过大易导致刀具损耗过高。

3 刀具组合形式

机械破岩机构一般由多个刀具组合构成(图 1), 刀具组合形式可分为同类刀具组合、异类刀具组合和重复刀具组合等, 重复刀具组合依据组合维度分为一次组合、二次组合。重复刀具组合为常见的组合形式, 如截齿组合构成的采煤机螺旋滚筒或悬臂

掘进机截割头; 滚刀组合构成的盾构机刀盘等。同一种刀具采用不同的组合形式, 匹配不同运动模式, 可达到不同的破岩效果。刀具布置组合形式应考虑刀具结构及运动模式, 其基本原则为满足受力均衡的排列规律、满足承载能力的组合密度、与运动复合模式相匹配的布置姿态。以截齿、滚刀、圆盘刀和楔形镐为例, 分析不同结构刀具布置组合形式选择依据与其破岩性能。

3.1 截齿组合

截齿有序排列组合的破岩机构, 如图 18 所示。图 18(a)为截齿一次组合形式, 依次为滚筒采煤机螺旋滚筒、悬臂式掘进机截割头、掘锚机(连采机)截割滚筒, 截齿均以螺旋状布置, 且具有安装角度, 破



图 18 截齿不同组合形式的破岩机构

Fig. 18 Rock-breaking mechanism of different combinations of picks

碎岩石强度与截齿布置密度呈正比, 采用旋转和牵引二维度运动复合模式。为提高破岩能力和效率, 出现了截齿二次组合形式的破岩机构, 将截齿一次组合构成的破岩机构(类似悬臂式掘进机截割头), 均匀布置于大刀盘圆周面, 形成二次组合形式的破岩机构, 如图 18(b)所示的两种形式, 其运动模式为小截割头驱动旋转、大刀盘驱动旋转、大刀盘水平或垂直摆动形成的三维度运动复合模式, 第二种所示机构形式为卡特彼勒研制冶金采矿机械。

3.2 滚刀组合

滚刀有序排列组合形式的破岩机构如图 19 所示。图 19(a)为滚刀一次组合形式, 依次为有序排列在刀盘端面的破岩机构(传统圆形盾构机)、有序排列在刀盘圆周面的破岩机构(阿特拉斯公司研制)^[2], 以刀盘推进与驱动旋转(促使滚刀自旋转)二维度运动复合模式破岩, 其均可适用于硬岩巷道掘进。滚刀二次组合形式, 即滚刀一次组合形式(传统圆形盾构机)基础上进行多个组合, 如图 19(b)为中铁装备研制“掘进号”, 采用两层六刀盘组合布置形式, 形成大面积矩形截割, 提高破岩效率, 其运动模式为刀盘推进与驱动旋转复合的二维度运动。图 19(c)为中铁装备“242 号矩形顶管机”, 为异类刀具组合破岩机构, 包含 4 个切刀组合构成刀盘、4 个切刀与滚刀组合构成刀盘, 运动模式亦为刀盘推进与驱动旋转复合的二维度运动, 适用于含有砂卵石的松散地层, 切刀对岩层进行掘进, 滚刀以自旋转运动减小刀盘扭矩并破碎岩层中粒径较大的卵石。

滚刀工作特征为碾压破岩, 常用于硬岩截割, 故滚刀组合形式及运动复合模式选择为机械破岩方法

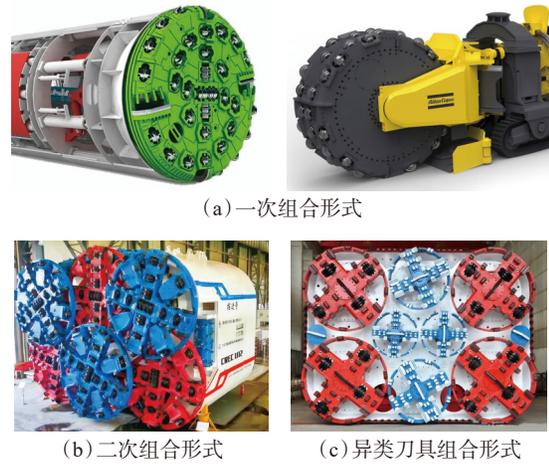


图 19 滚刀不同组合形式的破岩机构

Fig. 19 Rock breaking mechanism of different combination forms of hob

创新常见方式, 滚刀一次组合布置演变形式, 如图 20 所示。图 20(a)是目前盾构机的基本形式, 图 20(b)和图 20(c)为在图 20(a)基础上演变而成的非全断面掘进机破岩机构, 均为刀盘推进、驱动旋转运动复合的二维度运动模式, 滚刀为自旋转运动。如图 20(d)、图 20(e)和图 20(f)所示的布置形式, 将滚刀有序排列组合构成悬臂式掘进机截割头, 以悬臂水平或垂直摆动、截割头驱动旋转运动复合二维度运动模式破岩, 与滚刀工作特征碾压破岩不匹配, 对破岩能力的提升适得其反。如图 20(f)所示, 将悬臂式掘进机截割头的截齿替换成滚刀, 将截齿破岩方法移植到滚刀, 并未考虑截齿、滚刀两种刀具工作特征的差异, 且滚刀作用岩石姿态有很大的不确定性, 滚刀刃口与运动方向成较大的夹角, 受力状态不利于滚刀破岩。

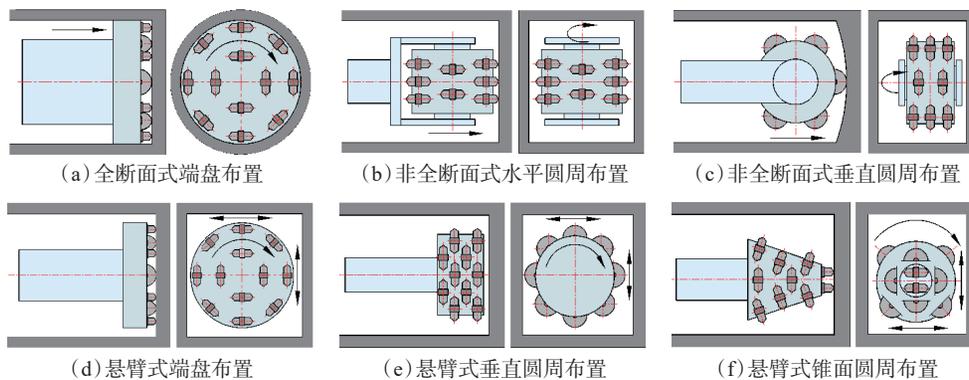


图 20 滚刀一次组合形式布置演变

Fig. 20 Evolution of one-time combination form arrangement of hob

3.3 碟盘刀组合

碟盘刀不同组合形式的破岩机构, 如图 21 所示。图 21(a)为原久益环球研制的悬臂式掘进机, 采用单

碟盘刀破岩, 碟盘刀以悬臂水平或垂直摆动基本运动附加振动运动的二维度运动模式破岩, 以振动运动增强破岩能力^[23]。碟盘刀一次组合形式、二次组

合形式分别如图16(a)和图16(b)所示,图21(b)为山特维特研制原理同图16(a)圆盘刀布置于刀盘端面一次组合形式的破岩机构,图21(c)为波兰FAMUR研制原理同图16(b)的圆盘刀二次组合形式的破岩机构^[22]。如图21(d)所示圆盘刀与异类刀具组合形式,第一种圆盘刀以螺旋状有序排列组合于截割头圆锥

面,截割头尖部镶嵌有截齿,形成截齿先破岩、圆盘刀后截割的工作模式^[24],第二种圆盘刀螺旋状排列组合于截割头圆周面,截割头端盘圆周布置截齿,截齿预先开槽,圆盘刀劈楔破碎岩石,增大破岩块率、降低粉尘量,其均为悬臂水平或垂直摆动、截割头驱动旋转运动复合的二维度运动模式。

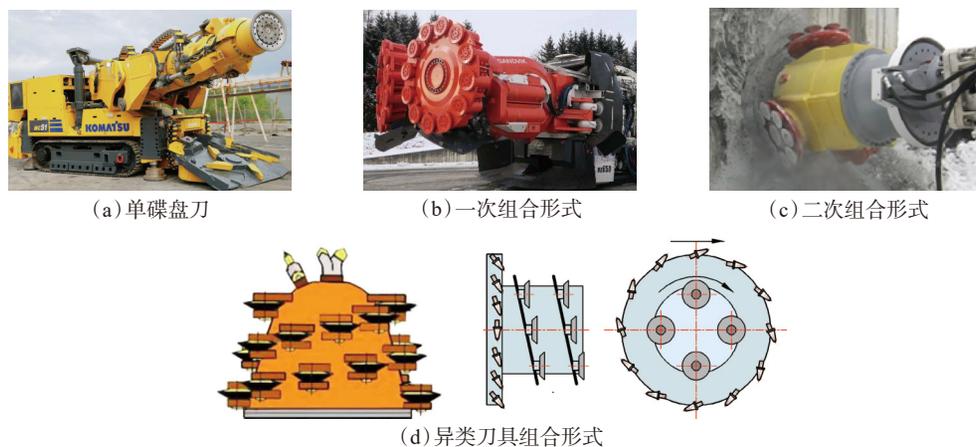


图21 圆盘刀不同组合形式的破岩机构

Fig. 21 Rock breaking mechanism of disc cutter with different combination forms

3.4 楔形镐组合

楔形镐组合为一次组合形式,其布置形式可分为平行并列式(图22)、交错锥体式等,采用沿截割方向进给与振动的二维度运动复合模式,形成一种具有冲击作用的破碎锤,以低频往复振动运动破岩。现已有多种样机应用于岩石巷,若用于只有一个自由面巷道断面工况时,破岩效率较低,不适用硬岩巷道。

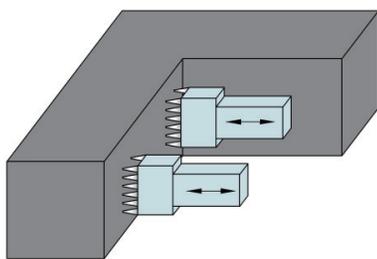


图22 楔形镐组合形式

Fig. 22 Combination form of wedge picks

4 破岩方法组合(复合)

除对机械破岩方法的刀具布置组合形式、运动复合模式创新改进,不同破岩方法组合也可提高破岩机构的破岩能力、效率。破岩方法组合分为机械破岩方法与机械破岩方法组合、机械破岩方法与非机械破岩方法组合两类,主要通过叠加各方法破岩作用或改变岩体原始条件(即损伤岩石),以增强破

岩能力。破岩方法组合应确定增强破岩能力与效率的理论性、破岩作用的叠加性和相互协同性、组合方法工程易实现性等原则。

4.1 截齿为主的破岩方法

截齿为矿山工程中常用的刀具,为提高截齿破岩能力,构建了诸多以截齿为主的破岩方法组合形式,如图23所示。

图23(a)为截齿①与高压水射流②组合的破岩方法,分为截齿与高压水射流同轨迹截割和异轨迹截割两种形式,高压水射流起到对岩石预弱化作用,减小截齿破岩所需能量,提高破岩效率。图23(b)为截齿与高压水射流复合的破岩方法,截齿与高压水射流复合作用于岩石,叠加破岩作用,提高破岩能力。如图23(c)所示圆盘锯③开槽与截齿截割组合的破岩方法,圆盘锯开槽分纵向缝截割、横向缝截割两种形式,截缝又可分为平行截割、非平行截割,以圆盘锯开槽改变岩石物理结构,减小岩石强度,从而提高截齿截割效率,截缝密度、截缝宽度、截缝深度参数为改变岩石物理结构关键因素,为组合破岩方法重要调试参数。如图23(d)所示钻具④钻孔与截齿截割组合的破岩方法,其与图23(c)破岩原理一致,孔径、孔深、孔间距、孔排列方式等参数为影响破岩效果的重要参数。

4.2 异类刀具为主的破岩方法

除截齿外,异类刀具为主破岩方法的组合形式

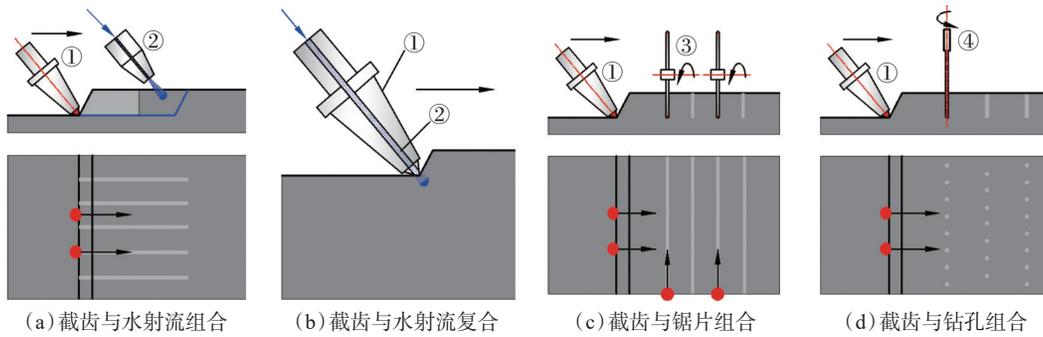


图 23 截齿为主的破岩方法组合(复合)形式

Fig. 23 Combination(composite) form of rock breaking method based on picks

也多种多样, 如图 24 所示。图 24(a)为悬臂式掘进机截割头与盾构机刀盘组合的破岩方法, 其破岩过程类似于钻头钻小孔再扩孔的打孔工艺过程, 图 24(b)为旋转截盘和滚筒(连采机)组合的破岩机构, 类似图 24(a)和图 24(b)的组合具有多种形式。图 24(c)

为轨道炮与冲击锤(可替换为截割头)组合的破岩方法, 其原理为轨道炮冲击预损伤岩石后, 冲击锤破岩。类似的方式还有采用振动炮预损伤岩石等方法, 这与静力破碎、振动破碎、冲击破碎等破岩运动对围岩的损伤、安全性、环境的影响有着本质的区别。



图 24 异类刀具为主的破岩方法组合形式

Fig. 24 Combination form of rock breaking method based on heterogeneous cutting tools

5 破岩方法评价

在破岩方法创新中, 破岩方法效果评价是衡量创新破岩机构是否可行、好用的标准依据。破岩方法创新是在考虑岩石抗压强度、磨蚀性等特性的前提下, 实现灵活截割、快速截割、经济截割、安全性、环保等目标。破岩方法评价应从环境与安全、能力与效果两方面出发, 前者体现在破岩过程中产生火花、粉尘、振动噪声等, 后者体现为破岩效率、破岩能耗、刀具磨损、工作寿命、载荷特征等, 则可得破岩方法效果评价基本框架如图 25 所示。

依据破岩方法原理搭建实体试验装置系统和数值模拟模型全面采集破岩载荷谱、刀具温升分布、块率粉尘等数据, 重点基于数值模拟或试验破岩载荷谱, 全面评价破岩方法破岩性能与效果, 定量表征图 25 中评价各项指标, 如: 刀具所受载荷谱幅值统计量与刀具温升、磨损指标呈正相关, 载荷越大, 刀具温升、磨损越大; 利用刀具破岩载荷谱盒维数、比例系数等分形特征量和载荷谱熵特征量反映刀具截割比能耗、粉尘产生率指标^[25-26]; 载荷谱低频成分占

比变化规律间接表征岩石破碎程度与崩落块率^[27]。综上, 刀具破岩载荷谱特征量是破岩方法性能评价核心参数要素, 亦是采掘装备产品创新研发的关键依据。

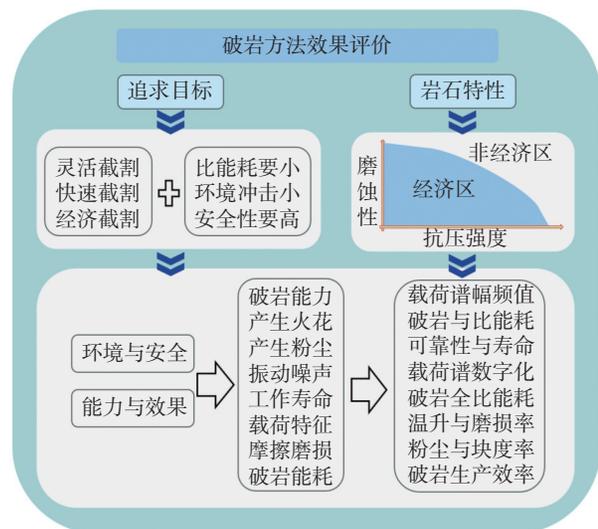


图 25 破岩方法效果评价

Fig. 25 Effect evaluation of rock breaking method

6 结 语

从机械破岩方法创新的角度出发,探讨了刀具运动复合模式、刀具组合形式及破岩方法组合(复合)的关联性与其对破岩性能的影响,不同岩石特性(尤其硬岩)应有相匹配的刀具结构、刀具运动和刀具组合方案。提出的刀具运动维度概念和运动间关联度定量算法,不同维度运动破岩作用有效性和刀具不同运动模式下速度与轨迹的分析方法,为刀具施加截割破岩作用形式的分析确定提供一种方法途径。

综合刀具运动复合模式、刀具组合形式及破岩方法间组合等因素分析,给出了机械破岩方法创新的路径与原则。①刀具运动复合与维度确定应遵循运动叠加性、各维度运动破岩作用有效性与运动复合模式可工程化性原则;②基于刀具结构与运动模式确定合理的组合密度、布置规律和姿态协同原则;③破岩方法组合实现破岩作用叠加、相互协同、破岩能力与效率的可增强性和易工程化实现原则;④刀具结构及组合形式、运动复合模式、破岩方法组合与破岩技术原理综合相匹配原则。

针对采掘机械高效破岩(尤其硬岩)方法,基于机械破岩方法的研究发展趋势与性能要求,构建了破岩效力和性能基本评价框架,评价创新方法的有效性。技术发展需经历基础理论、工程技术基础、共性关键技术研究,实现自主创新。

参考文献(References):

- [1] 贾秉义, 陈建, 方秦月. 复杂地质条件下深部煤层瓦斯高效抽采技术探索[J]. 中国矿业, 2023, 32(8): 89-94.
JIA Bingyi, CHEN Jian, FANG Qinyue. Exploration on efficient gas extraction technology of deep coal seam under complex geological conditions[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(8): 89-94.
- [2] 张倩倩, 韩振南, 张梦奇, 等. 截齿破岩机制及截线间距优化试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2172-2179, 2186.
ZHANG Qianqian, HAN Zhennan, ZHANG Mengqi, et al. Experimental study of breakage mechanisms of rock induced by a pick and associated cutter spacing optimization[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(8): 2172-2179, 2186.
- [3] 肖建成, 卢景景, 周辉, 等. 贯入角度对截齿破岩性能与几何排布的影响研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(12): 3372-3384.
XIAO Jiancheng, LU Jingjing, ZHOU Hui, et al. Influence of penetration angle on rock breaking performance and geometrical arrangement of picks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(12): 3372-3384.
- [4] 曹久磊, 俞缙, 张竹清, 等. 考虑破岩模式的TBM滚刀破岩力计算模型[J]. 煤炭学报, 2023, 48(8): 3300-3311.
CAO Jiulei, YU Jin, ZHANG Zhuqing, et al. Force calculation model of TBM disc cutter based on rock breaking mode[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(8): 3300-3311.
- [5] 谭青, 劳同炳, 张桂菊, 等. 静载与冲击加载方式下滚刀破岩特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(1): 101-108.
TAN Qing, LAO Tongbing, ZHANG Guiju, et al. Disc cutter cutting mechanism under static loading and impact dynamic loading conditions[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(1): 101-108.
- [6] 胡思成, 管志川, 路保平, 等. 锥形齿旋冲及扭冲的破岩过程与破岩效率分析[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(3): 87-93.
HU Sicheng, GUAN Zhichuan, LU Baoping, et al. Rock breaking process and efficiency analysis of conical cutting teeth under rotary and torsional impact[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(3): 87-93.
- [7] KOTWICA K, SIENKIEWICZ P. Influence of constructional and kinematic parameters of the new solution of roadheader mining head on the effectiveness of its work[J]. Multidisciplinary Aspects of Production Engineering, 2018, 1(1): 101-107.
- [8] 刘春生, 程硕, 刘延婷, 等. 碟盘刀具截割姿态倾角与破岩模式特征[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 1183-1198.
LIU Chunsheng, CHENG Shuo, LIU Yanting, et al. Cutting attitude inclination angle and rock-breaking mode characteristics of disc cutter[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 1183-1198.
- [9] 刘毅, 曹殿彬, 崔建波, 等. 硬岩地质下镶齿滚刀齿形对破岩性能影响研究[J]. 中国测试, 2024, 50(3): 62-68, 102.
LIU Yi, CAO Dianbin, CUI Jianbo, et al. Study on the influence of tooth profile of insert hob on rock breaking performance in hard rock geology[J]. China Measurement & Test, 2024, 50(3): 62-68, 102.
- [10] 吴泽兵, 席凯凯, 王杰, 等. 仿生耦合PDC单齿的设计及其仿真[J]. 石油机械, 2021, 49(8): 39-45.
WU Zebing, XI Kaikai, WANG Jie, et al. Design and simulation of bionic coupling PDC cutter[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(8): 39-45.
- [11] 李建斌. 中国隧道掘进机技术进展与展望[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(2): 178-189.
LI Jianbin. Advances and prospects of tunnel boring machine technology in China[J]. Modern Tunnelling Technology, 2024, 61(2): 178-189.
- [12] 黄鸿颖, 管会生, 母国旺, 等. 竖井全断面掘进机异型刀盘的滚刀布局[J]. 西南交通大学学报, 2025, 60(3): 704-713, 730.
HUANG Hongying, GUAN Huisheng, MU Guowang, et al. Cutter layout on special-shaped cutterhead for shaft boring machine[J]. Journal of Southwest JiaoTong University, 2025, 60(3): 704-713, 730.
- [13] 刘娇. 马蹄形隧道掘进机刀盘设计探讨[J]. 隧道建设, 2017, 37(S1): 204-211.
LIU Jiao. Discussion on design of cutterhead of horseshoe-shaped tunnel boring machine[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(S1): 204-211.
- [14] 高亚楠, 王云龙. 矿山建设中现代破岩方法综述[J]. 晋控科学技术, 2023(2): 1-8, 61.
GAO Yanan, WANG Yunlong. Review of modern rock fragmentation methods in coal mine construction[J]. Jinneng Holding Science and Technology, 2023(2): 1-8, 61.
- [15] 赵研, 张丛珊, 高科, 等. 超声波辅助PDC切削齿振动破岩仿真分析[J]. 钻探工程, 2021, 48(4): 11-20.
ZHAO Yan, ZHANG Congshan, GAO Ke, et al. Rock breaking simulation

- lation analysis for the ultrasonic vibration-assisted PDC cutter[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(4): 11-20.
- [16] JAMAL S, WITTIG V, BORNER J, et al. Application of high powered laser technology to alter hard rock properties towards lower strength materials for more efficient drilling, mining, and geothermal energy production[J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2019, 20(12): 1-11.
- [17] 李洪盛, 刘送永, 郭楚文. 自振脉冲射流预制裂隙对机械刀具破岩过程温度影响特性[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(7): 2136-2145. LI Hongsheng, LIU Songyong, GUO Chuwen. Effect of crack prefabrication by self-oscillating pulsed jet on the temperature of conical pick during rock breaking processes[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(7): 2136-2145.
- [18] CICCUCO R, GROSSO B. Improvement of disc cutter performance by water jet assistance[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(2): 733-744.
- [19] 刘春生, 刘延婷, 李德根, 等. 轴向振动截割下圆盘刀刃与煤岩作用机制及其载荷模型[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(1): 484-496. LIU Chunsheng, LIU Yanting, LI Degen, et al. Interaction mechanism and load model between disc blade and coal rock under axial vibration cutting[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(1): 484-496.
- [20] 任春平, 张训洪, 赵中旭. 不同运动参数对截齿截割含夹矸煤岩性能影响模拟研究[J]. *中国矿业*, 2024, 33(6): 148-157. REN Chunping, ZHANG Xunhong, ZHAO Zhongxu. Simulation study on the influence of different motion parameters on the performance of pick cutting coal rock containing gangue[J]. *China Mining Magazine*, 2024, 33(6): 148-157.
- [21] 任春平, 李佰顺, 马化凯. 不同工况对含夹矸煤岩截齿磨损深度影响模拟研究[J]. *中国矿业*, 2023, 32(11): 102-108. REN Chunping, LI Baishun, MA Huakai. Simulation study on the influence of different working conditions on the wear depth of coal and rock picks containing gangue[J]. *China Mining Magazine*, 2023, 32(11): 102-108.
- [22] KOTWICA K. Hard rock mining-cutting or disk tools[J]. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2019, 545: 1-11.
- [23] 刘送永, 李洪盛, 江红祥, 等. 矿山煤岩破碎方法研究进展及展望[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(2): 1047-1069. LIU Songyong, LI Hongsheng, JIANG Hongxiang, et al. Research progress and prospect of coal-rock breaking methods in mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(2): 1047-1069.
- [24] ALEKSEY K, LEONID M, ANDREY B, et al. Stress-deformed state knots fastening of a disk tool on the crowns of roadheaders[C]//Tais-han Academic Forum-project on Mine Disaster Prevention and Control. 2014.
- [25] 刘春生, 王庆华, 李德根. 镐型截齿截割阻力谱的分形特征与比能耗模型[J]. *煤炭学报*, 2015, 40(11): 2623-2628. LIU Chunsheng, WANG Qinghua, LI Degen. Fractal characteristic and specific energy model of conical picks cutting resistance spectrum[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(11): 2623-2628.
- [26] 刘春生, 袁昊, 李德根, 等. 载荷谱细观特征量与截割性能评价的熵模型[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(9): 2468-2474. LIU Chunsheng, YUAN Hao, LI Degen, et al. Meso-feature of load spectrum and entropy model for cutting performance evaluation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(9): 2468-2474.
- [27] 刘春生, 程硕, 李鑫鹏. 基于损伤力学的圆盘刀具振动截割岩石径向载荷[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2022, 32(3): 380-386. LIU Chunsheng, CHENG Shuo, LI Xinpeng. Radial load of vibration cutting coal and rock with disc cutter based on damage mechanics[J]. *Journal of Heilongjiang University of Science & Technology*, 2022, 32(3): 380-386.