

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.06.005

盾构刀盘振动切削性能有限元仿真研究^{*}

童一珏, 蒋建东^{*}, 张 钧, 赵颖娣

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对盾构机刀盘的掘进效率问题,对振动切削原理、刀具运动轨迹与破岩机理、盾构刀盘建模、切削力学模型等方面进行了研究,将振动切削技术运用到盾构刀盘的开挖过程中,对刀盘振动切削过程中各项性能参数进行了分析与对比,提出了在刀盘圆周添加正弦激励改变转速实现振动切削的方法,利用 LS-DYNA 仿真软件分别进行了单把刀具的振动切削及盾构刀盘振动切削过程的数值模拟仿真。研究结果表明,切刀振动切削减阻效果优于滚刀,刀盘在振动切削条件下受力减小,产生的内能增加。

关键词:盾构刀盘;破岩机理;振动切削;数值模拟

中图分类号:U455.3+1;TH113.1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)06-0668-06

Finite element simulation of shield cutter head vibration cutting performance

TONG Yi-jue, JIANG Jian-dong, ZHANG Jun, ZHAO Ying-di

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology,
Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the problem of shield machine excavation efficiency, the vibration cutting mechanism, cutter trajectory and rock breaking mechanism, shield cutter head modeling, cutting mechanics model were researched. The vibration cutting technology was applied to the excavation process of shield cutter head. Every performance parameters during the working process were analyzed and compared. The way of adding sinusoidal excitation to change the rotation speed of cutter head to realize vibration cutting was put forward. The numerical simulation software LS-DYNA was used. Both single cutter cutting and shield cutter head cutting process were tested. The results indicate that scraper is superior to hob in vibration cutting drag reduction effect. Under the condition of vibration cutting, the stress of cutter head is reducing and the internal energy is increasing.

Key words: shield cutter head; rock breaking mechanism; vibration cutting; numerical simulation

0 引 言

盾构机是一个具备多种功能于一体的大型地下隧道开挖衬砌成套设备,盾构刀盘作为其中的核心部件,具有开挖土体、稳定掌子面、搅拌渣土等重要作用^[1]。

刀盘上各种类型刀具与岩土之间的相对运动参数

及类型决定了岩土破坏失效、刀具磨损、岩土切削性能及盾构效率与能耗。国内外针对岩土切削的土壤失效与切削功率的相关研究有振动挖掘作业技术研究^[2],压实土壤高速切削振动减阻及其数值仿真研究等^[3],上述研究表明,土壤在振动载荷的用下强度会显著下降。伴随计算技术的发展,数值算法、理论的成熟,进一步扩大了数值模拟技术在科学研究、工程决策等领

收稿日期:2016-02-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375456)

作者简介:童一珏(1990-),男,浙江杭州人,硕士研究生,主要从事先进制造技术方面的研究. E-mail:531017955@qq.com

通信联系人:蒋建东,男,博士,教授. E-mail:jiangjd@zjut.edu.cn

域的应用。上海交通大学汤华和丁俊宏、天津大学王曰启和李娟^[4]利用 LS-DYNA 建立了盾构刀盘刀具切削土壤的有限元模型,成功对盾构掘进的扭矩计算进行了模拟,数值模拟结果与实验结果相近。

本研究将通过盾构刀盘的设计,针对岩土盾构刀盘在土中稳态振动切削过程,采用数值分析技术进行振动切削过程的有限元数值模拟与仿真。笔者分析相关的刀具切削减阻与土壤失效机理,并通过刀盘外加圆周正弦振动激励实现振动切削,进行岩土切削功率的对比,进一步研究盾构刀盘的振动切削机理及切削性能变化与振动激励参数之间的关系,为岩土盾构刀盘振动切削新方法奠定相关的理论及工程技术基础。

1 盾构刀具运动分析与切削仿真

1.1 振动减阻机理及盾构刀具切削原理

振动掘削,也就是将某种有规律的振动载荷施加与液压挖掘进的执行机构,使执行机构在挖掘作业时以某种方式作往复运动,从而使工作装置在挖掘作业时同时实现振动。研究表明,在各种减阻节能措施中,振动减阻的效果最为明显^[5]。

振动切削是指给刀具施以某种有规律的振动而进行的切削,其基本原理是:刀具在插入土壤时处于振动状态,在振动冲击载荷的作用下,土壤颗粒产生跳动,相互之间传递动能并获得大小不同的加速度,从而使土壤颗粒之间产生大小不同的惯性力;同时作用力的大小和方向都具有随机性,使作用力的合力偏离质心,土壤颗粒失去平衡,产生滑动或滚动现象,导致土壤的剪切强度降低、流动性增加,从而加速土体的破坏^[6]。

盾构刀盘与岩土的接触,实质上是刀具与岩土的接触过程。对于不同的土质、工况、刀盘的种类,刀具的种类与分布也各有不同^[7]。

按切削原理划分,盾构刀具可分为切削刀和滚刀两大类,切削刀适用于开挖软土或破碎软岩类地质,而滚刀适用于开挖硬岩类地质。

切削刀的切削原理主要是在盾构机向前推进的同时,刀具随刀盘旋转对开挖面土体产生的轴向剪切力和径向切削力,不断将开挖面前方的土体切削下来^[8]。滚刀掘进时在岩石的摩擦作用下绕刀轴在开挖面上滚动,依靠挤压力,当滚刀刀刃压力大于岩石抗压强度时,刀刃与岩石接触面处形成一个压碎粉核区,粉核区积聚了大量的弹性变形能,故在周边产生了大

量裂纹,并且裂纹在压力的作用下不断扩展,直到碎岩完成^[9]。

1.2 刀具运动轨迹及土体模型

在不添加振动时,刀具质心的运动轨迹方程为:

$$\begin{cases} x=r\cdot\sin\omega_0t \\ y=r\cdot\cos\omega_0t \\ z=vt \end{cases} \tag{1}$$

添加振动后轨迹方程为:

$$\begin{cases} x=r\cdot\sin(\omega_0+A\sin2\pi ft)t \\ y=r\cdot\cos(\omega_0+A\sin2\pi ft)t \\ z=vt \end{cases} \tag{2}$$

式中: r —刀具旋转半径, ω_0 —刀盘角速度, A —振幅, v —刀盘推进速度, f —振动频率, t —时间。

用 Matlab 仿真得到刀具轨迹曲线如图 1、图 2 所示。

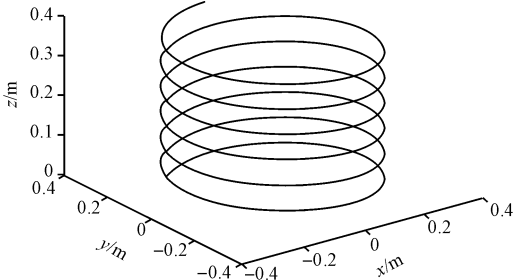


图 1 普通切削刀具运动轨迹

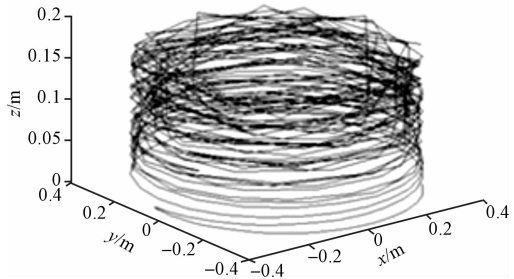


图 2 振动切削刀具运动轨迹

在不添加振动的情况下,刀具运动轨迹是螺旋线,图 2 所示是若干个螺旋线上的点及它们的连线,曲线是根据参数的取值来确定间隔,当时间 t 取的间隔足够短,轨迹就越趋近于螺旋线。

对于土体而言,它既不是理想的弹性材料,也不是理想的塑性材料,而是应变硬化或软化的弹塑性材料,通过使用与其接近的塑性随动模型能更好地反映其非线性特征^[10]。塑性随动模型与应变率相关,可考虑失效。通过在 0(仅随动硬化)和 1(仅各向同性硬化)间调整硬化参数来选择各向同性或随动硬化。应变率采用 Cowper-Symonds 模型,用与应变有关的因数表示屈服应力:

$$\sigma_y=\left[1+\left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^{\frac{1}{p}}\right](\sigma_0+\beta E_p\epsilon_p^{\text{eff}}) \tag{3}$$

式中: σ_0 —初始屈服应力; ε —应变率; C, P —应变率参数; $\varepsilon_p^{\text{eff}}$ —有效塑性应变; E_p —塑性硬化模量,其计算根据公式:

$$E_p = \frac{E_{\tan} \cdot E}{E - E_{\tan}}$$

(4)

式中: E —弹性模量, $E_{\tan}$ —切线模量。

土体模型材料参数参照论文灭茬刀辊仿生减阻研究中仿真实验给出^[11],选用的是 Plastic Kinematic 材料模型,数据如表 1 所示。

表 1 土体模型材料参数

参数	数值
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1 910
弹性模量/Pa	1×10^6
泊松比	0.4
屈服应力/Pa	8×10^5
切线模量/Pa	1×10^5
硬化参数	0
应变速率/ c	41
应变速率/ p	6
失效应变	0.8

表 2 单刀切削土壤仿真结果

仿真类型	滚刀匀速切削	滚刀振动切削	切刀匀速切削	切刀振动切削	滚刀振动匀速切削应力比	切刀振动匀速切削应力比
土体最大等效应力/MPa	0.225 9	0.229 1	0.124 1	0.107 8	0.986	0.869
土体最大正应力/MPa	0.568 6	0.566 1	0.322 2	0.288 8	0.996	0.869
土体最大剪切应力/Pa	6 043	7 519	2 604	2 020	1.244	0.776

2 盾构刀盘建模及有限元仿真

2.1 盾构刀盘选型与设计

针对浙江杭州地区土质,其在地理位置上位于钱塘江下游北岸,地形地貌复杂,具有竖向土层硬软交替、多层组合、厚度变化大等特征。盾构隧道沿线穿过的土层主要有砂质粉土、粉砂层、淤泥质粉质黏土、粉质粘土及钱塘江下部的圆砾层。根据其工作环境,笔者选用面板式刀盘进行模拟仿真,为保证最大出土率大于 1,刀盘开口率一般为 30% 左右,如果刀盘中心的开口率较小,切削下的土就容易粘附在刀盘上,在刀盘中心处极易形成泥饼,影响刀盘效率^[12],因而开口需尽量接近刀盘中心。

仿真采取的盾构刀盘如图 3 所示。

盾构刀盘选用具较高的耐磨性的 Q345 号钢,它是低合金钢($c < 0.2\%$),综合性能好,低温性能好,冷冲压性能,焊接性能和切削性能好。弹性模量为 2×10^5 MPa,泊松系数为 0.3,密度为 7.8×10^3 kg/m³。刀盘直径为 800 mm,用于实验仿真。刀盘角速度 0.15 rad/s,盾构推进力的设计原则是总推进力必须大

1.3 单刀切削仿真实验

本研究选取单把滚刀和单把切刀对土体分别进行切削仿真。在掘进速度、切削角等参数相同的条件下,使刀具随刀盘的原有角速度 ω_0 变为:

$$\omega = \omega_0 + A \sin 2 \pi f t$$

(5)

式中: $\omega_0 = 0.157$ rad/s; A —振幅, $A = 0.157$; f —频率, $f = 0.0167$ Hz。

刀具的受力可分为运动方向上的正应力和切向应力,等效应力反映了土体破坏情况及刀具的损耗情况,运动方向上正应力决定了刀盘的驱动功率的大小,切向应力则决定了刀盘工作过程的稳定性。

取刀具平移速度为 1.6 mm/s,最大切削深度为 128 mm,仿真结果如表 2 所示。

比较振动与匀速切削各向应力比值可知,切刀振动切削过程各项应力减少的比率都高于滚刀。刀具在该仿真条件下,添加振动对于切刀产生的切削效果更好。

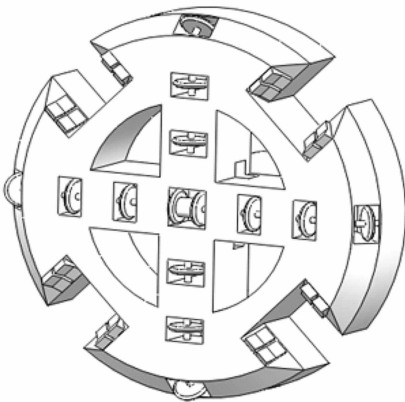


图 3 盾构刀盘

于各种推进阻力的总和。

在实际设计与施工中,根据经验公式^[13],推进力为:

$$F = \frac{1}{4} \cdot \pi D^2 p_j$$

(6)

式中: p_j —单位掘削断面上的经验推力,取值范围为 700 kN/m ~ 1 200 kN/m; D —刀盘本体直径。

土压系列盾构一般采用偏高一点的值,为保证刀盘具有足够强度,取 p_j 为 1 200 kN/m。计算得盾构推进力 $F = 603.19$ kN,刀盘受力面积为:

$$S=\frac{\pi}{4}D^2\times0.7=0.352\text{ m}^2\tag{7}$$

刀盘面推力压强为:

$$P=\frac{F}{S}=1.71\times10^6\text{ Pa}\tag{8}$$

刀盘总体的开口面积约为 0.182 m²,故开口率为 36.3%,符合面板式刀盘要求,刀盘面板厚度为 140 mm,根据材料密度估算刀盘质量为 358.8 kg。刀盘后采用中心支承,使用直径 150 mm,长 180 mm 的圆轴对刀盘进行支承。

有研究表明,刀刃倾角 45°时有利于切削,故刀盘外侧采用 40 mm×45°的倒角,刀盘中心采用 1 把双刃滚刀,滚刀刀刃间距 50 mm,,中心开口尺寸 80 mm×80 mm,边开口尺寸 50 mm×80 mm,刀座间距 70 mm,单刃滚刀总数为 12,其中边滚刀 4 把,滚刀刀刃直径为 72 mm,切刀总数 16 把。为方便中心位置出土,本研究在中心距刀盘前面板处 40 mm 到 80 mm 处开一个尺寸为 180 mm×180 mm 的矩形槽。滚刀轴距前面板的中心距离为 10 mm,滚刀刀刃高出面板高度 26 mm,切刀刀刃高出面板高度 14 mm,确保了滚刀与切刀 12 mm 的高度差,滚刀先接触土体进行破岩。刀具配置上尽可能使每个刀具的破岩量相等,磨损量相似,刀盘不产生倾覆力矩,以提高刀具寿命和掘进效率。

2.2 刀盘静力学分析

本研究用 ANSYS 对刀盘进行静力学仿真,根据经验公式,刀盘取总扭矩 $T=10.24\text{ kN}\cdot\text{m}^{[14]}$,推力压强 $P=1.71\times10^6\text{ Pa}^{[15]}$ 。刀盘所用材料的屈服极限 345 MPa,屈服安全系数取 $n_s=1.8$,得许用最大应力值为 192 MPa。添加旋转扭矩与刀盘推进力,扭矩载荷以一对力偶的方式施加力在刀盘过直径的两点,根据力臂的不同,在刀盘整前方添加一对 14 222 N 的力偶,连接轴底部添加一对反向 68 267 N 的力偶,由于刀盘推进力的反作用力,在刀盘前端面施加推力压强 1.71 MPa,倒角部分施加推力压强 1.21 MPa,计算得出结论如图 4、图 5 所示。

负载刀盘应力图如图 4 所示。

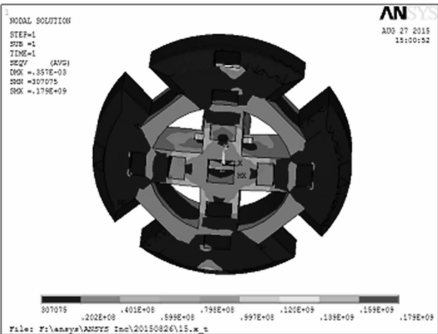


图 4 负载刀盘应力图

由图 4 可知,刀盘受到的最大等效应力为 179 MPa,在靠近刀盘中心空隙较大的位置,应力小于许用安全应力 192 MPa,满足要求。

负载刀盘变形图如图 5 所示。

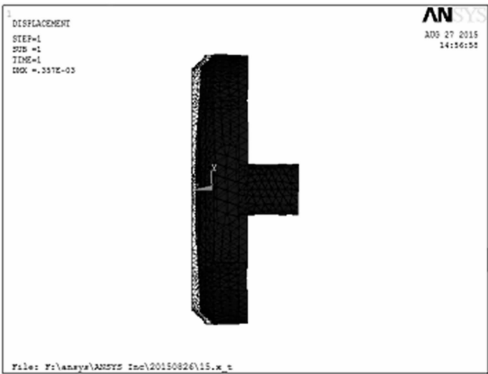


图 5 负载刀盘变形图

图 5 中刀盘最大变形为 0.357 mm,因刀盘正方受挤压力的作用和扭矩作用产生在刀盘圆周外端。在刀盘设计时,刀盘的变形量应该在一定的范围内,要求盾构刀盘的变形量应不应超过刀盘厚度的 3%^[16]。刀盘面板厚度为 140 mm,刀盘变形量 0.357 mm<140 mm×0.03=0.42 mm,符合要求。

3 振动切削数值分析与结果

3.1 刀盘动力学仿真流程

本研究设置单元的属性为 Solid164 实体单元,分别定义刀盘及土壤的材料属性,将刀盘的属性定义为刚体,在 ANSYS 仿真过程中统一采用:米-千克-秒-帕的单位制。刀盘密度为 7 800 kg/m³,弹性模量 2×10¹¹ Pa,泊松比 0.3。约束其 x,y 两个方向的位移及转动。

本研究将建好的切削模型以 parasolid(*.x_t)的文件格式导入 ANSYS 界面。网格划分时应该尽量保证刀盘与土体网格数量接近。定义接触类型为侵蚀接触(ERODING_SURFACE_TO_SURFACE),设置静摩擦系数 0.2,动摩擦系数 0.1,定义刀盘表面为 Contact 面,定义土体表面为 Target 表面。切削模型如图 6 所示。

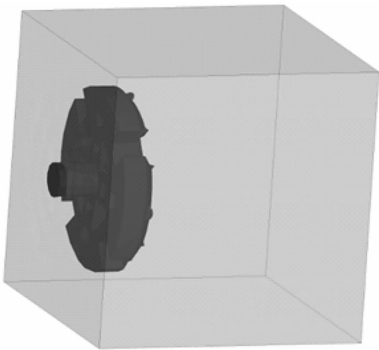


图 6 切削模型

土体模型大小有限,为了模拟无限大的土体区域时,需要在土体除切削面外的表面上定义非反射边界。同时定义数组 RBVZ(移速),RBOZ(转速),TIME(时间),以 EDLOAD 加载方式添加在刀盘上。此处将刀盘转速与时间的关系设置为正弦函数,转速的平均值与不添加振动时的转速一致。由于 LS-DYNA 中无法直接添加函数载荷,本研究通过输入数量足够大的两组数据来模拟正弦函数曲线,再以载荷曲线的方式添加到刀盘上。角速度与时间的正弦函数为:

$$y = 157\,000 + 157\,000\sin104\,720x \tag{9}$$

正弦函数曲线通过 81 组数据拟合而成,再加载在刀盘上,曲线共 4 个振动周期。

本研究确保加载无误之后进行求解的控制,一般物理过程的仿真求解时间设置应为毫秒级,设置数值越大求解时间越长,为减少计算时间,定义求解的时间为 24×10^{-5} s,由于求解时间极短,本研究将刀盘的移速和转速进行等比的放大,同时确保刀盘面完全进入土体。定义输出步数及时间历程输出步数为 20。输出结果的类型选择 LS-DYNA,同时确保能量开关打开。

3.2 仿真结果对比分析

本研究利用 LS-PREPOST 界面进行后处理,获取仿真结果,得到土体的各向应力云图及切削过程的能量的时间历程曲线。

普通切削正应力图如图 7 所示。

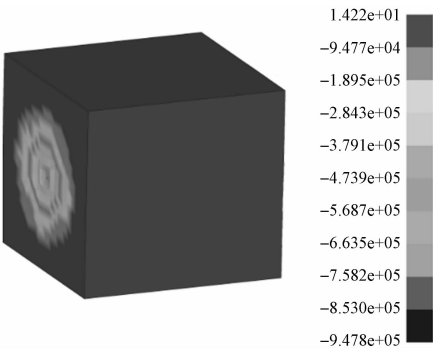


图 7 普通切削正应力图

振动切削正应力图如图 8 所示。

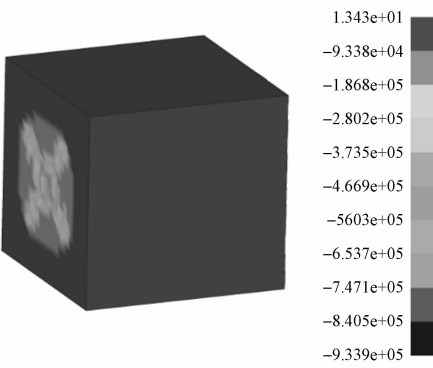


图 8 振动切削正应力图

图 7、图 8 中拉应力为正,压应力为负,除了土体受到的应力形态的不同之外,振动切削的最大压应力 9.339×10^5 Pa 要低于普通切削过程产生的最大压应力 9.478×10^5 Pa,最大拉应力 13.43 Pa 也要低于普通切削时的最大拉应力 14.42 Pa,且在生成的结果文件中每一时刻的结果振动切削的拉压应力都要低于普通切削过程产生的拉压应力。

国内外学者对多种力学模型的土壤切削进行了广泛研究,经过数学处理后可归纳出如下公式^[17]:

$$P = (Rgd^2N_r + cdN_c + qdN_q)w \tag{10}$$

式中: P —总切削力; g —重力加速度; d —切削深度; c —土壤附着力系数; q —作用在土壤表面的载荷密度; w —土壤密度; N_r, N_c, N_q —土壤摩擦、工作部件形状以及部件和土壤之间力学性质有关的系数。

两种切削方式各时段土体受到的最大等效应力值如表 3 所示。

表 3 两种切削方式各时段土体受到的最大等效应力值

步数	匀速切削最大等效应力/Pa	振动切削最大等效应力/Pa
1	18.41	18.8
2	3 963	3 930
3	14 040	13 990
4	29 500	29 350
5	50 540	50 060
6	75 530	74 710
7	100 500	99 280
8	125 500	123 900
9	150 300	148 200
10	175 100	172 600
11	199 700	196 800
12	224 200	220 700
13	248 500	244 500
14	272 600	268 200
15	296 600	291 600
16	320 500	315 000
17	344 200	338 100
18	367 800	361 200

表 3 中显示,随着切削深度的增大土体受到的等效应力逐步增加,与式(10)相符,结果基本一致。有限元仿真软件 LS-DYNA 能较为简便、详细地得到计算结果,所得仿真结果有效可靠。

除了第一步的结果,振动切削在任意时刻产生的最大等效应力都要低于普通切削,而第一步发生在刀盘刚与土体接触的时刻,刀盘刀具和土体会出现不稳定的冲击阻力,当刀盘整体进入土体内稳态切削时,各时刻振动切削所产生的最大应力值小,因此可以得出结论:稳态切削时,在刀盘圆周方向添加振动可以有效地减少切削产生的总应力与切削方向上的推进力,减少了刀具的损耗及驱动功率。

与单刀切削相比,可以发现刀盘振动切削的减阻效果有所下降,这是由于刀盘面板直接与土壤接触所引起的。

根据能量守恒,刀盘切削总能耗主要由刀盘动能与内能组成,对于两种切削方式,振动刀盘运动过程平均转速与普通切削时转速相等,势能不变,因此运动过程产生的内能差异决定了刀盘切削总能耗差异。普通切削时刀盘产生的内能 5 739.5 J 要低于振动切削时刀盘内能 6 247.2 J。由此可见振动切削有助于减少切削力,但同时增加了刀盘工作的能耗。切削过程中产生的内能随时间的变化如图 9、图 10 所示。

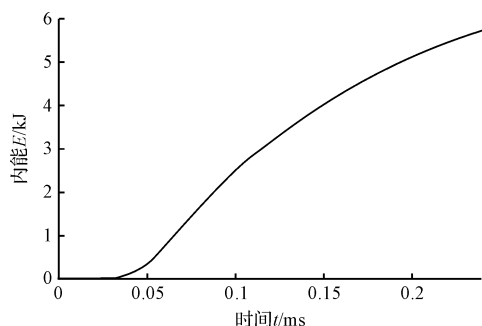


图9 普通切削过程内能时间历程曲线

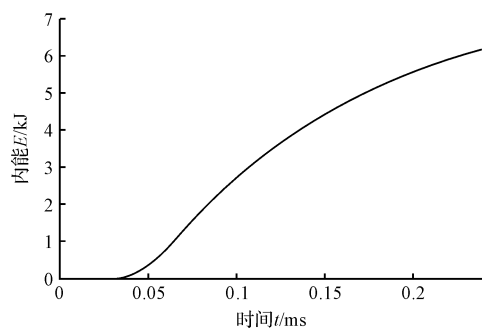


图10 振动切削过程内能时间历程曲线

4 结束语

本研究提出了盾构刀盘的振动切削工作方案,通过对盾构刀盘的设计、切削原理的分析,以及 ANSYS 和动力学仿真模块 LS-DYNA 的运用,对盾构刀盘进行了切削模拟仿真,并得出结果。

通过对仿真结果数据的对比可以得出如下结论:本研究提出的在盾构刀盘工作过程中添加振动能有效减小刀盘和刀具的作业阻力,在该仿真条件下,切刀振动后等效应力比之前减少了 13.1%,而滚刀切削等效

应力仅减少 1.4%,因此振动对于切刀切削的切削力减少效果更为明显。刀盘工作时由于添加振动,等效应力减少约 1%,内能的消耗也由 5 739.5 J 增加到 6 247.2 J。

参考文献(References):

- [1] 殷加顺. 盾构施工注浆对地层变形影响的有限元模拟及试验研究[D]. 天津:天津大学机械工程学院,2009.
- [2] 肖伟. 振动挖掘作业技术研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2013.
- [3] 高洁. 压实土壤高速切削振动减阻及其数值仿真研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2012.
- [4] 沈建奇. 盾构掘进过程数值模拟方法研究及应用[D]. 上海:上海交通大学电子信息与电气工程学院,2009.
- [5] MURO T, TRAN D T. Regression analysis of the characteristics of vibro-cutting blade for tuffaceous rock[J]. *Journal of Terramechanics*, 2003, 40(3): 191-219.
- [6] 蒋建东,高洁,赵颖娣,等. 土壤旋切振动减阻的有限元分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 58-62.
- [7] 宋克志,潘爱国. 盾构切削刀具的工作原理分析[J]. 建筑机械, 2007, 27(3): 74-76.
- [8] 张厚美. 盾构盘形滚刀损坏机理的力学分析与应用[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(1): 61-65.
- [9] 姬广彬. 盾构刀盘的设计研究[D]. 天津:天津大学机械工程学院,2009.
- [10] KARMAKARA S, KUSHWAHA R L, LAGUE C. Numerical modeling of soil stress and pressure distribution on a flat tillage tool using computational fluid dynamics[J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 97(1): 407-414.
- [11] 文立阁. 灭茬刀辊仿生减阻研究[D]. 长春:吉林大学生物与农业工程学院,2009.
- [12] 宋克志,王本福. 常见盾构刀盘型式及选用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2007, 24(6): 44-46.
- [13] 管会生. 土压平衡盾构机关键参数与力学行为的计算模型研究[J]. 成都:西南交通大学土木工程学院,2007.
- [14] 全哲. 盾构刀盘的受力分析及结构优化[D]. 郑州:郑州大学机械工程学院,2012.
- [15] 钟小春,林键,刘洪忠. 土压平衡术盾构机刀盘扭矩力学模型研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(S2): 821-824.
- [16] 夏俊芳,贺小伟,余水生,等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的螺旋刀辊土壤切削有限元模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 34-41.
- [17] 蓉长发,孙光明,吴华. 土壤切削力学[J]. 农业与技术, 1997, 17(2): 3-7.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

童一珏,蒋建东,张钧,等. 盾构刀盘振动切削性能有限元仿真研究[J]. 机电工程, 2016, 33(6): 668-673.

TONG Yi-jue, JIANG Jian-dong, ZHANG Jun, et al. Finite element simulation of shield cutter head vibration cutting performance[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(6): 668-673.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>