

基于离散元法的冷硬铸铁参数标定研究

姜升昊, 王剑松*

沈阳理工大学机械工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2026年8月23日; 录用日期: 2026年9月16日; 发布日期: 2026年9月24日

摘 要

冷硬铸铁具有高硬度和高耐磨性, 广泛用于轧辊、衬板等关键耐磨构件, 但其高脆性使切削加工过程中易产生裂纹和崩边缺陷。为获得适用于冷硬铸铁切削仿真的离散元微观参数, 建立了线性粘弹性摩擦键合平行键离散元模型, 并通过单轴压缩和三点弯曲数值试验对模型参数进行了交叉验证标定。采用控制变量法分析了颗粒细观泊松比、滚动摩擦系数和颗粒刚度对弹性模量、抗压强度和抗弯强度的影响规律。结果表明, 颗粒细观泊松比对弹性模量影响较小, 在实际取值范围0.24~0.28内, 抗压强度和抗弯强度波动均小于5%; 滚动摩擦系数对弹性模量和峰值强度影响不显著; 宏观弹性模量与颗粒刚度近似呈线性关系, 可根据目标弹性模量反算颗粒刚度。研究结果可为冷硬铸铁切削过程离散元建模和参数标定提供依据。

关键词

离散元法, 冷硬铸铁, MercuryDPM, 参数标定

Parameter Calibration of Chilled Cast Iron Based on the Discrete Element Method

Shenghao Jiang, Jiansong Wang*

School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang Liaoning

Received: August 23, 2026; accepted: September 16, 2026; published: September 24, 2026

Abstract

Chilled cast iron is widely used in key wear-resistant components such as rolls and liners because of its high hardness and excellent wear resistance. However, its high brittleness makes crack initiation and edge chipping likely to occur during machining. To obtain microscopic parameters suitable for discrete element simulation of chilled cast iron cutting, a linear viscoelastic frictional bonded

*通讯作者。

parallel-bond discrete element model was established. The microscopic parameters were calibrated and cross-validated through numerical uniaxial compression and three-point bending tests. The effects of particle mesoscopic Poisson's ratio, rolling friction coefficient and particle stiffness on elastic modulus, compressive strength and flexural strength were investigated by the control variable method. The results show that the particle mesoscopic Poisson's ratio has little influence on the elastic modulus. Within the practical range of 0.24~0.28, the fluctuations of compressive strength and flexural strength are both less than 5%. The rolling friction coefficient has no significant effect on the elastic modulus or peak strength. The macroscopic elastic modulus is approximately linearly related to particle stiffness, which makes it possible to calculate particle stiffness from the target elastic modulus. The research results can provide a basis for discrete element modeling and parameter calibration of the cutting process of chilled cast iron.

Keywords

Discrete Element Method, Chilled Cast Iron, MercuryDPM, Parameter Calibration

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

冷硬铸铁是采用金属型激冷工艺制备的特殊铸铁材料。该材料兼具优异耐磨性、抗热疲劳性与抗冲击性,是典型的高脆性难加工金属材料[1][2],广泛应用于冶金、矿山、通用机械等领域,是热轧轧辊、破碎机衬板、机床导轨等核心耐磨构件的关键磨件。然而,冷硬铸铁的高脆性导致其切削加工时极易产生崩边裂纹和亚表面损伤,对刀具强度和工艺系统刚性提出了极高要求。

针对冷硬铸铁切削过程中易出现裂纹萌生、扩展等非连续破坏现象,离散元法(DEM)[3]具有较好的适用性。该方法将连续材料离散为一系列相互作用的颗粒,并通过颗粒间可断裂的粘结键表征材料内部的承载与断裂行为。当粘结键应力超过强度阈值时,键合单元可自然失效并形成微裂纹,裂纹随后随键合断裂的空间扩展而逐步发展,无需预先设定裂纹扩展路径。因此,DEM能够较为直观地描述冷硬铸铁等脆性材料切削过程,为揭示脆性金属切削断裂机理提供了有效手段。然而,DEM模型中的微观参数,如颗粒刚度、摩擦系数和键合强度等,难以通过常规宏观力学试验直接测量,必须通过单轴压缩、三点弯曲等基础力学数值试验与宏观实验结果对比标定确定。谭援强、龙雪、狄少丞等[4]-[12]在岩石、陶瓷、脆性金属等材料的DEM研究中均采用这一思路,通过匹配宏观应力-应变曲线、峰值强度和破坏形态反演微观参数,验证了该方法的通用性与有效性,这是所有DEM连续体模拟研究的前提和基础。

在模拟脆性连续体方面,2004年Potyondy和Cundall提出的粘结键颗粒模型(BPM)[8]奠定了DEM模拟连续体力学行为的理论基础。张学朋等[9]采用PFC2D软件的黏结颗粒模型(BPM)开展双轴压缩数值模拟,通过试错法完成细观参数标定,对比模拟与室内试验的宏观力学响应、破坏形态。赵全满等[10]分析混凝土细观参数对宏观力学性能的影响规律,完成不同强度等级混凝土细观参数标定,验证了离散元方法模拟水泥混凝土细观破坏机理的可行性。谭援强、杨冬民等[11][12]采用离散元法(DEM)针对单晶硅微切削加工过程开展仿真研究,验证了离散元法模拟脆性材料加工裂纹萌生、扩展的有效性。该模型已被广泛应用于岩石、混凝土、陶瓷、玻璃等各类非金属脆性材料的力学性能模拟,成功再现了脆性断裂现象,证明了DEM模拟连续体的可行性和可靠性。

在金属材料领域, 刘宏、周里群等[13] [14]利用 PFC2D 软件建立了冷硬铸铁的二维正交切削模型, 验证了 DEM 模拟脆性金属低速切削过程的可行性。作景岳[15]采用离散元(EDEM)仿真 TC4 钛合金铣孔的离散元研究, 为 TC4 钛合金孔加工工艺优化提供参考。然而, 现有冷硬铸铁研究多侧重于切削现象和工艺参数分析, 对 DEM 微观参数与宏观力学性能之间关系的研究仍不充分。颗粒刚度、键合强度、颗粒材料泊松比参数和滚动摩擦系数等细观参数如何影响弹性模量、抗压强度和抗弯强度, 仍缺少匹配研究。

针对上述问题, 本文建立了冷硬铸铁的平行键离散元模型, 通过单轴压缩和三点弯曲数值试验完成了微观参数的交叉验证标定, 获得了与宏观力学性能相匹配的模型参数, 并定量分析了颗粒刚度、泊松比和滚动摩擦系数等关键微观参数对材料弹性模量、抗压强度和抗弯强度的影响规律, 揭示了微观参数与宏观力学性能的定量映射关系, 为后续冷硬铸铁切削过程的离散元模拟提供了理论基础和数据支撑。

2. 离散元模型

2.1. 离散元基本原理

离散元法将连续介质离散为大量具有独立物理属性的刚性颗粒, 每个颗粒的运动遵循牛顿第二定律, 采用中心差分法进行时间积分求解。颗粒间的相互作用通过接触模型和键合模型来描述, 当颗粒间的接触力或键合力超过阈值时, 键发生断裂, 材料产生微裂纹, 微裂纹不断扩展最终导致材料破坏。

2.2. 接触与键合模型

DEM 中常用接触模型主要包括线性接触模型和 Hertz-Mindlin 非线性接触模型[16]。Hertz 模型基于弹性接触理论, 接触力与颗粒间重叠量呈非线性关系, 能够较好描述颗粒间真实弹性接触过程, 适用于颗粒堆积、压实以及颗粒流动等问题。

然而, 冷硬铸铁属于典型高硬度、高脆性金属材料, 其切削过程主要表现为弹性变形后的裂纹萌生、扩展以及脆性断裂行为, 而非颗粒间的大尺度弹塑性接触。因此, 本文采用计算效率更高、参数标定更加直接的线性接触模型描述颗粒间弹性作用[8]。该模型将接触简化为弹簧-阻尼器系统, 接触力分为法向分量和切向分量:

$$F_n = k_n * \delta_n + c_n * \frac{d\delta_n}{dt} \quad (1)$$

$$\Delta F_s = k_s * \Delta u_s + c_s * \Delta v_s \quad (2)$$

$$F_s = \min(F_s + \Delta F_s, \mu * |F_n|) \quad (3)$$

其中, F_n 、 k_n 、 c_n 和 $\frac{d\delta_n}{dt}$ 分别为法向接触力、法向刚度、法向阻尼系数和颗粒接触时的法向相对速度; ΔF_s 、 k_s 、 Δu_s 、 c_s 和 Δv_s 分别为切向接触力增量、剪切刚度、切向累积位移增量、切向阻尼系数和颗粒接触时的切向相对速度; μ 为摩擦系数。

在此基础上, 引入平行键模型模拟颗粒之间的连续性。当键合区域承受的法向或切向应力超过强度极限时, 键发生断裂, 从而实现裂纹萌生和扩展过程的模拟。相比仅采用普通接触模型, 平行键模型能够同时描述材料的弹性响应和脆性破坏特征, 更适用于冷硬铸铁类脆性材料。该模型在接触模型基础上, 为相互接触的颗粒施加可断裂的粘结键, 当颗粒间的法向或切向应力超过键的强度阈值时, 粘结键发生断裂, 材料产生微裂纹。粘结力 F_m 的表达式为:

$$F_m = -F_n + C_q V \quad (4)$$

式中, C_q 是粘结阻尼系数; V 是颗粒的相对运动速度。

3. 模型的建立与参数标定

3.1. 冷硬铸铁模型的建立

冷硬铸铁是致密多晶材料, 为尽可能接近其实际微观结构, 本文采用密排六方(HCP)排列方式生成颗粒堆。HCP 排列具有孔隙率低(理论孔隙率约 25.95%)、结构均匀的特点, 能够有效减少因颗粒随机分布引入的数值误差。

本模拟过程的冷硬铸铁物理力学性能相关参数: 尺寸为 25 mm × 25 mm × 50 mm, 半径 $r = 1\text{ mm}$ 的球形颗粒堆, $\rho = 7750\text{ kg/m}^3$ 与冷硬铸铁实际密度一致离散元法中的颗粒密度可直接取为模拟材料的密度 [17] [18]。

3.2. 单轴压缩试验仿真

单轴压缩试验是标定脆性材料弹性模量与抗压强度的标准方法。本文建立的单轴压缩数值试验模型, 上下加载板采用刚性壁边界, 加载速度设置为 0.1 m/s (准静态加载, 避免惯性效应影响), 通过伺服控制实现位移加载。冷硬铸铁的宏观力学性能参数如表 1 所示 [13] [14]。

Table 1. Mechanical properties of chilled cast iron and DEM simulation results
表 1. 冷硬铸铁宏观力学性能与离散元仿真结果

参数	材料	DEM 仿真
E/GPa	170	165
ν	0.25	0.28
σ_b/MPa	700~800	752
σ_c/MPa	1800~2400	1960

生成的颗粒堆模型以及单轴压缩破坏过程的速度云图如图 1 所示, 图 2 为标定后的单轴压缩应力 - 应变曲线。可见裂纹从试样中部萌生并沿轴向扩展, 最终发生劈裂破坏, 与冷硬铸铁的实际破坏模式一致。

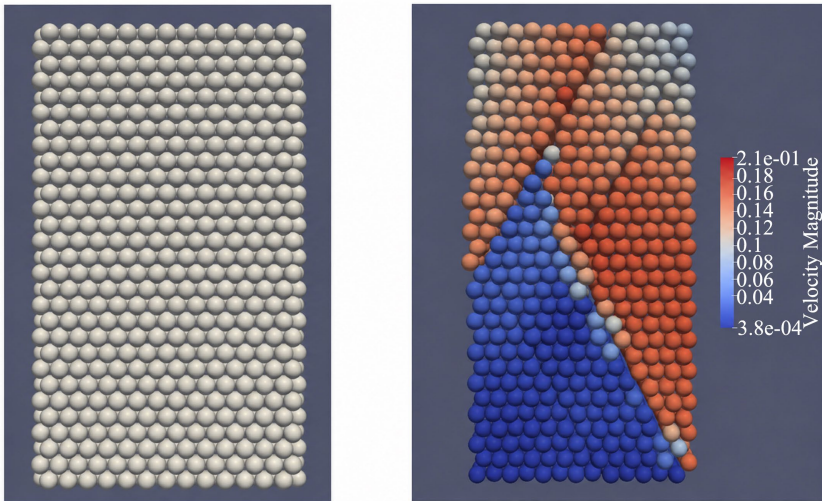


Figure 1. Particle assembly of chilled cast iron and velocity cloud map of its failure under uniaxial compression
图 1. 冷硬铸铁颗粒堆及单轴压缩破坏速度云图

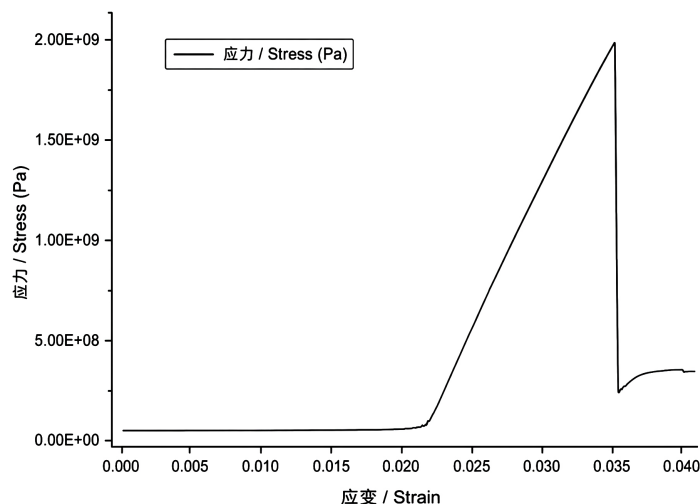


Figure 2. Stress-strain curve under uniaxial compression
图 2. 单轴压缩应力 - 应变曲线

3.3. 三点弯曲模型

为验证标定参数的通用性, 采用相同的微观参数进行三点弯曲数值试验。建立尺寸为 $16\text{ mm} \times 16\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的三点弯曲试样, 该试样的跨度 $L = 64\text{ mm}$, 下支点采用固定刚性壁, 上加载头以 0.1 m/s 的速度向下加载, 直至试样断裂。抗弯强度采用下式计算:

$$\sigma = \frac{3LF_{\max}}{2bh^2} \quad (5)$$

式中, $F_{\max}$ 为断裂载荷; b 、 h 分别为试样宽度和高度。三点弯曲数值试验的模型与破坏云图如图 3 所示。应力 - 应变曲线如图 4 所示, 材料在弹性阶段后迅速发生脆性断裂, 符合冷硬铸铁的力学特性。

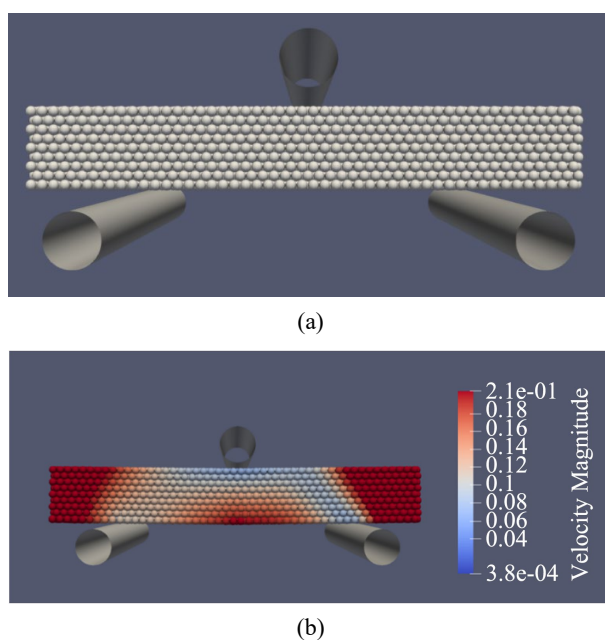


Figure 3. (a) Three-point bending model; (b) Velocity cloud map at the instant of fracture in the three-point bending test
图 3. (a) 三点弯曲模型; (b) 三点弯曲断裂瞬间速度云图

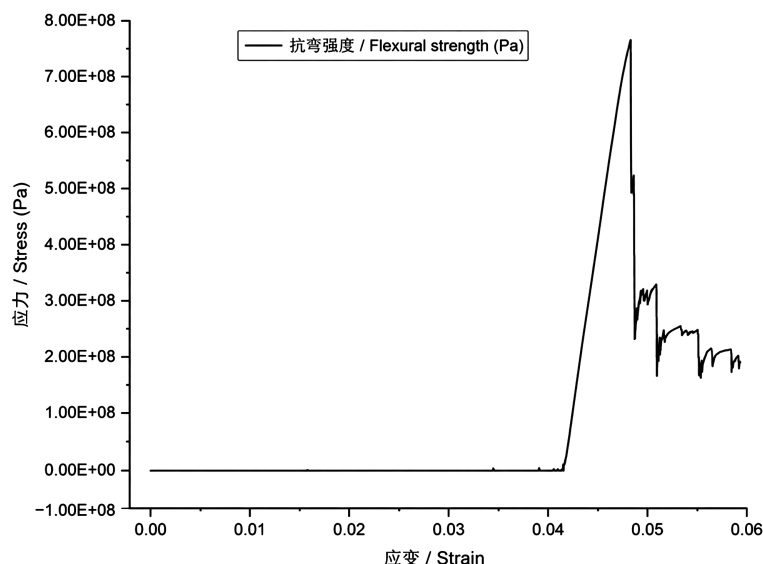


Figure 4. Stress-strain curve in the three-point bending test

图 4. 三点弯曲应力 - 应变曲线

4. 不同参数对模型的影响

离散元模型的宏观力学响应由多个微观参数共同决定, 明确各参数与宏观性能的定量映射关系及作用机理, 是实现精准、高效参数标定的核心[19]。该部分在基准标定参数的基础上, 采用控制变量法, 系统研究颗粒泊松比、滚动摩擦系数、颗粒刚度三个关键参数对冷硬铸铁宏观弹性模量、抗压强度和抗弯强度的影响规律, 揭示其内在作用机制, 为参数标定流程提供理论指导[20]。

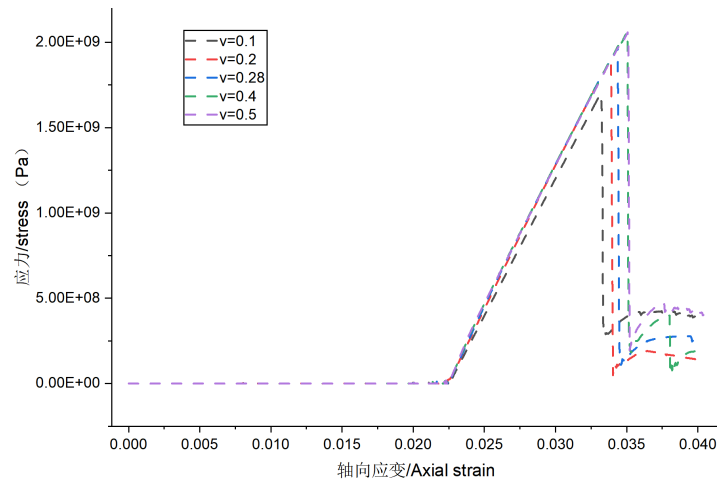
4.1. 细观泊松比的影响

颗粒细观泊松比参数表征材料在单向受力时横向应变与轴向应变的比值, 主导了颗粒间的侧向约束作用。为探究颗粒细观泊松比参数对冷硬铸铁离散元模型力学性能的影响规律, 在其他参数保持不变的情况下, 设置颗粒细观泊松比为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 五个水平进行单轴压缩和三点弯曲数值试验。为揭示参数影响的普遍规律, 本文设置的参数范围宽于冷硬铸铁的实际泊松比范围(0.24~0.28)。

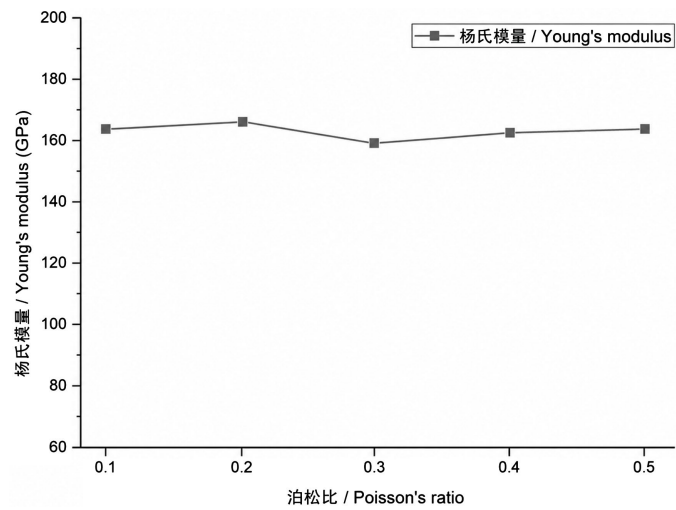
不同颗粒细观泊松比下的单轴压缩应力 - 应变曲线如图 5(a)所示。由图 5(a)和图 5(b)可知, 在 0.1~0.5 的宽范围内, 颗粒细观泊松比对材料弹性模量几乎无显著影响, 弹性模量始终稳定在 160~167.6 GPa, 标准差仅 2.75 GPa。其机理在于: 材料的轴向承载刚度主要由颗粒间的平行键刚度决定, 而颗粒细观泊松比仅影响颗粒的横向变形行为, 对轴向键合刚度的贡献极小。

颗粒细观泊松比对抗压强度呈明显的先升后稳趋势。随颗粒细观泊松比从 0.1 增至 0.4, 抗压强度由 1690 MPa 提升至 2060 MPa, 增幅约 21.9%; 进一步增至 0.5 时, 抗压强度基本保持稳定(2057 MPa)。这是因为颗粒细观泊松比增大使颗粒横向变形更充分, 颗粒间的接触力分布更均匀, 从而提高了材料的整体承载能力; 当颗粒细观泊松比超过 0.4 后, 颗粒的横向变形受到周围颗粒的刚性约束, 强度不再随颗粒细观泊松比增大而显著提高。

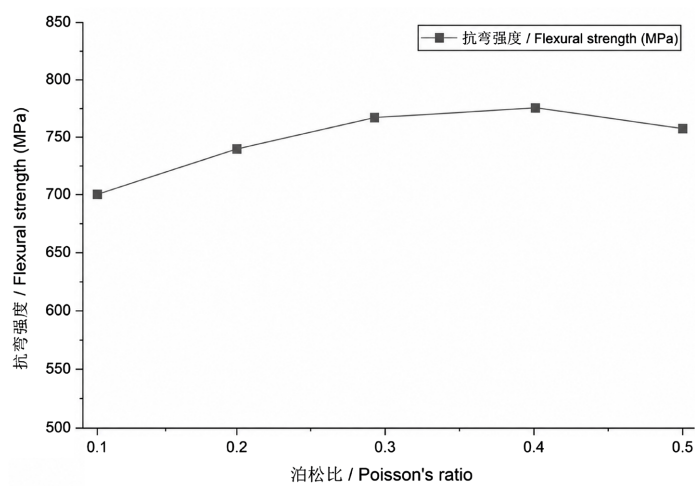
三点弯曲试验结果如图 5(c)显示, 颗粒细观泊松比对抗弯强度的影响规律与对抗压强度的影响规律一致, 呈先升后降趋势。随泊松比从 0.1 增至 0.4, 弯曲强度由 700 MPa 提升至 777 MPa, 增幅约 11%; 进一步增至 0.5 时略有回落。在冷硬铸铁实际泊松比范围(0.24~0.28)内, 抗弯强度的波动小于 4.5%, 与抗压强度的波动幅度(<5%)基本一致。



(a)



(b)



(c)

Figure 5. (a) Stress-strain curves in uniaxial compression under five working conditions; (b) Young's modulus under five working conditions; (c) Flexural strength under five working conditions

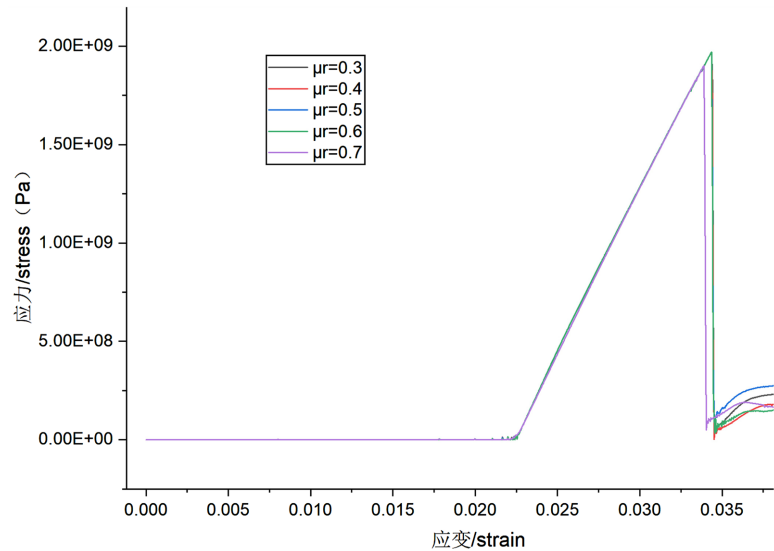
图 5. (a) 5 种工况下单轴压缩应力 - 应变曲线; (b) 5 种工况下的杨氏模量; (c) 5 种工况下的抗弯强度

基于上述结果, 在冷硬铸铁离散元模型的参数标定过程中, 颗粒细观泊松比可直接采用实验测量的平均值(0.25), 无需进行精细标定, 这将大幅简化参数标定流程。

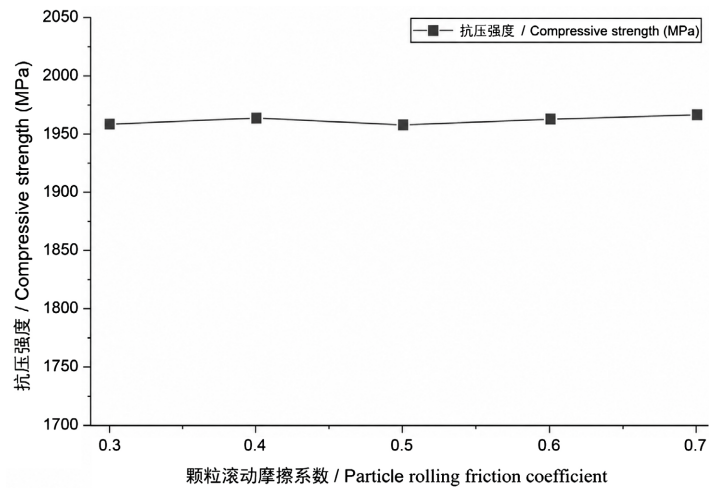
4.2. 滚动摩擦系数的影响

滚动摩擦系数通过颗粒间的力矩传递控制转动阻力, 主要影响材料破坏后颗粒的运动行为和堆积形态。对于平行键模型, 粘结键未断裂时颗粒转动被严格限制, 仅当键断裂后滚动摩擦才会发挥作用。尽管其对峰值强度的影响通常较小, 但现有标定过程中常因过度关注该参数导致效率低下, 因此有必要明确其影响规律。本文设置滚动摩擦系数为 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 五个水平, 保持其他参数不变进行数值试验。

不同滚动摩擦系数下的单轴压缩应力 - 应变曲线如图 6(a)所示, 抗压强度随滚动摩擦系数的变化规律如图 6(b)所示。结果表明, 滚动摩擦系数对材料弹性模量几乎无影响, 在 0.3~0.7 范围内, 弹性模量稳定在 165 GPa 左右, 波动幅度小于 1%。其机理在于: 弹性阶段和峰值前材料内部平行键保持完整, 颗粒几乎不发生转动, 滚动摩擦的作用无法体现。



(a)



(b)

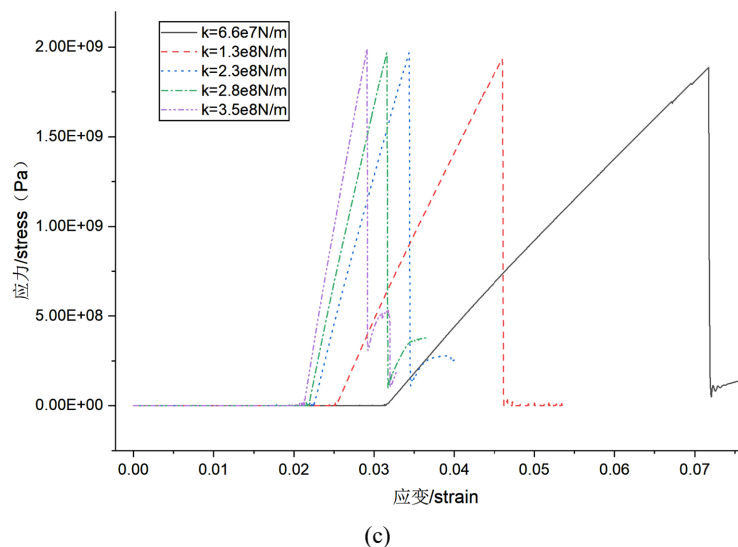


Figure 6. (a) Stress-strain curves with different rolling friction coefficients; (b) Effect of rolling friction coefficient on compressive strength; (c) Stress-strain curves under different particle stiffnesses

图 6. (a) 不同滚动摩擦系数下的应力 - 应变曲线; (b) 滚动摩擦系数对抗压强度的影响; (c) 不同颗粒刚度下的应力 - 应变曲线

滚动摩擦系数对抗压强度的影响同样微弱。当滚动摩擦系数从 0.3 增至 0.7 时, 抗压强度从 1942 MPa 变化至 1978 MPa, 波动幅度小于 1.9%。这是因为冷硬铸铁为典型高脆性材料, 断裂发生在弹性阶段之后, 几乎无塑性变形过程, 颗粒尚未发生明显转动时平行键已全部断裂, 因此颗粒转动对峰值承载能力的贡献极小。三点弯曲试验结果显示, 滚动摩擦系数对抗弯强度的影响规律与抗压强度一致, 波动幅度小于 2.7%。

基于上述结果, 在以研究材料弹性性能和断裂强度为目标的冷硬铸铁离散元模拟中, 滚动摩擦系数可直接设置为常用值 0.5, 无需进行精细标定, 这将进一步简化参数标定流程, 提高标定效率。

4.3. 颗粒刚度的影响

弹性模量是描述颗粒自身抗变形能力的核心参数, 直接由颗粒之间的刚度, 是影响材料宏观弹性模量的最主要因素。为建立颗粒刚度与宏观弹性模量的定量关系, 设置颗粒刚度为 50 GPa、100 GPa、150 GPa、200 GPa、250 GPa 五个水平, 保持其他参数不变进行数值试验。

如图 6(c)所示的应力 - 应变曲线可以清晰观察到: 尽管五个工况的弹性段斜率(弹性模量)差异巨大, 但它们的峰值应力(抗压强度)几乎完全重合。颗粒刚度仅影响弹性阶段的变形大小和应变能积累的速率, 而不改变平行键本身的断裂强度阈值。因此, 在平行键强度保持不变的情况下, 无论颗粒刚度如何变化, 材料的抗压强度都将保持恒定。而在三点弯曲中获得的五种工况的抗弯强度始终稳定在 760~769 MPa 之间, 波动幅度很小。

颗粒刚度是标定宏观弹性模量的唯一核心参数, 可通过上述线性关系式直接由目标宏观弹性模量反算得到颗粒刚度, 无需进行多次试算。这一结论极大地提高了参数标定的效率和准确性。

5. 结论

为建立与冷硬铸铁宏观力学性能相匹配的离散元模型, 本文构建了线性粘弹性摩擦键合平行键模型, 并通过单轴压缩和三点弯曲数值试验对模型微观参数进行了交叉验证标定。在此基础上, 进一步分析了颗粒材料泊松比参数、滚动摩擦系数和颗粒刚度 3 个关键微观参数对宏观弹性模量、抗压强度、抗弯强

度及破坏形态的影响规律。研究结果表明, 基于宏观力学响应和破坏特征的多指标标定方法, 能够有效确定冷硬铸铁 DEM 模型的关键微观参数, 为其切削断裂过程模拟提供可靠的参数基础。同时, 该标定思路也可为其他高硬度、高脆性金属材料的 DEM 参数标定提供参考。主要结论如下:

1) 颗粒细观泊松比参数对冷硬铸铁的弹性模量几乎无影响, 在 0.1~0.5 的宽范围内弹性模量稳定在 160~167.6 GPa, 标准差仅 2.75 GPa。在冷硬铸铁实际泊松比范围(0.24~0.28)内, 抗压强度和抗弯强度的波动均小于 5%, 工程应用中可直接采用实验平均值(0.25), 无需精细标定。

2) 滚动摩擦系数对弹性模量和峰值强度的影响可忽略, 在 0.3~0.7 范围内, 弹性模量波动幅度小于 1%, 抗压强度波动幅度小于 1.9%, 抗弯强度波动幅度小于 2.7%。这是因为冷硬铸铁为高脆性材料, 断裂前颗粒几乎不发生转动, 滚动摩擦的作用无法体现。在以研究弹性性能和断裂强度为目标的模拟中, 滚动摩擦系数可直接取常用值 0.5。

3) DEM 冷硬铸铁的宏观弹性模量和颗粒刚度之间存在严格的近似线性关系, 宏观强度与平行键的键合力之间也存在近似的线性关系, 可根据冷硬铸铁的宏观力学实验参数直接反算离散元的微观参数。

参考文献

- [1] Gobinath, V.M. and Annamalai, K. (2021) Experimental Investigation of Te Addition on Chilled Cast Iron Tappet Manufacturing Process. *Materials and Manufacturing Processes*, **36**, 1299-1304. <https://doi.org/10.1080/10426914.2021.1906894>
- [2] Fraś, E. and Gorny, M. (2007) Mechanism of Silicon Influence on the Chill of Cast Iron. *Archives of Foundry Engineering*, **7**, 57-62.
- [3] Cundall, P.A. and Strack, O.D.L. (1979) A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies. *Géotechnique*, **29**, 47-65. <https://doi.org/10.1680/geot.1979.29.1.47>
- [4] 龙雪. 海洋结构物作用下海冰破坏模式及冰载荷的离散元分析[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [5] 狄少丞. 基于 GPU 并行算法的海洋平台及船舶结构冰荷载的离散元分析[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [6] 陈碧昊. CFD-DEM 耦合下冰载荷计算分析[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [7] 王安良. 基于强度试验和立体监测的海冰离散元模型及工程应用[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [8] Potyondy, D.O. and Cundall, P.A. (2004) A Bonded-Particle Model for Rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **41**, 1329-1364. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.09.011>
- [9] 张学朋, 王刚, 蒋宇静, 等. 基于颗粒离散元模型的花岗岩压缩试验模拟研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(S1): 99-105.
- [10] 赵全满, 张洪亮, 周浩. 基于离散元的水泥混凝土细观模拟试验[J]. *公路交通科技*, 2016, 33(12): 48-55.
- [11] Tan, Y., Yang, D. and Sheng, Y. (2008) Study of Polycrystalline Al₂O₃ Machining Cracks Using Discrete Element Method. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **48**, 975-982. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.01.010>
- [12] 谭援强, 杨冬民, 李才, 等. 单晶硅加工裂纹的离散元仿真研究[J]. *中国机械工程*, 2008, 19(21): 2545-2548.
- [13] 刘宏, 周里群, 邢国. 基于离散元法对冷硬铸铁切削过程的模拟[J]. *机械科学与技术*, 2011, 30(12): 2048-2051.
- [14] 周里群, 李玉平, 肖杨, 等. 基于离散元法对冷硬铸铁切削过程的模拟与工艺优化[J]. *湘潭大学自然科学学报*, 2012, 34(1): 84-86.
- [15] 仵景岳. 基于离散元的 TC4 钛合金高速内冷螺旋铣孔加工特性研究[D]: [硕士学位论文]. 湛江: 广东海洋大学, 2023.
- [16] Weinhart, T., Orefice, L., Post, M., van Schroyen, Lantman, M.P., Denissen, I.F.C., Tunuguntla, D.R., et al. (2020) Fast, Flexible Particle Simulations—An Introduction to MercuryDPM. *Computer Physics Communications*, **249**, Article 107129. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2019.107129>
- [17] Herman, A. (2016) Discrete-Element Bonded-Particle Sea Ice Model DESIgn, Version 1.3a—Model Description and Implementation. *Geoscientific Model Development*, **9**, 1219-1241. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1219-2016>
- [18] 刘佳明, 吴敏敏, 岳翎, 等. PFC3D 模型中类岩材料微观力学参数的校准方法研究[C]//中国地质学会工程地质专

- 业委员会. 2016 年全国工程地质学术年会论文集. 北京: 科学出版社(Science Press), 2016: 1378-1383.
- [19] Aela, P., Zong, L., Yin, Z., Esmacili, M. and Jing, G. (2023) Calibration Method for Discrete Element Modeling of Ballast Particles. *Computational Particle Mechanics*, **10**, 481-493. <https://doi.org/10.1007/s40571-022-00507-4>
- [20] 倪宝玉, 魏宏宇, 王军, 等. 冰的离散元数值模型参数分析[J]. 中国造船, 2023, 64(2): 36-48.