

特种成形

粉末压制中粉末形状对粉体力学行为的影响

张 炜^{1,2}, 袁传牛^{1,2}, 萧伟健^{1,2}, 陈荣昕^{1,2}, 张 宁^{1,2}, 刘 焜³

(1. 福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118;

2. 福建工程学院 福建省智能加工技术及装备重点实验室, 福建 福州 350118;

3. 合肥工业大学 摩擦学研究所, 安徽 合肥 230009)

摘要: 针对粉末压制中的粉末形状与粉体力学行为的关联问题, 基于离散单元法建立了铁基粉末的单轴压制模型, 分析了压制中粉末形状对致密化特征、微观接触力以及宏观应力等力学行为的影响规律。结果表明: 在压制过程中粉体的孔隙率随形状系数 AR 的减小而降低, 配位数随形状系数 AR 的减小而增加。粉体接触力各向异性随形状系数 AR 的减小而逐渐增强, 而各形状粉体的接触各向异性系数 a_c 、 a_n 、 a_t 均经历从突增过渡到稳定阶段的变化过程。此外, 粉体的压制应力快速增加阶段所占比例会随形状系数 AR 的减小而增大; 粉末形状系数 AR 越小, 体系内应力的分布范围越集中。将进一步拓展粉末压制中力学行为的研究理论基础, 为改善粉末零件的致密性提供方法指引。

关键词: 粉末颗粒形状; 粉末压制; 离散元法; 接触力; 应力

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.07.019

中图分类号: TF121

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 07-0138-11

Influence of powder shape on mechanical behavior of powder in powder compaction

Zhang Wei^{1,2}, Yuan Chuanniu^{1,2}, Xiao Weijian^{1,2}, Chen Rongxin^{1,2}, Zhang Ning^{1,2}, Liu Kun³

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Key Laboratory of Intelligent Machining Technology and Equipment, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

3. Institute of Tribology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: For the relationship problem between powder shape and powder mechanical behavior in powder compaction, a uniaxial compaction model of iron-based powder was established based on discrete element method, and the influence laws of powder shape on mechanical behaviors such as densification characteristics, microscopic contact force and macroscopic stress during compaction process were analyzed. The results show that during the compaction process, the porosity of powder decreases with the decreasing of shape coefficient AR , and the coordination number increases with the decreasing of shape coefficient AR . The anisotropy of powder contact force gradually increases with the decrease of the shape coefficient AR , while the contact anisotropy coefficients a_c , a_n and a_t of powders with various shapes all undergo a change process from a sudden increase to a stable stage. In addition, the proportion of rapid increase stage in the compression stress of powder increases with the decreasing of shape coefficient AR , and the smaller the powder shape coefficient AR , the more concentrated the distribution of the internal stress in the system. Thus, the research theoretical basis of the mechanical behavior in powder compaction is further expanded to provide method guidance for improving the compactness of powder parts.

Key words: powder particle shape; powder compaction; discrete element method; contact force; stress

粉末冶金作为一种材料近净成形制造技术, 具有效率高、环保、成本低等优点^[1-2]。因此, 粉末

冶金技术在机械工程、航空航天、医疗等领域被广泛运用。粉末压制作为粉末冶金中的重要成形环节, 其本质是使金属粉末在外界压力之下形成具有一定形状尺寸和力学性能的压坯过程。在粉末压制过程中, 粉末压制应力的变化直接影响着金属零件的密度、密度均匀性等致密化行为, 并对最终压坯成形零件的质量具有显著影响。

收稿日期: 2022-09-16; 修订日期: 2022-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51975174); 福建省自然科学基金资助项目 (2020J01869)

作者简介: 张 炜 (1991-), 男, 博士, 讲师

E-mail: zw1256@fjut.edu.cn

粉末压制力学行为受到国内外学者的广泛关注,同时有一系列研究工作展开。叶先勇等^[3]通过对气雾化 316L 不锈钢球形粉末进行实验,研究分析了粉末粒径、压制压力对材料结构特性的影响规律。曹秒艳等^[4]通过对固体颗粒介质传力特性的研究,发现保持压制应力不变时,压制中的应力传递存在极限距离。Zhang H 等^[5]针对铁基粉末温压过程展开研究,揭示了温压与常规压制情况下上模冲应力状态的变化差异。综上,目前对于粉末压制力学行为的研究多集中于外部力学行为,对体系内部力学行为的研究相对较少。

在粉末压制过程中,影响粉体力学行为的因素有很多,其中粉末颗粒形状将在一定程度上影响粉体颗粒间的接触作用行为,从而可对粉体成形力学行为造成显著影响。目前,对粉末形状的研究多集中在粉体形态结构影响粉体运动状态方面,对于粉末颗粒形状对力学行为影响的关注较为有限。Cavarretta I 等^[6]通过单轴压缩实验发现,在压制应力的作用下,粉体颗粒的几何形状与摩擦共同影响着粉体颗粒旋转。Shinohara K 等^[7]通过对不同形状不锈钢粉末的三轴压缩实验研究发现,内摩擦角会随着颗粒形状复杂程度的增加而增加。Nouguier-lehon C 等^[8]通过离散元方法建立了不同颗粒形状的二维数值模型,研究发现,形状复杂的颗粒的平均绝对旋转值远低于形状规则的颗粒。Yang J 等^[9]通过实验研究了颗粒形状与颗粒材料临界运动状态的关系,研究表明,改变颗粒形状可以改变应力空间和体积压缩空间中的临界运动状态,但从实验角度难以明确颗粒形状对体系内部力学行为的影响。

广泛研究表明,粉末颗粒形状对粉末流动性的影响很大^[10-12],从而进一步影响粉体致密位移重排等过程,同时,形状复杂的粉体在压制过程中会因为粉体间接触状态的转变,造成压制中力学行为的显著差异性。而压制中的力学行为将直接影响粉末产品的成形质量,即力学行为的改变会使粉末产品的硬度、强度、刚度等成形质量特性发生相应的变化。因此,了解粉末形状与力学行为对粉末产品性能的提升至关重要,但目前多数研究仅关注粉末颗粒的形状对粉体运动状态、摩擦行为及颗粒破碎的影响^[13-16],而少有研究全面地从体系内、外部两方面综合考虑粉末颗粒形状对压制中力学行为的影响,进而难以明晰粉末形状及力学行为对最终粉末产品性能的影响作用机制。

此外,目前常见的粉体颗粒行为观测实验手段

如光弹法^[17]、X-Ray 法^[18-19]等,由于实际铁粉粉体材料的尺寸较小及不透光等颗粒材料客观条件的限制,难以通过实验方式对其内部力学行为进行分析,并探究颗粒形状的影响机制。因此,本文结合颗粒物质力学理论,基于离散元法建立铁基粉末压制数值仿真模型,并通过铁基粉末压制方程进行了模型验证,探讨了粉末压制中粉末颗粒形状对粉体致密化结构参数如孔隙率等,以及接触力、应力在内的力学行为的影响。相关的研究为进一步明晰粉末压制过程中的力学特性及粉末颗粒形状的影响,进而为改善金属压坯的密度及均匀性和综合力学性能提供了理论基础。

1 数值模型

1.1 数值理论

由 Cundall P A 和 Stack O D L^[20]提出的颗粒离散元方法(Discrete Element Method, DEM)是研究金属粉末系统力学特性的有效方法。离散元法的核心是运用牛顿第二定律对体系中的每个颗粒进行动力学分析^[21],具体公式为:

$$m_p \mathbf{g} + \sum \mathbf{f}_i = m_p \mathbf{a}_p \quad (1)$$

$$\sum (\mathbf{f}_i \times \mathbf{r}_i) = I_p \boldsymbol{\alpha}_p \quad (2)$$

式中: m_p 为颗粒质量; \mathbf{g} 为重力加速度; \mathbf{f}_i 为颗粒周围的第 i 个接触力向量; \mathbf{a}_p 为颗粒的质心加速度; \mathbf{r}_i 为颗粒周围第 i 个接触到颗粒质心的向量; I_p 为颗粒转动惯量; $\boldsymbol{\alpha}_p$ 为颗粒的角加速度。

除了满足牛顿第二定律之外,颗粒模型还需要满足颗粒之间的接触定律。粉末接触变形本质包含弹性变形和塑性变形两部分,在弹性变形的阶段所用的模型是根据 Mindlin-Deresiewicz 理论^[21]近似得出的一种非线性接触模型。在该模型中各颗粒的接触力 \mathbf{F} 为:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}^h + \mathbf{F}^d \quad (3)$$

式中: \mathbf{F}^h 为非线性赫兹力; \mathbf{F}^d 为阻尼力。

而接触力的两部分组成可描述为:

$$\mathbf{F}^h = -\mathbf{F}_n^h \mathbf{n}_c + \mathbf{F}_s^h \quad (4)$$

$$\mathbf{F}^d = -\mathbf{F}_n^d \mathbf{n}_c + \mathbf{F}_s^d \quad (5)$$

式中: \mathbf{F}_n^h 、 \mathbf{F}_s^h 为赫兹法向接触力和赫兹切向接触力; \mathbf{F}_n^d 、 \mathbf{F}_s^d 为阻尼法向接触力和阻尼切向接触力; \mathbf{n}_c 为接触法向量; \mathbf{n} 为法向; \mathbf{s} 为切向。

赫兹法向、切向接触力,阻尼法向、切向接触力分别由式(6)~式(9)得到:

$$F_n^h = -\frac{2G\sqrt{2\tilde{R}}}{3(1-\nu)}g_p^{3/2} \quad (6)$$

$$F_s^h = k_s \Delta\delta_s \quad (7)$$

$$F_n^d = (2\beta_n \sqrt{mk_n})\bar{v}_n \quad (8)$$

$$F_s^d = (2\beta_s \sqrt{mk_s})\bar{v}_s \quad (9)$$

式中： G 、 \tilde{R} 、 ν 分别为等效剪切模量、等效半径和等效泊松比； g_p 为接触间隙，当 $g_p \geq 0$ 时颗粒间不产生相互作用力； $\Delta\delta_s$ 为切向位移增量； k_n 、 k_s 分别为法向和切向接触刚度； \bar{v}_n 、 \bar{v}_s 为相对法向速度和相对切向速度； β_n 、 β_s 分别为法向和切向临界阻尼系数； m 为有效惯性质量。

而法向、切向接触刚度根据式 (10) 和式 (11)^[21] 可得：

$$k_n = \left[\frac{G\sqrt{2\tilde{R}}}{(1-\nu)} \right] \sqrt{\delta_n} \quad (10)$$

$$k_s = \left[\frac{2(1-\nu)G\sqrt{2\tilde{R}}}{(2-\nu)(1-\nu)} \right] F_n^{h1/3} \quad (11)$$

式中： ν 为泊松比； δ_n 为法向位移增量。

在塑性变形阶段根据应力屈服准则将法向接触力 F_n^p 表示为^[22]：

$$F_n^p = 6\sigma\tilde{d}a - \beta_n\bar{v}_n \quad (12)$$

式中： σ 为屈服应力； \tilde{d} 为等效平均粒径； a 为接触半径。

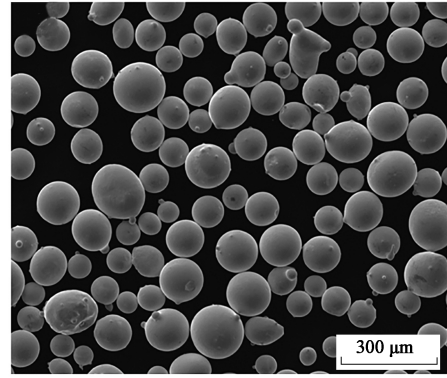
塑性变形阶段的切向接触力为：

$$F_s^p = \lambda\Delta\delta_s F_n^{p1/3} \left[\frac{2(6\tilde{R}^2(1-\nu)G^2)^{1/3}}{2-\nu} \right] + \mu F_n^p(1-\lambda) - \beta_s\bar{v}_s \quad (13)$$

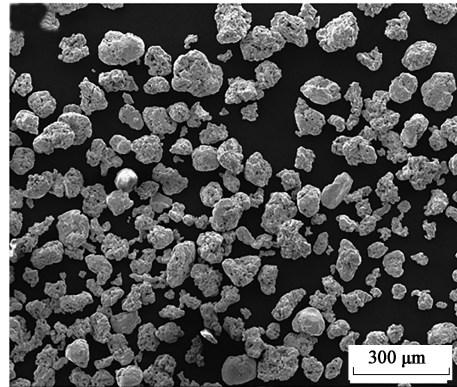
式中： μ 为摩擦因数； λ 为切向接触力系数，如果 $F_s^p < \mu F_n^p$ ，则 $\lambda = 1$ ，否则， $\lambda = 0$ 。

1.2 粉末颗粒的形状选择

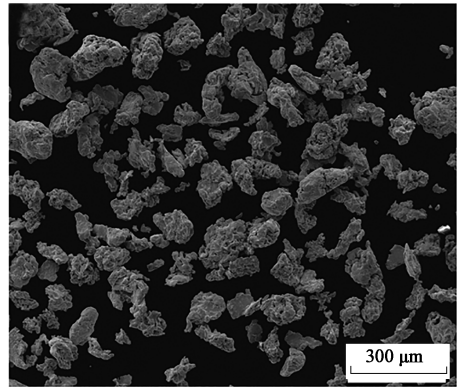
在实际的工业生产中，虽然每种制备方式均难以获得形状完全一致的金属粉末颗粒，但是，不同的制备方式所生产的颗粒形状还是有所差异。例如，水雾化法通常生成形状较一致的球形颗粒^[23]，还原法通常生成形状较一致的多角形颗粒^[24]，球磨法通常生成形状较一致的长条形颗粒^[25]。不同制备方法获取的铁基粉体微观形状图片如图 1 所示。本文利用离散单元法进行数值模拟，探究压制时颗粒形状对金属粉末系统力学行为的影响。利用 Clump 成簇技术，通过颗粒之间的重叠形成近似的球形、多角形、长条形粉体颗粒，如图 2 所示。为了对颗粒的形状进行量化，本文采用 Altuhafi F



(a)



(b)



(c)

图 1 粉末微观形状

(a) 球形 (b) 多角形 (c) 长条形

Fig. 1 Micro shapes of powder

(a) Sphere (b) Polygon (c) Long strip

等^[26]提出的形状系数 AR ，如图 3 所示。 AR 为粒子相对两侧的两条切线之间的最小距离 d_{\min} 与最大距离 d_{\max} 之间的比值。球形、多角形、长条形颗粒的 AR 分别为 1.00、0.80、0.67。

1.3 模型建立

建立二维物理模型，模拟铁基粉末的压制过程 (图 4)。该模型高度为 20 mm，宽度为 16 mm，模型符合实际粉末压制模型尺寸^[27]。上模冲墙体可沿

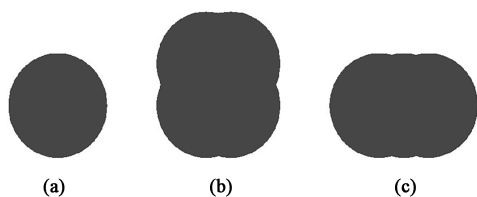


图2 粉末颗粒形状

(a) 球形 (b) 多角形 (c) 长条形

Fig. 2 Powder particle shapes

(a) Sphere (b) Polygon (c) Long strip

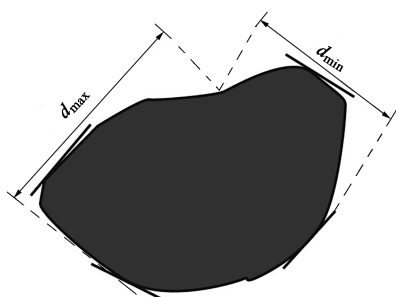


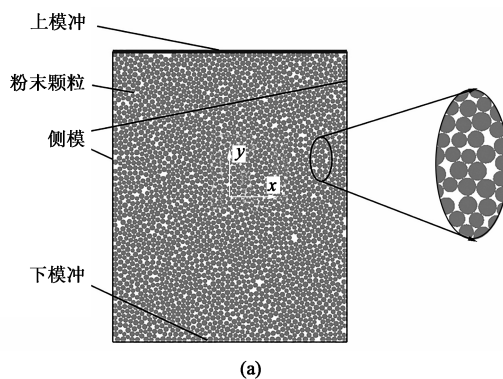
图3 AR的定义示意图

Fig. 3 Definition schematic diagram of AR

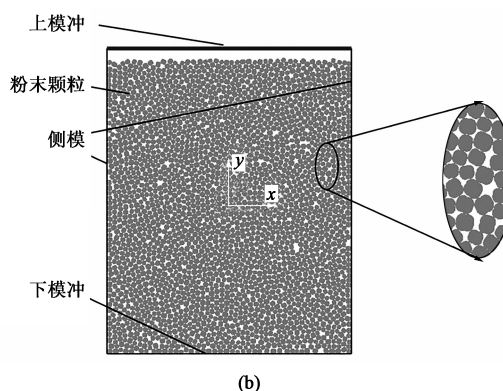
y 轴方向移动, 3 道直线墙分别构成侧模和下模冲, 并保持固定。根据铁粉的参数选取颗粒的泊松比和弹性模量, 分别为 0.25 和 209 GPa。为了防止在压制过程中有颗粒从墙体中溢出, 将墙的法向刚度和切向刚度均设为 $2 \times 10^{12} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。颗粒间摩擦因数与侧壁的摩擦因数均为 0.25^[28]。在侧模与上下模冲区域范围内形成初始孔隙率为 0.2 的初始模型, 粉体颗粒的数目均为 2651 个, 颗粒的面积范围为 $12.56 \sim 706.90 \text{ mm}^2$, 均匀地分布在模型中, 详细参数如表 1 所示。铁粉颗粒在重力下沉作用 ($g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$) 下静置, 直到模型中颗粒整体的速度为 0。然后, 进行粉末压制实验, 即在侧模和下模冲保持位置固定的情况下, 使上模冲以 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度匀速沿着 y 轴负方向加载。直到上模冲给予粉体的压制压强为 600 MPa 时加载结束^[29]。

1.4 模型验证

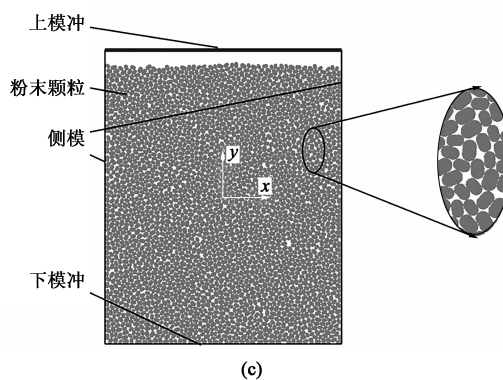
通过压制方程可对金属粉末压制成形力学及致密化程度进行分析, 其亦可用于粉末压制模型的验证。Heckel 压制方程是由 Heckel R W^[30] 提出的粉末压制方程, 用于分析金属粉末压制成形致密化程度的效果理想^[31], 所以本文采用此方程对压坯密度与压制应力间的关系进行研究。Heckel 压制方程的公式为:



(a)



(b)



(c)

图4 离散元模型

(a) 球形 (b) 多角形 (c) 长条形

Fig. 4 DEM models

(a) Sphere (b) Polygon (c) Long strip

$$\ln\left(\frac{1}{1-\rho_v}\right) = TP + \ln\left(\frac{1}{1-\rho}\right) + B \quad (14)$$

式中: ρ_v 为压坯的相对密度; ρ 为压坯的初始相对密度; T 为粉末屈服强度相关的常数; B 为粉末颗粒形状相关的常数; P 为压制压应力。

在离散元法分析过程中, 压坯的相对密度为 1 与模型孔隙率的差值, 压制压强为上模冲所受到的压制应力与上模冲面积的比值。

结合相关压制模拟数据, 得到球形、多角形、长条形粉末的 Heckel 压制方程拟合曲线, 如图 5 所示, 拟合方程与相关系数 R 值如表 2 所示。拟合结

表 1 模型参数
Table 1 Model parameters

参数	数值
模型初始宽度/mm	16
模型初始高度/mm	20
模型初始孔隙率	0.2
颗粒密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7800
最小颗粒面积/ mm^2	706.90
最大颗粒面积/ mm^2	12.56
泊松比	0.25
弹性模量/GPa	209
阻尼系数	0.25
侧模法向接触刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	2×10^{12}
侧模切向接触刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	2×10^{12}
颗粒间摩擦因数	0.25

果中 R 值均大于 0.99, 表明所建立的粉末压制模型符合 Heckel 压制方程, 且材料相关常数 T 、 B 与文献 [30] 中铁粉在压制过程中的值相近, 粉末压制模拟模型的可靠性得到验证。为了进一步验证粉末压制模型的可靠性, 基于已有的实验设备, 将 15 g 高纯度水雾化球形铁基粉末置入直径为 $\Phi 20$ mm 的圆柱体模具中, 使用 DNS300 微机控制电子实验机对粉末进行压制, 当压制应力达到 600 MPa 时终止压制, 获取压坯密度随压制应力的变化曲线, 如图 6 所示。同时, 使用实验相同的粉体参数与模具参数进行压制模拟, 得到粉末孔隙率随压制应力的变化曲线, 如图 6 所示。孔隙率表示的是模型中粉体颗粒未占据的面积 (体积) 与模型总面积 (总体积) 之比, 其值越低, 表明粉体的密度越大。从图 6 中可以看出, 在压制过程中压坯密度随着压制应力的增大, 其增速从加速上升到逐渐向平缓上升过渡, 而孔隙率经历快速下降, 向缓慢降低转变。在压制初期, 因为铁基粉末粉体颗粒之间的孔隙率较大, 受到外界压制应力的作用发生滑移填充, 使粉体的孔隙率快速降低, 并使压坯密度快速增加。同时对实验与模拟的孔隙率进行拟合对比验证, 拟合曲线如图 7 所示。拟合的相关系数 R 值为 0.9838, 表明实验与数值分析获取的孔隙率呈现高度线性相关关系。结果与何咏睿等^[32]得到的二维颗粒孔隙率与三维颗粒孔隙率间的高度线性相关变化规律的结论相吻合。综合图 6、图 7 的结果进一步验证了数值模拟模型的正确性。

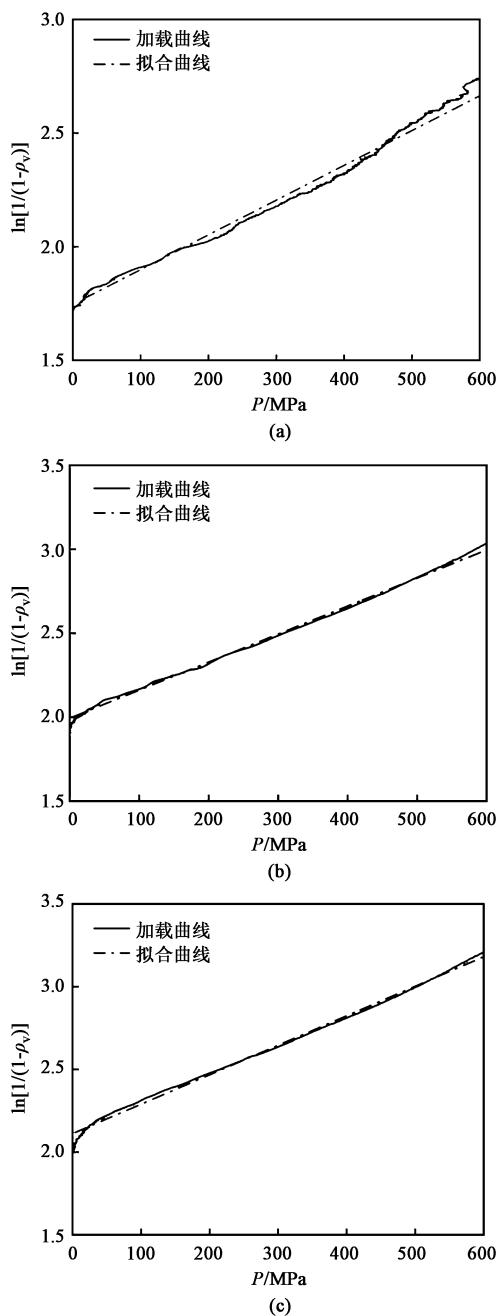


图 5 粉末压制拟合方程
(a) 球形 (b) 多角形 (c) 长条形
Fig. 5 Fitting equations of powder compaction
(a) Sphere (b) Polygon (c) Long strip

表 2 拟合方程与相关系数 R 值
Table 2 Fitting equation and correlation coefficient R values

粉末形状	拟合方程	相关系数 R
球形	$\ln\left(\frac{1}{1-\rho_v}\right) = 0.0015P + 1.7455$	0.9901
多角形	$\ln\left(\frac{1}{1-\rho_v}\right) = 0.0016P + 1.9953$	0.9962
长条形	$\ln\left(\frac{1}{1-\rho_v}\right) = 0.0018P + 2.1123$	0.9981

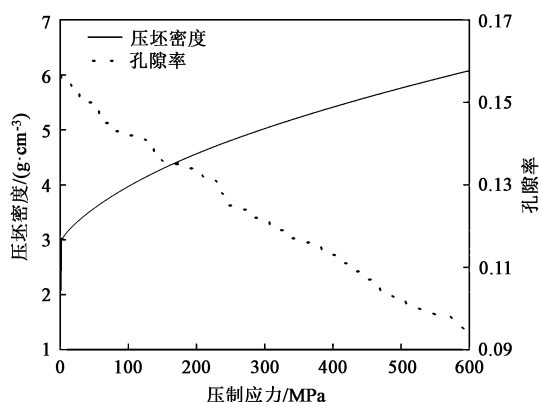


图6 压制实验验证

Fig. 6 Compression experiment verification

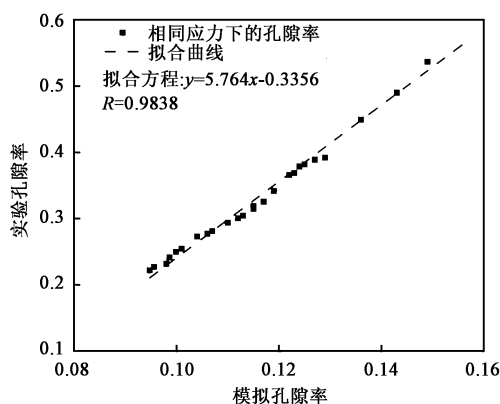


图7 孔隙率对应点

Fig. 7 Corresponding points of porosity

2 结果与讨论

2.1 粉末颗粒形状对致密化的影响

孔隙率与配位数是表征粉末压制过程中粉体致密化程度的重要指标,同时,其受到压制过程中粉体颗粒的相互作用力的显著影响。为研究粉末颗粒形状对孔隙率与配位数的影响,在模型的底部沿宽度轴线位置设置一个虚拟测量圆(测量圆与模型的下模冲相切且半径为0.005 m),来记录3种不同形状粉体在压制过程中孔隙率与配位数的变化规律。孔隙率表示的是模型中粉体颗粒未占据的面积与模型总面积之比,配位数表示的是每个粉体颗粒周围的平均接触颗粒数目,配位数越大说明粉体之间接触越紧密。3种形状粉体的孔隙率与配位数的变化曲线如图8和图9所示。

由于测量圆测量的不是整个模型粉体而是局部模型粉体的孔隙率,所以记录的初始孔隙率与所设

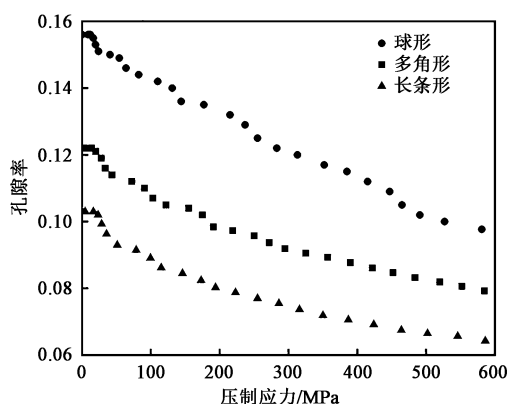


图8 不同形状粉体的孔隙率随压制应力的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of porosity with compression stress for powder with different shapes

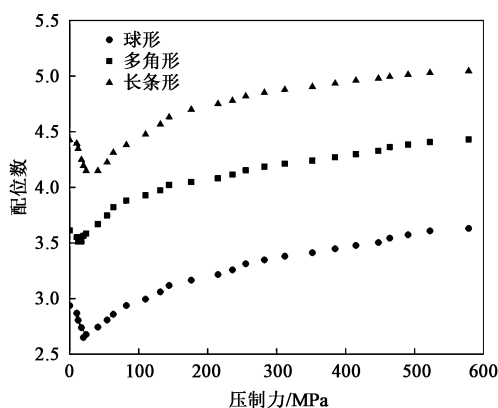


图9 不同形状粉体的配位数随压制应力的变化曲线

Fig. 9 Variation curves of coordination number with compression stress for powder with different shapes

置的初始孔隙率会有一定的差别。如图8所示,重力下沉作用下,粉体的初始孔隙率会随粉末颗粒形状系数 AR 的减小而减小。随着压制的进行,粉体的孔隙率均逐渐下降,且粉体孔隙率的下降速率越来越慢,到了压制后期,孔隙率逐渐趋于稳定。该现象表明,粉体致密化行为经历了快速致密到缓慢致密状态的转变,粉体颗粒之间由于位移和变形互相钩连而形成的机械啮合程度越来越强。

如图9所示,粉体的初始配位数会随粉末颗粒形状系数 AR 的减小而增加,在压制开始阶段,3种类型粉体的配位数会出现一次突降。然后随压制的进行,3种粉体的配位数均会逐渐增加。由于随着粉体的形状系数 AR 的减小,粉末颗粒形状会越趋于扁平,这样导致中心粉体与周围粉体的接触面积变大,接触的概率增加,所以形状系数 AR 较小的长条形粉体的初始配位数最大。模型在不受外力作用时粉体的接触相对稳定,当突然受到外力作用时

3 种类型粉体间的稳定接触状态均被破坏, 粉体之间的相互接触减少导致压制的初期配位数有所下降。但是随着外力的继续作用, 粉体间的接触恢复并进一步的加强, 粉体结构逐渐变得紧密, 粉体配位数逐渐增加。在粉末压制过程中, 提高压坯相对密度的过程对应于提高压坯强度等力学性能的过程^[33]。而形状系数小的粉体的整体孔隙率比形状系数大的粉体低, 配位数更高, 从而表明形状系数较小的粉体有助于致密化行为的展开, 其压坯的相对密度普遍更大, 压坯强度等力学性能将更为优异。

2.2 粉末颗粒形状对接触力的影响

接触力各向异性为压制过程中粉体接触力在各方向上集中情况的体现, 而通过接触方向可对体系内部的微力学特性进行描述。为分析在压制中粉末颗粒形状对粉体接触力的影响, 采用法向接触力在各个方向的接触数目对接触力的各向异性进行量化分析。将模型中各接触力方向按照 20° 为标准区间绘制极坐标图, 极坐标轴表示法向接触力的数目。

按照上述方法分别绘制上模冲压应力为 0、600 MPa 时, 即压制开始及压制结束时的法向接触力数目极坐标图, 如图 10 和图 11 所示。从图 10 和 11 中可以看出, 在上模冲压应力为 0 MPa 时, 3 种形状系数粉体颗粒体系内部各个方向的接触力数目差异性较小, 压制应力从 0 MPa 增加到 600 MPa, 随着形状系数 AR 的减小, 各体系的法向接触各向异性变化越显著。在上模冲压应力为 600 MPa 时, 球形粉体的接触数目远远小于多角形和长条形颗粒的接触数目, 且各体系内 y 方向的法向接触力数目均比 x 方向的法向接触力数目多。随着形状系数 AR 的减小, 各体系内 y 方向法向的接触力数目与 x 方向法向的接触力数目的差值会增大。说明随着粉末颗粒形状系数 AR 的减小, 各体系的各向异性更为显著, 表现出更强烈的接触方向集中性。这一现象主要是由于随着加载的进行, 粉末体系受到 y 轴方向的轴向载荷会逐渐增加, 为了抵抗轴向载荷, 体系通过增加粉体之间的 y 向接触密度维持颗粒结构, 使体系再次达到平衡状态。当模型受到上模冲的压制应力时, 体系内的颗粒受到外力的作用会发生旋转。在压制过程中, 形状系数 AR 小的粉体颗粒的接触面积更大, 更容易形成接触去抵抗轴向载荷。所以在压制应力为 600 MPa 时, 多角形和长条形粉体 y 方向的接触数目要大于圆形粉体 y 方向的接触数目。形状系数越小, 体系内接触力的各向异性越明显, 这与文献 [34] 中粉末的形状

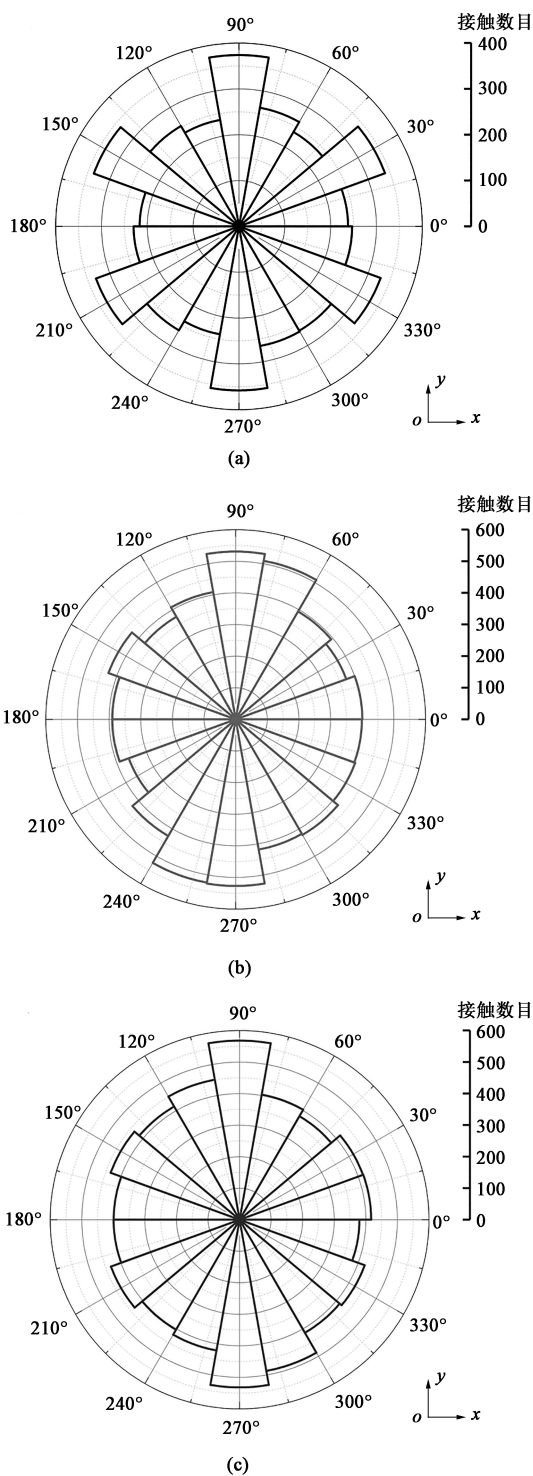


图 10 压制应力为 0 MPa 时的法向接触极坐标图

(a) 球形 (b) 多角形 (c) 长条形

Fig. 10 Normal contact polar plots at compression stress of 0 MPa

(a) Sphere (b) Polygon (c) Long strip

越复杂、压制应力的传递各向异性更明显的结论保持一致。综合表明, 形状系数越小的粉体压制中力的传导更集中于外载荷方向进行, 从而更有利于粉末的致密化展开。

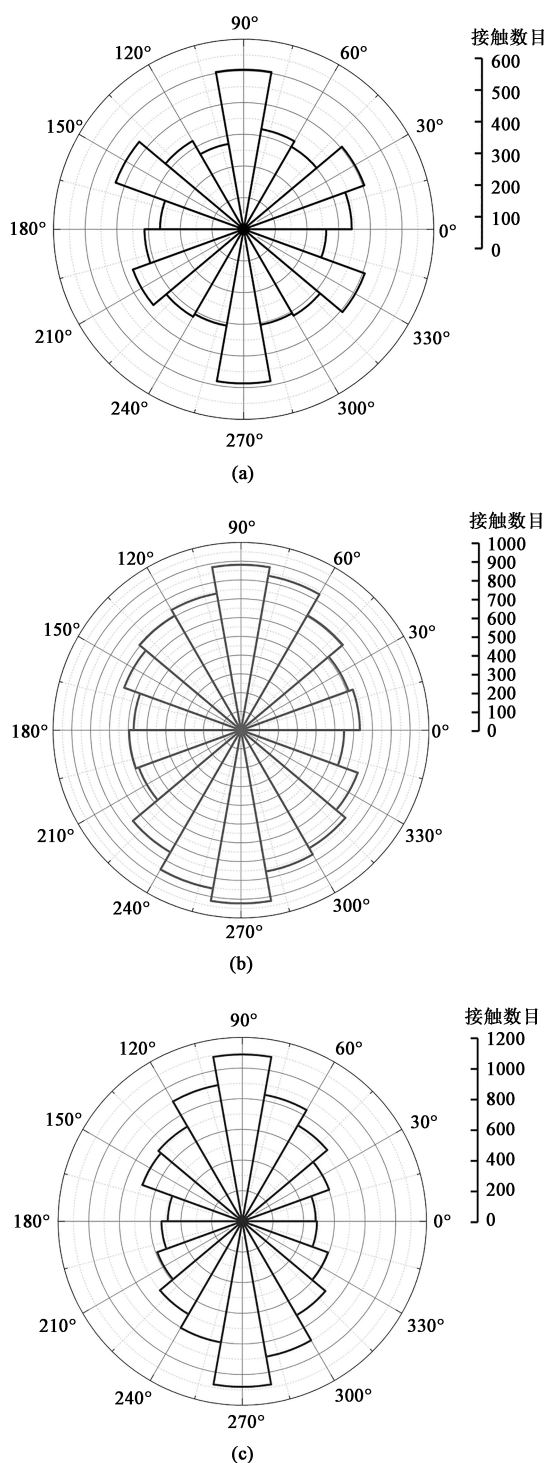


图 11 压制应力为 600 MPa 时的法向接触极坐标图

(a) 球形 (b) 多角形 (c) 长条形

Fig. 11 Normal contact polar plots at compression stress of 600 MPa

(a) Sphere (b) Polygon (c) Long strip

为了进一步定量分析压制过程中粉体接触力各向异性的变化趋势, 根据 Radjai F 等^[35]所提出的各向异性系数展开接触力方向量化分析, 计算方式如下:

$$a_c = 2(\sigma_1^c - \sigma_2^c) \quad (15)$$

$$a_n = 2(\sigma_1^n - \sigma_2^n) / (\sigma_1^n + \sigma_2^n) - a_c \quad (16)$$

$$a_t = 2(\sigma_1^t - \sigma_2^t) / (\sigma_1^t + \sigma_2^t) - a_c - a_n \quad (17)$$

式中: a_c 、 a_n 、 a_t 分别为总接触力各向异性系数、法向接触力各向异性系数及切向接触力各向异性系数, 其值越大表示各向异性越明显; σ_1^c 、 σ_2^c 分别为体系的总接触大主应力和小主应力; σ_1^n 、 σ_2^n 分别为体系的法向接触大主应力和小主应力; σ_1^t 、 σ_2^t 分别为体系的切向接触大主应力和小主应力。

从图 12 所示的接触力各向异性系数变化曲线可以看出, 随着压制应力的增大, 形状系数 AR 越小的粉体, 其 a_c 与 a_t 的数值越大, 说明总接触力各向异性与切向接触力各向异性对形状系数 AR 的变化更为敏感。其次, 从图 12 可以看出, a_c 、 a_n 、 a_t 的变化曲线随着压制进行, 均由前期突增阶段和后期相对稳定阶段构成。但是在 a_n 的变化过程中, 多角形和长条形粉体在突增阶段后会经历一个下降阶段, 然后进入稳定阶段。在压制的前期, 上模冲的压制应力会首先导致上层粉末颗粒的接触稳定性发生破坏, 并对其施加压制应力, 而下层颗粒还处于初始的稳定状态。从而导致各向异性系数在前期有突增阶段, 随着压制的进行, 粉末逐渐进入致密化状态, 体系内的受力逐渐趋于稳定, 所以各向异性系数最终倾向于稳定状态。

2.3 粉末颗粒形状对应力的影响

压制过程中粉体的应力变化是粉体宏观力学行为的重要体现, 其影响着粉末制品的成形性、压缩性等。为研究粉末颗粒形状对应力的影响, 获取压制过程中 3 种不同形状粉体的外部压制应力-应变关系曲线, 如图 13 所示, 轴向应变为上模冲位移与模型初始高度的比值。随着压制的进行, 3 种形状粉体的应力随着应变的增大, 经历了相对缓慢增加阶段到快速增加阶段的变化过程, 但随着形状系数 AR 的减小, 应力相对缓慢增加阶段所占比例逐渐较低。发生该现象的原因主要为: 在压制初期由于粉末颗粒间存在较大孔隙, 粉体之间的相互作用接触位置的限制较少, 受到上模冲的压制应力作用后粉体极易发生位移, 发生位移重排填充空隙过程, 从而导致孔隙率降低, 所以应力随着应变的增加, 压制增加地较为平缓。当压制应变逐渐增大, 粉体之间的间隙大大减小, 出现压缩阻力, 粉体的位移重排变得困难。而该阶段需要更大的压制应力才能使粉体进一步实现压缩致密, 所以导致应力快速增加阶段的产生。3 种形状粉体的压制应力-应变曲线说

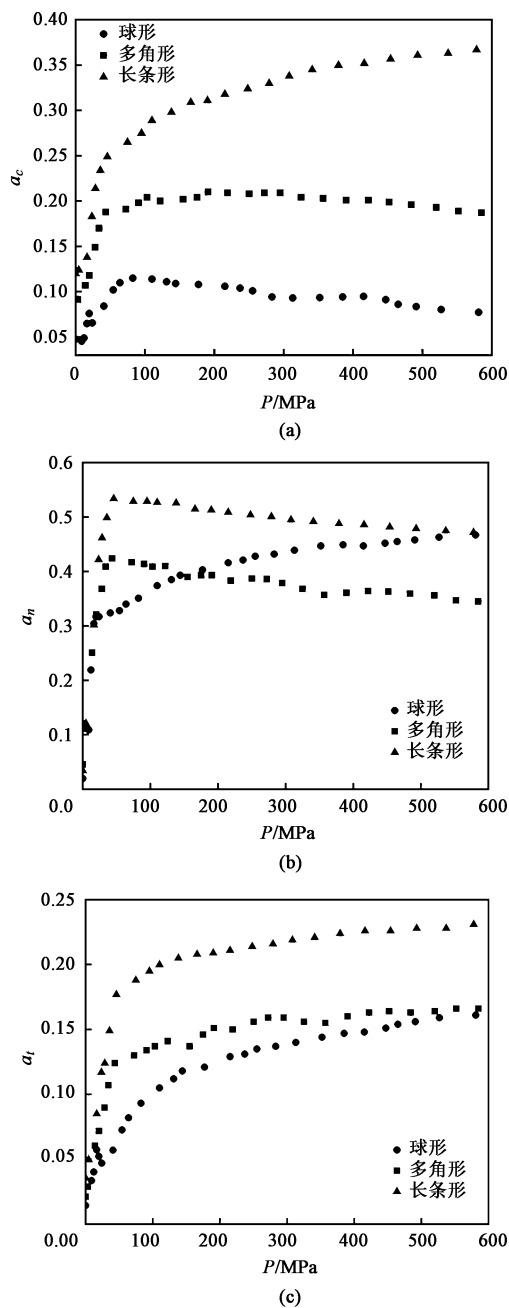


图 12 各向异性系数随压制应力的变化曲线

(a) a_c (b) a_n (c) a_t

Fig. 12 Variation curves of anisotropic coefficients with compression stress

明形状系数 AR 越小, 越容易出现压制应力快速增加阶段, 从而有利于粉体致密化行为展开。

为了进一步探究各形状粉末体系内部应力随压制应力的变化, 本文引入与文献 [36] 相似定义的高应力颗粒占比。高应力颗粒占比指的是主应力大于平均主应力的颗粒数目与总颗粒数目的比值。高应力颗粒占比在一定程度上可以反映粉体在微观情况下整体颗粒应力状态变化。颗粒主应力的计算方式为:

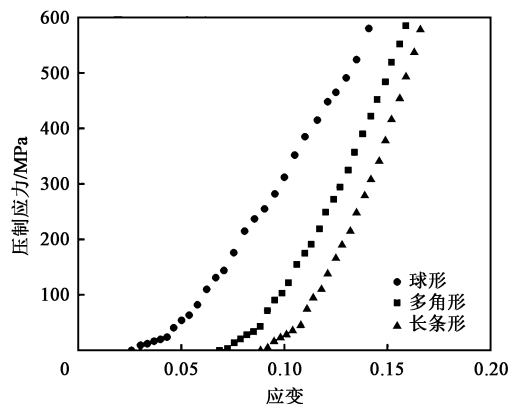


图 13 压制应力-应变曲线

Fig. 13 Compression stress-strain curves

$$\sigma_1^i = \frac{\sigma_{11} + \sigma_{33}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{11} - \sigma_{33}}{2}\right)^2 + (\sigma_{13})^2} \quad (18)$$

式中: σ_1^i 为 i 颗粒的主应力; σ_{11} 为 x 方向的应力; σ_{33} 为 y 方向的应力; σ_{13} 为 xy 方向的应力。

不同形状系数 AR 的铁基粉体颗粒高应力颗粒占比随压制应力的变化如图 14 所示。不同形状粉体其高应力颗粒占比的变化过程基本相同, 3 种形状的粉体高应力颗粒占比均经历了下降阶段、上升阶段、波动阶段和相对稳定阶段。但是在变化程度上有所不同, 形状系数小的粉体抵抗外载荷的能力更强。所以, 在下降阶段和上升阶段, 球形粉体高应力颗粒占比的下降量和增加量相对于多角形和长条形粉体变化更大。此外, 在压制的前期上模冲的压制应力会首先导致上层粉末颗粒发生移动, 并对其施加强压制应力, 从而导致高应力颗粒占比的初始值较低。随着压制的进行粉末逐渐进入致密化状态, 3 种形状粉体的高应力颗粒占比最终均趋向于相对稳定状态。

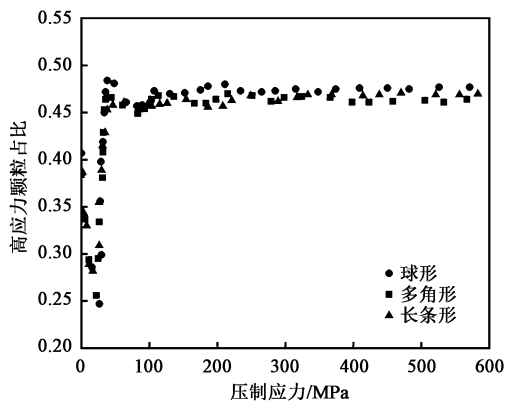


图 14 高应力颗粒占比

Fig. 14 Proportion of high stress particles

为了进一步探究各体系内颗粒应力的分布情况, 获取压制应力为 600 MPa 时各体系内颗粒应力的概率分布密度 (Probability Distribution Function, PDF) 曲线如图 15 所示。PDF 曲线表示的是颗粒应力在区间内所占的比例情况。3 种形状粉体颗粒的应力大部分均集中在 50 MPa 以内, 只有极少部分颗粒的压制应力大于 50 MPa。压制应力在 50 MPa 内时, 多角形和长条形粉体颗粒的应力占比呈反比例函数下降趋势, 而球形粉体颗粒的应力占比则呈现出先波动、再近似直线下降的趋势。这种现象说明形状系数 AR 越小的粉体颗粒的应力大小分布范围越集中。

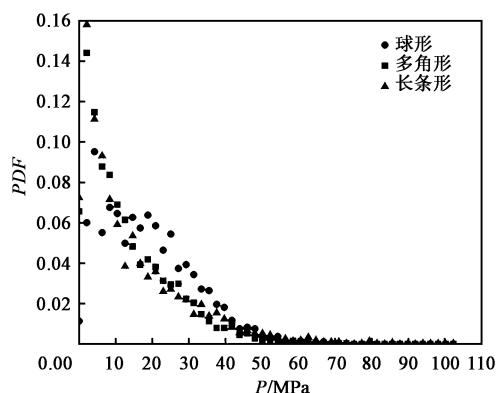


图 15 颗粒应力的 PDF 曲线

Fig. 15 PDF curves of particle stress

3 结论

(1) 随着压制的进行, 铁基粉末的孔隙率稳定下降然后趋于稳定, 配位数会在一次突降后逐渐增加。随着形状系数 AR 的减小, 粉体的孔隙率整体更低, 配位数更高, 表明其致密化情况更为优异, 更为有利于压坯性能的提升。

(2) 粉末颗粒形状可对压制中微观力学行为造成影响。在压制过程中, 形状系数 AR 小的粉体的接触力数目相比于形状系数 AR 大的粉体变化更剧烈, 表现出更强的各向异性; 其次, 3 种形状粉体的接触各向异性系数 a_c 、 a_n 、 a_t 均有从突增阶段到稳定阶段的变化过程。

(3) 粉末颗粒形状与压制中的宏观力学行为具有关联机制。随着压制的进行, 粉体的外部压制应力会经历相对缓慢增加阶段到快速增加阶段的变化, 且形状系数 AR 小的粉体的快速增加阶段所占比例会更大。体系内球形粉体高应力颗粒占比的下降量和增加量相对于多角形和长条形粉体变化更大, 其

有利于致密化行为进行。在压制应力为 50 MPa 内时, 多角形和长条形粉体颗粒的应力占比呈反比例函数下降趋势, 球形粉体颗粒的应力占比呈现出先波动、再下降的趋势, 形状系数 AR 越小的粉末体系颗粒的应力大小分布范围越集中。

参考文献:

- [1] 岳太文, 刘旭辉, 门正兴, 等. 基于热模锻造的 FGH96 粉末冶金高温合金晶粒细化工艺 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (10): 19-24.
Yue T W, Liu X H, Men Z X, et al. Grain refinement process for power metallurgy superalloy FGH96 based on hot die forging [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (10): 19-24.
- [2] 马春宇, 陈湘平, 肖志瑜, 等. 装饰用 316L 不锈钢粉末高速压制成形过程中的孪晶行为 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (8): 130-137.
Ma C Y, Chen X P, Xiao Z Y, et al. Twinning behavior of 316L stainless steel powder for decoration during high velocity compaction forming process [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (8): 130-137.
- [3] 叶先勇, 刘京雷, 徐宏, 等. 粉末粒径和压制压力对 316L 不锈钢多孔材料结构特性的影响 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2013, 18 (3): 409-414.
Ye X Y, Liu J L, Xu H, et al. Effects of powder size and molding pressure on structural characterization of 316L stainless steel porous material [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2013, 18 (3): 409-414.
- [4] 曹秒艳, 董国疆, 赵长财. 基于离散元法的固体颗粒介质传力特性研究 [J]. 机械工程学报, 2011, 47 (14): 62-69.
Cao M Y, Dong G J, Zhao C C. Research on pressure-transfer characteristics in the solid granule medium forming based on the discrete element method [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47 (14): 62-69.
- [5] Zhang H, Zhang L, Dong G, et al. Effects of warm die on high velocity compaction behaviour and mechanical properties of iron based PM alloy [J]. Powder Metallurgy, 2016, 59 (2): 100-106.
- [6] Cavarretta I, O'sullivan C. The mechanics of rigid irregular particles subject to uniaxial compression [J]. Géotechnique, 2012, 62 (8): 681-692.
- [7] Shinohara K, Oida M, Golman B. Effect of particle shape on angle of internal friction by triaxial compression test [J]. Powder Technology, 2000, 107 (1-2): 131-136.
- [8] Nougier-lehon C, Cambou B, Vincens E. Influence of particle shape and angularity on the behaviour of granular materials: A numerical analysis [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2003, 27 (14): 1207-1226.
- [9] Yang J, Luo X D. Exploring the relationship between critical state and particle shape for granular materials [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2015, 8 (1): 196-213.
- [10] 黄培云. 粉末冶金原理 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
Huang P Y. Theory of Power Metallurgy [M]. Beijing: Metallur-

- gical Industry Press, 2004.
- [11] Brika S E, Letenneur M, Dion C A, et al. Influence of particle morphology and size distribution on the powder flowability and laser powder bed fusion manufacturability of Ti-6Al-4V alloy [J]. Additive Manufacturing, 2020, 31: 1-16.
- [12] Haferkamp L, Haudenschild L, Spierings A, et al. The influence of particle shape, powder flowability, and powder layer density on part density in laser powder bed fusion [J]. Metals, 2021, 11 (3): 1-14.
- [13] Jiang M J, Sima J, Li L Q, et al. Investigation of influence of particle characteristics on the non-coaxiality of anisotropic granular materials using DEM [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2017, 41 (2): 198-222.
- [14] 王蕴嘉, 宋二祥, 张千里. 颗粒形状对堆石料力学特性影响的离散元分析 [J]. 工程力学, 2022, 39 (3): 137-146.
Wang Y J, Song E X, Zhang Q L. Dem analysis of the aggregate shape effect on mechanical properties of rockfill [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39 (3): 137-146.
- [15] 祁原, 黄俊杰, 陈明祥. 可破碎颗粒体在动力载荷下的耗能特性 [J]. 力学学报, 2015, 47 (2): 252-259.
Qi Y, Huang J J, Chen M X. Energy dissipation characteristics of crushable granules under dynamic excitations [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 47 (2): 252-259.
- [16] 赵金凤, 严颖, 季顺迎. 基于离散元模型的土石混合体直剪实验分析 [J]. 固体力学学报, 2014, 35 (2): 124-134.
Zhao J F, Yan Y, Ji S Y. Analysis of direct shear test of soil-rock mixture based on discrete element model [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2014, 35 (2): 124-134.
- [17] 宗谨, 周志刚, 王文广, 等. 颗粒固体应力转向比的光弹法探测 [J]. 物理学报, 2017, 66 (10): 177-184.
Zong J, Zhou Z G, Wang W G, et al. Janssen ratio in granular solid measured by photoelastic method [J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66 (10): 177-184.
- [18] Chen C Y, Xie Y C, Yan X C, et al. Effect of hot isostatic pressing (HIP) on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy fabricated by cold spray additive manufacturing [J]. Additive Manufacturing, 2019, 27: 595-605.
- [19] 李强, 张学华, 程思海, 等. 高压粉末制样-X射线荧光光谱法测定富钴结壳样品中 20 种组分 [J]. 冶金分析, 2021, 41 (4): 20-26.
Li Q, Zhang X H, Cheng S H, et al. Determination of twenty components in cobalt-rich crust samples by X-ray fluorescence spectrometry with high-pressure powder pelleting preparation [J]. Metallurgical Analysis, 2021, 41 (4): 20-26.
- [20] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. Géotechnique, 1979, 29 (1): 47-65.
- [21] Mindlin R D, Deresiewicz H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces [J]. Journal of Applied Mechanics, 1953, 20: 327-344.
- [22] 张炜. 金属粉末高速压制中多尺度力学特性及致密化机制 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019
Zhang W. Multi-scale Mechanics and Mechanism of Densification in High Velocity Compaction of Metal Powder [D]. Hefei: Hefei University of Technological, 2019.
- [23] Nouri A, Sola A. Metal particle shape: A practical perspective [J]. Metal Powder Report, 2018, 73 (5): 276-282.
- [24] Song P, Cheng J, Wan L, et al. Preparation and characterization of Mo-15 Cu superfine powders by a gelatification-reduction process [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 476 (1-2): 226-230.
- [25] Sadeghi B, Cavaliere P. Progress of flake powder metallurgy research [J]. Metals, 2021, 11 (6): 931-945.
- [26] Altuhafi F, O'sullivan C, Cavarretta I. Analysis of an image-based method to quantify the size and shape of sand particles [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139 (8): 1290-1307.
- [27] Zhang W, Zhang S, Tan J J, et al. Investigation on the friction mechanism and its relation to the force chains during powder compaction [J]. Journal of the Physical Society of Japan, 2020, 89 (12): 1-9.
- [28] Zhang N, Zhang S, Tan J J, et al. Correlation mechanism between force chains and friction mechanism during powder compaction [J]. Chinese Physics B, 2022, 31 (2): 486-496.
- [29] 王飞. 粉末材料压制过程中阻塞现象研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
Wang F. Research on Jamming Phenomenon in Powder Material Compaction [D]. Hefei: Hefei University of Technological, 2014.
- [30] Heckel R W. Density-pressure relationships in powder compaction [J]. Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 1961, 221 (4): 671-675.
- [31] Dong S C, Qiu F C, Lei P, et al. Evaluation and parameter analysis of compaction equations applied to titanium powder [J]. Powder Metallurgy, 2022, 65 (3): 181-199.
- [32] 何咏睿, 朱晟, 武利强. 粗粒料二维与三维孔隙率的对应关系研究 [J]. 水力发电, 2014, 40 (5): 27-29, 47.
He Y R, Zhu S, Wu L Q. Research on the corresponding relationship between two-dimensional porosity and three-dimensional porosity of coarse materials [J]. Water Power, 2014, 40 (5): 27-29, 47.
- [33] 王海陆, 刘军, 林立, 等. 基于离散元的不同粒径配比粉末压制相对密度与力链分析 [J]. 粉末冶金技术, 2021, 39 (6): 490-498.
Wang H L, Liu J, Lin L, et al. Compacting relative density and force chain analysis of powders with different particle size ratios based on discrete element [J]. Powder Metallurgy Technology, 2021, 39 (6): 490-498.
- [34] 丁朋辉. 热复合磁脉冲粉末致密实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
Ding P H. Experimental Research on the Powder Compacts Prepared by Magnetic Pulse and Heating [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [35] Radjai F, Wolf D E, Jean M, et al. Bimodal character of stress transmission in granular packings [J]. Physical Review Letters, 1998, 80 (1): 61-64.
- [36] Wu W, Ma G, Zhou W, et al. Force transmission and anisotropic characteristics of sheared granular materials with rolling resistance [J]. Granular Matter, 2019, 21 (88): 1-18.