

基于有限元方法的超导线协调变形研究进展

侯弘历¹, 胡乐², 张胜楠¹, 王庆阳¹, 姜浪¹, 刘静¹, 刘吉星¹, 李建峰¹, 张平祥^{1,2}

(1. 西北有色金属研究院 超导材料研究所, 陕西 西安 710016)

(2. 西北工业大学 超导材料与应用技术研究院, 陕西 西安 710072)

摘要: NbTi、Nb₃Sn、MgB₂、Bi系超导材料的结构复杂, 金属间、金属与粉体间及芯丝间的协调变形均匀性决定了线材加工质量和力学性能。线材和模具结构、加工工艺、变形条件是影响其协调变形行为的重要因素, 基于有限元数值模拟方法, 分析和评估多种因素下超导线材的协调变形行为是一种重要工程手段, 能够较为准确和直观地分析多层、多芯复合结构超导线材成形过程协调流变行为及复合相间及其界面处的应力/应变分配。本综述旨在概述超导线材成形过程有限元模拟的研究进展, 归纳总结了超导线材成形有限元模型构建、本构模型选择及边界条件设置等。同时论述了变形参数、模具结构和加工工艺对协调变形行为影响机制及多尺度分析最新研究进展。

关键词: 超导线材; 有限元; 协调变形; 数值模拟

中图法分类号: TH142.8

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2026)03-0830-11

1 引言

NbTi、Nb₃Sn、MgB₂、Bi系超导线材通过集束拉拔技术成形, 制备工艺复杂。其变形为异质复合材料多芯组合体多道次、极端大变形、多尺度的塑性成形过程, 且受多种因素影响^[1-4]。单芯复合结构和多芯组合结构产生的位移约束及异质层间的应变协调, 会引起拉拔时芯丝变形不均匀、畸变、应力集中等问题, 进而导致超导线性能衰减, 甚至出现失超^[5]。

此外, MgB₂、Bi系超导线材的变形更为复杂, 是一个金属间、金属与陶瓷间、芯丝间跨尺度协调变形问题, 涉及到粉体沿轴/径向流动与金属沿轴/径向变形的协调和金属层-粉体层以及芯丝间的应变协调分配等问题。尤其是受径向应力被压实导致其后续流动变形困难, 极易产生应力集中, 进而造成微裂纹、香肠效应、外层金属层破裂等问题^[6]。因此, 研究超导线材成形过程协调变形机制, 阐述协调变形过程线材内部应力/应变分配规律, 对理解复合、多芯结构线材材料流动及其屈服、硬化及内应力演变具有重要的意义, 同时, 也能够为调控和优化成形工艺和模具结构进而提升线材加工性能提供理论指导。

传统常规多组试错试验不能精确分析多种因素对线材协同变形的影响, 当前通过有限元数值模拟方法分析

复合结构线材协调变形行为是一种重要工程手段。该方法能够较为准确和直观地分析多层、多芯复合结构超导线材挤压、拉拔及轧制等体积成形过程中的协调流变行为及变形过程不同复合相间及其界面处的应力/应变分配。因此, 本文概述超导线材成形过程有限元模拟的研究进展、难点以及未来展望, 归纳总结了不同成形工艺下超导线材有限元模型建立、本构模型选择、边界条件设置; 同时, 论述了变形参数、模具结构和加工工艺对协调变形行为影响机制及多尺度分析最新研究进展。

2 金属基低温超导线材有限元数值模型的建立

NbTi和Nb₃Sn超导线材加工过程涉及单芯复合、多芯组装结构线/棒材的挤压、拉拔变形两个关键工序, 复合、多芯、多相材料的变形与单相金属材料不同, 多相间存在模量差异和应力-应变关系差异。对于单相金属材料而言, 利用有限元分析其大塑性变形时, 通常将其认为是均质的、整体的, 而复合、多芯超导材料的变形问题是一个多尺度变形科学问题, 其加工变形行为, 不仅受变形工艺、模具结构的影响, 还与组分相的性能、增强相的形状、尺寸和分布, 以及增强相与基体之间的界面特性等细观特性密切相关^[7-8]。因此, 需要利用有限元方法建立宏观均匀模型、细观代表性单元模型, 分析材料变形过程中

收稿日期: 2025-03-17

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3800200); 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点项目(U24A2068); 陕西省财政厅功能材料专项(1101YC2303); 国家自然科学基金(52172274)

作者简介: 侯弘历, 男, 1991年生, 博士, 西北有色金属研究院超导材料研究所, 陕西 西安 710016, E-mail: houhongli1991@c-nin.com/hongli_hou@mail.sdu.edu.cn

宏观整体和不同相间的应力/应变分配规律。

2.1 挤压变形

$\text{Nb}_3\text{Sn}/\text{Cu}$ 和 NbTi/Cu 单/多芯复合棒材的热挤压过程是一个多变形体、接触复杂、热力耦合的大塑性变形过程, 考虑到基于有限元方法模拟计算的时效性和准确性, 现有相关研究大都采用芯丝均匀化模型建立多芯组合结构的挤压有限元模型。

为了揭示单芯多组元复合结构超导材料挤压过程中的协调变形行为, Wu 等^[9]基于上界理论建立了 $\text{Nb}/\text{Nb}_3\text{Sn}/\text{Cu}-\text{Sn}$ 非轴对称三维模型挤压数值模拟模型, 但为了便于数值计算, 热交换及组元弹性变形对整体变形的影响被忽略, 三层结构均设置为各向同性、均匀的刚塑性材料, 构建了简化的复合结构三维挤压流速场(如图 1a 所示, 图中 V_{fx} 、 V_{fm} 、 V_{fc} 分别为包套、中间层和芯部材料沿 y 轴的流动速度)。为了进一步理解挤压过程复合结构不同相层间的固态焊接行为, Peng 等^[10]同时考虑挤压变形过程内芯与包套间的正向压力和界面剪切应力, 利用 ABQUAS 建立 Nb/Bronze 单芯复合棒材二维轴对称静液挤压弹塑性有限元模型(如图 1b 所示), 并采用了 Von Mises 屈服和各向同性硬化准则描述材料的流变行为, 通过设置不同芯/外包套界面库伦摩擦系数 μ (0.1~0.9)分析界面应力/应变分配及焊接行为。考虑到 Cu/NbTi 超导接头组元层之间力学性能差异对其协调变形和界面固态焊接行为的影响, Sun 等^[11]又提出了差温 Cu/NbTi 包覆挤压方法以减小 Cu 包套层和 NbTi 芯的屈服应力差异, 针对挤压过程 Cu 包套层和 NbTi 芯协调变形和界面兼容问题, 基于刚粘塑性有限元方法, 并考虑界面换热和摩擦效应, 利用 Deform 软件建立了单芯 Cu/NbTi 包覆挤压变形三维轴对称有限元模型(如图 1c 所示), 同时采用 Von Mises 屈服准则和 Arrhenius 高温热压缩本构模型描述了变形体的流变行为, 基于模拟结果分析了外包套筒和 NbTi 芯的挤压应力/应变分配和协同变形差温调控。

多芯超导线材加工时, 多芯组装后, 相邻芯棒间、芯棒与铜外包套间通常存在一定空隙。挤压时各部件存在

位移约束, 使得变形更为复杂, 且易产生变形不均匀、应力集中等问题, 进而诱导棒材出现损伤、裂纹等缺陷。为了揭示热挤压过程 NbTi/Cu 多芯结构复合棒材协调变形机制, 张建英^[2]考虑界面传热和塑性变形引起的变形材料热量变化, 首次利用 ABQUAS 建立了 55 芯 NbTi/Cu 复合棒材热挤压热力耦合弹塑性有限元模型(如图 2 所示), 其几何模型包括 NbTi 芯棒、芯棒外层 Cu 包套、复合棒外层铜包套, 变形体采用自适应网格划分, 并选择 C3D8RT 单元类型; 同时, 采用 Von Mises 屈服准则、Levy Mises 增量理论、各向同性硬化准则分别描述 Cu 、 NbTi 的屈服、塑性流变和硬化行为, 基于模拟结果分析系统研究了工艺参数、模具结构对 NbTi/Cu 多芯复合棒材热挤压中 NbTi 芯棒变形均匀性、整体出口速度分布均匀性的影响规律。

2.2 拉拔变形

集束拉拔过程, 界面接触和内外应力/应变分布不均匀, 会易引起内部芯丝畸变、应力集中, 进而导致拉拔过程出现断芯、断线现象。因此, 研究超导线材拉拔过程中的应力/应变分配、断裂预测和芯丝畸变规律尤为重要。

为了揭示多芯超导线材拉拔过程的应力/应变分配对线材断裂行为的影响规律, Peng 等^[12]基于热力耦合弹塑性有限元方法, 首次利用 ABAQUS 建立了 7 芯内 Sn 的 Nb_3Sn 超导线材三维 1/4 轴对称拉拔变形有限元模型, 如图 3 所示, 建立几何模型时, Cu/Nb 作为一个整体, 与 Sn 作为组件组合, 同时 Cu/Nb 与 Sn 间不设置界面连接; 变形体划分网格后采用八节点、三线性位移和温度实体单元赋予单元属性。而为了进一步分析多道次变形过程亚组元间的协调变形情况, 徐建伟等^[13]利用 Deform-3D 建立了 7 芯 Nb_3Sn 超导线材拉拔三维 1/6 轴对称有限元模型, 并模拟了 3 道次拉拔变形。为了更加精确分析拉拔过程不均匀变形引起的线材断裂, Liu 等^[14]建立了 3 道次 7 芯 NbTi/Cu 超导线材拉拔有限元模型, 并采用 GTN 损伤模型描述线材拉拔过程裂纹产生和断裂。除线材断裂

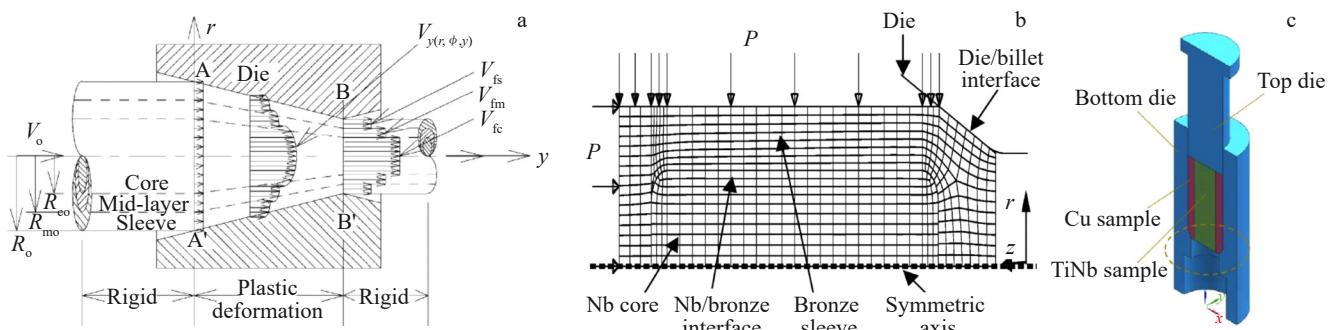


图 1 三维挤压流速场、Nb/Bronze 单芯复合棒二维轴对称有限元模型和 Cu/NbTi 包覆挤压变形三维轴对称有限元模型

Fig.1 Three-dimensional extrusion velocity field^[9] (a), two-dimensional axisymmetric finite element model of Nb/Bronze single-core composite rod^[10] (b), and three-dimensional axisymmetric finite element model of Cu/NbTi coated extrusion deformation^[11] (c)

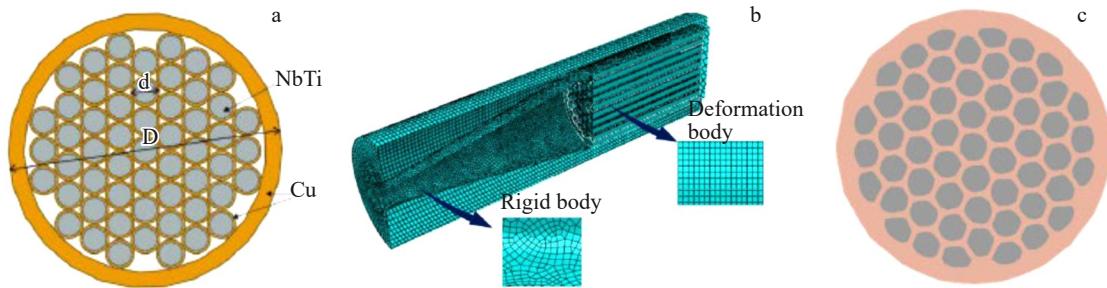


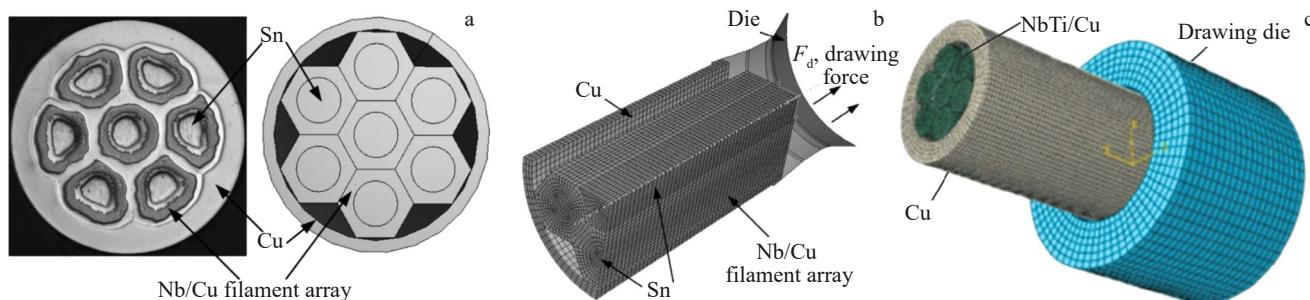
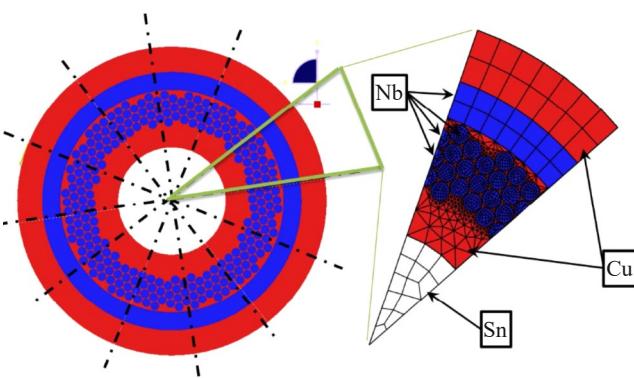
图 2 多芯复合 NbTi/Cu 复合棒材截面图、挤压有限元模型和挤压后截面图

Fig.2 Cross-section of multifilamentary NbTi/Cu composite rod (a), extrusion finite element model (b), and cross section after extrusion (c)^[2]

会直接影响到线材的继续加工,芯丝畸变也会严重影响到线材加工性能,为了揭示拉拔变形过程中拉拔道次、铜超比、拉拔速度对芯丝畸变程度的影响规律,赵圣泽等^[4,15]基于均一化芯丝假设,利用ABAQUS建立了7芯NbTi/Cu复合超导线7道次集束拉拔三维弹塑性有限元模型,如图3c所示,采用Johnson-Cook模型描述了Cu包套本构关系。

除了加工工艺外,组合结构的复杂性也会引起线材的非均匀变形;同时,充分考虑组元间、组元与界面间力学行为的精确描述,对于准确分析多组元超导线材拉拔变形的应力/应变分布及变形均匀性至关重要。为了进

一步分析道次变形率和模具角度对拉拔力、变形均匀性和应力三轴度的影响,进而通过应力三轴度和等效应变分布来评估多芯和多组元超导线材拉拔过程中的均匀性,Taillard等^[16]根据图4所示的内嵌228Nb棒的Nb₃Sn的对称几何模型,利用ABAQUS建立了1/12的三维圆柱轴对称Nb₃Sn拉拔变形有限元模型,分别采用Johnson-Cook本构模型和考虑软化效应的粘塑性本构模型描述Cu和Nb、Sn的流变行为,并采用自适应网格划分变形体,采用位移和温度耦合实体单元赋予单元属性。同时,多芯组合体的组合结构及集束拉拔过程组合体之间因相对运动而产生的位移约束对芯丝不均匀变形具有显

图 3 7 芯 Nb₃Sn 超导线材结构图和轴对称挤压有限元模型与 NbTi/Cu 多芯复合超导线集束拉拔有限元模型Fig.3 Schematic diagram (a) and axisymmetric extrusion finite element model (b) of 7-core Nb₃Sn superconducting wire^[12]; finite element model of NbTi/Cu multi-core composite superconducting wire under bundle drawing^[15] (c)图 4 1/12 三维轴对称 Nb₃Sn 拉拔有限元模型Fig.4 1/12 three-dimensional axisymmetric finite element model of Nb₃Sn for drawing^[16]

著影响,刘君等^[3]利用ABAQUS建立了37芯NbTi/Cu复合超导线多道次集束拉拔有限元模型,分别建立单芯NbTi棒和Cu包套的几何模型,采用面对面Tie约束设置二者接触关系,并采用线性实体缩减积分单元C3D8R对变形体进行离散分割。此外,为了进一步揭示芯丝组合结构和变形工艺参数对芯丝不均匀变形及损伤的影响机制,刘燕红^[1]采用上述有限元方法和材料参数建立了7芯、36+1芯、30+7芯、37芯NbTi/Cu复合超导线多道次集束拉拔有限元模型,其几何模型和有限元模型如图5所示。

多芯集束组装多采用六方芯丝,通常通过将圆线拉拔至一定尺寸,然后再进行圆模-六方模的过渡变形,其协调变形均匀性对于六方芯丝的成形质量具有重要影

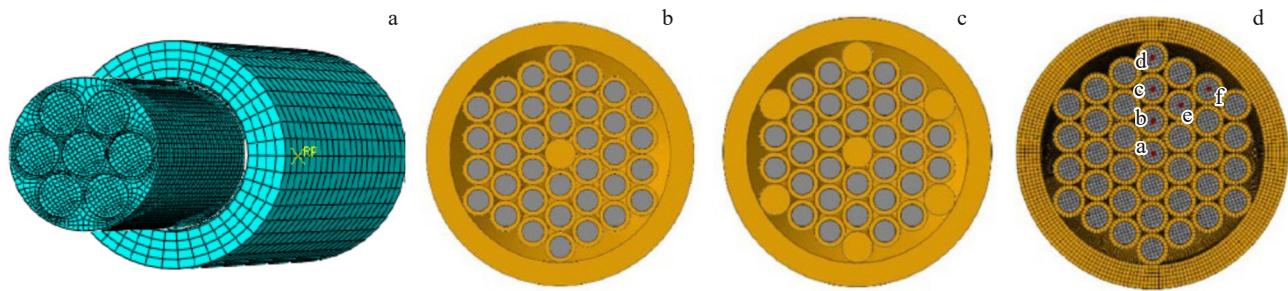


图5 NbTi/Cu多芯复合超导线集束模型

Fig.5 Model of multifilamentary NbTi/Cu superconducting composite wire^[1]: (a) 7 cores, (b) 36+1 cores, (c) 30+7 cores, and (d) 37 cores

响。为此,根据NbTi和Nb₃Sn制备过程中六方单芯线拉拔成形过程,为了分析组元间屈服强度差异、道次变形率和半模角对圆线拉拔至六方线拉拔过程协调变形行为的影响,Norasethasopon^[17]选择了Cu包套/Cu基合金芯、不锈钢包套/Cu基合金芯两种结构,并利用MSC.MARC软件建立了两种复合结构棒材的三维拉拔弹塑性有限元模型,如图6所示,包套和内芯界面间设置为连接状态。

3 金属-陶瓷复合高温超导线材有限元数值模型的建立

$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+x}$ (Bi-2223)、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi-2212)、 MgB_2 高温超导材料的线材结构和成形工艺与NbTi、Nb₃Sn低温超导材料不同,它们是通过粉末装管-单芯/多芯拉拔/轧制工艺制备,其变形过程涉及到金属间、金属与粉体间的协同变形。其中,粉体的装管密度变化和其流变行为对超导线材的临界电流密度(J_c)具有显著的影响,Oh等^[18]指出高的装粉密度会使得烧结后材料的微观组织紧密,进而获得较强的晶间连接性。而装粉密度的大小会严重影响粉体均匀协调变形行为,高的装粉密度极易引起粉体的局部硬化行为,导致线材难以继续变形。因此,揭示拉拔变形过程粉体的密度变化、流变行为及粉体与金属外包套的协调变形对于调控线材的超导性能至关重要。

相对于NbTi、Nb₃Sn、MgB₂、Bi系高温超导材料的有限元模型建立更加复杂,其中,精确粉体本构模型的建立

是描述超导线材粉体密度变化、粉末流变行为及粉末与金属包套协调变形行为的必要前提,同时,粉末颗粒与金属包套的摩擦模型和摩擦系数的选择对于粉末和金属包套的协调变形分析也至关重要。与连续固态介质相比,粉体的屈服变形条件更为复杂,其塑性屈服不仅与连续固态介质中的偏应力张量相关,同时,还会受到静水压力的影响,因此,连续固态介质常用的Von Mises屈服准则已不适合描述粉体介质的屈服条件。目前,粉末成形的建模方法主要包括烧结多孔金属塑性力学法、广义塑性力学法(土塑性力学)和微观力学法^[19-21]。其中广义塑性力学模型,如Cam-Clay、DiMaggio-Sandler和Drucker-Prager等帽子模型^[22-24],是基于土塑性力学模型演化而来,由于岩土体在屈服过程中体积可变,粉末材料与其行为相似。因此,通常会在土塑性力学模型上,添加一个椭圆帽子用来描述金属粉体成形过程中的应变硬化和几何硬化行为,即Drucker-Prager/Cap(DPC)。该模型包括控制剪切流动应力的Drucker Prager剪切失效线,同时还包括对静水压力轴进行切分的一个帽子。

3.1 Bi系高温超导材料

Shah^[25]和Malberg^[26]等建立了Bi系超导线材单芯线拉拔变形有限元模型,并首次利用DPC模型分析了超导线材拉拔变形过程中内部铜基氧化物粉体的密度变化及其流变行为。考虑到线材的圆周对称性,Shah等^[25]利用ABAQUS建立了Bi-2212单芯线二维轴对称拉拔变形弹塑性有限元模型,采用四节点线性四边形轴对称单元划

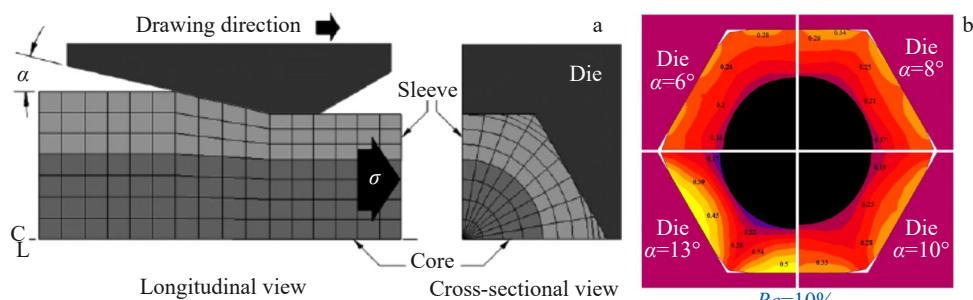
图6 圆模-六方模拉拔变形有限元模型和不同模角 α 的等效应变分布图

Fig.6 Finite element model of drawing deformation from circular die to hexagonal die (a) and equivalent strain distribution diagram of different die angles α (b)^[17]

分网格；同时，分别采用各向同性硬化 Mises 流动理论和压力相关的塑性理论描述银包套和粉体的流动变形行为。

Bi 系超导线材银包套的加工硬化、BSCCO 前驱粉的致密化及复合材料的中间退火敏感性会使得线材沿拉拔方向存在内应力不均匀现象，会使得线材发生畸变甚至拉断。为了改善这种现象，蔡芳等^[27]通过建立 Ag/BSCCO 二维轴对称拉拔有限元模拟，模拟和分析了锥形半模角对粉体致密性、线材内部残余内应力的影响，同时，他们也指出道次变形率也是影响粉体致密性的重要因素。同时，雷丽萍等^[6]建立了单芯 Bi 系高温超导线二维轴对称拉拔模型，采用 Drucker-Prager/Cap 模型描述超导陶瓷粉体的塑性屈服行为，通过模拟了第 1、2 道次拉拔过程，进一步揭示了半模角对粉体的密实率和均匀性的影响。卢永进等^[28-29]又基于理论分析和有限元仿真建立了 Bi-2223/Ag 单芯拉拔截面减缩率(道次变形率)与粉体密度的理论关系，如式(1)，并基于改进的 Drucker-Prager/Cap 模型描述 BSCCO 的变形行为，揭示了静水压力的增加对粉体致密化和屈服强度增益的影响。

$$\rho_1 = \rho_0 \frac{\sqrt{1 - \varphi}}{1 - \varphi} \quad (1)$$

式中， ρ_0 和 ρ_1 分别为拉拔前、后 BSCCO 粉体芯的密度， φ 为线材截面减缩率。

Bi 系超导多芯线材通常需要加工成扁线进行使用，且为了保证最终带材具有较高的临界电流密度，轧制变形过程应该尽可能保证粉体的致密度及其均匀性，并且需要保证变形过程带材不能出现裂纹和宏观剪切带等缺陷，为了评估轧制变形工艺对粉体致密度分布及粉体与金属外包套的均匀协调变形的影响，Eriksen^[30]、Bech^[31]、Bay^[32]、卢永进^[33]等又建立了多芯超导线轧制变形有限元模型。Eriksen^[30]、Bech^[31]、Bay^[32]等利用 Elfen 有限元软件建立了 1/4 轴对称 Ag/BSCCO 多芯带材轧制变形弹塑性有限元模型，如图 7 所示，并采用修正的带有圆锥形帽形的 Drucker-Prager/Cap 模型描述粉体的变形，该模型能够描述粉末的重要特征，包括压力相关的屈服应力、体积应变和硬化。对于外包套银则采用 Von Mises 屈服模型描述其屈服行为，采用 Swift Voce 本构模型描述其硬化行为。

相对于圆线，利用椭圆形或者矩形线轧制成带其变形均匀性得到了极大的改善，为此，卢永进等^[33]基于有限

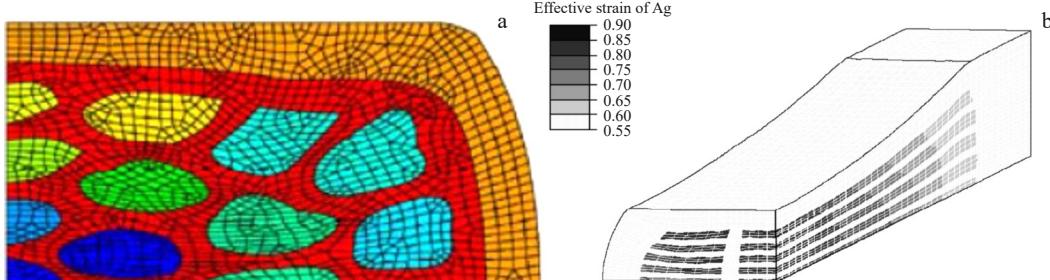


图 7 基于 Elfen 软件的 Ag/BSCCO 平面轧制有限元模拟结果

Fig.7 Finite element simulation results of Ag/BSCCO planar rolling based on Elfen software: (a) two-dimensional finite element model^[31] and (b) three-dimensional finite element model^[32]

元方法对椭圆截面多芯超导线材的轧制变形进行了模拟分析，利用 ABAQUS 建立了 61 芯椭圆截面超导线材的 1/4 轧制变形有限元模型，如图 8 所示^[34]，仍采用改进的 Drucker-Prager/Cap 模型描述超导粉体材料 BSCCO 的本构行为。他们指出轧制用椭圆形 Bi-2223 线材与轧辊的接触面积严重影响到轧制过程线材的均匀性、内部裂纹产生，通过拉拔能够使得线材变形更加均匀，但从圆线到方形线过渡在边角处极容易引起应力集中，产生断裂。因此，他们提出先采用跑道型模具对轧制用的线材进行拉拔，尽可能增大线材的上下平面面积；并利用 ABAQUS 建立了 61 芯超导线材拉拔有限元模型，模拟了线材的三道次拉拔变形，采用修正的 Drucker-Prager/Cap 模型描述了 BSCCO 粉末本构行为，将外包套银和银合金设置为连续体模型。

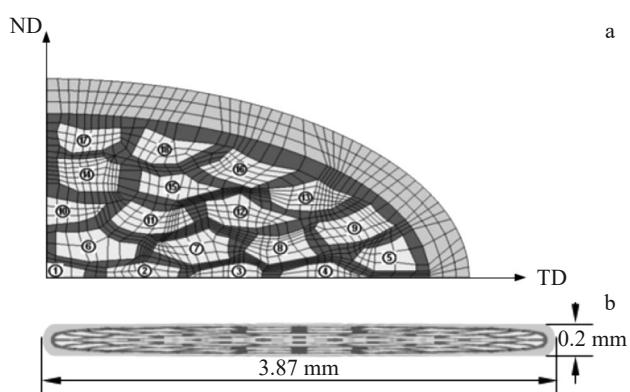


图 8 61 芯超导复合线材的 1/4 数值模型和数值模拟中的轧后中截面
Fig.8 1/4 numerical model of 61-core superconducting composite wire (a) and post-rolling cross section in numerical simulation (b)^[34]

由于Bi系高温超导带材的成形是一种典型的宏观作用、微观成形的多芯多场塑性成形过程,曾攀等^[35]提出了宏域微成形理论,并将多晶弹塑性模型应用到单芯和多芯复合带材压制工艺的数值模拟中,进一步分析了压制变形、摩擦系数等工艺参数对Bi系超导芯内c轴织构形成的影响。此外,张阳等^[36]基于细观力学假设,利用ANSYS软件建立了多芯带材代表性单元二维轧制变形有限元模型,代表性单元中银层和超导粉体交替分布。

3.2 MgB₂高温超导材料

MgB₂多芯线材截面结构和芯丝数严重影响着拉拔变形过程应力/应变分配,Hancock等^[37]针对图9a和9b所示先位装管法19芯和先位/原位装管法8+1(铜)芯MgB₂多芯线材拉拔变形过程不同层芯丝内粉末的应力/应变分配调控问题,利用Elfen软件建立简单的二维轴对称有限元模型,如图9c和9d所示,采用Drucker-Prager模型粉末的本构关系,同时采用Swift Voce模型模拟Cu和外包套Fe的本构关系。

上述的有限元模型大都采用Drucker-Prager、Drucker-Prager/Cap和修正的Drucker-Prager/Cap的模型描述粉体的本构关系,修正的模型增添了Cap项,用以描述静水压力对粉体变形影响,Cap面的形状表示粉体的硬化和软化行为变化,描述粉体的屈服演变;而粉体的屈服演变会受到加载历史、应力途径、粉末当前的密度和体积应变的影响,同时,粉体的屈服和硬化行为也存在各向异性。为此,Oh等^[18]等考虑粉体的各向异性硬化行为和静水应力状态建立了一个先进的修正Drucker-Prager/Cap

模型,并利用ABAQUS建立了1/4轴对称MgB₂多芯线材多道次拉拔三维有限元模型,如图10所示,Von Mises模型和修正的各向硬化的DPC模型描述金属包套和粉体,采用Swift-Voce硬化方程描述铜包套和铌包套的本构关系;同时,采用沙漏控制的八节点六边形缩减单元划分网格,采用库伦模拟描述模具与线材的界面摩擦,摩擦因子设置为0.1。

4 协调变形多尺度分析

4.1 低温超导材料

材料的流动变形是决定其最终产品成形质量的关键,一般通过调控材料流动速度的均匀性来控制其协调变形,影响材料流动变形的主要因素包括变形参数、模具结构、加载方式、摩擦条件等。下面针对超导材料协调变形及影响因素,给出了基于有限元方法分析的相关研究。

4.1.1 单芯复合体挤压变形

单芯复合结构材料组元层之间的流速差异是影响其挤压成形质量的主要因素,其主要与应变分配和组元层的力学性能差异有关。Wu等^[9]指出Nb₃Sn棒组分力学性能的差异及其复合结构使其变形过程出现明显非均匀性,进而会导致棒材出现缺陷或发生断裂。他们通过研究半模角度($\alpha=5^\circ\sim40^\circ$)、棒料面积缩减率($\varphi=59.48\%\sim79.33\%$)、三层结构材料的屈服强度比(外层/中间层/内层的屈服强度比 YSS/YSM/YSC=3/1/2, 1/2/3)对Nb₃Sn复合棒材挤压过程三维流速场的影响规律发现,随挤压半模角增加,挤压压力先减小后增大;对于六方棒的拉拔,挤压压力最小时

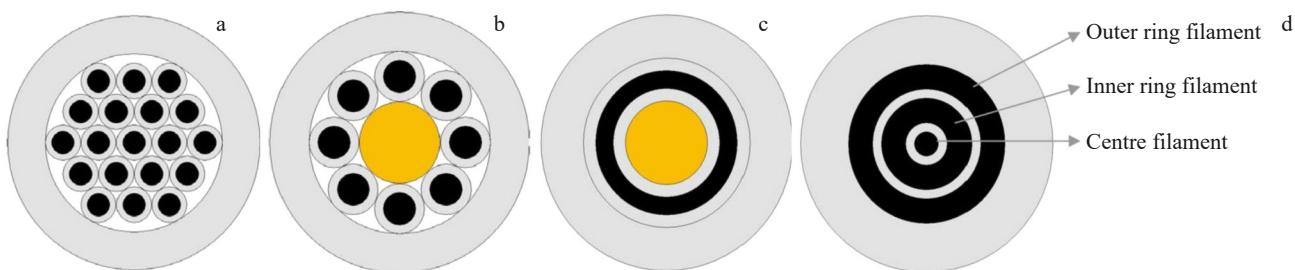


图9 18芯和8+1芯MgB₂线材截面结构与简化的二维有限元模型

Fig.9 Cross-sectional structures of 18-core MgB₂ wire (a) and 8+1-core MgB₂ wire (b); simplified two-dimensional finite element models (c-d)^[37]

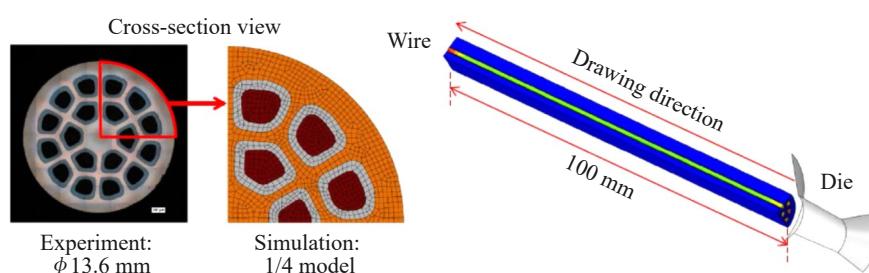


图10 1/4轴对称MgB₂多芯线材多道次拉拔三维有限元模型

Fig.10 Three-dimensional finite element model of 1/4 axisymmetric multi-pass drawing process for a multifilamentary MgB₂ wire^[18]

的最优半模角为 $10^{\circ}\sim20^{\circ}$ 。通过分析三层结构材料的屈服强度差异(内软外硬, YSS/YSM/YSC=3/1/2; 内硬外软, YSS/YSM/YSC=1/2/3)下材料的出口半径发现, 外包套屈服强度较高时, 中间层和芯部更易于变形; 由于增加模具角度会使得材料塑性变形更加剧烈, 其出模半径随半模角度的增加而减小。而当芯部的屈服强度较高时, 半模角度< 30° 时, 随着半模角度增加, 芯部和中间层材料出模半径位置不变; 半模角度> 30° 时, 随半模角度增加, 外层材料拉应力水平增高, 剪切应力增大, 变形更加剧烈, 芯部和中间层出模半径增加。Sun 等^[11]基于 Cu/NbTi 差温挤压试验和有限元模拟, 研究了锥形模角($60^{\circ}\sim180^{\circ}$)对热挤压过程双相层复合结构材料的变形均匀性、流动行为、应力/应变分配的影响规律, 并指出挤压过程 Cu 包套层的外、内层及 NbTi 芯的流动速度和应变差异较大, Cu 包套的材料流动速度大于 NbTi 芯的材料流动速度; 随锥形模角的增大, 由于粘性摩擦条件的设置, Cu 包套内层和 NbTi 芯的等效应变的变化较小, 而 Cu 包套内外侧的变形不均匀性增加, 但 Cu 包套整体的流动速度下降, 导致 Cu 包套与 NbTi 芯相对流动速度差减小, 它们之间的相对位移值减小, 进而增强了 Cu 和 NbTi 的变形协调均匀性。

4.1.2 多芯组合体挤压变形

多芯结构复合棒材在挤压变形过程中易产生分层和拉裂等问题, 造成挤压成形困难, 尤其变形“死区”的形成, 会造成与模具接触的外层金属流动阻力增大, 造成变形区与“死区”金属流动速度相差较大, 这也是造成堆簇分层现象的主要原因。其中, 模角 α 是影响多芯复合结构棒材成形过程的显著因素, 模角越小, 材料变形“死区”越小, 但模角度过小, 坯料与模具的接触面积增大, 使得坯料外层与模具的摩擦增大, 导致挤压件表面成形质量差; 但当模角 α 过大时, 容易形成较大的变形“死区”, 附件应力增大, 内外层材料流动速度差异增加, 不利于内外侧材料的同时挤出, 此外, 过大的模角会使得多芯组合棒材内外侧出现严重的分层现象。同时, 变形参数的选择也尤为重要, 挤压速度影响着挤压件的质量和成形效率, 挤压速度过小时, 坯料与模具间发生严重的界面换热, 坯料表层材料温度显著降低, 其强度增大, 热变形能力降低, 挤压过程容易出现开裂; 挤压速度过大时, 材料流动速度加快, 加工硬化程度加剧, 材料流动均匀性变差易产生裂纹。而挤压温度影响着挤压件的组织、性能和表面质量, 挤压温度较高时, 材料的变形抗力差, 有利于加工变形, 但是温度过高时, 动态再结晶更加完全, 且晶粒容易快速长大, 还会导致产品的表层氧化加剧。此外, 润滑状态影响着坯料与模具的摩擦, 良好的润滑状态可以减少坯料与模具之间的摩擦, 降低挤压压力, 同时可以提高产品的表面质量。张建英^[2]基于试验和有限元模拟方

法研究了工艺参数和模具结构对 NbTi/Cu 多芯复合棒材热挤压后 NbTi 芯棒的变形均匀性及整体出口速度分布均匀性的影响规律, 基于不同模角($8^{\circ}\sim15^{\circ}$)的 55 芯挤压模拟结果表明(如图 11 所示), 当挤压模角为 8° 时, 挤出的 55 芯组合棒材变形均匀; 基于不同挤压速度($10\sim40$ mm/s)的 55 芯挤压模拟结果表明, 挤压速度为 20 mm/s 时多芯组合体整体变形均匀性最好; 不同挤压温度($600\sim750$ °C)的 55 芯挤压模拟结果表明, 挤压温度为 750 °C 时, 内外侧棒材的变形协调最好, 挤压件成形质量最优。

4.1.3 多芯组合体拉拔变形

在拉拔过程中, 多芯集束超导线材受到模具正压力、界面摩擦力、轴向拉力的作用, 这三个作用力的分配决定了包套和芯丝材料的流动, 其受到半模角、拉拔速度、道次变形率等因素影响。其中, 拉拔速度的选择依赖于材料的变形性能和线材的截面尺寸, 低的拉拔速度能够维持较好的润滑条件, 进而减小摩擦, 而高的拉拔速度引起的剧烈变形会引入热应力; 同时, 还会增加线材中心等效应力和拉应力, 而静水拉应力和轴向拉应力容易引起局部孔洞出现, 进而使得线材发生断裂。

Peng 等^[10]指出对大截面的线材通常尽量选择低的拉拔速度 0.01 m/s, 而对于非常细的线, 尽可能选择高的拉拔速度 50 m/s。此外, 由于多芯结构组元间的变形性能不同, 当道次变形率不足够大时, 组元间的变形差异显著, 变形极不均匀, 且容易产生外层金属流动, 内部金属基本不流动现象; 增加道次变形率, 可以产生一个均匀的变形状态并使组元间的界面发生焊合。拉拔过程组元间的界面产生较大的静水拉应力是引起孔洞进而发生断裂的主要原因, 提高道次变形率能够有力改善变形均匀性,

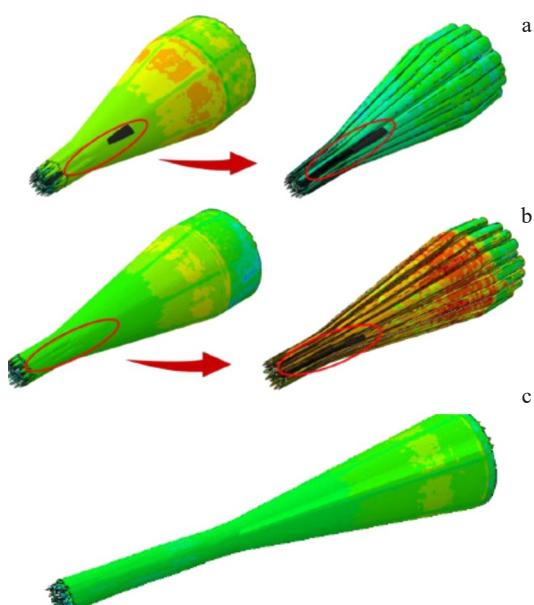


图 11 不同模角下热挤压成形结果

Fig.11 Results of hot extrusion forming under different die angles^[2]:
(a) 15° , (b) 12° , and (c) 8°

减少拉应力,甚至增加压应力。Peng 等^[12]建议在拉拔起始道次选择道次变形率超过 20% 以增加变形协调均匀性。徐建伟等^[13]的模拟结果也表明,拉拔过程等效应力从中心到表面呈递增分布,由于材料的性质不同和各组元之间可能存在相互滑动,因此,在两种材料的接触面存在等效应力突变现象,且这种不均匀变化增加了开裂的可能性。

通过 NbTi/Cu 多芯复合超导线材拉拔分析^[15],集束拉拔变形过程,畸变主要集中在外层芯丝,包括芯径畸变和形状畸变。通过分析铜超比、拉拔速度对线材畸变的影响规律,发现随着铜超比的增加,芯丝的畸变程度降低,当铜超比大于 1.3 后,各部分受力均衡性增强,畸变大幅度减弱;此外还发现随拉拔速度的增加,NbTi/Cu 多芯复合线材中各部分应变速率增加,线材整体应变增大,芯丝最大等效应变增加,由于最外层芯丝应变速率大于中心芯丝,最大等效应变差值增大,但变形速度的增加会使得线材的温度增加,材料的塑性增加,沿拉拔方向材料各处受力均衡程度增大,畸变程度下降,但拉拔速度继续增加,材料硬化程度超过软化程度,变形抗力增加,芯丝均衡性恶化,因此,随拉拔速度增加,芯丝畸变程度先减小后增加,存在一个极小值。此外,赵圣泽等^[4]的拉拔模拟分析结果还表明,随着工作锥半角的增大,线材整体变形增大,芯丝芯径畸变、形状畸变呈现少量增加后减小再增加的趋势,且在工作锥半角为 6°~8° 这一范围内畸变程度存在极小值;同时还发现,随道次变形率的增加,线材整体变形增大,内外芯等效应力增加,芯丝的芯径畸变、形状畸变先增加后减小再增加,最后趋于平稳,且在道次变形率为 20%~25% 区间内芯丝畸变存在极小值。

芯丝间及其包套、阻隔层的不均匀变形增加了线材断裂的可能性,Taillard 等^[16]基于拉拔过程 Nb₃Sn 超导线内部应力三轴度和界面等效应变模拟结果(如图 12 所示)指出,中心的应力三轴度最小,容易发生断裂,同时,双相界面处变形不均匀,界面处靠近软相的一侧等效应变较大,增加道次变形率能够提升线材的变形均匀性和减小断裂产生的可能性,合理半模角度和道次变形率搭配能够极大保证线材变形的均匀性,如半模角 5.8° 时,道次变形率>30%;半模角 3° 时,道次变形率 15%。刘君

等^[3]基于两种结构的 37 芯 NbTi/Cu 复合超导线多道次集束拉拔变形模拟结果发现,中心及 6 个边角位置为 Cu 棒时,多芯组合体中 NbTi/Cu 复合芯棒等效应力及应变更均匀;Cu 具有更优的塑性变形能力,提高了多芯组合结构的流动性,减少了位移约束作用,使整体应力应变均匀性提高。刘燕红^[1]基于 7 芯、30+7 芯、36+1 芯和 37 芯结构的 NbTi/Cu 复合超导线多道次集束拉拔过程有限元模拟结果进一步证实了这一点。

4.2 高温超导材料

高温超导线材制备过程更加关注粉体的流动及其致密化过程,以及其对金属包套截面积变化的影响,因此,内层粉体与外层包套的协调变形问题一直备受关注。其变形过程中涉及到金属外包套的加工硬化、内层粉体的致密化和剪切流动、金属与粉体的协同流变等行为。

蔡芳等^[27]基于 Bi 系高温超导线材拉拔变形有限元模拟结果指出,拉拔力的大小严重影响着银包套变形,拉拔力过大使得线材发生畸变甚至拉断,由于接触摩擦效应,拉拔力随着半模角的减小而增大。当半模角达到 9° 时,线材的拉拔力达到了最小值;此外,半模角的变化还影响摩擦损耗能,进而使得线材内部残余应力发生改变,当拉拔半模角小于 5° 时残余内应力较小;当其大于 5° 时,残余内应力基本不变。尽管半模角的增大会大幅降低线材拉拔力,但内部粉体的密实均匀化过程需要较长范围的缓慢变形,当半模角度为 3° 时,径向体积应变分布最为均匀,拉拔变形后的密度分布最均匀。此外,道次加工率的增加也会使得单芯线材体积应变的分布呈均匀的趋势,但其也会导致线性内部残余应力的增加。而 Malberg 等^[26]基于单芯 BSCCO/Ag 的拉拔模拟分析结果得出,以拉拔应力为优化目标,最优的拉拔半模角在 7°~10° 之间,雷丽萍等^[6]综合考虑粉体的密实均匀性和拉拔力的大小,指出现有生产中,一般采用 8° 的拉拔半模角。由于超导粉体颗粒变形行为复杂,且粉体与包套金属间存在力学性能差异,这使得越长的超导线材越难保证其均匀性。因此,改善粉体致密度和均匀性,控制金属包套基材与超导粉体复合变形应变分布状态是解决上述问题的关键。卢永进等^[28]指出适当增加截面缩减率,能

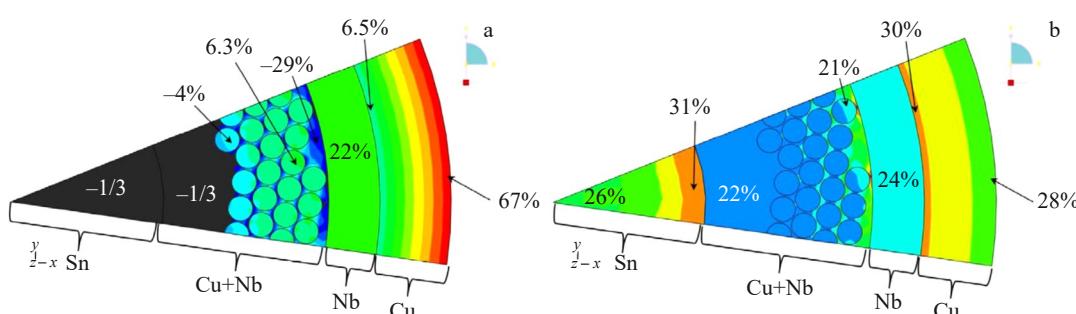


图 12 单道次拉拔后线材截面应力三轴度分布图和等效应变分布图

Fig.12 Stress triaxiality distribution (a) and equivalent strain distribution (b) of wire section after single-pass drawing^[16]

够促进金属包套变形,改善粉体密度的均匀性。这是因为大的变形率必然会引起大的静水压力,势必会使得粉体密度致密化。因此,通常需要综合考虑影响因素对响应目标的影响结果,来评判最优的工艺参数。

多芯拉拔成形后通常需要轧制变形扁带形状,主要有正方形、椭圆形和跑道形。基于有限元分析结果可知^[30-33],线材形状和模具结构对线材变形均匀性具有显著影响,其中,圆线受力集中在上部和下部,变形也主要集中在对应区域的芯丝,其变形最不均匀;方形线材的受力和变形非常均匀,有利于各超导芯的整体致密化;跑道形线材和椭圆形线材则介于二者之间,且跑道形线材的受力和变形更均匀,且其轧制变形过程中,线材与轧辊的接触面积更大,更有利于超导粉体密度的增加和均匀化。Eriksen 等^[30]还指出不均匀变形会引起线材内部应力/应变分布不均匀,进而使得内部粉体密度分布不均匀,粉体与金属银包套的界面处的粉体密度较高,芯部的粉体密度较低。Malberg 等^[26]也指出了这一点,此外他们还指出显微硬度与粉末的密度呈线性关系。

Bech 等^[31]研究了矩形线材轧制变形过程纵向应变与横向应变比对其变形均匀性和内裂纹形成原因的影响,通过引入对数应变比值 LSR(纵向应变与横向应变之比的自然对数),当 LSR=0 时,横纵应变相同,带材内部不易出现裂纹,超导线材的临界电流最高;当 LSR>0 时,纵向应变大于横向应变时,复合体沿纵向运动的趋势增加,由于轧向拉伸作用,带材内部容易出现横向裂纹;而当 LSR<0 时,横向应变大于纵向应变,横向拉伸作用其主导变形,超导带材的横截面容易出现纵向裂纹。卢永进等^[33]基于有限元模拟进一步分析了摩擦系数、压下率、轧辊直径和前后张力等轧制工艺对带材变形和粉体致密度、均匀性的影响规律,结果表明,界面摩擦力增大,会使得变形区产生较大的水平压应力和剪切应力,进而使得材料沿横向和轧制方向变形不一致性增加,且应力/应变分布不均匀性增加,粉体的致密性下降;但道次压下率的增加,使得带材的横、纵应变均增大,进一步平衡了内部不均匀应力,粉末的密度和 LSR 值增加,且各芯丝间 LSR 值的均匀性也增加。

对于 MgB₂ 高温超导线材,外包套材料种类、内部芯丝结构、粉体的状态等是影响线材协调变形、粉体致密化的主要因素,Hancock 等^[37]基于 18 芯和 8+1(铜)芯结构 MgB₂ 拉拔有限元模拟结果指出,拉伸应力主要集中在多芯线材的中间区域,添加内部铜芯会增加线材的协调变形,减缓整体硬化现象;此外,他们还指出包套材料的软化会导致内部粉体的压缩率降低,粉末与包套管边界处会出现不均匀现象,因此合理选择外包套材料对于 MgB₂ 协调变形至关重要。同时,Oh 等^[18]基于模拟分析结果指出,由于牵引力引起的压力作用在外部芯丝上的作用力

比内部芯丝的要大,这使得外部芯丝的装管密度比内部芯丝的高;此外,他们也指出最终粉体的压实密度与外包套的强度有关。尽可能选择具有一定强度且变形过程不需要进行退火的外包套材料,这是因为退火处理会导致外包套软化,进而使得粉体的压缩密度和均匀度下降。

5 本构模型和摩擦模型的选择

精确本构模型是准确描述材料的屈服、硬化、软化等行为的重要前提,其与加载历史、变形条件等相关。低温超导材料为金属基复合材料,其挤压、拉拔变形有限元分析需要建立单芯组合包套各层金属的本构模型,而对于多芯结构,还需要建立芯丝的本构模型。考虑到温度、应变速率和应变量 3 个主要影响因素,在有限元分析中,多采用 Arrhenius 模型、修正的 Arrhenius 模型和 Johnson-Cook 模型来描述金属材料的热力耦合变形行为^[1-4,9-15]。高温超导材料为陶瓷-金属基复合材料,常采用粉末装管法制备,粉末压制变形过程中伴随着体积压缩、摩擦、加工硬化、剪切软化等复杂现象^[6,25-30]。通常利用有限元方法分析粉体的应力/应变分配和粉体的致密度,对于粉体本构关系的描述大都采用 Drucker-Prager、Drucker-Prager/Cap 和修正的 Drucker-Prager/Cap 的模型描述粉体的本构关系^[38-41]。

芯丝间、外层芯丝与外层铜包套之间的接触,这需要选用相应的摩擦模型来描述各部分之间的接触关系,库伦摩擦模型和剪切摩擦模型是塑性成形中最常用的摩擦模型($t = mp$, $t = mk$, 其中, t 为摩擦切应力, m 为摩擦系数, p 为垂直于接触面正压力, k 为临界切应力)^[42-45]。库伦摩擦定律中摩擦应力与正应力成正比,而在剪切摩擦定律中摩擦应力与材料的剪切屈服强度成正比。孟丽芬等^[42]指出,当 $t > k$ 时,界面不再有相对滑移并发生黏着现象,库伦摩擦模型不再适用,其更适用于低载荷条件;与库伦摩擦模型比较,剪切摩擦模型形式更为简单,且摩擦应力与接触面上的应力状态无关,仅需要考虑变形材料的特性,其更适用于高应力状态,且更容易计算。因此,大塑性热变形通常采用剪切摩擦模型,粉末与金属的摩擦通常采用库伦摩擦模型。

6 结论与展望

1) 借助有限元模拟能够较为准确和直观地反映超导线材挤压、拉拔变形过程中的材料流动、应力/应变分配规律、亚组元间的界面行为、粉体的致密度等。截止到目前,在超导线/带材大塑性体积成形有限元模拟方面,仍主要采用均质模型、简化模型单一尺度下去分析其变形,尽管在一定程度上为工程应用发展提供了理论支持,但超导材料成形是一个多尺度、多维度、多相的变形过程,其变形是宏观尺度的微纳成形,后续的研究应该将尺度效应、界面效应、加载历史考虑到其有限元模型建立中。

芯丝尺寸从最初的上百毫米演变为上百纳米, 其应力-应变关系的表达形式会发生变化, 应该根据其变化修正或者建立新的精确本构模型; 同时, 挤压变形和拉拔变形过程, 线材内部的应力状态分别为三向压应力和两压一拉, 应该分别采用圆柱形试样压缩变形和圆棒形试样拉伸变形获得真实应力-应变曲线, 进而建立考虑温度、应变、应变速率和线材宏观尺度、内部晶粒尺度的本构模型; 此外, 多道次拉拔变形过程中, 线材会出现包辛格效应, 加载-卸载-再加载过程中的应力-应变关系与单向加载应力-应变关系不同, 应该采用随动硬化模型代替各向同性Mises硬化模型来描述动态加载-卸载引起的再加载软化行为。

2) 多相复合结构变形, 精确的界面行为相关的本构模型是准确描述界面固态焊合、界面应力/应变分配、界面流变行为的重要前提, 后续界面本构模型研究中, 需要同时考虑界面摩擦、界面剪切流动、两相径向流动行为等。加载方式、变形温度和累积道次变形率影响着界面固态焊合的程度, 进而使得双相界面连接力发生变化, 当前大都采用单一摩擦因子表示界面状态。一方面, 后续应该采用内聚力模型和定义特定界面单元来准确捕捉界面的滑移、焊接和分裂, 同时, 还应该建立载荷、应力状态、温度相关的摩擦模型, 准确描述摩擦因子的变化。

3) 尽管土塑性理论能够较好地描述松散粉体变形, 但是金属塑性理论对多孔烧结材料的适用性较好, 仍不能准确描述粉体成形的物理本质。一方面, 粉体是非连续体, 其杨氏模量和泊松比均随压坯致密化而逐渐变化, 材料力学性能参数也随密度变化而难以确定; 此外, 多道次拉拔变形过程中, 卸载后, 弹性应变能的释放会使压坯发生弹性回复, 导致尺寸变化, 密度、应力重新分布。下一步应该基于流变学方法, 考虑温度和压力变化下粉体的流变特征, 加强粉末材料流动法则、硬化模型、控制方程和屈服条件的研究, 进一步实现粉体与多孔烧结体屈服条件的统一, 建立更准确的本构模型; 同时, 考虑粉体中孔隙大小、形态、随机分布及颗粒形貌等现实特征, 加强宏观和细观力学方法的结合。

参考文献 References

- [1] Liu Yanhong(刘燕红). *Numerical Simulation Study on Deformation and Damage of NbTi/Cu Superconductor Wire During Bundle Drawing(NbTi/Cu超导线集束拉拔过程变形损伤数值模拟研究)[D]*. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020
- [2] Zhang Jianying(张建英). *Forming Law and Process Optimization of NbTi/Cu Multi-core Composite Bar in Hot Extrusion(NbTi/Cu多芯复合棒材热挤压成形规律与工艺优化)[D]*. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022
- [3] Liu Jun(刘君), Liu Yanhong(刘燕红), Sun Xiaguang(孙霞光) et al. *Journal of Plasticity Engineering(塑性工程学报)[J]*, 2019, 26(6): 8
- [4] Zhao Shengze(赵圣泽), Liu Jun(刘君), Yang Haiying(杨海瑛) et al. *Titanium Industry Progress(钛工业进展)[J]*, 2020, 37(5): 6
- [5] Chen Zili(陈自力), Du Shejun(杜社军), Liu Xianghong(刘向宏) et al. *Materials Reports(材料导报)[J]*, 2007, 21(11): 139
- [6] Lei Liping(雷丽萍), Fang Gang(方刚), Zhao Yinghong(赵迎红) et al. *The 4th North China (Expanded) Conference on Technology of Plasticity(第四届华北(扩大)塑性加工学术会议)[C]*. Tianjin: Chinese Mechanical Engineering Society, 2006: 128
- [7] Zheng Xiaoxia(郑晓霞), Zheng Xitao(郑锡涛), Gou Linhu(缑林虎). *Advances in Mechanics(力学进展)[J]*, 2010, 40(1): 41
- [8] Chen Yuli(陈玉丽), Ma Yong(马勇), Pan Fei(潘飞) et al. *Chinese Journal of Solid Mechanics(固体力学学报)[J]*, 2018, 39(1): 1
- [9] Wu C W, Hsu R Q. *Journal of Materials Processing Technology[J]*, 2002, 123(1): 47
- [10] Peng X, Sumption M D, Collings E W. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity[J]*, 2003, 13(2): 3434
- [11] Sun Dong, Wang Zhe, Jiang Shuyong et al. *Rare Metal Materials and Engineering[J]*, 2023, 52(2): 441
- [12] Peng X, Sumption M D, Collings E W. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity[J]*, 2005, 15(2): 3426
- [13] Xu Jianwei(徐建伟), Zeng Weidong(曾卫东), Liu Jianglin(刘江林) et al. *Materials Reports(材料导报)[J]*, 2013, 27(20): 153
- [14] Liu J, Zhang J Y, Lei C et al. *Journal of Materials Engineering and Performance[J]*, 2022, 31(4): 3004
- [15] Zhao Shengze(赵圣泽), Liu Jun(刘君), Wu Jinping(吴金平) et al. *Titanium Industry Progress(钛工业进展) [J]*, 2019, 36(4): 24
- [16] Taillard R, Rabhi A. *Materials Science Forum[J]*, 2012, 706: 1014
- [17] Norasethasopon S. *Journal of Materials Processing Technology[J]*, 2008, 203(1-3): 137
- [18] Oh Y S, Lee H W, Chung K C et al. *Metals and Materials International[J]*, 2022, 28(7): 1697
- [19] Wang Jun(汪俊), Li Congxin(李从心), Ruan Xueyu(阮雪榆). *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering(机械科学与技术)[J]*, 2000, 19(3): 3
- [20] Sun Shimin(孙世民), Huang Shangyu(黄尚宇), Zhou Mengcheng(周梦成) et al. *Powder Metallurgy Technology(粉末冶金技术)[J]*, 2018, 36(4): 261
- [21] Zhou Rui(周蕊), Li Lulu(李璐璐), Xie Dong(谢东) et al. *Materials Reports(材料导报)[J]*, 2018, 32(6): 1020
- [22] Rahman M M, Ariffin A K, Nor S S M. *Applied Mathematical Modelling[J]*, 2009, 33(11): 4031
- [23] Andersson D C, Larsson P L, Cadario A et al. *Powder Technology[J]*, 2010, 202(1-3): 78
- [24] Krook A, Wu C Y. *Engineering Crystallography: From Molecule to Crystal to Functional Form[M]*. Dordrecht: Springer, 2017: 451
- [25] Shah R, Tangrila S, Rachakonda S et al. *Journal of Electronic*

- Materials*[J], 1995, 24: 1781
- [26] Malberg M, Bech J, Bay N et al. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 1999, 9(2): 2577
- [27] Cai Fang(蔡芳), Lei Liping(雷丽萍), Zhao Yinghong(赵迎红) et al. *China Mechanical Engineering(中国机械工程)*[J], 2006, 17(19): 2010
- [28] Lu Yongjin(卢永进), Zeng Pan(曾攀). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2013, 42(3): 536
- [29] Lu Yongjin(卢永进). *Study on the Microforming Processing in Macro-field for Bi-2223/Ag Superconducting Tape(铋系超导带材的宏域微成形加工过程研究)*[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010
- [30] Eriksen M, Bech J I, Seifi B et al. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2001, 11(1): 3756
- [31] Bech J I, Nielsen M S, Eriksen M et al. *CIRP Annals*[J], 2001, 50(1): 201
- [32] Bay N, Nielsen M S. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2004, 151(1–3): 18
- [33] Lu Yongjin(卢永进), Lei Liping(雷丽萍), Zhao Yinghong(赵迎红) et al. *Materials Science and Technology(材料科学与工艺)*[J], 2009, 17(5): 597
- [34] Lu Y J, Zeng P, Lei L P et al. *Science in China Series E: Technological Sciences*[J], 2009, 52: 2255
- [35] Zeng Pan(曾攀), Lu Yongjin(卢永进), Lei Liping(雷丽萍) et al. *Forging & Stamping Technology(锻压技术)*[J], 2007, 32(6): 125
- [36] Zhang Yang(张阳), Li Guang(李光). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2005, 34(10): 1562
- [37] Hancock M H, Bay N. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2007, 17(2): 3054
- [38] Zhao Y H, Zeng P, Lei L P et al. *Journal of Materials Science*[J], 2007, 42: 4692
- [39] Allais A, Bruzek C E, Lallouet N et al. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*[J], 2003, 13(2): 3026
- [40] Lei L P, Zhao Y H, Zeng P et al. *Superconductor Science and Technology*[J], 2005, 18(6): 818
- [41] Xia X, Zhu Y C, Zhu C D et al. *Superconductor Science and Technology*[J], 2023, 36(4): 045016
- [42] Meng Lifen(孟丽芬), Hu Chengliang(胡成亮), Zhao Zhen(赵震). *Die & Mould Industry(模具工业)*[J], 2014, 40(4): 1
- [43] Chu Candong(储灿东), Peng Yinghong(彭颖红), Ruan Xueyu(阮雪榆). *Journal of Shanghai Jiaotong University(上海交通大学学报)*[J], 2001(7): 993
- [44] Ren Qianyu(任倩玉). *Numerical Simulation on 6082 Aluminium Alloy During Equal Channel Angular Pressing(6082铝合金等通道转角挤压变形过程的数值模拟)*[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019
- [45] Wang Xiaona(王小娜). *Numerical Simulation on Indirect Extrusion of Copper Clad Aluminum Bimetal Composite(铜包铝双金属复合材料反向挤压变形的数值模拟仿真)*[D]. Changsha: Hunan University, 2016

Research Progress on Coordinated Deformation of Superconducting Wires Based on Finite Element Method

Hou Hongli¹, Hu Le², Zhang Shengnan¹, Wang Qingyang¹, Jiang Lang¹, Liu Jing¹, Liu Jixing¹, Li Jianfeng¹, Zhang Pingxiang^{1,2}

(1. Superconducting Materials Research Center, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

(2. Institute of Superconducting Materials and Applied Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The structures of NbTi, Nb₃Sn, MgB₂, and Bi-based superconducting materials are complex. The uniformity of coordinated deformation among metals, between metals and powders, and within core wires determines the processing quality and mechanical properties of wires. The structures of wires and dies, processing parameters, and deformation conditions are important factors affecting their coordinated deformation behavior. The finite element numerical simulation method is an important engineering tool for analyzing and evaluating the coordinated deformation behavior of superconducting wires under multiple factors. This approach can accurately and intuitively simulate the coordinated rheological behavior during the forming process of multi-layer and multifilament composite superconducting wires, as well as the stress/strain distribution among composite phases and their interfaces. This review summarizes recent progress in finite element simulation of superconducting wire forming. It covers the establishment of finite element models, selection of constitutive models, and setting of boundary conditions for superconducting wire forming. At the same time, the review discusses the affecting mechanism of deformation parameters, die structure, and processing technique on coordinated deformation behavior, as well as recent advances in multi-scale analysis.

Key words: superconducting wire; finite element; coordinated deformation; numerical simulation

Corresponding author: Wang Qingyang, Professor, Superconducting Material Research Center, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P. R. China, E-mail: wqy233@sina.com