

# 金属增减材制造本构模型获取方法研究进展

王丰<sup>1</sup>, 刘蒙<sup>2</sup>, 李国和<sup>1</sup>, 王大春<sup>1</sup>, 闫冬<sup>1</sup>, 范建勋<sup>1</sup>

(1.天津职业技术师范大学 机械工程学院, 天津 300222;

2.大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**总结了金属增材制造材料本构模型的获取方法,从准静态试验、热压缩试验、动态试验、硬度等效及微观组织模拟 5 个方面归纳了金属增材制造材料本构模型获取的研究成果。在此基础上,分析了目前存在的问题,并对未来的发展方向进行了展望。结果表明,通过准静态力学试验、热压缩试验及动态力学试验获取的本构模型可以反映材料宏观的力学性能,但无法反映材料的非均质特性;硬度等效本构模型可以体现一定的非均质性,但准确性无法得到保证;基于微观组织的本构模型对材料的性能表征较为全面,但目前仍处在探索阶段。随着计算机技术和增减材复合制造技术的发展,开发具有一定物理意义、考虑增材成形材料微观组织分布的本构模型获取方法将是未来主要的发展方向。

**关键词:**增减材制造;本构模型;力学性能试验;硬度;微观组织

**中图分类号:** TG506; TG665 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2023)03-0052-12

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2023.03.004

## Research Progress on Methods for Obtaining Constitutive Model of Metal Material Additive Manufacturing

WANG Feng<sup>1</sup>, LIU Meng<sup>2</sup>, LI Guo-he<sup>1</sup>, WANG Da-chun<sup>1</sup>, YAN Dong<sup>1</sup>, FAN Jian-xun<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China;

2. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China)

**ABSTRACT:** Additive/subtractive manufacturing is an advanced hybrid manufacturing technology that combines additive manufacturing with traditional machining. The additive forming materials have excellent mechanical properties and the forming process breaks the geometric constraints of the traditional machining. Therefore, the additive/subtractive manufacturing technology has a huge market prospect in the fields of aerospace, shipbuilding, and die manufacturing. However, the rapid cooling and heating in the additive process leads to the inhomogeneous of microstructure, which brings great challenges to the subsequent machining. Finite element simulation is an effective method to study the machining mechanism of additive manufacturing materials. The constitutive model is the decisive factor to assurance the accuracy of finite element simulation.

收稿日期: 2021-11-13; 修订日期: 2022-05-18

Received: 2021-11-13; Revised: 2022-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875409); 天津市教委重点项目(2020ZD08); 天津市“项目+团队”重点培养专项(XC202051); 2021 年天津市研究生科研创新项目(2021YJSS217)

Fund: The National Natural Science Foundation of China(51875409); Tianjin Education Commission Project(2020ZD08); Tianjin innovation team project(XC202051); 2021 Tianjin Graduate Scientific Research Innovation Project(2021YJSS217)

作者简介: 王丰(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为先进制造技术。

Biography: WANG Feng(1995-), Male, Postgraduate, Research focus: advanced manufacturing technology.

通讯作者: 李国和(1979—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为先进制造技术。

Corresponding author: LI Guo-he(1979-), Male, Doctor, Professor, Research focus: advanced manufacturing technology.

引文格式: 王丰, 刘蒙, 李国和, 等. 金属增减材制造本构模型获取方法研究进展[J]. 表面技术, 2023, 52(3): 52-63.

WANG Feng, LIU Meng, LI Guo-he, et al. Research Progress on Method for Obtaining Constitutive Model of Metal Material Additive Manufacturing[J]. Surface Technology, 2023, 52(3): 52-63.

Therefore, it is urgent to study on the establishment of constitutive relationship of additive manufacturing materials.

The work aims to summarize the methods of obtaining the constitutive model of additive manufacturing of metal materials and review the research results of obtaining the constitutive model from five aspects of quasi-static test, hot compression test, dynamic test, hardness equivalence and microstructure simulation. The common methods used to study the mechanical properties of additive manufacturing materials by obtaining the stress-strain relationship and fit the corresponding constitutive model are the quasi-static test, hot compression test and dynamic test. On this basis, the existing problems were analyzed and the future development direction was prospected. On the aspect of quasi-static test, researchers in China and abroad have studied the mechanical properties of materials based on Ramberg-Osgood model, and put forward a variety of modified constitutive models. For hot compression test and dynamic test, researchers mostly use the Johnson-Cook model to characterize the dynamic mechanical properties of materials, and modify the model according to different test conditions and materials. The strain rate of quasi-static test is no more than  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , and that of hot compression test is  $10^{-3} \sim 10 \text{ s}^{-1}$ . Compared with the high strain rate state of cutting process, there is still a large gap. Split Hopkinson pressure bar test is the most recognized method to obtain dynamic mechanical properties, which can obtain the stress-strain relationship of materials under high strain rate. However, the above three methods can only be used to study the mechanical properties of additive manufacturing materials based on the assumption of equivalent homogeneity. Due to the unique preparation process of additive manufacturing materials, their microstructure is not uniform, so the heterogeneity should be considered in the study of their mechanical properties. At present, the heterogeneous constitutive model can be constructed based on hardness equivalence and microstructure. Hardness equivalence method mainly fits the constitutive model of material equivalent relationship between hardness and stress. The direct hardness equivalence and nanoindentation test combined with finite element inverse method all can be used. Furthermore, the material inhomogeneity can be studied by combining the hardness distribution. However, this method is based on the empirical formula between hardness and stress and its accuracy cannot be guaranteed. The constitutive model based on microstructures is a comprehensive characterization of material mechanical properties by considering the microcosmic factors such as crystal size and shape, grain boundary, structural defects, dislocation slip, etc. However, the model is complicated and has too many parameters, which is still in the exploratory stage.

The unique forming characteristics of additive manufacturing material make it more difficult to obtain the constitutive model compared with traditional materials. Although relevant researches have been carried out on the acquisition method of constitutive model for metal additive manufacturing and certain research results have been achieved. However, there are still significant deficiencies, and further research is urgently needed. According to the existing research, the problems of sample preparation, more attention should be paid to the model reliability and model application scope in the study of obtaining the constitutive model of additive manufacturing materials. In addition, nanoindentation experiment, which is widely used in weld seam research, is one of the effective methods to obtain mechanical properties of additive manufacturing materials because it can be used to study the heterogeneity of microstructure.

**KEY WORDS:** additive/subtractive manufacturing; constitutive model; mechanical properties experiment; hardness; microstructure

增材制造通过使用高功率密度热源(如大功率激光束、电子束或等离子弧)熔化粉末或线材,形成牢固的冶金结合。通过改进材料成分及优化工艺可以显著提高零件的耐磨性及耐腐蚀性等力学性能。增材制造突破了传统制造工艺的极限,可以实现复杂几何结构零件的直接快速制造,在航空航天、船舶制造、模具等领域具有广阔的应用前景<sup>[1-2]</sup>。但逐层堆积的成形方式导致零件表面的“阶梯效应”,使得增材成形件表面质量较差<sup>[3-4]</sup>。因此,结合增材制造和传统切削加工的增减材复合制造技术应运而生,展现出了巨大的技术优势和良好的应用潜力。然而,在金属增材过程中,熔池温度梯度大,冷却速度快,进而产生“急

冷急热”效应,导致增材成形材料不仅硬度高,而且微观组织分布不均匀,给后续切削加工带来困难。此外,增材粉末或丝材、基体材料、工艺参数及工艺过程等因素都会对金属增材成形件的微观组织结构和力学性能产生显著影响<sup>[5]</sup>,增加了其后续切削加工研究的复杂性。

采用传统切削实验法进行熔覆层切削加工的研究需要大量的人力和财力,且无法研究增材成形材料微观组织与硬度不均匀对切削过程的影响。有限元法在金属切削领域的应用已经非常成熟,能够实现宏-微观切削过程的建模和预测,是金属切削加工实验研究的重要补充<sup>[6-7]</sup>,必将成为增减材制造中切削加工

研究的有效手段。材料本构模型是金属切削仿真的关键技术之一。对于传统铸造及锻造件,由于组织成分较均匀,可近似视为均质材料,通过准静态拉伸试验及霍普金森压杆试验等方法可以获得较为准确的本构模型<sup>[8]</sup>。而金属增材制造件的力学性能受到众多工艺参数影响,且微观组织分布极不均匀<sup>[9]</sup>,给增材制造材料本构模型的获取增加了难度,成为增减材制造切削加工有限元建模的最大难点所在。因此,亟需开展金属增减材制造本构模型获取方法的研究。

本文总结了金属增材制造材料本构模型的研究现状,对金属增材制造本构模型的获取方法进行了归纳和总结。目前针对金属增材成形材料本构模型的研究较少,而在焊缝力学性能分析和本构模型获取方面的研究较为成熟。激光增材与激光焊接成形过程较为相似,熔覆层与焊缝的组织分布也具有相似性。因此,焊缝材料的本构模型获取方法也可用于金属增材制造材料本构模型的获取,因此文中引用了部分焊缝材料本构建模方向的研究成果。

## 1 基于准静态试验的本构建模

准静态试验是一种常见的材料力学性能试验方法,可以获得材料的力学性能参数和应力-应变曲线。其基本过程是:对试样进行准静态压缩或拉伸,记录材料的载荷-位移曲线,通过曲线获得材料的屈服应力、抗拉强度、伸长率和断面收缩率等性能参数。进一步通过载荷-位移曲线获得材料的工程应力和工程应变,然后通过式(1)将其转换为流变应力和塑性应变,拟合出材料的应力-应变曲线。

$$\sigma = \sigma_e (1 + \varepsilon_e), \quad \varepsilon_e = \ln(1 + \varepsilon_e) \quad (1)$$

式中: $\sigma$ 和 $\varepsilon$ 为材料的流变应力和塑性应变; $\sigma_e$ 和 $\varepsilon_e$ 为材料的工程应力和工程应变。

郭风雷<sup>[10]</sup>在激光熔覆材料本构关系的研究中,根据实测 304 不锈钢的应力-应变数据拟合 Ramberg-Osgood 幂强化模型,为了引入材料屈服强度 $\sigma_0$ ,将应力-应变关系式改写为:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + K \frac{\sigma_0}{E} \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (2)$$

式中: $n$ 为硬化指数; $E$ 为杨氏模量。具体参数值见表 1。

表 1 304 不锈钢幂强化模型参数<sup>[10]</sup>  
Tab.1 Parameters of the power law model of 304 stainless steel<sup>[10]</sup>

$E/\text{GPa}$	$\sigma_0/\text{MPa}$	$K$	$n$
195	250	1.906	4.404

周玥丞<sup>[11]</sup>通过准静态拉伸试验测试了不同熔覆粉末及不同熔覆厚度对材料力学性能的影响,获得了增材制造不锈钢的力学性能参数,并建立了 Ramberg-

Osgood 幂强化模型和 Gardner 等人提出的 G-R-O 模型。

张家奇<sup>[12]</sup>通过准静态拉伸试验,获得了激光熔化沉积镍铜合金平行及垂直于激光扫描方向试样的力学性能参数,拟合材料的本构模型。还对拉伸试验过程进行了有限元模拟,并将试验结果与有限元模拟结果进行了对比,如图 1 所示。

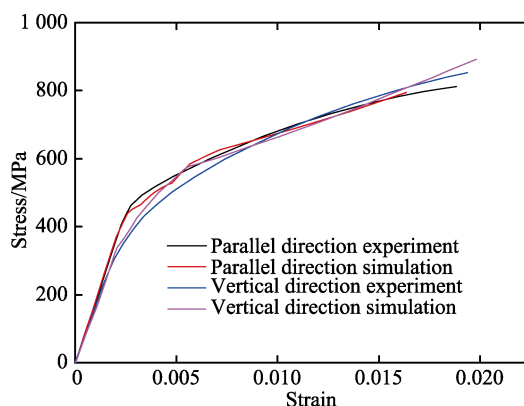


图 1 试验结果和仿真结果的比较<sup>[12]</sup>

Fig.1 Comparison of test results and simulation results<sup>[12]</sup>

Yang 等<sup>[13]</sup>针对多种金属 3D 打印材料,通过准静态拉伸试验获得了材料不同角度的应力-应变关系,建立了材料在不同方向的弹塑性本构方程,并用来描述材料的各向异性。Dai 等<sup>[14]</sup>通过不同温度下的拉伸试验,获得了增材制造 AlSi10Mg 在热变形过程中的流体力学行为,建立了材料的应变补偿 Arrhenius 本构模型。Costas 等<sup>[15]</sup>通过准静态拉伸试验,获得了选区激光熔化 AlSi10Mg 的相关力学性能参数,根据试验结果建立了弹塑性本构模型,并结合有限元模型预测了构件的结构响应。Zhang 等<sup>[16]</sup>采用准静态压缩试验及修正有限元模型,对激光选区熔化 Ti-6Al-4V 粉末冶金蜂巢结构的应力分布及力学性能进行了预测和验证,并建立了本构关系模型。

Siddiqui 等<sup>[17]</sup>采用激光烧结制备了 GP1 不锈钢的增材试样,对 xy 构型平面上不同方位的拉伸试样进行了试验。研究发现,GP1 不锈钢表现出不连续屈服,为了确定屈服强度,分别对低屈服强度、高屈服强度和 0.2%屈服强度下的参数进行拟合,并基于 Ramberg-Osgood 模型得到了 x 取向试样、y 取向试样和 45°取向试样的本构模型,其本构方程为:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \left( \frac{\sigma}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

式中: $K$ 为应变硬化系数; $n$ 为应变硬化指数。模型参数见表 2。

Siddiqui 等<sup>[18]</sup>还建立了塑性屈服 Hahn 模型,并将 Hahn 模型与 Ramberg-Osgood 模型的拟合结果进行比较。结果表明,Hahn 模型与实验数据吻合更好,其表达式为:

$$\sigma = q\varepsilon_p + 2\tau_0 \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{0.5bf(\rho_0 + c\varepsilon_p^a)} \right)^{1/N} \tag{4}$$

式中:  $q$  为宏观加工硬化系数;  $\dot{\varepsilon}$  为应变率;  $\tau_0$  为单位速度下的解析剪应力;  $\rho_0$  为平均位错密度;  $b$  为伯格斯向量;  $f$  为位错密度;  $c$  和  $a$  为位错密度相

关参数;  $N$  为位错速度相关常数<sup>[19]</sup>。  
在此基础上, 进一步进行了参数优化, 拟合实验数据的初始参数选用 Hahn 模型低碳钢参数, 再利用 MATLAB 曲线拟合工具箱中的非线性最小二乘法 and 信赖域算法对 Hahn 模型的参数进行优化, 优化数据见表 3。

表 2 烧结 GP1 不锈钢 Ramberg-Osgood 模型参数<sup>[17]</sup>

Tab.2 Parameters of Ramberg-Osgood model of Sintered GP1 stainless steel<sup>[17]</sup>

Orientation	Based upon 0.2% yield strength		Based upon upper yield strength		Based upon lower yield strength	
	$K/\text{MPa}$	$n$	$K/\text{MPa}$	$n$	$K/\text{MPa}$	$n$
$x$ -axis	1 096.3	0.102 7	1 120.9	0.119 3	1 370.3	0.270 0
$y$ -axis	1 260.4	0.097 2	1 281.4	0.108 0	1 573.8	0.242 1
$xy45^\circ$	1 152.7	0.109 7	1 178.4	0.124 8	1 383.4	0.234 6

Note:  $K$ —Monotonic strain-hardening coefficient;  $n$ —Monotonic strain-hardening exponent.

表 3 Hahn 模型优化参数<sup>[17]</sup>

Tab.3 Optimization parameters of Hahn model<sup>[17]</sup>

Orientation	$\tau_0/\text{MPa}$	$q/\text{MPa}$	$b/(10^{-7} \text{ mm}^{-1})$	$f$	$\rho_0$	$c/(10^5 \text{ mm}^{-2})$	$a$	$N$
$x$ -axis	152.4	3 266	3	$10^{-1}$	160.9	4.7	1.5	9
$y$ -axis	163	3 700	2.808	$10^{-1}$	255	4.7	1.5	7
$xy45^\circ$	124	3 813	3	$10^{-1}$	288.8	4.7	1.5	6

宋燕利<sup>[20]</sup>基于准静态单向拉伸试验和混合法则, 以 Hollomon 幂指数硬化方程为基础, 结合试样长度方向上的平衡条件, 建立了焊缝的本构模型, 其表达式为:

$$\sigma_w = \frac{P - (K_1 \varepsilon_w^{n_1} b_1 t_1 + K_2 \varepsilon_w^{n_2} b_2 t_2)}{A_w} \tag{5}$$

式中:  $\sigma_w$  为焊缝真实应力;  $\varepsilon_w$  为焊缝真实应变;  $P$  为水平方向载荷;  $A_w$  为焊缝的横截面面积;  $K_i$  ( $i=1,2$ )表示母材 1 和 2 的材料强化系数;  $n_i$  ( $i=1,2$ )表示母材 1 和 2 的应变硬化指数;  $b_i$  和  $t_i$  ( $i=1,2$ )为母材 1 和 2 的板料宽度和厚度。

准静态力学性能试验是一种基础力学性能测试试验, 可以准确获取材料的静态力学性能参数<sup>[21]</sup>。但准静态试验的应变率不超过  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , 而切削过程中材料的应变率可以达到  $10^3 \sim 10^6 \text{ s}^{-1}$ <sup>[22]</sup>, 因此准静态试验获得的材料力学性能无法准确描述切削过程中材料的高应变率流动行为, 不能满足增材制造材料切削加工有限元模拟的需求。

2 基于热压缩试验的本构建模

热压缩试验是利用等温压缩机在试验所需温度条件下将试样以不同应变速率进行压缩, 通过测量试样的高度、横截面积以及受力的变化获得材料的应力-应变关系, 计算公式为:

$$\varepsilon = \ln[(l - \Delta l)/l] \tag{6}$$

$$\sigma = [F \cdot (l - \Delta l)] / (A_{\text{rea}} \cdot l) \tag{7}$$

式中:  $l$  为试样的原始高度;  $\Delta l$  为压缩量;  $A_{\text{rea}}$  为圆柱体横截面的原始面积;  $F$  为试样所受的力。与准静态试验相比, 热压缩模拟试验可以获得  $10^{-3} \sim 10 \text{ s}^{-1}$  应变率范围的材料动态应力-应变关系<sup>[23]</sup>, 能够获得材料在更高应变率下的流变行为。

Niu 等<sup>[24]</sup>通过等温压缩试验获得了激光沉积 Ti6Al4V 的应力-应变曲线, 并且考虑了应变响应位置、温度及应变速率的耦合作用, 提出了一个改进的 Johnson-Cook 本构模型:

$$\sigma = (A_1 + B_1 \varepsilon + B_2 \varepsilon^2)(1 + C_1 \ln \dot{\varepsilon}^*) \exp[(\lambda_1 + \lambda_2 \ln \dot{\varepsilon}^*)(T - T_0)] \tag{8}$$

式中:  $\sigma$  和  $\varepsilon$  为材料的流动应力和塑性应变;  $\dot{\varepsilon}$  为等效应变率;  $T$  为试验温度;  $T_0$  为参考温度 (取为室温);  $A_1$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $C_1$ 、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  为材料常数。运用线性回归和非线性回归 2 种方法拟合了改进的 Johnson-Cook 本构模型参数, 修正参数见表 4。对 2 种求解方法所得的模拟数据与实验数据进行对比, 发现非线性回归在应变小于 0.4 时精度更高, 当应变大于 0.4 时, 2 种方法的预测结果近似。

此外, Niu 等在 Sellars 等<sup>[25]</sup>研究的基础上还建立了应变补偿 Arrhenius 模型:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp(Q/RT) = A_2 \sigma^{n_1} (\alpha \sigma < 0.8) \tag{9}$$

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp(Q/RT) = A_3 [\exp(\beta \sigma)] (\alpha \sigma < 1.2) \tag{10}$$

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp(Q/RT) = A_3 [\sinh(\alpha \sigma)]^{n_2} \text{ for all stress} \tag{11}$$

式中:  $\dot{\varepsilon}$  为应变率;  $Z$  为温度补偿应变速率;  $Q$  为活化能;  $R$  为气体常数,  $R=8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ 、 $n_1$ 、 $n_2$ 、 $\beta$ 、 $\alpha$  为材料参数。式 (11) 在低应

力水平（即  $\alpha\sigma < 0.8$ ）可由式（9）代替，在高应力水平（即  $\alpha\sigma < 1.2$ ）可由式（10）代替。材料常数  $\alpha$  是调节  $[\sin h(\alpha\sigma)]$  和  $\ln \dot{\epsilon}$  相对关系的一个可调参数<sup>[26]</sup>。分别采用线性回归和非线性回归对固定应变下的参数进行拟合，再对比分析所拟合的应变补偿 Arrhenius 模型。结果显示，应变补偿 Arrhenius 模型的预测结果更为准确。

还运用非线性回归拟合了修正的 Field Backofen 模型，表达式为：

$$\sigma = K_0 \epsilon^{n_3} \dot{\epsilon}^m \exp(bT + s\epsilon) \quad (12)$$

式中： $K_0$  为常数； $n_3$  为加工硬化指数； $m$  为速度影响指数； $b$  为温度影响指数； $s$  为软化影响指数。对 AZ31 和 AZ61 镁合金高温流动应力的研究表明，

材料常数  $K_0$ 、 $n_3$  和  $m$  可表示为：

$$K_0 = K_1 + K_2 \ln \dot{\epsilon} + K_3 / T \quad (13)$$

$$n_3 = n_4 + n_5 \ln \dot{\epsilon} + n_6 / T \quad (14)$$

$$m = m_1 + m_2 T \quad (15)$$

式中： $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  为关于  $K_0$  的材料常数； $n_4$ 、 $n_5$ 、 $n_6$  为关于  $n_3$  的材料常数； $m_1$ 、 $m_2$  为关于  $m$  的材料常数。修正 Field Backofen 模型的参数见表 5。验证结果表明，修正 Field Backofen 模型与实验数据吻合得较好。

增材成形材料独特的成形工艺导致其微观组织分布不均匀，使得利用热压缩试验获取材料的本构模型时，制备特定金相组织试样非常困难，限制了其在增材制造材料本构模型获取中的应用。

表 4 改进 Johnson-Cook 模型参数<sup>[24]</sup>  
Tab.4 Parameters of improved Johnson-cook model<sup>[24]</sup>

Constants	$A_1$	$B_1$	$B_2$	$C_1$	$\lambda_1$	$\lambda_2$
TLRM	433.37	319.22	-427.97	0.092 76	-0.006 01	0.000 055 02
NRA	548.83	-122.17	-58.068	0.091 43	-0.005 47	0.000 561

表 5 修正的 Field Backofen 模型参数<sup>[24]</sup>  
Tab.5 Parameters of modified Field Backofen model<sup>[24]</sup>

$K_1$	$K_2$	$K_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$	$m_1$	$m_2$	$b$	$s$
10 772 259	270 817.1	-8 034 816 343	-0.617 45	0.037 598	-1.095 16	0.011 3	-0.008 46	-0.467 46	733.006 1

### 3 基于动态力学试验的本构建模

分离式霍普金森压杆技术广泛应用于材料在高应变率和不同温度下的力学性能研究，是由 Hopkinson 于 1914 年首先提出的<sup>[27-28]</sup>。分离式霍普金森压杆系统原理如图 2 所示<sup>[29]</sup>。该技术通过气体压缩装置使撞击杆以一定初速度撞击入射杆，通过压缩试样在入射杆和透射杆内产生入射脉冲信号和反射脉冲信号，采用应变片进行应变测量，再通过弹性模量等已知参数

求解压缩试样材料的应力、应变，从而获得材料在不同应变率和不同温度下的应力-应变曲线。由于其设备简单，操作方便，应变率可达  $10^4 \text{ s}^{-1}$ ，被广泛应用于工程材料动态力学性能的研究，可以为金属切削加工有限元模拟提供较为准确的材料参数<sup>[30-31]</sup>。

谢中亚<sup>[32]</sup>采用分离式霍普金森压杆系统对 3D 打印钛合金进行动态力学性能试验，获得了不同应变率和不同温度下的应力-应变曲线。根据试验数据运用线性回归法建立了材料的 Johnson-Cook 本构模型，其表达式为：

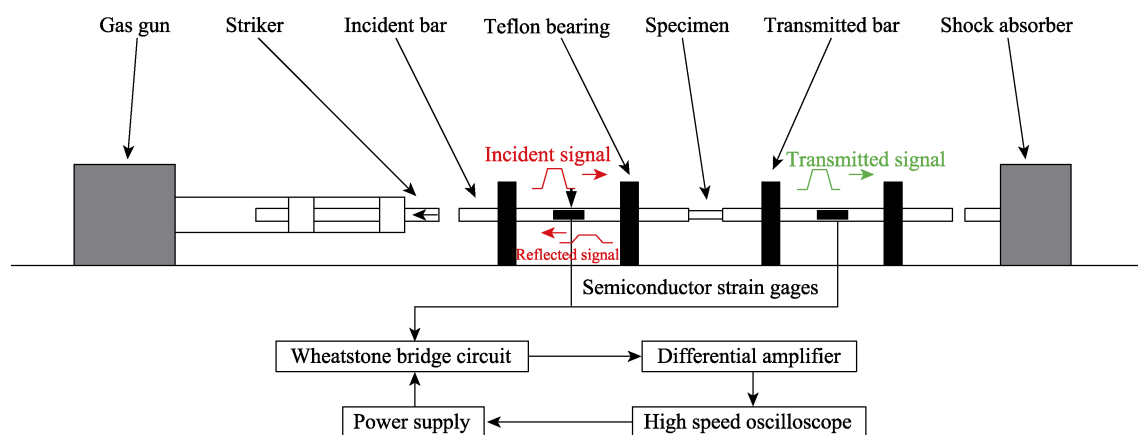


图 2 分离式霍普金森压杆系统原理  
Fig.2 Schematic diagram of Split Hopkinson pressure bar system



$$\sigma=(A+B\varepsilon^n)(1+C\ln \dot{\varepsilon}^*)(1-T^{*m})$$

(16)

$$\dot{\varepsilon}^*=\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}$$

(17)

$$T^*=\frac{T-T_0}{T_m-T_0}$$

(18)

式中:  $\dot{\varepsilon}$  为等效应变率;  $T$  为试验温度;  $T_0$  为参考温度 (取为室温);  $T_m$  为材料的熔点;  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $m$ 、 $n$  分别表示材料的屈服应力、应变硬化系数、应变率敏感系数、温度敏感系数和应变硬化指数。

试验所得的本构模型参数见表 6。在此基础上, 开展了 3D 打印钛合金铣削和钻削加工的有限元仿真, 对切削力及切削温度进行了预测, 并进行了切削参数优化。

表 6 3D 打印钛合金的 Johnson-Cook 模型参数<sup>[32]</sup>  
Tab.6 Parameters of Johnson-Cook model of 3D printed titanium alloy<sup>[32]</sup>

$A/\text{MPa}$	$B/\text{MPa}$	$C$	$m$	$n$
1 015	254.6	0.011	1.15	0.465

Wang 等<sup>[33]</sup>通过分离式霍普金森压杆试验, 获得了激光直接沉积 Ti-6Al-4V 钛合金的应力-应变曲线, 并建立了其 Johnson-Cook 本构模型。但试验是在室温下进行, 并没有考虑热软化效应对材料流变应力的影响。庞兴等<sup>[34]</sup>通过分离式霍普金森压杆试验, 获得了 U75V 铁轨钢在不同应变率下的应力-应变曲线, 通过最小二乘法确定了其 Johnson-Cook 本构模型参数。Zhao 等<sup>[35]</sup>通过分离式霍普金森压杆试验, 获得了激光增材制造 FeCr 合金的 Johnson-Cook 本构模型参数, 并对本构模型的应变硬化项进行了修正。Asala 等<sup>[36]</sup>通过分离式霍普金森压杆试验, 获得了增材制造 ATI 718 Plus 高温合金的应力-应变曲线, 拟合获得了基于应变补偿的 Arrhenius 模型和修正 Johnson-Cook 模型, 并对 2 种模型的可靠性进行了比较。

朱磊等<sup>[37]</sup>采用热模拟材料试验机、分离式霍普金森压杆装置对激光选区熔化钛合金在不同温度下进

行了准静态和动态压缩试验, 并基于试验结果拟合 Johnson-Cook 本构模型, 将所获取的本构模型与其他方式获取的 Ti-6Al-4V 合金本构模型进行对比, 见表 7。

Rohan 等<sup>[38]</sup>讨论了 Cu、Al6061-T6 和 Ti6-Al4-V 这 3 种材料冷喷涂工艺涂层的力学性能, 通过有限元模拟建立了考虑应变梯度塑性的改进型 Johnson-Cook 本构模型, 并将改进型 Johnson-Cook 本构模型、原 Johnson-Cook 本构模型和试验数据进行比较, 验证了模型的有效性。其改进型的 Johnson-Cook 本构模为:

$$\sigma_{\text{JC}}=[A+B\varepsilon^n]\left[1+C\ln\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\left(\frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_C}\right)^D\right][1-T^{*m}]$$

(19)

$$D=\begin{cases} 0, \dot{\varepsilon}_p < \dot{\varepsilon}_C \\ x, \dot{\varepsilon}_p \geq \dot{\varepsilon}_C \end{cases}, \quad \dot{\varepsilon}_C=yS^{-1}$$

(20)

其中, 当塑性应变率  $\dot{\varepsilon}_p$  大于等于临界应变率  $\dot{\varepsilon}_C$  ( $y$ ) 时,  $D$  变为非零参数。

Baxter 等<sup>[39]</sup>研究了金属激光烧结 AlSi10Mg\_200C 合金在高应变速率条件下水平方向和垂直方向上的力学性能。采用分离式霍普金森压杆系统分别对 2 个方向的样品进行了高应变率冲击试验, 在水平方向建立了一个带有幂函数强化部分的本构模型:

$$\bar{\sigma}=\sigma_s+K\varepsilon_p^n\cdot F_1\cdot F_2$$

(21)

在垂直方向用 Chang-Asaro 硬化方程代替幂函数模型, 探究了增材制造材料的各向异性。

$$\bar{\sigma}=\sigma_s+\left[(\sigma_\alpha-\sigma_s)\cdot\tanh\left(\frac{h_0}{\sigma_s-\sigma_0}\cdot\varepsilon_p\right)\right]\cdot F_1\cdot F_2$$

(22)

式中:  $\bar{\sigma}$  为等效应力;  $\sigma_s$  为屈服应力;  $\sigma_\alpha$  与饱和应力有关;  $h_0$  与初始硬化速率有关。为了确保在初始硬化后的软化阶段得到适当的拟合结果, 添加双曲正切函数  $F_1$ ; 为了精确匹配衰减到最终应变的曲线末端, 添加了指数量  $F_2$ , 并且有:

$$F_1=\left[\tan h^2\left(\frac{\varepsilon_p-\varepsilon_m}{A}\right)+B\right]$$

(23)

表 7 Ti-6Al-4V 合金 Johnson-Cook 本构参数对比结果<sup>[37]</sup>  
Tab.7 Comparison results of Johnson-Cook constitutive parameters of Ti-6Al-4V alloy<sup>[37]</sup>

Processing technology	$A/\text{MPa}$	$B/\text{MPa}$	$n$	$C$	$m$
Foundry	830	809	0.26	0.012	—
Forging	997.9	653.1	0.45	0.019 8	0.7
Rolling	985	830	0.379 4	0.016 1	0.764 6
Rolling	1 060	1 090	0.884	0.011 7	1.1
Rolling	1 104	1 036	0.634 9	0.013 9	0.779 4
Hot extrusion	782.7	49 834	0.28	0.028	1
Electron beam selective melting	1 119	838.6	0.473 4	0.019 21	0.643 7
Selective laser melting	1 100	899	0.32	—	—
Selective laser melting (Literature)	1 186	734	0.36	0.025	0.82

$$F_2 = \left[ 1 - \exp \left( C_0 \frac{(\varepsilon_p - \varepsilon_f)}{\varepsilon_p} \right) \right] \quad (24)$$

式中:  $\varepsilon_m$  是一个与拐点的波谷有关的应变;  $A$  控制波谷的宽度;  $B$  控制波谷的深度;  $C_0$  是一个常数, 与衰减的严重程度相关;  $\varepsilon_f$  与最终应变相关。验证结果表明, 在不同应变率下, 2 种模型的预测结果与实验结果基本一致, 水平方向所产生的屈服应力远大于垂直方向。

采用动态力学性能试验获取金属增材制造材料本构模型时, 一般通过试样取向来研究材料的各向异性, 但试样制备较为困难, 同时无法获取微米尺度的增材制造材料不均匀组织的力学性能。

## 4 基于硬度等效的本构建模

准静态试验、热压缩试验和动态力学试验是将材料视为均质材料进行研究的, 而硬度等效本构获取方法考虑了材料的组织分布的不均匀性, 通过硬度等效法可以建立硬度与流变应力之间的关系。现在常用的硬度等效本构模型获取方法包括: 基于维氏硬度建立硬度与力学性能之间的等效本构模型<sup>[30-42]</sup>和基于纳米压痕试验拟合材料的非均质本构模型<sup>[43-44]</sup>。

### 4.1 基于维氏硬度等效的本构建模

维氏硬度等效法是采用硬度-强度和应变硬化系数-强度关系的转换方程来获得材料的本构特性, 其应变硬化系数可由最小二乘回归确定, 但是该方法的可靠性尚有待验证。

詹民等<sup>[45]</sup>在汽车结构钢 S420MC 和 S520MC 的激光焊接焊缝处进行硬度测量, 得到焊缝界面不同测试点的维氏硬度, 如图 3 所示。再根据硬度与初始屈服应力的比例关系经验公式得到不同位置的初始屈服应力。在弹性阶段变形的应力-应变关系采用胡克定律描述:

$$\sigma = E\varepsilon \quad \sigma \leq \sigma_0 \quad (25)$$

塑性阶段采用 Hollomon 方程来描述各向同性金属材料的塑性流动:

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad \sigma > \sigma_0 \quad (26)$$

宋燕利<sup>[20]</sup>对塑性阶段本构模型中的应变硬化指数和强化系数选择进行了优化: 首先通过对焊缝的金相显微观测, 确定焊缝截面积及各区域的面积, 再结合母材和拼焊板的单向拉伸试验, 确定焊缝的平均力学性能, 估算出强化系数  $K$  的取值范围; 利用维氏硬度值与塑性应变对应的流变应力之比近似为常数的特性, 建立了维氏硬度与流变应力之间的关系式:

$$\sigma_{0.29} = \frac{g}{k_0} HV = 3.05 HV \quad (27)$$

式中:  $g$  表示重力加速度;  $k_0$  为比例常数, 取固定值 3.21。

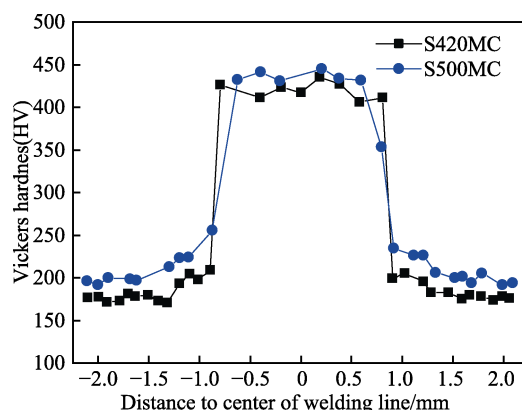


图 3 压痕实验维氏硬度值<sup>[45]</sup>

Fig.3 Vickers hardness value of indentation experiment<sup>[45]</sup>

通过维氏硬度与流变应力之间的关系反求出应变硬化指数  $n$  和维氏硬度、强化系数的关系。最后, 对所得流变应力的平均值与标准差进行最小值的塑性参数组合得到  $n$  和  $K$  的最佳组合, 拼焊板焊缝和热影响区的 Hollomon 本构方程参数见表 8。

表 8 拼焊板焊缝和热影响区的 Hollomon 本构参数<sup>[15]</sup>  
Tab.8 Hollomon constitutive parameters of tailor-welded blank welds and heat-affected zone<sup>[15]</sup>

Tailor welded blank	Material	$K/\text{MPa}$	$n$
DX56D    DX56D	HAZ	625	0.166 4
	WN	900	0.158 4
DX56D    DP600	HAZ1	700	0.202 2
	HAZ2	1 100	0.175 4
	WN1	1 500	0.167 6
	WN2	1 700	0.159 8

Note: HAZ—Heat-Affected Zone, WN—Weld Neck.

Yang 等<sup>[46]</sup>通过维氏硬度等效应力经验公式获得母材、热影响区和熔融区的屈服强度  $\sigma_s$  和拉伸强度  $\sigma_u$ , 再由 Considère 的颈缩准则推导出应变硬化指数  $n$ 。选用 Pham 本构方程描述结构钢焊缝的线弹性阶段、塑性稳定阶段和应变硬化阶段的应力-应变曲线。真实应力-应变曲线的线弹性阶段用直线表示, 塑性变形阶段假定为塑性变形量与屈服强度的乘积。真实应力-应变曲线的应变硬化行为可以用幂律方程来描述, 其本构方程为:

$$\sigma = E\varepsilon \quad \varepsilon < \varepsilon_s \quad (28)$$

$$\sigma = \sigma_s \varepsilon_s \quad \varepsilon < \varepsilon_{st} \quad (29)$$

$$\sigma = \sigma_s [1 + E(\varepsilon - \varepsilon_{st})/(\beta\sigma_s)]^n \quad \varepsilon \geq \varepsilon_{st} \quad (30)$$

$$\beta = \frac{\varepsilon_{st}}{\varepsilon_s} \quad (31)$$

式中:  $\varepsilon_s$  表示屈服应变;  $\varepsilon_{st}$  为应变硬化阶段起始点的应变;  $n$  为应变硬化指数;  $\beta$  为塑性稳定区的长度, 可以通过显微硬度试验获得。

焊接接头不同区域的真实应力-应变曲线如图 4 所示。通过维氏硬度等效本构模型细化了材料塑性阶

段的流变应力特性, 由于热影响区目前还没有利用维氏硬度预测其强度的理论模型, 文中采用母材等效应力特性的经验公式代替, 这将导致模型存在一定的误差。

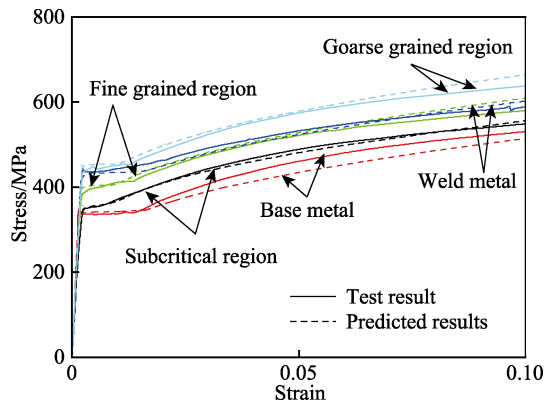


图 4 不同区域的应力-应变曲线对比<sup>[46]</sup>

Fig.4 Comparison of stress-strain curves in different zones<sup>[46]</sup>

此外, 在硬度对材料力学性能影响的研究方面, 李国和等<sup>[47]</sup>针对淬硬 45 钢开展了动态力学性能试验, 获得了不同硬度条件下材料的力学性能参数, 对 J-C 本构模型进行了修正, 将流变应力看成应变、应变率、温度和硬度的函数, 并通过算例证实了该方法的有效性。

## 4.2 基于纳米压痕试验的本构建模

纳米压痕试验是获取材料本构模型的一种常用方法。将载荷-压痕深度曲线的特征参数(压痕弹性模量、载荷曲线、最大载荷等)与本构参数建立多项式方程, 根据量纲分析可以得到材料的流动应力方程。由于纳米压痕法试验中压头尺寸为纳米级别, 因此能够实现微小区域力学性能的分析, 可以用于考察增材制造材料微观组织分布不均匀性的影响。

李银银等<sup>[48]</sup>通过纳米压痕试验获得纳米 WC 的激光熔覆材料的载荷-位移曲线, 运用纳米压痕有限元模拟对试验载荷-位移曲线进行修正。最后运用拉伸试件的晶体塑性有限元模型对熔覆层的晶体塑性常数进行反演, 获得了材料的应力应变关系。

宋燕利<sup>[20]</sup>通过纳米压痕试验获得了焊缝的载荷-压痕深度曲线、硬度-压痕深度曲线及焊缝横截面的硬度分布, 并拟合得到杨氏模量、强化系数、初始屈服应力和应变硬化指数。考虑宽度方向不均匀性的熔融区及热影响区弹塑性本构方程为:

$$\sigma(\varepsilon, x) = \begin{cases} (-6.116 \times 10^{-5} x^2 + 0.008772x + 257.1)\varepsilon, \\ \sigma \leq -0.001441x^2 + 0.453x + 907.6 \\ \frac{1777}{e^{(0.0012x - 0.2372)^2}} \varepsilon^{-1.217 \times 10^{-10} x^3 + 1.294 \times 10^{-7} x^2 - 3.445 \times 10^{-6} x + 0.1125}, \\ \sigma > -0.001441x^2 + 0.453x + 907.6 \end{cases} \quad (32)$$

Zhang 等<sup>[49]</sup>采用代表性体积单元 (RVE) 和纳米压痕法, 将 C-Mn 焊缝材料金相组织分为晶界铁素体

和针状铁素体, 采用纳米压痕法分别测定了这 2 种金相组织的弹塑性力学性能, 建立了应力-应变方程, 表达式为:

$$\sigma_{0.033} = \sigma_y \left( 1 + 0.033 \frac{E}{\sigma_s} \right)^n \quad (33)$$

其中:  $\sigma_{0.033}$  为应变为 0.033 时的流动应力, 通过计算得到晶界铁素体和针状铁素体的应力-应变曲线如图 5 所示。

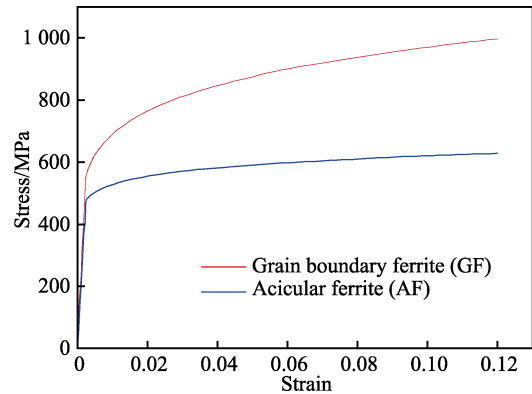


图 5 晶界铁素体和针状铁素体的应力-应变曲线及相关参数<sup>[49]</sup>

Fig.5 Stress-strain curves of grain boundary ferrite and acicular ferrite and related parameters<sup>[49]</sup>

随后, 利用光学显微镜获得实际的金相组织, 将显微组织图像转化为由像素组成的二值图像, 再通过灰度值提取单个相位, 将像素与有限单元匹配, 从而将像素集合转移到有限元软件中<sup>[50]</sup>。再由 2 种金相组织的比例分数定义代表性体积单元的本构模型, 并对实验数据和模拟结果进行了对比。所采用的本构模型为:

$$\sigma_{WM} = \sigma_{GF} V_{f,GF} + \sigma_{AF} V_{f,AF} \quad (34)$$

其中:  $\sigma_{WM}$  为整体焊缝应力;  $\sigma_{GF}$  和  $\sigma_{AF}$  分别为针状铁素体和晶界铁素体的应力值;  $V_{f,GF}$  和  $V_{f,AF}$  分别为针状铁素体和晶界铁素体的体积分数。模拟得到的应力-应变曲线与实验得到的应力-应变曲线的对比如图 6 所示。

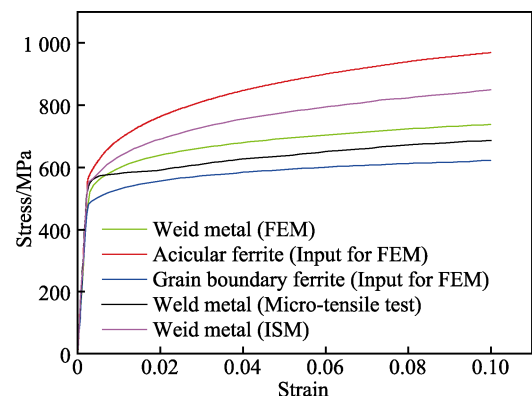


图 6 宏观拉伸应力-应变与 RVE 有限元模拟的应力-应变的对比<sup>[49]</sup>

Fig.6 Comparison of macroscopic tensile stress-strain and stress-strain in RVE finite element simulation<sup>[49]</sup>



硬度等效法主要以硬度-应力等效经验公式拟合材料的应力-应变关系,获得材料的本构模型。通过金相组织分区、拟合硬度梯度函数、建立材料代表性体积单元等方法研究增材成形材料的非均质性。通过维氏硬度等效和纳米压痕法可以完成不适用于传统力学性能试验的微细力学性能测试,对于增材制造材料复杂金相组织力学性能的研究更为合适。

## 5 基于微观组织分析的本构建模

通过对材料微观组织结构分析,考虑晶体尺寸和形貌、晶界连接、组织缺陷、错位滑移等微观因素,可以建立材料的本构模型。

Motaman 等<sup>[51]</sup>为了研究金属增材制造材料在微观结构中的非均质性,以高锰钢为研究对象,建立了考虑滑移和孪生机制的晶体塑性本构模型。其本构模型包括 3 种微观状态变量:单极/偶极位错密度、孪生动力学和孪生体积积分。根据 Orowan 方程定义单极位错是可移动的,偶极位错是固定的。根据 Olson 等<sup>[52]</sup>、Remy 等<sup>[53]</sup>和 Allain 等<sup>[54]</sup>提出的连续统一体公式定义了孪生动力学和孪生体积分数的演化关系。

Yuan 等<sup>[55]</sup>研究了激光沉积 Inconel718 高温合金微观组织中的晶粒几何形状、金相体积分数及晶粒尺寸,并研究了热处理对合金塑性流动行为的影响,建立了基于微观组织的本构模型。该本构模型考虑了材料塑性变形的长程阻力和短程阻力,长程阻力包括:晶界和亚晶界、位错远场和其他远场效应;短程阻力包括:Peierls 应力(对于 BCC 晶体结构)、点缺陷、滑移面和溶质原子相交的其他位错<sup>[56-57]</sup>。此外,动态时效对塑性应力的贡献被认为是流变应力的一个独立分量<sup>[58]</sup>。因此,塑性流变应力(等效应力) $\sigma$ 可表示为长程阻碍部分 $\bar{\sigma}_a^*$ 、短程阻碍部分 $\bar{\sigma}_a$ 和动态时效部分 $\bar{\sigma}_{\text{DSA}}$ 的和。

$$\sigma = \bar{\sigma}_a^* + \bar{\sigma}^* + \bar{\sigma}_{\text{DSA}} \quad (35)$$

式中:远程部分 $\bar{\sigma}_a^*$ 为 El-Awady 提出的与尺寸有关的广义泰勒强化定律;短程部分考虑了基体和析出相对热激活应力影响的不同,分为热基体贡献 $\bar{\sigma}_m^*$ 和热析出贡献 $\bar{\sigma}_p^*$ ,即 $\bar{\sigma}^* = \bar{\sigma}_m^* + \bar{\sigma}_p^*$ ;动态时效部分 $\bar{\sigma}_{\text{DSA}}$ 是为了描述与温度相关的动态时效流变应力。

Guo 等<sup>[59]</sup>通过微观结构表征、热力学模拟和强化机理分析,对混合增材制造哈氏合金力学性能不均匀性的机理进行了研究,并探索了材料的拉伸性能和显微硬度与材料微观组织变化的关系,建立了屈服强度叠加模型:

$$\sigma_Y = \sigma_{\text{Ni}} + \Delta\sigma_g + \Delta\sigma_s + \Delta\sigma_{\text{oro}} + \Delta\sigma_d \quad (36)$$

式中: $\sigma_{\text{Ni}}$ 为镍基体的本质强度; $\Delta\sigma_g$ 为晶界强化; $\Delta\sigma_s$ 为固溶强化; $\Delta\sigma_{\text{oro}}$ 为 Orowan 强化; $\Delta\sigma_d$ 为位错强化。

目前,关于金属增材成形材料基于微观组织的本构关系研究还处于初始阶段,研究成果鲜有报道。但是在传统金属材料研究领域取得了一定的成果,如杨雷等<sup>[60]</sup>和校文超等<sup>[61]</sup>分别建立了 TA15 钛合金基于高温塑性损伤微观组织的本构模型和 7075 铝合金基于热塑性微观组织的本构模型,其建模理论及方法对增材成形材料本构模型的获取具有一定的指导意义。

## 6 存在的问题及发展方向

尽管目前对金属增材制造材料本构模型的获取方法进行了相关研究,并取得了一定的研究成果,但仍存在显著不足,主要包括以下几点。

1) 通过准静态试验、热压缩试验及动态力学试验获取的本构模型主要是以均质材料特性表征增材成形材料的应力-应变关系,而忽略了增材制造材料的特殊制备工艺使得其内部微观组织分布不均匀的特性。因此,只是唯像拟合材料的应力-应变曲线,无法准确描述增材成形材料的力学性能。如果对模型有更高的要求,还是需要从理论角度建立具有物理意义的材料本构模型。此外,由于金属增材制造试验材料和成形工艺的多样性,导致增材制造材料力学性能的复杂多变,采用大量试验获得所需的本构参数是不切实际的。因此,亟待开发考虑增材成形材料微观组织非均性的简易本构模型获取方法。

2) 硬度等效本构模型可以在一定程度上表征材料的非均质性,但该方法是以硬度与流变应力之间的经验公式为基础的,准确性无法得到保证。深度学习算法具有强大的非线性整合能力和信息挖掘能力,可以采用深度学习算法建立材料硬度与流变应力的关系模型,有望大幅提升模型的准确性。

3) 通过微观组织分析建立材料的本构模型,可以对材料微观组织分布的不均匀性进行表征,但目前在这方面的研究还处在探索阶段,还需探究微观组织内部多元多相、单晶多晶等混乱度更高的内部晶体结构、晶体间接触关系以及位错、滑移等晶体缺陷对材料力学性能的影响。Voronoi 单元法可以模拟晶体或多晶界结构内部的力学性能,并对不同晶粒尺寸、形貌以及组织的各向异性进行表征。相较基于硬度等效的本构模型获取方法,运用 Voronoi 单元法建立金属增材制造材料的本构模型,具有较好的理论基础,在材料的非均质性研究中具有优势。将硬度等效和微观组织分析本构获取方法相结合,通过维氏硬度和纳米压痕试验建立材料硬度梯度分布的非均质本构模型;再结合代表体积单元、Voronoi 单元分析金相组织分布特点、内部晶体结构、晶界滑移等微观组织对力学性能的影响,建立基于硬度梯度分布的微观组织非均质本构模型,可以更好地从宏/微观层面对材料的非均质性进行表征。

4) 目前针对金属增材成形材料本构模型的研究

较少,而在焊缝力学性能分析和本构模型获取方面的研究较为成熟。激光增材与激光焊接成形过程较为相似,熔覆层与焊缝的组织分布也具有相似性。因此,焊缝材料本构模型获取方法对金属增材制造材料本构模型的获取具有一定的借鉴意义。

## 7 结语

增减材制造技术充分结合了增材制造和传统机械加工的优点,可以有效提高零件的力学性能,同时满足环保、节约资源的时代发展需求,具有广阔的市场前景和研究价值。但金属增材制造材料不仅硬度高,而且微观组织分布不均匀,给后续切削加工带来困难。影响金属增材成形件微观组织结构和力学性能的众多增材工艺因素,增加了对其进行切削加工研究的复杂性,使得采用传统切削实验进行增材制造材料后续切削加工的研究更加困难。有限元仿真建模已成为增减材制造过程中增材制造材料后续切削加工分析的有效手段,但增材制造独特的成形特性使得其本构模型的获取与传统材料相比更为复杂。尽管目前对金属增材制造材料本构模型的获取方法进行了相关研究,并取得了一定的研究成果,但仍存在显著不足,亟需开展进一步的深入研究。从现有研究来看,在进行增材制造材料本构关系获取研究时,应综合考虑试样制备、模型可靠性以及模型适用范围等问题。此外,目前在焊缝研究中获得较好应用的纳米压痕实验法由于能够考虑微观组织分布的不均匀性,是获取增材制造材料力学性能的有效方法之一。

### 参考文献:

- [1] SAMES W J, LIST F A, PANNALA S, et al. The Metallurgy and Processing Science of Metal Additive Manufacturing[J]. International Materials Reviews, 2016, 61(5): 315-360.
- [2] DEBROY T, WEI H L, ZUBACK J S, et al. Additive Manufacturing of Metallic Components—Process, Structure and Properties[J]. Progress in Materials Science, 2018, 92: 112-224.
- [3] KUMBHAR N N, MULAY A V. Post Processing Methods Used to Improve Surface Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies: A Review[J]. Journal of the Institution of Engineers (India): Series C, 2018, 99(4): 481-487.
- [4] BARARI A, KISHAWY H A, KAJI F, et al. On the Surface Quality of Additive Manufactured Parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(5): 1969-1974.
- [5] 张培荣. Cr/Ni 合金激光熔覆层车—滚复合加工表面完整性及耐腐蚀性研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [6] ZHANG Pei-rong. On Surface Integrity and Corrosion Resistance of Laser Cladded Cr/Ni Alloy Finished by Hybrid Turning and Burnishing[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [7] SIEBRECHT T, BIERMANN D, LUDWIG H, et al. Simulation of Grinding Processes Using Finite Element Analysis and Geometric Simulation of Individual Grains[J]. Production Engineering, 2014, 8(3): 345-353.
- [8] SALONITIS K, D'ALVISE L, SCHOINCHORITIS B, et al. Additive Manufacturing and Post-Processing Simulation: Laser Cladding Followed by High Speed Machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(9): 2401-2411.
- [9] KOK Y, TAN X P, WANG P, et al. Anisotropy and Heterogeneity of Microstructure and Mechanical Properties in Metal Additive Manufacturing: A Critical Review[J]. Materials & Design, 2018, 139: 565-586.
- [10] 刘颖, 董丽虹, 王海斗. 激光熔覆成型的各向异性表征方法研究现状[J]. 材料导报, 2019, 33(21): 3541-3546.
- [11] LIU Ying, DONG Li-hong, WANG Hai-dou. Research Progress on Anisotropic Characterization of Laser Cladding Molding[J]. Materials Reports, 2019, 33(21): 3541-3546.
- [12] 郭风雷. 激光修复材料本构研究及断裂性能有限元分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [13] GUO Feng-lei. Study on the Constitutive Relation and Fracture Properties of Materials Repaired by Laser Based on Finite Element Method[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [14] 周玥丞. 增材制造不锈钢的力学性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [15] ZHOU Yue-cheng. Mechanical Properties of Stainless Steel Products by Additive Manufacturing[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [16] 张家奇. 激光熔化沉积镍铜合金力学性能及颗粒强化机制研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2020.
- [17] ZHANG Jia-qi. Study on Mechanical Properties and Particle Strengthening Mechanism of Nickel-Copper Alloy Deposited by Laser Melting[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2020.
- [18] XIA Yang, XU Ke, ZHENG Guo-jun, et al. Investigation on the Elasto-Plastic Constitutive Equation of Parts Fabricated by Fused Deposition Modeling[J]. Rapid Prototyping Journal, 2019, 25(3): 592-601.
- [19] DAI Shi, DENG Zi chen, YU Ya jun, et al. Microstructure and Constitutive Model for Flow Behavior of AlSi<sub>10</sub>Mg by Selective Laser Melting[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 814: 141157.
- [20] COSTAS M, MORIN D, DE LUCIO M, et al. Testing and Simulation of Additively Manufactured AlSi<sub>10</sub>Mg Components under Quasi-Static Loading[J]. European Journal of Mechanics - A/Solids, 2020, 81: 103966.
- [21] ZHANG Lei, SONG Bo, ZHAO Ai-guo, et al. Study on Mechanical Properties of Honeycomb Pentamode Structures Fabricated by Laser Additive Manufacturing: Numerical Simulation and Experimental Verification[J].

- Composite Structures, 2019, 226: 111199.
- [17] SIDDIQUI S F, FASORO A A, COLE C, et al. Mechanical Characterization and Modeling of Direct Metal Laser Sintered Stainless Steel GP1[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2019, 141(3): 031009.
- [18] HAHN G T. A Model for Yielding with Special Reference to the Yield-Point Phenomena of Iron and Related Bcc Metals[J]. Acta Metallurgica, 1962, 10(8): 727-738.
- [19] SHIOYA T, SHIOIRI J. Elastic-Plastic Analysis of the Yield Process in Mild Steel[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1976, 24(4): 187-204.
- [20] 宋燕利. 激光拼焊板焊缝建模与冲压成形基础研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- SONG Yan-li. Fundamental Study on Weld Bead Modeling and Forming Behaviour for Laser Welded Blanks[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [21] ZHOU Tian-feng, WU Jun-jie, LIANG Zhi-qiang, et al. A Novel Constitutive Model for Ti-6Al-4V Alloy Based on Dislocation Pile-up Theory[J]. Materials Science and Technology, 2017, 33(11): 1379-1387.
- [22] 陈刚, 陈忠富, 陶俊林, 等. 45 钢动态塑性本构参量与验证[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(5): 451-456.
- CHEN Gang, CHEN Zhong-fu, TAO Jun-lin, et al. Investigation and Validation on Plastic Constitutive Parameters of 45 Steel[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(5): 451-456.
- [23] 刘文胜, 郭伦文, 马运柱, 等. 2A14 铝合金热变形的显微组织及流变行为[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(8): 2091-2097.
- LIU Wen-sheng, GUO Lun-wen, MA Yun-zhu, et al. Microstructure and Flow Behavior of 2A14 Aluminum Alloy during Hot Deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(8): 2091-2097.
- [24] NIU Yong, SUN Zhong-gang, WANG Yao-qi, et al. Phenomenological Constitutive Models for Hot Deformation Behavior of Ti6Al4V Alloy Manufactured by Directed Energy Deposition Laser[J]. Metals, 2020, 10(11): 1496.
- [25] SELLARS C M, MCG TEGART W J. Hot Workability[J]. International Metallurgical Reviews, 1972, 17(1): 1-24.
- [26] SLOOFF F A, ZHOU J, DUSZCZYK J, et al. Constitutive Analysis of Wrought Magnesium Alloy Mg-Al4-Zn1[J]. Scripta Materialia, 2007, 57(8): 759-762.
- [27] 陈荣, 卢芳云, 林玉亮, 等. 分离式 Hopkinson 压杆实验技术研究进展[J]. 力学进展, 2009, 39(5): 576-587.
- CHEN Rong, LU Fang-yun, LIN Yu-liang, et al. A Critical Review of Split Hopkinson Pressure Bar Technique[J]. Advances in Mechanics, 2009, 39(5): 576-587.
- [28] 赵习金. 分离式霍普金森压杆实验技术的改进和应用[D]. 长沙: 中国人民解放军国防科学技术大学, 2003.
- ZHAO Xi-jin. Improvement and Application of Experimental Technology of Separated Hopkinson Pressure Bar[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003.
- [29] 常志宇. 钨合金基体材料动态性能及绝热剪切局部化分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- CHANG Zhi-yu. Dynamic Properties and Analysis of Adiabatic Shearing Localization of Tungsten Alloy Matrix Material[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005.
- [30] 李国和, 王敏杰. 淬硬 45 钢在高温、高应变率下的动态力学性能及本构关系[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(4): 433-438.
- LI Guo-he, WANG Min-jie. Dynamic Mechanical Properties and Constitutive Relationship of Hardened Steel (45HRC) under High Temperature and High Strain Rate[J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(4): 433-438.
- [31] 曹自洋, 何宁, 李亮, 等. 高速切削钛合金 Ti6Al4V 切屑的形成及其数值模拟[J]. 中国机械工程, 2008, 19(20): 2450-2454.
- CAO Zi-yang, HE Ning, LI Liang, et al. Chip Formation and Its Numerical Simulation in High Speed Cutting of Ti6Al4V Alloy[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(20): 2450-2454.
- [32] 谢中亚. 激光增材制造钛合金切削加工性能基础试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- XIE Zhong-ya. Basic Experimental Study on Machinability of Titanium Alloy by Laser Increasing[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.
- [33] WANG Tao, QIAO Wei-lin, WANG Sheng, et al. Ti-6Al-4V Alloy Fabricated by Laser Direct Deposition: Dynamic Mechanical Properties, Constitutive Model, and Numerical Simulation[J]. Surface Review and Letters, 2020, 27(8): 1950191.
- [34] 庞兴, 阚前华, 赵吉中, 等. U<sub>75</sub>V 焊接接头三维轮轨滚动接触有限元分析[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2019, 38(1): 73-77.
- PANG Xing, KAN Qian-hua, ZHAO Ji-zhong, et al. Finite Element Analysis on Three-Dimensional Wheel-Rail Rolling Contact of U<sub>75</sub>V Welded Joint[J]. Journal of Chengdu University (Natural Science Edition), 2019, 38(1): 73-77.
- [35] ZHAO Yan-hua, SUN Jie, LI Jian-feng, et al. A Comparative Study on Johnson-Cook and Modified Johnson-Cook Constitutive Material Model to Predict the Dynamic Behavior Laser Additive Manufacturing FeCr Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 723: 179-187.
- [36] ASALA G, ANDERSSON J, OJO O A. Analysis and Constitutive Modelling of High Strain Rate Deformation Behaviour of Wire-Arc Additive-Manufactured ATI 718Plus Superalloy[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 103(1): 1419-1431.
- [37] 朱磊, 刘洋, 孟锦晖, 等. 激光选区熔化 Ti-6Al-4V 合金的动态力学性能及其本构关系[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(9): 90-99.
- ZHU Lei, LIU Yang, MENG Jin-hui, et al. Dynamic Mechanical Properties and Constitutive Relationship of Selective Laser Melted Ti-6Al-4V Alloy[J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(9): 90-99.
- [38] CHAKRABARTY R, SONG Jun. A Modified Johnson-

- Cook Material Model with Strain Gradient Plasticity Consideration for Numerical Simulation of Cold Spray Process[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 397: 125981.
- [39] BAXTER C, CYR E, ODESHI A, et al. Constitutive Models for the Dynamic Behaviour of Direct Metal Laser Sintered AlSi<sub>10</sub>Mg<sub>200</sub>C under High Strain Rate Shock Loading[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 731: 296-308.
- [40] KHALFALLAH A. Experimental and Numerical Assessment of Mechanical Properties of Welded Tubes for Hydroforming[J]. *Materials & Design*, 2014, 56: 782-790.
- [41] HERTELÉ S, GUBELJAK N, DE WAELE W. Advanced Characterization of Heterogeneous Arc Welds Using Micro Tensile Tests and a Two-Stage Strain Hardening ('UGent') Model[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2014, 119: 87-94.
- [42] HERTELÉ S, O'DOWD N, VAN MINNEBRUGGEN K, et al. Fracture Mechanics Analysis of Heterogeneous Welds: Numerical Case Studies Involving Experimental Heterogeneity Patterns[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2015, 58: 336-350.
- [43] PHAM T H, KIM S E. Determination of Mechanical Properties in SM490 Steel Weld Zone Using Nanoindentation and FE Analysis[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 114: 314-324.
- [44] PAMNANI R, KARTHIK V, JAYAKUMAR T, et al. Evaluation of Mechanical Properties across Micro Alloyed HSLA Steel Weld Joints Using Automated Ball Indentation[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 651: 214-223.
- [45] 詹民民, 代欣, 曹澍, 等. 激光焊线强度模型的建立以及失效预测[J]. *机械强度*, 2019, 41(2): 419-424.  
ZHAN Min-min, DAI Xin, CAO Shu, et al. Establishment of Intensity Model for Laser Welding Line and Prediction of Failure[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2019, 41(2): 419-424.
- [46] PENG Yang, WU Chao, GAN Jie-liang, et al. Characterization of Heterogeneous Constitutive Relationship of the Welded Joint Based on the Stress-Hardness Relationship Using Micro-Hardness Tests[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 202: 37-45.
- [47] 李国和, 王敏杰, 康仁科. Fe-36Ni 高温高应变率动态力学性能及其本构关系[J]. *材料科学与工艺*, 2010, 18(6): 824-828.  
LI Guo-he, WANG Min-jie, KANG Ren-ke. Dynamic Mechanical Properties and Constitutive Model of Fe-36Ni Invar Alloy at High Temperature and High Strain Rate[J]. *Materials Science and Technology*, 2010, 18(6): 824-828.
- [48] 李银银, 蒋玮. 基于纳米压痕的激光修复层晶体材料常数反演方法[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(2): 97-104.  
LI Yin-yin, JIANG Wei. Extracting Crystal Parameters of Laser Repaired Layer by Nanoindentation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(2): 97-104.
- [49] ZHANG Cheng-ze, GONG Bao-ming, DENG Cai-yan, et al. Computational Prediction of Mechanical Properties of a C-Mn Weld Metal Based on the Microstructures and Micromechanical Properties[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 685: 310-316.
- [50] SHEN Wei, FAN Qun-bo, WANG Fu-chi, et al. Modeling of Micro-Crack Growth during Thermal Shock Based on Microstructural Images of Thermal Barrier Coatings[J]. *Computational Materials Science*, 2009, 46(3): 600-602.
- [51] MOTAMAN S, ROTERS F, HAASE C. Anisotropic Polycrystal Plasticity Due to Microstructural Heterogeneity: A Multi-Scale Experimental and Numerical Study on Additively Manufactured Metallic Materials[J]. *Acta Materialia*, 2020, 185: 340-369.
- [52] OLSON G B, COHEN M. Kinetics of Strain-Induced Martensitic Nucleation[J]. *Metallurgical Transactions A*, 1975, 6(4): 791-795.
- [53] REMY L. Kinetics of F.C.C. Deformation Twinning and Its Relationship to Stress-Strain Behaviour[J]. *Acta Metallurgica*, 1978, 26(3): 443-451.
- [54] ALLAIN S, CHATEAU J P, BOUAZIZ O. Constitutive Model of the TWIP Effect in a Polycrystalline High Manganese Content Austenitic Steel[J]. *Steel Research*, 2002, 73(6/7): 299-302.
- [55] YUAN Kang-bo, GUO Wei-guo, LI Dong-wu, et al. Influence of Heat Treatments on Plastic Flow of Laser Deposited Inconel 718: Testing and Microstructural Based Constitutive Modeling[J]. *International Journal of Plasticity*, 2021, 136: 102865.
- [56] NEMAT-NASSER S, LI Yu-long. Flow Stress of F.C.C. Polycrystals with Application to OFHC Cu[J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(2): 565-577.
- [57] WANG Jian-jun, GUO Wei-guo, GAO Xiao-sheng, et al. The Third-Type of Strain Aging and the Constitutive Modeling of a Q235B Steel over a Wide Range of Temperatures and Strain Rates[J]. *International Journal of Plasticity*, 2015, 65: 85-107.
- [58] GUO Wei-guo, GAO Xiao-sheng. On the Constitutive Modeling of a Structural Steel over a Range of Strain Rates and Temperatures[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 561: 468-476.
- [59] GUO Bo-jing, ZHANG Ya-shan, HE Feng, et al. Origins of the Mechanical Property Heterogeneity in a Hybrid Additive Manufactured Hastelloy X[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, 823: 141716.
- [60] YANG Lei, WANG Bao-yu, LIU Gang, et al. Hot Tensile Behavior and Self-Consistent Constitutive Modeling of TA15 Titanium Alloy Sheets[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, 24(12): 4647-4655.
- [61] XIAO Wen-chao, WANG Bao-yu, WU Yong, et al. Constitutive Modeling of Flow Behavior and Microstructure Evolution of AA7075 in Hot Tensile Deformation[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 712: 704-713.