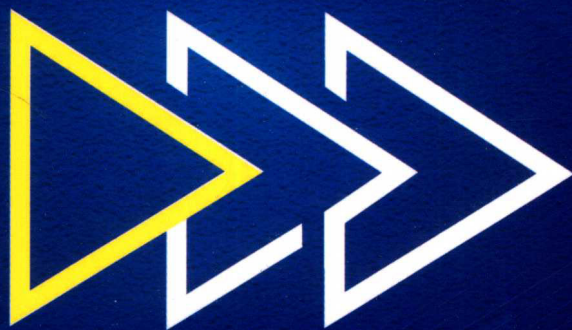


金属材料流变学 理论及应用

孙蓟泉 尹衍军 编著



科学出版社

金属材料流变学理论及应用

孙蓊泉 尹衍军 编著

北 京

内 容 简 介

本书是关于材料流变学及其在金属材料加工中应用的专著。全书共 7 章, 主要内容包括: 流变学研究内容及发展历史; 物体运动与变形、应力与应变的描述; 材料在变形过程中的流变学本构模型理论; 合金材料在凝固过程中的流变学行为; 流变学在金属材料铸造及半固态成形过程中的应用; 流变学在材料塑性变形中的应用; 金属材料在焊接过程、热轧过程及激光加工过程中的应用。本书内容新颖, 不仅具有理论价值, 而且有很好的工程应用背景。

本书可供材料科学、材料成型及控制工程、机械工程、航空航天、国防工程和工程力学等领域的科研人员参考, 也可作为高等学校相关专业教师、研究生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

金属材料流变学理论及应用 / 孙蓊泉, 尹衍军编著. —北京: 科学出版社, 2019.5

ISBN 978-7-03-060258-9

I. ①金… II. ①孙… ②尹… III. ①金属材料-流变学-研究 IV. ①TG11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 296164 号

责任编辑: 裴 育 陈 婕 纪四稳 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 蓝 正

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 5 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2019 年 5 月第一次印刷 印张: 10 1/2

字数: 210 000

定价: 90.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

金属材料是一种历史悠久、发展成熟的工程材料，由于其具有较高的强度、硬度等力学性能，优异的塑性、韧性等工艺性能，良好的导电、导热等物理性能，是工业和现代科学技术中最重要的基础材料之一。

近年来，受到能源、资源和环境等方面的压力以及来自非金属材料的挑战，对金属材料的生产与使用提出了更高的要求，要求金属材料制品不仅具有高品质、长寿命，而且在生产制造及使用过程的整个生命周期内都要做到节能环保。因此，一些高强度、高韧性的新型金属材料和生产这些新材料的新工艺不断涌现。随着材料强度的不断增高，材料成形难度也不断增加，特别是相变增强材料，这使得传统的金属材料成形理论出现了不足与缺陷，即传统材料的本构模型无法准确描述金属材料成形过程中金属的流动与变形关系，因此也就无法正确制定合理的成形工艺制度，从而使高强度金属材料在成形过程中出现成形精度低、性能差、金属收得率不高等问题。

流变学是研究物质流动与变形规律的科学，目前在材料成形领域构建本构模型方面越来越受到国内外学者的重视。流变学本构模型综合考虑了时间、温度等因素，弱化了流体与固体的界限，既适用于材料的液态成形，也适用于材料的固态成形，更适用于目前被广泛关注的金属材料增材制造(3D 打印)过程中金属材料的流动、凝固与变形规律的描述。因此，材料流变学理论将高温蠕变、应力松弛和黏性、弹性、塑性流动与变形有机地结合起来，在研究金属材料成形过程方面更具普遍性和优越性，已成为国际上建立材料本构模型的发展方向与趋势。

《金属材料流变学理论及应用》的作者孙蓓泉教授长期从事金属材料成形与控制领域的科研与教学工作，在基础理论与应用技术开发方面都取得了颇丰的成果。作者在完成国家自然科学基金项目的基础上，对其研究成果进行总结、提升，形成了该书理论与实践相结合的特色。该书不仅丰富了流变学在构建材料本构模型方面的理论，而且广泛地论述了流变学本构模型在铸造(模铸、连铸)、半固态成形、金属塑性加工(冲压、热轧)、材料增材制造(焊接、激光熔覆)等领域的具体应用，体现了研究工作的开拓性、深入性和创新

性,使该书内容更加全面、系统、厚重和富有新意。这是金属材料成形技术发展的客观需要,并为金属材料成形工艺制度的选择与制定提供了科学依据,也将促进我国金属材料成形技术的进一步发展。

王 一 德

中国工程院院士

2018年7月

前言

金属材料是人类社会发展的重要物质基础,是生产制造各种机器与工具的基础原材料。金属材料的性能决定着材料的适用范围及应用的合理性。而材料及成形过程中所呈现的流动与变形关系是制定材料成形工艺的重要因素。流变学是研究物质流动和变形的科学,也是研究力与力的作用效果内在联系的一门科学。其研究对象既包括流体,也包括固体。本书所论述的材料流变学主要研究各种材料在服役和成形过程中的蠕变和应力松弛现象、屈服值,以及材料的流变模型和本构方程。

流变学理论已经在化工、建材以及生物材料领域取得很大的进展,近年来在铸造、凝固和冲压等金属成形领域也有成功的应用范例。金属材料在成形过程中,通常被看成弹塑性材料,在计算材料形变时不考虑时间的影响,即认为若载荷不变,变形将保持不变。事实上,有些材料即使在载荷不变的情况下,随着时间的增长,变形也会不断增加,同样一种材料,由于受力时间不同,将呈现出不同的流变性能。对于高温下的金属热成形工艺,如铸造、焊接及激光熔覆等液态成形工艺,传统的弹塑性本构模型无法准确描述材料在液态相变过程中存在的流动与变形行为。即使是热轧、热锻等固态成形工艺,由于成形温度高,在成形过程中保持应力不变和足够高的温度,材料也会发生高温蠕变变形。由此可见,在金属成形过程中,传统的弹塑性、黏弹性理论在描述材料的本构关系上都有一定的局限性,而流变学理论引进了时间变量,并考虑了温度、热流、熵等因素的综合影响,因此流变学在描述金属成形过程中的材料本构关系更具普遍性和优越性,是研究材料流动与变形的统一本构理论的基础。本书旨在利用材料流变学理论建立能够正确反映金属材料流动与变形的统一本构模型,并对金属材料在各种成形工艺的应用进行论述。

本书共7章,由孙蓓泉、尹衍军共同编著。第1章介绍流变学的含义、发展过程及其应用领域;第2章介绍物体的运动与变形、应力与应变;第3章介绍常见的流变学模型和统一本构方程模型的构想;第4~7章分别介绍流变学理论在金属铸造、半固态成形、金属塑性加工、材料增材制造等领域的具体应用。

在本书的撰写过程中,作者得到中国工程院王一德院士,北京科技大学唐荻教授、米振莉研究员、苏岚博士的指导与支持,在此表示衷心感谢。特别是王一德院士在百忙之中为本书作序,并对书稿的内容与结构提出了很多指导性建议,作者受益匪浅,再次向王一德院士深表谢意。

本书的主要研究内容是在国家自然科学基金项目支持下完成的,对于江海涛副研究员、苏岚博士、高续涛博士、彭世广博士、李双娇硕士、牛闯硕士、藤胜阳硕士、李斌硕士、杨程大硕士、孙学中硕士、杨登翠在读博士、阚鑫锋在读博士等课题组成员在项目研究工作中做出的成绩和贡献表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,诚恳广大读者批评指正。

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 流变学概述及发展历史	1
1.1.1 流变学含义	1
1.1.2 流变学发展历史	2
1.1.3 流变学研究内容	3
1.2 流变学在金属材料加工中的应用	4
1.2.1 流变学在铸造加工中的应用	4
1.2.2 流变学在半固态金属加工中的应用	5
1.2.3 流变学在塑性加工中的应用	5
1.2.4 流变学在其他金属材料加工中的应用	6
第 2 章 运动与变形、应力与应变描述	9
2.1 物体的运动	9
2.2 变形与运动的空间与物质描述	10
2.3 应力分析	11
2.3.1 一点的应力状态	12
2.3.2 应力张量	13
2.3.3 主应力、应力张量不变量以及其他特征应力	14
2.4 应变分析	24
2.4.1 一点的应变状态	25
2.4.2 应变张量	27
2.4.3 主应变、应变张量不变量以及其他特征应变	27
第 3 章 流变学本构关系	32
3.1 流变模型理论	32
3.2 常见的流变模型	34
3.2.1 Kelvin-Voigt 模型	35
3.2.2 Maxwell 模型	38

3.2.3	Poynting-Thompson 模型	40
3.2.4	Bingham 黏弹塑性模型	42
3.3	多维流变模型	43
3.3.1	二维黏弹性流变模型	43
3.3.2	正交各向异性黏弹性模型	47
3.3.3	多孔正交黏弹性模型	50
3.3.4	三维黏弹性流变模型	54
3.3.5	非正交黏弹性流变模型	57
3.4	统一本构理论	59
3.4.1	统一本构方程的一般特征	59
3.4.2	流动法则与运动方程	61
3.4.3	内变量演化方程	64
3.4.4	稳定性和单值性准则	65
第 4 章	合金材料在凝固过程中的流变行为	67
4.1	引入内变量参数的本构关系	67
4.1.1	模型框架	68
4.1.2	黏塑性势	69
4.1.3	内变量演化方程	71
4.2	基于热-力模型凝固过程的流变学本构关系	72
4.2.1	热控制方程	72
4.2.2	力控制方程	73
4.2.3	黏塑应变性模型	73
第 5 章	流变学在铸造及半固态成形过程中的应用	75
5.1	铝硅合金的铸造流变特性	75
5.1.1	模型建立	75
5.1.2	数学方程建立	78
5.2	连续铸钢	80
5.2.1	模型建立	80
5.2.2	弹性变形	81
5.2.3	黏塑性变形	83
5.2.4	计算案例	85
5.3	半固态成形	86
5.3.1	半固态合金的流变现象	87
5.3.2	本构模型描述	87

第 6 章 流变学在材料塑性变形中的应用	93
6.1 本构关系的建立	94
6.2 TRIP 钢本构模型的建立	97
6.2.1 相变诱导塑性钢的黏塑性分析	97
6.2.2 蠕变条件下的本构关系	100
6.2.3 应力松弛条件下的本构关系	105
6.3 微观力学与宏观流变模型的内在关系	110
6.3.1 组织演变观察与分析	110
6.3.2 残余奥氏体测定	112
6.4 非弹性回复分析	115
6.5 有限元仿真实例	120
第 7 章 流变学在其他金属加工过程中的应用	124
7.1 焊接过程中的流变学应用	124
7.1.1 热黏塑性耦合分析	124
7.1.2 弹黏塑性分析	126
7.2 热轧过程中的流变学应用	128
7.3 激光加工过程中的流变学应用	133
参考文献	137
附录 A 本构理论的基础知识	141

第 1 章 绪 论

材料是人类赖以生存的物质基础,根据材料的不同特性可将其制造成各种机器、工具为人类服务。材料在生产、制造以及使用过程中都会呈现出不同的流动与变形特性,而这些性能将直接影响材料的生产以及服役过程中的可靠性与安全性。在研究材料的特性时,往往以传统的弹性理论、塑性理论和牛顿流体等经典理论为基础,但在 20 世纪 20 年代,学者发现使用这些经典理论无法解释橡胶、塑料、油漆、玻璃、混凝土及金属等材料成形过程中复杂的流动与变形特性。Maxwell、Kelvin、Bingham 等科学家发现这些材料流动与变形特性均与时间存在紧密关系,即具有时间效应,于是产生了以材料流动和变形与时间的关系为特征的流变学理论。

1.1 流变学概述及发展历史

1.1.1 流变学含义

流变学是研究物质流动和变形的科学,也是研究力与力的作用效果内在联系的科学,其研究对象既包括流体,也包括固体。

自然界中,物质是不断变化的,而这种运动的结果要经过千万年的时间才能明显观察到,虽然时间漫长但表现出流动性;液态水在极短的时间内施加力的作用可以表现出弹性体的性质。这两个现象表明,物质本身固有弹性和黏性的内在性质,因力作用的时间不同而发生相对转化。这种考虑了时间维度效应的力与变形之间的关系,是流变学要解决的问题。

所有流变现象归根结底都是力学现象,一般力学研究欧几里得(Euclid)固体,弹性力学研究胡克(Hooke)固体,流体力学则研究帕斯卡流体和牛顿流体。在传统的弹性力学中,变形关系取决于某一时刻作用的力,而与这一时刻前的加载历程无关,因此物体变形规律中不包含作为独立变数的时间。牛顿流体力学的基本假设是剪切应力与剪切速率呈线性关系。随着人类生产实践范围的扩大,人们发现当材料的载荷增大时,其变形逐渐取决于加载速度,应力越接近材料的屈服点,时间因素的作用就越明显,这说明物体的应力、

应变、时间之间不是简单的函数关系。而流变学是根据应力、应变和时间来研究物质流动及变形的构成与发展一般规律的科学,其任务是用描述真实材料特性的模型把物体、构形、力系三者联系起来(包括温度、熵、自由能等量),建立包括时间因素的本构方程,以描述材料在各种复杂外界条件下的流动和变形特性。

弹性、塑性、黏性和强度是基本的流变性质,其他性质可以由这些基本性质演化得到。Reiner 等^[1]认为,在特定的条件下,所有的材料都具有流变特性,即所有真实存在的物质均具有流变特性,只是程度不同。在工程材料中,流变学扮演了一个非常重要的角色,尤其是材料的蠕变特性、高温下的流变特性、长时间受载下的塑性变形等。

1.1.2 流变学发展历史

经过长期探索,人们发现一切材料都具有时间效应,于是出现了流变学。流变学在 20 世纪 30 年代后得到了蓬勃发展。1928 年,流变学的奠基人 Bingham 与希腊哲学家 Heraclitus 提出了“一切皆流”的说法。流变学形成独立科学是在 1929 年,在这一年美国首先成立了流变学学会。1932 年,荷兰皇家科学院成立黏度协会,1950 年改称为荷兰流变学学会。1940 年,英国成立流变学家俱乐部。1950 年以后,多个国家先后成立流变学学会。1985 年,中国才成立流变学学会。首届国际流变学会议于 1948 年 9 月在荷兰召开,以后每 5 年在不同成员方召开一次。流变学初期应用于胶体化学中,随后又广泛应用于聚合物、纤维、塑料、岩石、土、水泥、混凝土、沥青材料等物质中。经过多年的发展,流变学已经成为处于弹性力学、塑性力学、流体力学的前沿科学,其相关科学涉及物理学、工程学、医学、生物学、农学、药学、食品学等,是物理、化学、力学交叉产生的新的生长点。流变学研究对象已发展为聚物流变学、生物流变学、悬浮流变学、磁流变学、矿山流变学、食品流变学、电流变学、金属流变学等。流变学应用到的数学知识有积分变换、张量计算、泛函分析、微分几何、数理逻辑、概率论等。

我国流变学研究起步较晚,在 20 世纪 60 年代才开始有学者对其进行研究。随着我国材料科学和工程技术的不断发展,人们遇到了许多非牛顿流体,从而促进了对流变学的研究。1978 年制定的全国力学学科发展规划中指出,流变学是必须重视和加强的薄弱领域。1985 年我国成立流变学专业委员会,该组织于 1988 年成为国际流变学学会会员之一。流变学从一开始就是作为一门实验基础学科发展起来的,随着实验原理、测试技术和测试设备的发展以及电子计算机的应用,流变学的研究朝着更加广泛、更加

深入的方向快速发展^[2]。

非牛顿流体的流变特性十分明显,如韦森堡效应、射流胀大现象、二次流、无管虹吸、剪切变稀或剪切变稠等特性,因此学者的研究工作主要集中在塑料、石油等行业。1965年,Kelvin最早发现金属锌具有黏性性质,其内部抗力与变形速度不成比例,此后逐步开始有学者研究金属材料流变学特性。

1.1.3 流变学研究内容

流变学是研究物质流动和变形发生与发展一般规律的科学,不区分固体和流体,一并加以研究,是一个交叉性很强的学科。流变学研究了应力、应变、时间之间的关系。物体的流变特性通常可以用四个参数来表示,它们可以是常数,也可以是非常数,这四个参数就是弹性模量、延迟时间、松弛时间、强度。这里物体的两个“固有时间”关联到两个黏性系数,即延迟时间关联到固体的黏度,松弛时间关联到液体的黏度。可以说,这些参数都是成对存在的,一类属于畸变,另一类属于体变。因此,流变学主要研究物质在服役历程中的作用,从而得到能够全面反映物体力学行为的本构方程。流变学的研究内容包括各种材料的蠕变和应力松弛现象、屈服值,以及材料的流变模型和本构方程。材料的流变性能主要表现在蠕变和应力松弛两个方面。蠕变是指材料在恒定载荷作用下变形随时间增大的过程。蠕变是由材料的分子和原子结构的重新调整引起的,这一过程可以用延迟时间来表征。当卸去载荷时,材料的变形部分恢复或完全恢复到起始状态,这就是结构重新调整的现象。材料在恒定应变下,应力随着时间的变化而减小至某个有限值,这一过程称为应力松弛,这是材料的结构重新调整的另一种现象。

蠕变和应力松弛是物质内部结构变化的外部显现。这种可观测的物理性质取决于材料分子(或原子)结构的统计特性。因此,在一定应力范围内,单个分子(或原子)的位置虽会有改变,但材料结构的统计特征可能不会变化。当作用在材料上的剪应力小于某一数值时,材料仅产生弹性形变;而当剪应力大于该数值时,材料将产生部分或完全永久变形,此数值就是这种材料的屈服值。屈服值标志着材料由完全弹性进入具有流动现象的界限值,所以又称弹性极限、屈服极限或流动极限。同一材料可能会存在几种不同的屈服值,如蠕变极限、断裂极限等,因此在对材料进行研究时一般都是先研究材料的各种屈服值。

在不同物理条件下(如温度、压力、湿度、辐射、电磁场等),以应力、应变和时间的物理变量来定量描述材料状态的方程,称为流变状态方程或本

构方程。材料的流变特性一般可用两种方法来模拟,即力学模型和物理模型。

在简单情况(单轴压缩或拉伸、单剪或纯剪)下,应力应变特性可用力学流变模型来描述。在评价蠕变或应力松弛实验结果时,利用力学流变模型有助于了解材料的流变性能。这种模型已用了几十年,它们比较简单,可用来预测在任意应力历史和温度变化下的材料变形。

力学模型的流变模型没有考虑材料的内部物理特性,如分子运动、位错运动、裂纹扩张等。当前对材料质量的要求越来越高,如高强度超韧性的金属、高强度耐高温的陶瓷、高强度聚合物等,对它们的研究就必须考虑材料的内部物理特性,因此发展出高温蠕变理论。高温蠕变理论通过考虑固体晶体内部和晶粒颗粒边界存在的缺陷对材料流变性能的影响,表达材料内部结构的物理常数,即材料的物理流变模型。它适用于具有复杂结构的物质,包括泥浆、污泥、悬浮液、聚合物、食品、体液和其他生物材料。这些物质的流动在固定温度下不能用单一黏度值来表征,有些因素也会影响它们的黏度。例如,摇动番茄酱可以减小其黏度,但是水却不行。自从牛顿提出黏度的概念以来,对黏度可变的液体的研究也称为非牛顿流体力学。

1.2 流变学在金属材料加工中的应用

1.2.1 流变学在铸造加工中的应用

在铸造生产过程中,很多工艺过程都与物体的流动变形有关,因此有很多问题与流变学的研究内容有密切联系。在制造砂型时,砂的紧实程度、砂粒的表面性能、砂粒的大小、加压的速度和压力大小等都会对砂粒的流动变形特性产生影响;制造砂型时的涂料和制造熔模壳时用的涂料,它们的流动变形性能也与铸型的工作质量有密切关系。除此之外,铸造用合金在浇铸过程及随后的凝固冷却过程,都伴随着多种流动变形现象。

铸造合金在进入铸型以后,随着自身温度的下降,由液态转变为固态(固态质点少,由液态合金包围)、固液态(固态骨架之间有液态合金)、全固态。在整个过程中会出现补缩、偏析、冷隔、热裂、冷裂、应力产生等现象,这些现象的产生都不能离开金属本身的流动和变形^[3]。在整个液固态转变过程中,各种状态的合金流动变形状态不能简单地视为刚体、理想液体、黏性体、弹性体或塑性体,铸造生产中常见的流变模型有 Kelvin 体、Maxwell 体、Bingham 体和 Prandtl 体等。不同的铸造过程选用不同的流变模型,例如:铸

造中常用的黏土团就具有 Kelvin 体的黏弹性特征；高温的固态金属、聚合物的熔体在焙烧中内部出现的玻璃相的熔模型壳，均具有 Maxwell 流变性能。因此，流变学就是按照金属的实际流动变形性能，把黏性、弹性和塑性结合起来研究物体的流动变形性能。

1.2.2 流变学在半固态金属加工中的应用

固液混合态金属是将固态金属颗粒混合在液态金属中，这种状态下的固液混合金属具有在剪切应力下“剪切变稀”的特点，显现出“触变”特性。因此，根据这个特点，可以在相对较低的温度和流动应力下精确成形复杂制件。这一过程离不开流变学的指导，将这一成果系统化、理论化即成为半固态流变学。许多实验证明，半固态金属液体属于非牛顿流体，在非牛顿流体中会出现悬浮各种粒子的二相悬浮系，非牛顿流体不同于牛顿流体主要是因为：各向异性的颗粒在取向中的变化；一定条件下，颗粒从流体系统外侧开始移动。半固态金属液体的稳态黏度系数不再是常数，而是随着固相体积分数的增加而增加，并随着剪切速率增加而减小。影响半固态金属流变特性的主要因素有固相体积分数、剪切速率、合金成分、流变制度等。因此，应用固液态金属的特点以及影响半固态金属流变成形的主要因素逐步形成了半固态金属末端成形、半固态金属压铸成形以及半固态金属注射成形等工艺。目前，人们对半固态金属流变学研究相对较多，对枝晶固液态流变学研究较少。

1.2.3 流变学在塑性加工中的应用

对塑性加工流变学的研究，从利用材料塑性对材料进行加工时就已经开始了。一些学者曾把“塑性变形”与“塑性流动”相提并论。但“塑性变形”是物质流动的结果，物质流动是一个复杂的物理-化学过程，它是由于应力状态的作用，物体内部各相之间相内部的物质发生相互作用，这些化合物可能是物质包含的，也可能是后生的，甚至有可能发生组织转变。

在金属材料成形过程中，人们发现：当载荷逐渐增大时，固体材料的变形逐渐取决于加载速度；应力越接近材料屈服点，时间因素的作用越明显。物体的应力、应变、时间之间不是简单的函数关系，因而流变系数一般是应力与应变不变量及其时间导数的函数。当物体所受载荷较小时，变形处于弹性，变形极小时符合胡克定律，为弹性状态。一旦全截面均发生屈服，即进入塑性状态，无限制的塑性流动便成为可能。在塑性阶段，应变状态不但与应力状态有关，而且依赖于整个应力历史，即与时间有关，流变学认为整个

过程具有“记忆”，从而也就不一定要求几何变形线性化，即不一定限制物体的变形属于小变形。

在大多数情况下，塑性加工过程是一个时间极短的过程，时间因素并不突出，往往被人们忽视。但塑性流动依时性的研究在相关的文献中也有提及^[4]。随着超塑性、等温锻造、蠕变等流动过程研究的不断深入，时间因素就突显出来。实际上任何一个成形工艺都是一个过程，只要涉及过程就会有时间因素，研究此刻与前一刻状态的差异，即物质流动的结果。如果时间是流动的函数，那么变形就应该是时间的函数。一般情况下，人们对流动的关注主要集中在外摩擦对塑性、变形抗力的影响上。因此，从流动的观点来研究塑性变形过程，建立一个系统的塑性加工流变学来指导塑性加工的各种成形过程特别是时间因素较为突出的过程就显得十分必要。

1.2.4 流变学在其他金属材料加工中的应用

流变学在具有形变诱导相变的钢中，在金属温成形、热成形、金属焊接以及金属材料增材制造中都十分具有应用前景。

形变诱导塑性钢(TRIP 钢)的微观组织是复相组织，它的本构关系既有双相钢的软相、硬相特点，又有残余奥氏体向马氏体转变而发生的体积膨胀、诱导塑性行为。另外，TRIP 钢的加工硬化率、应变硬化指数随着残余奥氏体的体积分数和马氏体的体积分数变化而变化，而马氏体的体积分数还受马氏体相变速度的影响，TRIP 钢的加工硬化现象与传统方式定义的硬化率、应变硬化指数有本质不同，传统的加工硬化方程无法正确描述 TRIP 钢的加工硬化现象。TRIP 钢在成形过程中的本构关系与温度、应变增量有关，即残余奥氏体向马氏体转变而诱导塑性行为，而残余奥氏体向马氏体转变是由相变点 M_d 的温度决定的，应变增量是应变对时间的变化率，特别是剪切应变起主要作用。TRIP 钢在塑性变形过程中的本构关系与温度、时间和应力状态有关，这样的本构关系就与流变学特性相符合。在流变学本构模型中可以用两个弹性体元件的并联以及一个塑性体元件的串联，并通过各个元件参数的变化来描述。而 TRIP 钢的相变诱导塑性，不仅体现了弹性和塑性，而且具有一定的黏性行为^[5]。TRIP 钢板料在模具中的塑性变形过程，是在预知应变或应变率的情况下求解流变应力的变化，这与流变学本构模型中的应力松弛模型相近。回弹行为是加工过程中由于变形或金属流动的不均匀性而形成的残余应力在卸载后释放所产生的变形，而伴随着马氏体相变的 TRIP 钢的回弹行为则表现的是一种金属的滞弹性行为特性，可用流变模型中的 Kelvin 模型来描

述,其特性与流变学本构模型中的蠕变特性相符。

金属在加热过程中的流动特性会逐渐明显。热成形是指金属在再结晶温度以上完成成形的工艺,金属在成形过程中可以得到大应变而不产生应变硬化。热成形的流动模型一般如图 1-1 所示,为 Prandtl 流动模型,它由一个弹性元件(H)和一个摩擦件(STV)串联而成,为弹塑性体。Prandtl 体具有弹性变形的极限,即 $\gamma_s = \tau_s / G$,也就是开始塑性变形时的应变量。当进行一定塑性变形后,撤去应力,塑性变形不能消失,而串联的胡克变形是可逆的。热成形所涉及的加工方法均有确定的流变模型,并能产生蠕变。

温成形是指在低于热成形、高于冷成形的温度下进行的金属成形,即成形温度低于金属再结晶温度,金属加工过程中还存在加工硬化现象。温成形的流变模型可以用具有加工硬化作用的黏塑性模型表示,如图 1-2 所示。

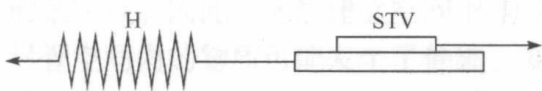


图 1-1 Prandtl 流动模型

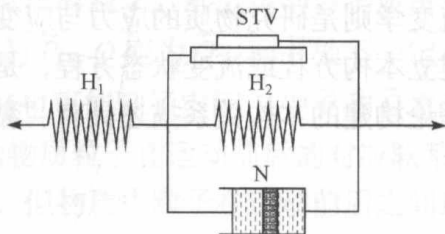


图 1-2 温成形的流变模型

金属材料 3D 打印技术是增材制造中最前沿并且存在困难最多的一种技术。因为金属的熔点较高,在成形过程中会发生固液态的转变,而且热传导、热膨胀和表面扩散的复杂性使粉末熔化区、凝固过渡区和热影响区产生极其不均匀的温度场,从而导致热应力的产生,使熔池中的固液分离速度加快,形成凝固裂纹。同时,金属在冷却过程中还会发生固态相变,产生组织应力。这些应力的表现形式、分布规律在很大程度上取决于材料的流动与变形行为,而流变行为取决于外界所施加的载荷(包括温度载荷)和约束状况,即事物的外因,但同时与事物的本构关系相关,即事物的内因。目前,关于温度场及相变规律的研究已经趋向成熟,但材料的本构关系研究进展很慢,一般还是采用传统的弹塑性力学中的胡克定律、米泽斯(Mises)屈服准则等,但无法反映材料在高温下既有液体流动、固体变形,又有液-固相变和固-固相变的特性。目前还未见到比较合理的金属材料激光快速成形过程中的本构模型,因此影响激光成形过程中的流动、变形与应力计算的准确性,不能合理地阐明熔覆层裂纹产生和开裂的机理。但流变学理论可以将整个成形过程视为一个整体从而建立一个统一的本构模型,该本构模型既可以客观地阐明液相区的金属