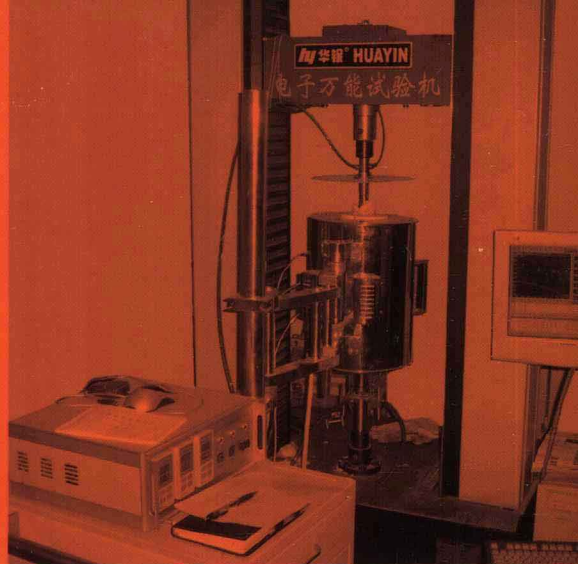
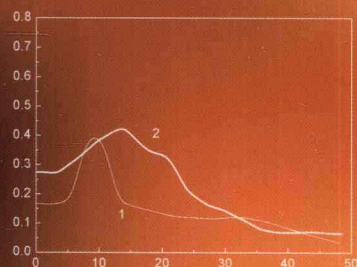


FUZA
LÜLIHEJIN
LINGJIAN
RECHENGXING
JISHU



复杂铝锂合金零件 热成形技术



◎ 马高山 著

化学工业出版社

复杂铝锂合金零件热成形技术

马高山 著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书在简要介绍铝锂合金的塑性成形技术及铝锂合金热成形技术相关的材料本构关系、成形极限、成形中的摩擦、拉深成形及数值模拟等研究现状的基础上,运用理论分析、数值模拟技术和塑性成形试验相结合的方法,分别对铝锂合金的热塑性变形行为、铝锂合金在热态下的成形极限、铝锂合金的热拉深成形技术进行了工艺试验和数值模拟研究,并以获得的相关结论为依据,针对复杂铝锂合金零件在热成形中遇到的问题进行数值模拟和试验研究,从而顺利成形出了合格的铝锂合金零件,为复杂铝锂合金零件的热成形提供了一定的技术指导。

本书可供从事铝锂合金零件热塑性成形技术及其数值模拟研究的高等学校教师、科研人员及工程技术人员阅读,也可作为研究生的教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

复杂铝锂合金零件热成形技术/马高山著. —北京:化学工业出版社, 2011.5

ISBN 978-7-122-10996-5

I. 复… II. 马… III. 铝合金: 锂合金-机械元件-热成型 IV. TG166.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 064439 号

责任编辑: 彭喜英

装帧设计: 韩 飞

责任校对: 蒋 宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张 8 字数 126 千字 2011 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 32.00 元

版权所有 违者必究

前 言

铝锂合金是一种新型的铝基合金材料，它具有低密度、较高的比强度和比刚度、高弹性模量等特点，用其代替常规的高强度铝合金，可使结构质量减轻 10%~20%，刚度提高 15%~20%，因此，铝锂合金用作结构材料具有极大的潜在经济效益，被认为是 21 世纪航空航天飞行器的主要结构材料。然而，铝锂合金在常温下的塑性变形能力较差，难以使用冷冲压工艺进行成形，从而限制了它在结构上的广泛应用。因此，开展铝锂合金热成形技术研究具有十分重要的意义。

本书作者通过对 5A90 铝锂合金板材在不同变形条件下的单向拉伸试验、成形极限试验以及拉深成形试验研究，建立了铝锂合金的本构关系模型及成形极限模型，确定了铝锂合金获得良好变形性能的工艺参数，并将研究成果应用于某飞机座舱盖零件热成形的有限元模拟和试验研究中，解决了零件热成形中的问题。归纳起来，本书的研究内容主要包括以下四个方面。

(1) 铝锂合金热塑性变形行为的研究。在不同变形温度范围和应变速率范围内，进行了 5A90 铝锂合金板材单向拉伸试验，研究了铝锂合金的热塑性变形行为；通过对 5A90 铝锂合金单拉试验数据的计算及拟合，建立了适用于铝锂合金的本构关系模型，将其通过编写用户材料子程序的方法应用于有限元模拟软件 ABAQUS 中，为铝锂合金热成形的有限元模拟提供了准确的材料本构模型。

(2) 铝锂合金热态下的成形极限研究。以 M-K 凹槽失稳准则为理论基础，以 5A90 铝锂合金的单拉试验研究结果为数据基础，对铝锂合金的成形极限进行了理论计算，研究了材料参数和变形温度对铝锂合金成形极限图的影响规律；进行了 5A90 铝锂合金板材在不同变形温度下的成形极限试验，验证了铝锂合金成形极限理论预测模型的准确性；对铝

铝锂合金成形极限试验数据进行拟合计算,建立了铝锂合金的成形极限计算模型,为其他金属板材获得不同温度下的成形极限图提供了一种简单实用的方法。

(3) 铝锂合金热拉深的数值模拟与试验研究。在铝锂合金的本构关系模型、成形极限模型及摩擦模型的基础上,进行有限元软件 ABAQUS 的二次开发,建立了一套铝锂合金热成形专用的有限元模拟计算平台,通过对圆筒形件热拉深成形的有限元模拟及试验研究,验证了有限元模拟计算平台的准确性。在此基础上,研究了变形条件对拉深成形的影响规律,进行了热拉深成形工艺参数的正交优化设计,分析了工艺参数的影响规律,并确定了最佳拉深成形工艺参数组合。

(4) 复杂铝锂合金零件热成形的数值模拟与试验研究。针对某型号飞机铝锂合金座舱盖零件在热成形中遇到的破裂和起皱问题,基于铝锂合金热成形有限元模拟计算平台,结合铝锂合金热拉深成形的最佳工艺参数,进行了座舱盖零件热成形的有限元模拟和试验研究,从优化毛料形状和尺寸以及对毛料准确定位等方面进行了分析,提出了解决成形缺陷的方法和措施,顺利成形出了合格的铝锂合金座舱盖零件,为实际生产提供了技术指导。

全书内容共分为 7 章。第 1 章介绍了铝锂合金的特点、发展、应用及成形技术,并对铝锂合金研究中所涉及的材料本构关系、成形极限、成形中的摩擦以及热成形数值模拟的研究现状进行了阐述。第 2 章介绍了铝锂合金板材的单向拉伸试验,对铝锂合金的热塑性变形行为和本构关系模型进行了分析和研究。第 3 章介绍了成形极限的理论计算和成形极限试验研究,建立了铝锂合金的成形极限模型。第 4 章阐述了铝锂合金平板摩擦试验研究,确定了铝锂合金热成形数值模拟中的摩擦系数。第 5 章在建立铝锂合金数值模拟计算平台的基础上研究了成形参数对铝锂合金热拉深成形的影响规律,并根据成形参数的正交优化设计方案进行相应的拉深成形试验,获得了拉深成形的最佳成形参数。第 6 章针对复杂铝锂合金零件在热成形中存在的问题进行了一系列的数值模拟和试验研究,从而最终获得了合格的复杂铝锂合金热成形零件。第 7 章是复杂铝锂合金零件热成形技术的总结与展望。

感谢北京航空航天大学万敏教授对本书的悉心指导。本书的出版得到了郑州航空工业管理学院张锐教授的大力支持,同时郑州航空工业管理学

院科研处、机电工程学院、航空工程系以及材料学学科的领导、老师对本书的出版给予了诸多指导，在此一并感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在纰漏与不当之处，恳请广大读者批评指正。

著 者

2011 年 2 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 铝锂合金的发展、应用及其塑性成形技术	2
1.3 材料本构关系的研究	6
1.4 板材成形极限曲线的研究	10
1.5 板材成形中摩擦的研究	13
1.6 板材热成形技术及数值模拟的发展概况	18
1.7 复杂铝锂合金零件热成形技术研究的目的和意义	20
第 2 章 铝锂合金热塑性变形行为研究	22
2.1 引言	22
2.2 单向拉伸试验	22
2.3 单拉试验结果及分析	24
2.4 铝锂合金本构关系模型的建立	32
第 3 章 铝锂合金热态下的成形极限研究	39
3.1 引言	39
3.2 成形极限理论预测	40
3.3 成形极限试验研究	48
3.4 成形极限模型的建立与验证	55
第 4 章 铝锂合金冲压成形的摩擦特性研究	60
4.1 引言	60

4.2	温度对成形中摩擦影响分析.....	60
4.3	铝锂合金平板摩擦试验研究.....	62
4.4	热成形中摩擦系数的确定.....	65
第5章 铝锂合金热拉深的数值模拟与试验研究		75
5.1	引言.....	75
5.2	有限元模拟计算平台准确性研究.....	75
5.3	拉深成形工艺参数数值模拟研究.....	81
5.4	工艺参数的优化设计与拉深试验研究.....	86
第6章 飞机座舱盖热成形的数值模拟与试验研究		93
6.1	引言.....	93
6.2	座舱盖零件成形分析.....	93
6.3	座舱盖零件热成形数值模拟.....	96
6.4	座舱盖零件热成形试验研究	104
6.5	数值模拟与试验结果的对比	106
第7章 总结与展望		109
7.1	总结	109
7.2	展望	110
参考文献		112

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

锂是自然界中最轻的金属，其密度为 0.53g/cm^3 。试验表明，在铝中加入 1% 的锂，密度可降低 3%，弹性模量提高 6%；加入 2% 的锂，密度降低 10%，弹性模量提高 25%~35%，这是添加其他轻金属元素如 Be、Mg 等所不及的^[1]。作为一种新型的铝基合金材料，铝锂合金具有低密度、较高的比强度和比刚度、高弹性模量等特点，用其代替常规的高强度铝合金可使结构质量减轻 10%~20%，刚度提高 15%~20%^[2]。若在航空航天中采用密度较轻的铝锂合金，则能显著降低飞行器的重量，增大飞行器的推重比，进而显著提高飞行器的载重性能和机动性能。因此，铝锂合金用作结构材料具有很大的潜在经济效益，被认为是 21 世纪航空航天飞行器的主要结构材料^[3-6]。

尽管铝锂合金具有许多优良的特性，但由于其成本比普通铝合金高、室温塑性与韧性较低、各向异性明显等，使用传统的冷冲压成形技术只能成形较简单的零件，难以制造复杂的零部件，从而限制了其在结构方面的应用。然而，有研究表明，铝锂合金在热态下变形时会产生再结晶，变形导致的形变强化可以被再结晶所减弱或消除^[7,8]，所以热塑性成形可以以较小的能量获得较大的变形，既可提高金属的塑性、降低形变抗力，还可得到细小的等轴晶粒、均匀致密的组织和力学性能优良的制品，并能满足高精度的尺寸要求。

随变形温度的升高，铝锂合金的塑性随之改善，这就为铝锂合金板材的热塑性成形提供了条件。因此，研究铝锂合金板材在一定温度下的变形行为

和成形性能,建立铝锂合金的本构关系模型、成形极限模型以及摩擦模型等,为铝锂合金的热成形及其有限元模拟提供必要的条件,并为深入研究铝锂合金的成形工艺提供重要的试验指导和理论依据,对于扩大铝锂合金在结构领域的广泛应用具有十分重要的意义。

1.2 铝锂合金的发展、应用及其塑性成形技术

铝锂合金按化学成分可大致分为三类,即 Al-Cu-Li 系合金(如 1450、1451、1460 合金)、Al-Cu-Mg-Li 系合金(如 2091、8090、8091、1430、1440、Weldalite 049 合金)和 Al-Mg-Li 系合金(如 1420、1421、1423、1429 合金)。按加工工艺来分类,铝锂合金又可分为铸造铝锂合金、变形铝锂合金和粉末冶金铝锂合金等。铝锂合金还可以根据性能分为耐损伤型铝锂合金(如 8090)、中强型铝锂合金(如 1420、1421)及高强型铝锂合金(如美国的 2090、8091,俄罗斯的 1450、1460)三类。

1.2.1 铝锂合金的发展

铝锂合金的发展大体可分为三个阶段,相应出现的铝锂合金也可以分为三代^[9,10]。第一代铝锂合金是 20 世纪 50 年代研制的,典型的牌号有美国的 2020、俄罗斯的 БАд23 和 1420 等。2020 和 БАд23 合金的延展性不高,且存在着各向异性、断裂韧性差等问题,而 1420 强度较低。第二代铝锂合金是 20 世纪 80 年代发展起来的,有 2090、2091、8090 及 8091 等。这些合金具有引人注目的高模量,但其力学性能仍存在较强的各向异性。20 世纪 90 年代,针对第二代铝锂合金本身存在的问题,人们开发研究了第三代新型铝锂合金。代表牌号有 Martin Marietta 研究所开发的高可焊性合金系列,如 Weldalite 049,随后又由此派生出了 2094、2095、2096 和 2195 等几种合金,其中 2195 铝锂合金是 Weldalite 049 系列合金的佼佼者,其低温下的断裂韧性较高。

目前处于第三个发展阶段的铝锂合金,已开发出的新型合金主要有,高强可焊的 1460 和 Weldalite 系列合金,低各向异性的 AF/C-458、AF/C-489 合金,高韧的 2097、2197 合金,高抗疲劳裂纹的 C-155 合金及经特殊真空

的XT系列合金等^[9,11]。此外,还研制出了具有各向同性、以颗粒或晶须SiC陶瓷为增强体的铝锂金属基复合材料,其弹性模量达130GPa,成为在航空航天领域中其他复合材料强有力的竞争者。近年来铝锂合金开始向超强、超韧性、超低密度、低各向异性、改善焊接性能及热稳定性等方向发展,其中对高强可焊合金和低各向异性合金方面的研究较多,是第三代铝锂合金研究的主要发展方向。

目前为止,已见报道的铝锂合金牌号有很多种,并且有20多种铝锂合金的生产达到了工业化水平,但最成熟且已获得应用的只有1420、2090、2091、8090等几种合金。常用的典型铝锂合金的分类及其发展进程如表1-1所示。美、欧等已能生产6~10吨的铸锭,而俄罗斯已经具备生产25吨铸锭的能力,而且美、俄、西欧等铝锂合金轧制、挤压及锻造的生产技术已达到常规铝合金水平。我国铝锂合金的基础研究起步于20世纪60年代初,随着国家对铝锂合金的重视,先后进行了1420、2090、2091、9080以及8091等铝锂合金的研究工作,生产出了小规格板材和型材,并完成了铝锂合金半连续铸造工艺研究。在此研究的基础上,还进行了Weldalite 049成分系列中2195合金的研究,并成功试制出了2195合金的大规格薄壁挤压管材和板材。此项研究表明,我国已经具备了铝锂合金的大规模研制与开发能力,对满足我国航空航天工业对先进结构材料的需求具有重要的意义。

表 1-1 常用典型铝锂合金的分类及发展进程

发展阶段	合金牌号	研制年代	研制国家	分 类
初期	Scleron	1924	德国	
第一代合金	2020	1957	美国	Al-Cu-Li
	BA _{Li} 23	1961	俄罗斯	
	1420	1965	俄罗斯	中强型
第二代合金	2090	1984	美国	高强型
	2091	1984	英国	Al-Li-Cu-Mg
	8090、8091	1984	法国	Al-Li-Cu-Mg
第三代合金	1430、1440、1450、1460	1989	俄罗斯	高强型
	Weldalite 049 系列	1989	美国	高可焊性
	2097、2197	1989	美国	高韧性

1.2.2 铝锂合金的应用现状

铝锂合金优良的综合性能使其在航空航天领域得到了广泛的应用^[11,12]。在航空领域,俄罗斯在雅克-36、苏-27、苏-36、米格-29、米格-33 等战斗机以及图-204 旅客机上大量使用了铝锂合金。在西欧,英国研制的 EH101 直升机有 25% 的构件由 8090 铝锂合金制造,其用量占飞机结构总重的 15%;法国的阵风军用战斗机以及空中客车工业公司的 A310、A320、A330、A340 和 A350 客机上使用了铝锂合金,其中, A330 和 A340 每架飞机约有 3 吨的铝锂合金用于机身结构、桁条等部件,而 A350 有着全新的铝锂合金机身,其新材料的使用比例高达 60%。美国的铝锂合金应用研究发展较快, F-16、F-22 战斗机、Douglas C-17 运输机、波音 747、777 客机等均使用了铝锂合金,其使用部位包括燃料箱、隔框、机翼蒙皮、前缘、后缘等。我国也在 20 世纪 80 年代开展了铝锂合金的生产和应用研究。东北大学、621 研究所、703 研究所、中南大学和西南铝业公司等进行了许多卓有成效的工作,先后开发出国产 1420、2091 和 8090 等铝锂合金材料,并已开始应用于我国航空、航天领域。成都飞机公司在歼-10 的机翼上采用了铝锂合金整体油箱,沈阳飞机公司在某型号机上采用了铝锂合金的座舱盖、燃料箱等热成形零件。然而,我国还没有实现铝锂合金的大批量成品化生产,有关材料性能和工艺研究的报道还较少。

在航天领域,铝锂合金已在许多航天构件上取代了常规高强铝合金。据统计,在航天工业中每减轻 1kg 结构重量所获得的经济效益比在航空工业中的高 10 倍以上,所以航天工业更重视使用密度较低的铝锂合金,它们通常用于制造燃料贮箱、卫星结构件和空间站等。美国铝锂合金的应用发展非常快,在航天工业上的应用尤为突出。美国洛克希德公司利用 8090 铝锂合金加工制造了“大力神”运载火箭的有效载荷舱,使其减轻了 182kg。美国“发现号”航天飞机的外贮箱采用 Weldalite 049 铝锂合金以取代 2219 铝合金,使其运载能力提高了 3.6 吨。俄罗斯在铝锂合金的研究、生产和应用方面也一直处于领先地位,为提高载荷能力,航天飞机的外燃料贮箱便采用铝锂合金制成,“能源号”运载火箭的低温贮箱是采用 1460 铝锂合金制成的。

随着世界各国对降低燃油消耗和减轻环境污染的日益重视,铝锂合金除了在航空航天等领域应用外,在其他军工、电子、汽车等领域,铝锂合金也

有着广阔的应用前景。

1.2.3 铝锂合金的塑性成形技术

铝锂合金虽然已经发展到第三代,但其研究的领域较多集中在材料的基础研究上,如材料的制备、材料的成形性能、材料的热处理、板材的各向异性、材料的组织性能等^[13-16]。其中,铝锂合金基础性能的研究很多是在室温下进行的,如 M. L. Bairwa^[15]、H. Garmestani^[16]、张凌云^[17]等分别研究了 2090、1441 铝锂合金板材和 5A90 铝锂合金型材在室温下的成形性能,但这些研究所得到的铝锂合金的成形性能数据并不能反映铝锂合金在一定温度下的成形性能。而对提高温度下的成形性能研究相对较少^[18,19],其中,韩冬峰等^[20]研究了 2195 铝锂合金在一定温度下的流变应力变化规律,并描述了 2195 铝锂合金高温变形时的流变应力方程,为铝锂合金在热态下的成形提供了有价值的参考。

铝锂合金从熔铸、成型、热处理到成形加工为铝锂合金产品,经历了一个较为复杂的工艺制造过程,其中,成形技术的研究是当今铝锂合金研究与应用的主要方向。铝锂合金的室温塑性较差,所以铝锂合金在冷成形方面也仅局限于小角度的弯曲变形、浅拉深成形等变形不大的加工^[17]。在提高变形温度的情况下,铝锂合金的塑性也相对提高,因此,铝锂合金大多在一定温度下成形,常用的成形方法有锻造、旋压、挤压、超塑成形以及温热成形等^[18-22]。

在众多的成形技术中,铝锂合金超塑成形技术发展较迅速,相对也比较成熟,已广泛应用于国外的先进战斗机上^[23-25],但使用超塑成形技术较多的还是集中在一些较成熟的铝锂合金种类^[25,26]。然而,超塑成形本身存在一些不可避免的问题,如材料需要特殊处理,成形加工周期长等,而在温态或热态下进行塑性成形时,所需温度一般低于超塑成形温度,加热和冷却的时间显著缩短,而且对材料组织要求也不苛刻,故温热成形效率更高,经济效益相对也较高,故温热成形的应用更加广泛。

板材冲压成形是塑性加工中重要的工艺方法,通过冲压成形可以获得形状复杂的薄壁零件。作为一种新型铝基合金,铝锂合金在热态下冲压成形的研究相对较少,而研究较多的是应用更为广泛的普通铝合金以及高强铝合金等。Daoming Li 等^[27]对 5182、5754 和 6111 等三种铝合金板材在不同温度

和应变速率下进行了拉伸试验研究,确定了板材在一定变形温度下的变形规律。P. J. Bolt 等^[28]在一定温度下进行了 1050、5754 和 6016 等三种铝合金板材的拉深成形试验,研究了温度对成形性能的影响,并成功制造出了成形深度较大的盒形件。S. Novotny 等^[29]对 5182 和 6016 两种铝合金分别进行了不同温度下的一系列试验,研究了不同温度下铝合金的应力-应变关系,温度对成形极限图的影响以及液胀时的摩擦和润滑条件等,为铝合金在热成形方面的应用打下了基础。H. Takuda 等^[30]通过对 5182 铝合金板材进行一定温度下的单向拉伸试验和拉深试验,研究了温度对板材成形性能的影响,同时使用有限元法对拉深成形过程进行了数值模拟研究,通过试验与数值模拟对比的方法,验证了数值模拟结果的准确性。

1.3 材料本构关系的研究

1.3.1 塑性本构关系

材料本构关系是表达变形体的应力或应力变化速率与应变或应变速率之间关系的物理方程,是分析材料变形行为,制定合理变形条件以及实现准确数值模拟的基础,因此材料本构关系受到越来越多研究者的重视。目前,获得材料塑性变形的本构方程通常采用三种途径:①假设特别的变形机制,用相关的材料参数建立与这种机制相对应的应力-应变或应力-应变速率方程,该方法仅适合于少数几种金属材料,不具有普遍性;②用一标量内参数表示塑性变形时由材料内部状态产生的各向同性变形抗力,从而获得描述大塑性变形的一阶本构模型,该方法只适合于具有单相立方晶格的材料;③用实验测量一定应变速率、一定温度范围内的流动应力数据,进而根据这些数据利用统计回归方法建立相应的本构方程,该方法对建立材料的本构关系具有一定的普遍性,故而被广泛采用。在用实验来确定材料本构关系模型的方法中,常采用单向拉伸、扭转、压缩实验等多种实验方法。

金属在塑性变形时将引起内部能量状态的变化,因而金属的变形抗力也将随之而改变,并引起一系列组织性能的改变,主要表现为变形抗力增加、塑性下降、电阻提高等。对于同一种金属材料而言,引起上述变化的主要原

因是变形温度、变形速度（应变速率）、变形程度（应变）以及摩擦与润滑条件等，前三个因素则构成了金属塑性加工时的热力学条件。

材料的本构关系描述了材料成形过程的基本信息，它表明了的加工过程中应力与变形参数，如应变、应变速率和温度之间的依赖关系。库尔纳科夫在很多人实验工作的基础上，对于没有物理-化学转变的金属与合金，提出了一个综合考虑三个热力学条件对变形抗力影响的综合表达式：

$$\sigma = A\epsilon^a \dot{\epsilon}^b e^{-cT} \quad (1-1)$$

式中， A ， a ， b ， c 均为与材料和变形条件相关的实验常数。该模型综合考虑了变形温度、应变速率和变形程度的影响，从力学角度比较全面地概括了材料的流变应力特征，适用范围较广。

由于通常情况下的变形都认为是在等温下进行的，若不考虑变形过程晶粒度的变化因素，则流动方程仅包括应力、应变和应变速率等因素，材料本构方程演变为：

$$\sigma = K\epsilon^n \dot{\epsilon}^m \quad (1-2)$$

式中， K 为材料强度系数； n 为应变强化指数； m 为应变速率敏感性指数。

式(1-2)为流动状态方程，又称黏塑性流变方程，它既考虑了应变强化的影响，也考虑了应变速率敏感性的影响。

在高温变形过程中，当累积应变达到足够大时，应变强化和软化过程达到平衡，流动应力趋于稳定饱和状态，应变对本构模型的影响相对应变速率来说基本可以忽略，则此时的流动应力方程可写成：

$$\sigma = K\dot{\epsilon}^m \quad (1-3)$$

式(1-3)是只考虑应变速率影响的本构模型，仅适用于变形温度较高、变形量较大的材料。

Sellars 和 Tegart^[31]通过对不同热加工数据的研究，提出了一种包含变形激活能 Q 和温度 T 的双曲正弦形式的本构方程：

$$\dot{\epsilon} = Af(\sigma)\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1-4)$$

式(1-4)也称为 Arrhenius 方程。

式中， A 为结构因子； R 为气体常数； Q 为变形激活能，J/mol； T 为热力学温度。 $f(\sigma)$ 是应力的函数，根据条件的不同可以表达为以下三种形式：

$$\text{当 } \alpha\sigma < 0.8 \text{ 时, } f(\sigma) = \sigma^n \quad (1-5a)$$

$$\text{当 } \alpha\sigma > 1.2 \text{ 时, } f(\sigma) = \exp(\beta\sigma) \quad (1-5b)$$

对于所有的应力状态有: $f(\sigma) = \sinh(\alpha\sigma)$ (1-5c)

式中, β 为与温度无关的常数, $\beta = \alpha n$; α 为应力水平参数, mm^2/N ; n 为应力指数。

由式(1-5)可知, 在低应力和高应力状态下, 式(1-4)可以分别表示为:

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon} &= A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \sigma^n \\ \dot{\epsilon} &= A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \exp(\beta\sigma)\end{aligned}\quad (1-6)$$

对于所有的应力状态, 有:

$$\dot{\epsilon} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (1-7)$$

Arrhenius 方程一般用于表达稳态应力与应变速率和温度之间的关系, 同时任何应变水平下对应的流变应力和应变速率之间也符合 Arrhenius 方程, 只是 A 、 n 等材料常数随应变值的变化而有所不同。也就是说, 式(1-6)和式(1-7)中的流变应力可以是峰值应力或稳态应力, 也可以是任何应变水平下对应的不同流变应力。

根据材料流动应力变化特点和工艺条件的不同, 除了上述几种常用的本构关系模型外, 人们还提出了许多不同的材料本构关系模型, 如仅考虑应变对流动应力影响的模型, 适合于室温和低应变速率下的变形; 对于高温、高速变形, 一些学者提出了综合考虑加工硬化和动态软化的本构模型; 还有一些考虑加载历史、采用内参变量的本构模型也被提了出来。以下是几种研究中的典型材料本构关系的简介。

在高温情况下, 金属材料发生塑性变形时的本构方程可表示为:

$$\sigma = \sigma(\dot{\epsilon}, T, s) \quad (1-8)$$

其中, s 是一个代表材料微观组织特征的参数。一个普遍的近似就是把式(1-8)中的 s 用累计塑性应变 ϵ 来表示:

$$\sigma = \sigma(\dot{\epsilon}, T, \epsilon) \quad (1-9)$$

式(1-9)为由 Zener 和 Hollomon^[32]最先提出的本构方程一般表达式。

井上胜郎^[33]采用落锤式高速拉伸试验机对若干种钢材进行了研究, 通过研究热轧条件下材料的变形抗力, 总结得到了相应的流动应力数学模型, 其表达式为:

$$\sigma = a\epsilon^b \dot{\epsilon}^c \exp\left(\frac{d}{T}\right) \quad (1-10)$$

式中, T 为变形温度, $^{\circ}\text{C}$; a, b, c, d 均为与材料和变形条件有关的实验常数。

针对镁合金在高温下强烈的软化现象, 张先宪等^[34]提出了一种含有软化因子的流变应力本构模型:

$$\sigma = K\epsilon^n \dot{\epsilon}^m \exp(cT + s\epsilon) \quad (1-11)$$

式中, K, n, m 均为材料常数; T 为热力学温度; s 为应变软化因子。式(1-11)在形式上与式(1-1)类似, 不同的是式(1-11)中添加了一个与应变相关的参数以描述变形过程中的软化现象。

H. T. Zhou^[35]将变形激活能与应变软化结合起来, 形成了另外一种形式的本构关系模型, 其表达式为:

$$\sigma = K\epsilon^n \dot{\epsilon}^m \exp\left(s\epsilon - \frac{Q}{RT}\right) \quad (1-12)$$

式中, R 为气体常数; Q 为变形激活能; T 为热力学温度; s 为应变软化因子。

1.3.2 本构关系模型的研究进展

塑性变形本构关系模型的研究通常是借助于新型材料的开发及应用而发展的, 如镁合金、钛合金、复合材料, 还有一些高强铝合金、铝锂合金以及记忆合金等^[36,37], 以便掌握新型材料的变形行为, 制定合理变形条件以提高材料成形的数值模拟精度。

统计回归法是本构关系研究中采用较多的方法。虽然统计回归方法计算量较大、精度较低, 但它是以实验为基础的, 具有很高的实用价值。杨洪涛等^[38]根据最小二乘法原理采用多元线性回归的方法建立了超高强铝合金的本构方程。除了常规的统计回归法, 一些研究者还尝试使用其他研究方法进行材料本构关系的研究, 如运用人工神经网络技术。刘芳等^[39]在进行一系列等温压缩试验的基础上, 通过改进的误差反向传播 (Back Propagation, BP) 算法, 建立了铝合金高温本构关系的 BP 神经网络模型, 为本构方程的研究开辟了一种新型方法。

在热态下本构方程的研究中, 等温压缩变形试验是大多数研究者采用的方法。王孟君等^[40]通过等温压缩试验分析了铝合金的流变行为, 建立了一种包含变形激活能和变形温度的双曲正弦形式的高温流变应力模型; 周计明