



高新技术丛书

塑性成形新技术 及其力学原理

刘助柏 著

机械工业出版社

(京)新登字054号

该书是一本塑性成形领域某些新工艺、新技术及其力学原理方面的专著。它涉及到大型性(冷、热)变形、弹塑性变形、纯弹性变形诸领域中的某些新技术和新理论。全书反映出新工艺、新技术与相应工程应用理论相互依赖、相互促进与发展的内涵关系, 后者的价值与本书的内容处于同等重要的地位, 能给读者以某些启迪。

本书共分10章, 包括四个方面: 大型锻件锻造工艺理论与技术、护环强化成形技术与理论、残余应力理论与技术、弹性及弹塑性理论方面的某些进展。

本书可供金属塑性加工行业的工程技术与科研人员以及某些从事工程应用力学的科技工作者阅读, 也可供大专院校师生(包括研究生)参考。

图书在版编目(CIP)数据

塑性成形新技术及其力学原理 / 刘助柏著. —北京: 机械工业出版社, 1995.
ISBN 7-111-04316-5

I. 塑...

I. 刘...

Ⅰ. ①塑性变形-技术现状②塑性变形-塑性理论

Ⅳ. TG316

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第08643号

出版人: 马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)
责任编辑: 李会武 版式设计: 王颖 责任校对: 肖新民
封面设计: 方芬 责任印制: 王国光
机械工业出版社京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
1995年2月第1版·1995年2月第1次印刷
787mm×1092mm¹/₃₂·9印张·195千字
0 001—1 600 册
定价: 14.00元

前 言

本书是一部关于金属塑性成形领域某些新工艺、新技术及其力学原理方面成果的专著。它既包括了作者曾负责或主要参加的国家、省（市）部级鉴定（或验收）的7个科研项目的核心技术内容，也反映了作者目前承担的一项国家自然科学基金重点项目课题和一项机械部教育司预研基金课题的阶段性成果。诸内容经充实、提高和扩展后，已先后在《机械工程学报》（中、英文版）、《实验力学》、《应用数学和力学》（中、英文版）、《钢铁》、《钢铁研究学报》、《锻压技术》、《锻压机械》、《重型机械》、《大型铸锻件》、《东北重型机械学院学报》等科技期刊以及国内外重要学术会议上发表。但内容分散，不能形成一个完整的自成体系的内容系统。因此，作者撰写成此专著。

本书共阐述了五个方面的内容，即大型锻件锻造工艺理论与技术；汽轮发电机转子护环强化成形技术与理论；残余应力理论与技术；弹性及弹塑性理论方面的某些进展；液压胀形轧辊（VC轧辊）的技术与理论。这些研究成果，有些还只能算是一个起步。后面还有很多研究内容需要众多研究者去完成。

金属塑性成形领域需要研究的内容很多，诸如微粗体、拔长体内应力场的定量描述；变形速率对变形体内应力场的影响，其严谨的本构关系；由表面残余应力推算轴对称物体内的空间残余应力场；厚壁圆筒受任意分布压力之弹性解；

引起鲍辛格 (Bauschinger) 效应的微观力学; 控制锻造理论与工艺的研究 (作者在该领域研究的初步成果未包含在本书中) 等问题。本书的出版, 期望能促进与加速上述难题的解决, 能起一个抛砖引玉的作用。这也是本书出版的目的。

本书的出版, 得到了哈尔滨工业大学霍文灿教授、华中理工大学郭芷荣教授、吉林工业大学傅沛福教授的大力支持与书面推荐, 并对其内容给予很高评价。这对作者是一个莫大的鼓励与鞭策。

此外, 在行文过程中, 得到了作者的挚友聂绍珉教授, 作者的硕士研究生齐作玉、刘晓东、刘喜波、谢心钊、刘宏玉、王连东、李本利、彭家耕、康鹏超、官英平、朱继武、梁辰的诚挚协助, 刘蓉晖在抄写稿件中付出了努力。

还有, 在过去长期的科研合作中, 曾得到太原重型机器厂、上海重型机器厂、齐齐哈尔钢厂、第二重型机器厂、第一重型机器厂、陕西重型机器厂、天津重型机器厂、北京重型机器厂、北京机电研究所 x -光应力室、北京冶金部钢铁研究总院18室与19室、太原重型机械学院锻压教研室、清华大学锻压教研室等单位的有关领导及合作伙伴的真诚合作与帮助; 在科研立项及其进行过程中, 曾得到机械工业部教育司、科技司、重型局 (二装司) 锻冶处与重大装备处, 国家自然科学基金委员会材料和工程科学部机械学科、黑龙江省与齐齐哈尔市科委, 以及我院有关单位的有力支持与帮助。

借本专著出版之际, 一并致以由衷的谢意。

限于作者水平, 书中疏误之处在所难免, 恳请读者批评指正。

著 者

1993.11

目 录

前言

第1章 绪论	1
1 概述	1
2 阐述的几个主要方面与问题	3
2.1 大型锻件锻造工艺理论与技术	3
2.2 护环强化成形技术与理论	5
2.3 残余应力理论与技术	5
2.4 弹性及弹塑性理论方面的某些进展	6
2.5 液压胀形轧辊 (VC轧辊) 的技术与理论	7
3 本书特点与研究方法	7
第2章 镦粗力学分析及镦粗新工艺	9
1 普通平板间镦粗圆柱体的新理论	9
1.1 基本假设	10
1.2 刚塑性力学模型的拉应力理论	11
1.3 静水应力力学模型的切应力理论	14
1.4 结论	15
1.5 饼类锻件新工艺	16
2 圆柱体镦粗刚塑性力学模型拉应力理论的物理模拟	17
2.1 物理模拟方法	17
2.2 物理模拟结果	18
2.3 讨论与结论	19
3 圆柱体 ($H/D > 1$) 平板间镦粗的广义滑移线解	22
3.1 滑移线方程推导	22
3.2 算例	29

3.3 结论	32
4 圆柱体 ($H/D > 1$) 镦粗时应力场计算的力学分块法	32
4.1 基本假设	32
4.2 试件及其分块	33
4.3 力学分块法计算公式推导	33
4.4 镦粗体 ($H/D = 1.63$) 内应力场的计算与分析	44
5 锥形板镦粗新工艺	46
5.1 锥形板镦粗圆柱体的力学模型	47
5.2 实验验证	48
5.3 结论	50
6 变形速率对平板镦粗圆柱体内部应力状态的影响	52
6.1 实验研究结果	52
6.2 理论分析初探	52
第3章 拔长力学分析及拔长新工艺	55
1 方柱体镦粗的两个新力学模型	55
1.1 基本假设	55
1.2 刚塑性拉应力力学模型 ($H/A > 1$)	58
1.3 静水应力切应力力学模型	60
1.4 结论	63
2 平砧拔长矩形截面毛坯的新理论	63
2.1 名词释义	64
2.2 砧宽比 W/H 和料宽比 B/H —— 平砧拔长的重要 工艺参数	65
3 新拔长理论工艺参数的量值匹配与确定	67
3.1 平砧拔长的展宽	67
3.2 拔长毛坯的截面变换计算	68
3.3 结论——平砧拔长工艺参数量值的匹配与确定	71
4 新FM锻造法	71
4.1 新FM锻造法的实质——增加了料宽比的控制	72

4.2 毛坯变形后的展宽	73
4.3 新FM法锻造毛坯的截面变换计算	73
5 无横向拉应力锻造法	76
5.1 问题的提出	76
5.2 锥面砧拔长矩形截面毛坯的力学模型	77
第4章 FM锻造与鲍辛格效应的实验研究	78
1 锻造条件对毛坯内部空洞闭合的影响	78
1.1 问题的提出	78
1.2 模拟试验方法	79
1.3 试验数据整理与分析	81
1.4 生产性试验	85
1.5 结论	86
2 护环特殊现象的分析与鲍辛格效应的实验研究	87
2.1 护环特殊现象的分析	87
2.2 鲍辛格效应的实验研究	90
第5章 发电机护环液压强化新工艺	93
1 减压式液压胀形强化护环工艺的先进性及经济社会效 益分析	93
1.1 减压式液压胀形强化护环工艺提出的背景	93
1.2 与国外同类技术综合对比情况	95
1.3 应用推广情况	98
2 护环液压胀形新工艺的基本原理	99
3 建立液体高压的基本条件	100
4 减压式液压胀形护环装置的新形线冲头	102
4.1 折线形冲头	103
4.2 直线曲线形冲头	104
5 减压法液压胀形护环内在成形规律的研究	105
5.1 液压胀形内在成形规律的实验研究	105
5.2 环坯液压胀形时的失稳条件及对原始塑性的判据	108

5.3	环坯内圆角半径对成形塑性的影响及实验验证	112
5.4	胀形时冲头与环坯的受力特点	114
5.5	某些工艺参数的实验研究	116
6	300MW汽轮发电机护环液压胀形工艺试验	118
6.1	材料成分与炼钢工艺的选择	118
6.2	工艺及模具设计	119
6.3	材料及工艺有关参量的确定	123
6.4	300MW护环液压胀形工艺试验	124
6.5	结论	129
第6章	护环楔块扩孔	130
1	楔块扩孔护环所需胀形力公式的推导	130
2	楔块扩孔护环的变形分析	136
3	护环的质量控制	138
3.1	钢锭的质量控制	138
3.2	护环钢热锻质量控制	138
3.3	固溶处理的质量控制	139
3.4	冷扩孔操作要领	139
4	楔块扩孔优缺点	140
第7章	厚壁圆筒问题	141
1	圆筒受余弦分布压力之弹性解及其 $K \rightarrow 0$ 的极限	141
1.1	边界条件	141
1.2	新应力函数	142
1.3	余弦分布压力之解	145
1.4	$K \rightarrow 0$ 的极限情况	148
2	厚壁圆筒弹塑性问题的工程应用解	151
2.1	屈服条件 β 系数的推导	151
2.2	受内压厚壁筒塑性变形时 Lode 应力参数的确定	152
2.3	$\beta_{L(a)}$ 的实验验证	154
2.4	厚壁圆筒弹塑性问题的新解	156

2.5 几种解的比较	159
第8章 液压胀形轧辊的技术与理论	161
1 液压胀形轧辊系统的基本原理	162
2 静载实验	163
2.1 静、动态密封性能实验	164
2.2 辊套胀形凸度值的测定	164
2.3 实验结果及分析	166
3 胀形凸度的解析解	167
3.1 力学模型	167
3.2 变位移函数的选择与确定	168
3.3 胀形凸度的求解	169
3.4 计算结果及讨论	172
4 胀形凸度的弹性有限元分析及轧辊油槽深度的确定	174
4.1 计算模型与单元划分	174
4.2 胀形凸度计算及结果分析	177
4.3 油槽深度确定	179
5 结论	180
第9章 轴对称物体内的残余应力	182
1 用Sachs法研究模拟辊中的残余应力	182
1.1 基本理论	183
1.2 内剥层实验	188
2 由表面残余应力计算内部残余应力的方法	195
2.1 理论推导	196
2.2 计算实例	199
3 轴对称物体内三维残余应力场的确定	202
3.1 力学模型	202
3.2 实验	205
3.3 变应力函数的选择与确定	207
3.4 残余应力的求解	208

3.5 计算结果及讨论	211
4 冷轧辊的综合应力分析	215
4.1 轧辊工作力学分析	216
4.2 容许残余应力条件	218
4.3 结论	220
第10章 轴对称变形强化护环的残余应力	221
1 总论	221
1.1 护环变形强化方法的分类与过去存在的主要问题	221
1.2 基本设想	222
1.3 护环变形强化后的卸载过程	223
1.4 位移曲线的微分方程	225
1.5 求残余应力的基本式	227
2 护环残余应力的分析与理论计算	228
2.1 残余应力产生的原因	229
2.2 残余应力的理论计算	232
3 确定护环或筒形件残余应力分布的测量理论与方法	241
3.1 测量由于附加弯矩在护环中引起的残余应力	243
3.2 测量由于强化变形程度不同所引起的切向残余应力	249
4 护环残余应力分布的解剖测量实例	250
4.1 解剖测量实例	250
4.2 解剖试验的分析	258
5 护环残余应力的理论计算实例	262
5.1 7号护环残余应力的理论计算	262
5.2 理论计算与解剖试验比较	266
6 消除护环有害残余应力	266
6.1 降低和消除护环(或筒形件)有害残余应力的 基本原理	266
6.2 消除护环有害残余应力的模拟试验	268
6.3 生产性试验	271
参考文献	272

第1章 绪 论

本书研究内容的理论基础是经过长期发展起来的固体变形力学。某些新工艺、新技术设想的提出，促使工程应用力学某些有关内容的完善与发展。反之，其中某些有关工程应用理论的完善与发展，又促使新工艺、新技术的完善、产生与繁衍。理论、实验结果与工程应用具有同等的重要性。

本书内容属于一部金属塑性成形领域某些新工艺、新技术及其力学原理方面成果的专著。它涉及到大塑性（冷、热）变形、弹塑性变形、纯弹性变形诸方面的某些新技术和新理论。

1 概 述

塑性变形力学的建立、发展经历了几个世纪，特别是近代，塑性变形理论的发展很快，在很多领域内已建立了完整的理论体系。尽管如此，塑性变形理论的发展仍远远满足不了工艺技术发展的需要。作者仅就以下几类问题进行阐述。

塑性力学（包括工程塑性理论）很多问题不能解，甚至不能进行定性分析。有些内容的阐述，不能正确描述其内在规律。例如：对普通平板间的圆柱体镦粗，认为，不管毛坯高径比 H/D （瞬时状态）的大小，在变形体中心都产生三向压缩应力状态，这与作者所做的实验结果不符。很多著作，对镦粗体的各种解，都是求变形力，对应力场的阐述几乎没有。大型饼类锻件，都以镦粗变形为主锻制而成，目前

超声波探伤废品率高。实际锻造的变形量很大,对该类锻件内部出现横向型内裂层缺陷不可理解,也不能用目前的塑性力学解释清楚。

目前对拔长工艺理论进行了很多力学分析与实验研究。但只注意到了拔长变形时的轴向应力问题,而忽略了拔长体的横向应力问题。对FM锻造工艺的研究,在塑性变形理论上也有类似的不足。

拔长塑性变形工序实质是由局部锻造加刚端影响组成。锻造体内三向压应力之说与砧宽比不当出现轴向拉应力的阐述是相矛盾的。

护环强化技术,实质上是厚壁圆筒在内压作用下产生冷塑性变形,计算内压单位压力的公式,众多的金属塑性变形理论中都有阐述。一致的公式是 $P = \beta \sigma_s \ln \frac{D}{d}$, 其中屈服条件 β 系数的数值范围都为 $1 \sim 2/\sqrt{3}$ 。选取有随意性,没有定量的公式描述。作者还发现,以圆筒长度来区分其为平面变形或平面应力的观点没有足够的力学根据。

护环是汽轮发电机中关键零件之一。形状简单,但要求特别高的强度。主要用大塑性冷变形强化来提高它的强度。

从本世纪50年代末期开始,我国先后采用马杠扩孔、球面模具扩孔、爆炸变形等工艺生产护环,共同的缺点是残余应力大,废品率高。70年代末研制用楔块扩孔法生产护环,由于种种原因,没有在国内得到推广应用。法国采用全液压式液压胀形强化护环,需要大功率液压机。我国机械制造系统只有120MN自由锻液压机。据此国情,作者于1977年提出了一个减力的液压胀形强化护环的新装置。通过理论与实践交叉和由小到大反复验证,该工艺已推广全国,据反映,优

于引进的日本楔块扩孔工艺。工艺的发展,促进了理论的研究;理论的深入研究,完善了工艺。

在很多塑性理论中,都有鲍辛格效应的阐述。该现象是在小塑性变形条件下得出的。大塑性变形时的鲍辛格效应特征,在作者进行试验研究前,还未见文献报导。

残余应力问题,可以说还是一块正在被开垦的处女地。残余应力属于弹性理论的范围。按着作者的意见,残余应力应从弹性力学中分离出来,成立一门独立的学科——残余应力学。

在残余应力理论与实践方面,已有些专门著作阐述,其中包括有名的萨克斯(Sachs)残余应力测量理论,但只限于平面问题,对空间残余应力的理论与实验研究成果较少。作者对护环和冷轧辊(轴对称实心物体)的求解空间残余应力的分布方面做了一些尝试。

对厚壁圆筒受余弦分布压力载荷以及两端带约束条件中间受常压载荷的问题进行了解析的解答。前者为残余应力科研课题引伸出的成果,后者为液压胀形轧辊工程需要所进行的解析解。

2 阐述的几个主要方面与问题

2.1 大型锻件锻造工艺理论与技术

1. 对普通平板间镦粗圆柱体 根据镦粗体高径比 H/D 的不同,提出了二个新理论^[1]: $H/D > 1$, 刚塑性力学模型的拉应力理论; $H/D < 1$, 静水应力力学模型的切应力理论。已被物理模拟^[2]、广义滑移线解^[3]、力学分块法^[4]和生产解剖实验所证实。刚塑性力学模型的拉应力理论,打破了传统的工程塑性力学中所阐述的三向压应力之说;静水

应力力学模型的切应力理论, 圆满地解释了大型饼类锻件(按传统理论不好解释的)常出现的“夹馅饼”似的缺陷问题。

2. 提出了锥形板镦粗圆柱体的新工艺^[5] 改善了变形体内部的应力状态为三向压应力, 能迫使平板镦粗的刚性区变形($H/D > 1$), 能消除($H/D < 1$)或降低($H/D \ll 1$)平板镦粗静水应力区的剪切变形强度。

3. 在拔长工艺理论方面 论证了只有砧宽比 W/H 一个工艺参数的不足, 而应补充一个工艺参数料宽比 B/H , 才能正确描述拔长毛坯中心区域的应力状态与控制锻件质量^{[6][7]}。新拔长理论的提出, 基于方柱体镦粗的二个新力学模型^[7]。新拔长理论的正确实施, 关键在于其工艺参数量值的合理匹配与确定^[8]。

4. 以新拔长理论为基础, 提出了横向无拉应力锻造法^[9] 该工艺拔长时, 可不受料宽比的控制, 只要应用上、下锥面砧进行锻造即可实现。

5. 锻造条件对毛坯内部空洞闭合的影响进行了研究^[10] 求出了FM锻造法与普通锻造法对闭合空洞能力及锻造压力的相对关系, 以及FM法的最佳砧宽比及压下率。

6. 在条3、条5的基础上, 提出了新FM锻造法 新FM锻造法的实质——增加了料宽比的控制。根据金属塑性流动规律, 要合理协调压下率 $\left(\eta = \frac{\Delta H}{H}\right)$ 、砧宽比(W/H)和料宽比(B/H)这三者之间的关系^[11]。

7. 变形速率对平板镦粗圆柱体内部应力的影响 实验研究表明: 对于平板镦粗高径比 $H/D > 1$ 的圆柱体, 作用在刚性区圆锥体母线上的 τ/σ 之比值与变形速率有

关； τ/σ 的比值小于 1，高径比 $H/D > 1$ 的圆柱体中心作用着径向和切向拉应力； $\tau/\sigma = 0$ ，拉应力消失； $\tau/\sigma > 1$ ，作用着三向压应力。

2.2 护环强化成形技术与理论

8. 提出了减压法液压胀形装置、成形原理、模具设计计算公式^{[12][13][14]} 该装置的特点是：省力，结构简单，可靠，导向性好，操作方便，比法国同类装置先进。该技术已推广到全国各重机厂。用减压法液压胀形生产护环，目前世界上只有中国独此一家。

9. 减压法液压胀形护环内在成形规律的研究^{[16][15]} 对完成 300MW 护环^[17] 和更大容量护环的研制任务，具有直接的理论和实际指导意义。其中，某些理论研究和实验验证，对该学科有一定价值。

10. 在上述研究的基础上，导出了新型线模具的理论公式。该新型线模具已申报国家发明专利^[18]。

11. 楔块扩孔护环 对单冲头平底座、单冲压斜底座、双冲头三种楔块扩孔模具结构，进行了扩孔护环所需胀形力公式的推导；并对胀形时的变形特点进行了力学分析^[19]。

2.3 残余应力理论与技术

12. 对轴对称变形强化护环残余应力产生的机理、测量与消除等理论方面进行了全面、系统的研究 从变形强化后的回弹入手，把轴对称变形强化护环中的残余应力，分为两个平衡系统去分析研究，即把力学上的一个空间问题，分为两个二维问题的叠加去处理而得到解决^[13]。

13. 进一步对轴对称物体三维残余应力场的确定进行了研究与解决 三维残余应力场的测量理论是国内未能解决的问题。建立了新的轴对称空间力学模型，引入了卸载和

非卸载应力的概念。在求解中提出了变应力函数及其解法〔20〕。

14. 对Sachs内剥层法求平面残余应力理论的发展〔21〕

(1) 对实心轴提出虚拟打孔法, 对空心轴提出虚拟剥层法, 解决了实心轴中心和空心轴内表层的残余应力值〔22〕。

(2) 能求出打中心孔后或剥层后残余应力的重新分布〔23〕〔22〕。

(3) 能求得打中心孔(或剥层)与表面残余应力降低的关系〔23〕〔22〕。

15. 冷轧辊内部残余应力的估算 以实验为基础和Sachs方法为手段, 求出了一种已知表面残余应力无损求知冷轧辊(实心或空心)内部残余应力沿半径分布的方法〔24〕〔25〕。

16. 提出了冷轧辊剥落的机理和容许残余应力条件 冷轧辊工作应力和残余应力迭加, 最大综合应力值位于轧辊表面, 而使剥落失效。用Mises准则建立了保证轧辊在弹性状态下工作的容许残余应力条件〔25〕。

2.4 弹性及弹塑性理论方面的某些进展

17. 首次求出了圆筒受余弦分布压力之弹性解 应用一个新的应力函数, 解答了圆筒受余弦分布压力的问题。压力沿轴向不变化时的极限, 导出厚壁筒Lame解答。可望解决圆筒受沿轴向任意分布的轴对称荷载作用的问题〔26〕〔27〕。

18. 推导出厚壁筒屈服条件系数 $\beta_L = \frac{2}{\sqrt{3+(r/b)^4}}$,

当 $r = a$ 时, $\beta_{La} = \frac{2}{\sqrt{3+(a/b)^4}}$, 其数值范围, $1 <$

$\beta_{L\sigma} \leq \frac{2}{\sqrt{3}}$, 这与用Lode应力参量导出的 β 系数的数值范围

是一致的。当 $a \ll b$ 时, $\beta_{L\sigma} = \frac{2}{\sqrt{3}}$ 。说明内表面进入塑性状态是平面应变问题, 与厚壁筒的长度无关〔28〕〔16〕。

19. 利用Mises屈服条件, 求出了圆筒弹塑性问题中的一种新解。条17中 β_L 是径向坐标 r 的函数, 用 $\sigma_\theta - \sigma_r = \beta_L \cdot \sigma_r$ 和轴对称平衡微分方程联合求解, 问题得解决〔29〕。

20. Bauschinger效应的实验研究 得出了大塑性变形Bauschinger效应的特征〔30〕。

2.5 液压胀形轧辊(VC轧辊)的技术与理论

21. 液压胀形轧辊系统 在弹性理论上, 确定了外套壁厚, 使之能密封住外套且不胀裂的合适过盈配合量; 设计了独特的高压旋转密封; 确定了油槽深度〔31〕。

22. 在静载实验〔32〕的基础上, 选定了恰当的位移函数, 采用反逆解法, 求出了液压胀形轧辊胀形凸度的空间解析解〔33〕。这实质是一个两端带约束条件、中间受内压的厚壁圆筒问题。这为建立液压胀形轧辊系统进行闭环控制的数学模型奠定了基础。解析解的结果与实验和有限元计算〔34〕结果吻合。

3 本书特点与研究方法

全书内容, 综合起来, 有三大特点:

(1) 金属塑性成形的某些方法, 由传统工艺走向特殊工艺(即新工艺);

(2) 工艺研究由经验走向定性与定量分析(含新理论与新的解析);