

塑性加工理论及新技术开发 学术交流论文集

中国金属学会轧钢学会

1991



前 言

值得高兴的是塑性加工理论及新技术开发学术交流会是在八五计划的第一年召开的。

塑性加工技术飞速发展，其发展趋势是过程综合柔性化、工艺连续最佳化、机电一体化、技管结合一贯化，这一发展趋势将贯穿二十世纪的最后十年，并且依靠这一发展，钢铁工业在全世界迎来了一个稳定生产的阶段。

我国塑性加工技术在这十年要有一个比较大的发展，如何了解发展趋势、预测未来、开发技术使我国塑性加工技术跃上一个新的台阶，达到国际先进水平则是摆在我们科技工作者的光荣而艰巨的任务。

这次会议提供了一个讲台，它将为各位代表就塑性加工理论及技术的发展、发展生产提出建议、献计献策、交流学习提供一个极好机会。

遵照惯例，会议论文事前印订成册，它不仅便于交流，而且对推动塑性加工技术进步和生产发展也必将起积极作用。

限于时间及经济条件、印刷质量还不能尽满人意，论文中也难免有这样那样的不足或错误，望读者提出批评、指正

编者：朱为昌、朱景清、刘雅政、王进

1991·4·

目 录

1	贺毓辛、朱为昌等：轧制科技进步与学术体系的完善·····	(1)
2	刘才、杜凤山：三维弹塑性有限元法模拟板带轧制过程·····	(7)
3	杜凤山、刘才等：薄板轧制过程中的三维接触摩擦问题·····	(11)
4	许思广、连家创：环件连续轧制过程有限元分析·····	(15)
5	申光宪、黄庆学等：用有摩擦弹塑性接触边界元法模拟板带轧制过程·····	(21)
6	孙斌煜、李绍山：铸轧过程的数学模型·····	(26)
7	胡衍生：轧制变形区金属质点加速度以及滑动率的探讨·····	(30)
8	肖宏、申光宪等：三维弹塑性边界元法模拟带轧制过程·····	(37)
9	阎晓强：利用纯变形功建立变形抗力数学模型·····	(43)
10	吕元康、张强、吴国良：用能量法计算组合型花纹板的轧制力能参数 ·····	(51)
11	王振范、赵志业：流函数速度场上界法解析在挤压拉拔中的应用·····	(58)
12	陈家民：用三角形速度场求平冲头压入半无限体的正确解·····	(64)
13	方原栋：扁料平板压缩（考虑侧面鼓形）的综合上界分析·····	(68)
14	姜正义、戴钦孔等：21—4N钢在加热后空冷过程中二维温度场有限元 分析·····	(73)
15	魏立群、陆济民：轧辊弹性压扁的计算·····	(79)
16	周纪华、管克智等：低碳含铌高强度钢流动应力数学模型·····	(88)
17	姜周泰：开发新型七辊轧机的设想·····	(97)
18	马东清、吴国良：国产一米七轧机的继续改造·····	(105)
19	张文元、李庚唐：冷轧带钢横向应力分布的研究·····	(116)
20	赵荣国：废旧冷轧辊综合利用的研究与应用·····	(123)
21	邱松年、孙维韬：对锥面辊板带异步轧制的分析·····	(128)
22	王铭宗、郑红专等：异步轧结金属复合材料的实验研究·····	(136)
23	陈贻宏、何汉铿等：窄带钢冷轧机张力计的标定·····	(140)
24	张进之：测厚计厚控方法实用中的几个问题探讨·····	(144)
25	王丽华、苏德岚：低碳半硬质冷轧新材料开发与应用·····	(151)
26	程晓茹、赵忠诚：关于钢板性能最优化问题·····	(156)
27	魏立群、陆济民：轧制规程优化计算·····	(161)
28	杨新法、顾正秋等：异径四辊轧型轧制力参数的试验研究·····	(167)
29	应亚洁、贺桂英等：16Mn Nb Re 钢残余应变及组织性能关系的研究 ·····	(174)

30	邱松年、孙维韬：冷轧带钢镰刀弯数值计算模型及最优自动控制分析	(179)
31	孙铁铠、赵永和：HC六辊轧机中间辊肩部的优化设计	(192)
32	葛懋琦、李虎兴等：350三机架冷连轧机数学模型试验研究	(200)
33	付江、赵以相等：板坯大测压调宽变形的模拟研究	(206)
34	朱之超、王克明等：关于压力穿孔（PPM）穿孔力与顶头参数的研究	(211)
35	赵志业、曹自林：粉芯钢管拉拔的理论解析	(219)
36	王文斌、冯德明等：浮动芯头拉拔Cu管拉拔力及稳定性	(227)
37	田党、卜玉钦：二辊斜轧穿孔高温合金圆坯的变形分布及分层形成机理	(233)
38	王文斌、冯德明等：T ₂ 铜空调热交换器管“PR”态组织结构的控制	(239)
39	颜鹏、王玉霞等：降低空拔管残余应力的研究	(244)
40	冯德明、曲力等：小孔径厚壁Cu管拉拔工艺参数的设计	(249)
41	李生智、陈刚等：连铸—连轧工艺中的加工金属学问题	(255)
42	马义德、李增德等：轧制角钢的最少蝶式孔型系统及其设计特点	(261)
43	杨新法、顾正秋等：全主动四辊孔型（圆→方）轧制金属流动规律的试验研究	(267)
44	韩树春：积分法确定异型孔接触面水平投影面积	(273)
45	邱松年：热轧等边及不等边角钢的力学性能研究	(280)
46	陈林、唐伟林等：工字钢端部变形研究	(288)
47	殷志勇：U型钢切深孔咬入条件的分析	(286)
48	杨新法、顾正秋等：全主动四辊孔型轧制力参数的初等差分解	(303)
49	龚永平、苏敏文等：轧件在孔型中轧制的宽展模型的实验研究	(311)
50	孙超、杨觉先等：屏幕图形显示及程序复盖技术在CARD中的应用	(316)
51	刘天麟：耐热耐蚀双相不锈钢以轧代段开坯之（二）—HIGr13耐热耐蚀双相不锈钢焊丝工艺的创新	(319)
52	王安训：复二重线材精轧机稳定性研究	(325)
53	樊小平、王金柱：25Mn Si V热轧钢筋的回归分析	(336)
54	朱为昌、钟鸿儒等：Y型三辊冷轧工艺对合金钢丝组织性能的改善	(343)
55	雷立新、王进等：高速钢热轧线材表面纵向裂纹的分析和改进	(347)
56	王邦文、陈美英：高速线材轧机辊环的寿命分析	(352)

57	曾武: 冷连轧机打滑机理研究及应用	(360)
58	钟春生、黄毅: 板带材轧制的弯曲喂入效应	(365)
59	雒建斌、严崇年等: 浅论金属塑性加工过程人、机、工艺间的模糊关系	(372)
60	刘雅政: 对复杂加载路径下 A—K 低碳钢的微观缺陷实验研究	(377)
61	严崇年、雒建斌: 模糊数学在金属塑性加工摩擦学中的应用	(384)
62	陈无忌: 同步、异步混合五机架冷连轧	(389)
63	王文斌等: 铜管拉拔中浮动芯头的应用	(394)
64	唐杰民: 方轧件弯曲分析	(403)

轧制科技进步与学术体系的完善

贺毓辛 朱为昌 朱景清 杨觉先 顾卓

(北京科技大学)

一、生产发展提出许多新课题

钢铁工业面临着一个激烈竞争的局面，为适应这一严峻形势，各国科技人员正在顽强拼搏，以科技进步为对策，来满足用户的苛刻要求，求得生存和发展。正由于此，科学与技术的进步是非常明显的。

轧制技术与其它工程一样，其发展趋势是过程综合柔性化、工艺连续最佳化、机电一体智能化、技管结合一贯化。这也就是人们所说的新工艺决定着未来的道路。

新工艺的实现并非易事，无论在技术上还是在学术上都给轧制工作者提出许多新的课题。诸如

1. 开发新技术、变革传统工艺才能实现新工艺，如果没有高速、高温、无缺陷铸坯技术和规程有序轧制技术以及大侧压技术和灵活热工技术，实现连铸连轧的热装热送技术是不堪设想的。

2. 在进行方案设计时，由于问题的复杂性和无借鉴性，已不能仅靠工程师的经验进行决策，在板带连轧机组上几个机架或哪些机架上配备CVC轧辊对改善板型既经济又实效就是一例。

3. 生产计划制订及实施中的异常处理已不能用传统的计划安排或调度来处理，因为它们由于下列一些原因变得异常复杂：按订货号组织生产、小批量多品种生产、各工序作业的相互干扰、异常处理的实时性等。

4. 尽管各个机组单独生产都毫无问题，但过程综合把几个机组或工序联接起来由于遇到匹配与衔接问题常常使作业率大为降低等等。

虽然这些课题有相当难度，但对我国轧制生产有巨大意义，如能解决，将使我国轧制生产及技术达到一个新的高度，并将接近或赶上国际先进水平。

二、轧制工程的特点

轧制工程应用新技术遇到很多困难，这是由其特点所决定的，对钢材轧制生产更为突出。

1. 过程离散性 轧制工序复杂，全局上看是连续的，但实际又是离散的，例如CC—CR名为连续过程，但实际上铸坯是一块一块地送给轧机、轧机一块一块地轧，而钢水也是一炉一炉地炼，局部上它又是不连续的、离散的。

2. 生产随机性 轧制生产的随机性是普遍的，例如冷轧的每个卷重不可能是一样的，出钢量也是随机的，因而连铸机拉铸时间及铸坯长度也是随机的。

3. 作业的同步性 由于高温作业必须同步进行，从炼钢到连铸、从连铸到轧机等过

程必须不间断地进行下去。

4. 流程的分枝性 如图1所示, 钢铁工业的生产与机械工业不同, 后者是组装式, 而前者是分枝式, 同一批号或炉号的轧件在不同分枝上生产订货号不同的产品。

5. 工艺性能的固定性 轧制各工序的设备工艺特性在某一特定条件下是相对固定的, 不可能在很大的范围内变化, 亦即它的调整范围是有限的。

6. 轧制机电设备的非刚性 轧机是弹性的, 其弹性大小要随受力大小而变化, 这样就使工艺的不稳定性与设备因素及其调整联系起来。

上述轧制特点在轧制工程迅速发展的今天使问题变得日益突出和尖锐起来。

三、技术对策

根据轧制工程发展趋势和轧制特点来寻求技术对策。

1. 轧制柔化 过程综合使匹配问题尖锐, 因为各工序的工艺状态是随机波动的、事故及异常操作也是不确定的, 这种生产的随机、离散性与各工序环节的刚性之间的矛盾是影响匹配与衔接的基本因素。为了解决这一问题, 我们于84年提出柔性生产的技术方案, 该技术的思路是在各刚性机组间设置柔性环节, 使系统具有柔性, 这对CC—CR特别有效。例如在连铸与轧机之间设置缓冲保温台架可提高直轧率和作业率。

自适应技术也是一种柔化技术, 使生产有更大的适应性。

2. 轧制优化 优化技术已广泛用于生产而且带来巨大的经济效益。优化的概念可以从不同方面去理解。

从投产顺序来说, 设计必须建立在优化的基础之上, 例如, 冷热轧之间如何分配压下量, 确定最佳中间厚度, 最佳的断面压缩率, 设备及控制系统的设置方案等都有优化的问题。而生产中无论是压下规程、孔型设计、温度规程、速度规程, 还是工艺拟订、合金设计, 优化的效果都是十分明显的。

还必须指出除工艺优化外产品优化的重要性, 经济断面, 更优、更轻、更新的产品, 钢材的深加工等都是在优化基础上开发的, 它可以提高钢材使用效能, 并提高企业的经济效益和社会效益。

过去还有一个忽视的问题即原料的优化, 没有高精度的热轧板卷就轧不出高精度的冷轧板卷, 没有合格的成分就不能获得优良的性能这是人所共知的事实, 但常常被忽略, 最近提出了“精料技术”就是一个前进的标志, 原料的优化就是在保证产品要求条件下确定最低的原料标准。

3. 轧制模化 生产的复杂性已非人直观可以决策和控制, 而现在技术的发展趋势就是机、电结合一体化, 而且有智能的功能, 以便在线地实时地进行决策, 若要做得这一点就必须输入给计算机良好精确的数学模型, 在这种情况下, 只有变形抗力、压力等参数模型是不够的, 还必须有轧制动态模型以进行精确调整。

现在急待开发的则是各工序之间相互匹配的物流仿真模型、操作及其异常处理的调控模型、技术—经济—管理结合的生产计划编制及异常处理模型。不开发这样的模化技术来建立这样的模型, 那么实现现代化的轧制生产是不堪想象的。因此, 人们一定要改变这样的概念, 即模型仅是轧制理论工作者搞出来的而且实际上用途不大。发展到今天, 模型再也不是可有可无的, 而且模化技术急待开发、发展。

四、计算机辅助生产(CIM)

轧制柔化、优化、模化是现代轧制发展的关键技术，它们都是既有软件技术也有硬件技术，是轧制生产水平的标志，同时也是轧制发展的技术关键。而它们的实现是离不开计算机的支持的。

在当前，对于轧制的计算机辅助生产(CIM for Rolling)主要的是CAC、CAD/CAM和CAE。

计算机控制CAC方面，AGC、AWC已是成熟技术，形状控制(ASC)也已开始用于生产实践。过程综合及连续化的结果要求上一级的计算机也要有控制功能，如在某一异常情况下，及时变更生产计划改变作业使生产能顺利进行则是更高一级的控制功能，其极限或最高水平就是计算机辅助管理形成“无人车间”了。

计算机辅助设计CAD在我国已用于优化压下规程的制订，更多地是用于孔型设计CARD。CARD在我国是1983年开始的，目前已经进行到一个非常深入的阶段，它不仅解决了在微机上处理、人机对话、画面显示和绘图等问题，而且从简单断面型材到复杂断面型材，从简单地进行一套孔型参数的设计到工艺参数优化设计，进而进行综合优化设计，使CARD不仅是设计者的工具，而且在生产也取得效益，为生产厂家所采用形成普及之势。

CAE在我国也进入了一个新的阶段，它的一个标志就是在金属学会组织下已建立了冷轧板带CAE软件包。无疑，它将迅速普及，变成轧制工程人员的必不可少的工具。

CAE的发展使优化成为可能，但就优化理论本身，用于轧制工程还有不少问题，可用于生产的综合优化是值得研究的一个重大课题。

目前CAD和CAE所研制的软件基本上是专用软件，使用范围受到限制，软件的商业化、标准化和操作简易化是发展中应注意的问题。

CAE的发展使一些非直观的技术课题可以很容易地解决。由于塑性加工的复杂性，有些问题尚难精确地予以理论描述，在这种情况下人工智能和专家系统的应用将是一个方向。

塑性加工所使用的专家系统将由环境模型、知识库和控制策略三部分组成，在这方面的研究在我国可以说是刚刚起步。

轧制柔性生产系统则是计算机辅助生产的典型实例和代表。

五、轧制理论及轧制学科体系

生产、技术、科学的进步是由社会需求决定的，而科学推动技术进步、促进生产发展。

战后的四十年是钢铁生产的黄金时代，由1.5亿吨增加到现在的7.5亿吨。钢铁生产在战后经历了三个大阶段。

第一阶段是战后恢复及迅速发展生产的阶段，大约用了二十年。60%的板带轧机是这一时期建成的。

第二个阶段是轧钢自动化阶段，大约用了二十年的时间，65年第一套计算机控制轧机建成，85年板形控制也取得成功。计算机、可控硅、液压技术的广泛应用，实现了轧制生

产现代化。

第三个阶段 能源危机及激烈竞争给西方钢铁工业以致命的打击，使西方一些资本家发出“夕阳工业”的哀叹。但通过技术进步，走出了低谷，“新工艺决定未来的道路”已成现实。第三个阶段是能源危机和激烈竞争下技术进一步进步阶段，这一阶段刚刚开始，预计也要二十年的时间。其根据就是连铸连轧技术基本实现。

轧制理论发展也相应经历了三个阶段。

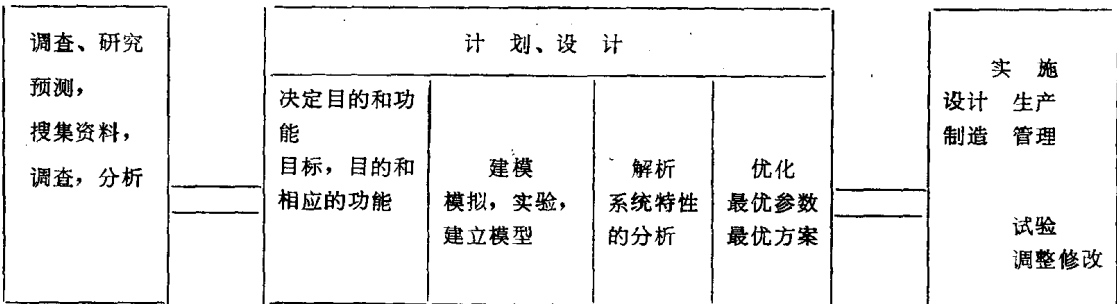
第一个阶段 理论研究深化。是一个百花齐放百家争鸣的时代，综合研究澄清了上面的争论问题，使变形区理论日臻完善。

第二个阶段 BISRA研究动态过程，开创了第二代轧制理论，为了解决计算精度，上界法有限元等算法得到很大发展。形成了具有特色的分块理论，如板形理论。

第二个阶段过程综合、工艺优化、技管结合给轧制理论推出新的课题，传统理论已不能解决。除了塑性加工力学、塑性加工金属学外，还必须把轧制工程做为一个系统工程来处理。建立新的第三代理论来解决工程实践问题。

所谓系统，就是由若干个可以相互区别、又相互联系的要素，有机地结合起来完成某种功能的综合体。系统工程，顾名思义，就是一门研究系统的工程技术科学，它以系统为对象把要研究的事与物运用科学方法，建成某种系统模型，进而采用最优化的方法求得系统的最佳效果。即经过工程过程使系统的各组成部分相互协调、相互配合，以获得技术上先进、经济上合算、运行中可靠、时间上最省。

通常以系统思想为基础的系统工程一般方法步骤可表示如下。



我们把物流理论引入进行轧制系统工程的研究，从而解决了这一难题。

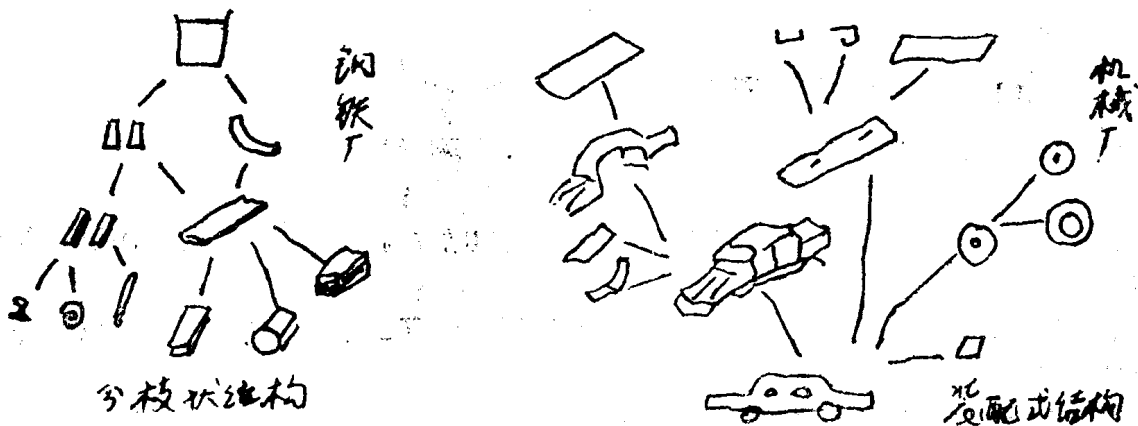
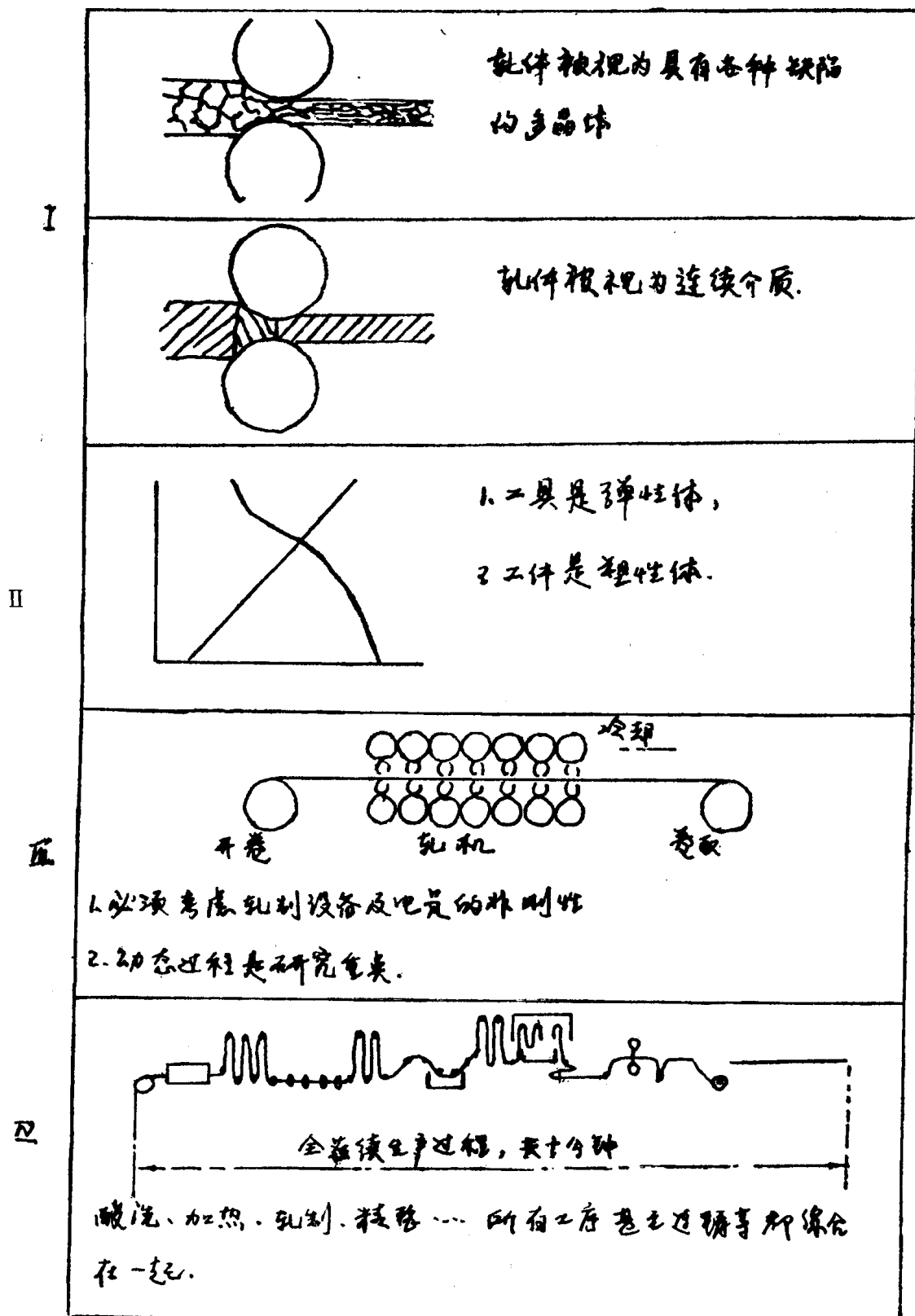


图 1 轧制生产流程的特性



总之，压力加工应当是一个微观材料学与宏观力学相结合、理论与实际结合、实验力学与数值计算结合的系统综合解决轧制工程问题的应用科学体系。

从材料既看成连续体又看成晶体、轧件与工具的矛盾、模型的精确性与生产不确定性的矛盾、设备工艺的刚性及生产柔性的矛盾还可以在科学方法论上给我们以启示：轧制过程的描述，往往是构想出两个并存同样起作用的相反或矛盾对立的概念，把两者对立给予统一的描述，则是建立现代轧制工程理论的途径。而数学的进展又为其提供了可能，为建立新理论提供了一幅新的图景。

下表为轧制理论的发展及多层次的学术体系。

基 本 特 征	研究盛期
1. 研究局限在轧件在变形区中的行为、轧制参数工程计算及设计。 2. 力学方法用于解决轧制参数的工程计算，材料学方法用于控制产品的性能。 3. 连续体和带有缺陷的实际晶体是相互矛盾的两个不同概念。	1970—1985
	1945—1965
1. 轧件轧机二者关系决定着轧机调整及厚控、板形控制的基本原则。 2. 希望轧件有尽可能大的塑性变形，轧机有尽可能小的弹性变形，而二者是矛盾的。	1955—1975
1. 轧制过程有许多外扰，它来自轧机设备、电气系统和原始轧件，即或模型是精确的也很难实时模拟实际过程。 2. 目前，生产的不确定性与模型精度的矛盾用自适应的方法来解决。	1965—1985
1. 每一机组(工序)的刚性和生产的柔性是矛盾的，这一矛盾用柔性生产系统来解决。 2. 轧制工程是一个巨系统，除力学、材料学(主要的)外，尚须引入系统工学，轧制理论成为多学科交叉的应用技术科学。	1975—

三维弹塑性有限元法模拟板带轧制过程*

——关于凹辊面轧制时的应力及变形

刘 才 杜凤山

(燕 山 大 学)

摘要 本文采用基于U. L法的三维弹塑性有限元方法, 针对辊缝变化所引起的带材横向厚度分布不均问题建立了新的有限元边界计算模型, 编入有限元程序《EPFEP3》以后进行了大量计算, 取得了一般解析法不能得到的信息。文中仅就凹辊面轧制情况进行了分析, 给出了有关应力分布及变形的信息。

关键词 双重非线性有限元, 凹辊面轧制, 应力及变形。

引 言

在板带轧制过程中, 轧后带材的横向厚差和平直度是评价产品质量好坏的重要指标。液压AGC技术的应用, 带材纵向厚差已经得到了严格控制, 而横向厚差和板形问题表现得尤为突出。众所周知, 带材横向厚度分布不均和板形缺陷是相关联的。所以, 一般冷轧带材生产都要增设辊缝形状控制系统以调节轧后带材厚度横向分布。即使如此, 也不能消除横向厚差。

传统解析方法在研究带厚横向分布时, 是将辊系弹性变形与带厚横向分布经反复迭代计算得到的^[1], 这在双重非线性有限元程序《EPFEP3》中难以实现。为此, 文中建立了新的有限元边界计算模型, 采用三维弹塑性有限元方法, 同时考虑材料、几何双重非线性模拟研究了凹辊面轧制时金属流动, 这对研究板形缺陷产生的原因有着重要的实际意义。

1 辊面约束模型

轧后带材横向厚度分布取决于终态辊缝几何形状。轧辊弯曲变形、弹性压扁、热变形以及工作辊面磨损等都影响辊缝凸度值分布。当给定原始辊型时, 辊缝凸度值可由下式确定

$$\Delta h = 2f - \Delta D_t - \Delta D_0 + \Delta D_y \quad (1)$$

式中 f 为工作辊弹性挠度; ΔD_t 为热凸度; ΔD_0 为原始辊型凸度; Δh 为辊缝凸度; ΔD_y 为工作辊弹性压扁量。

式(1)只能确定最大辊缝开度, 不能给出其轴向分布。由于辊缝形状受辊系变形影响, 工作辊面弹性压扁引起名义辊径相对增大且沿轴向分布不均。因此, 工作辊面函数是

* 国家教委优秀年轻教师基金资助项目

一个复杂的多元函数。对于象 $R=f(x,y)$ 这样一个空间曲面问题，由于其函数形式不易确定而不能直接在本程序中进行有约束处理。为简化计算，假设工作辊面为几何形状可变而轧辊轴线不变的刚性曲面。当选择抛物线为母线所得到的旋转抛物面函数为^[2]

$$F(x,y,z)=\sqrt{x^2+z^2}-\Delta R/l^2 \cdot y^2+(R_0+\Delta R) \quad (2)$$

式中 ΔR ——辊径变化值； R_0 ——初始轧辊半径； l ——轧辊辊身长。

对于这样一个空间曲面（图1），沿过辊面上一点 m 的法线方向（ Z' 轴）金属既不能穿透辊面也不能与辊面脱离，只能被约束在 $x'my'$ 平面内。由于 x' 轴、 y' 轴的方向矢量为两不定正交矢量。因此，固定 x' 轴便可求出 y' 轴的方向余弦。根据局部坐标轴的正交性，求得局部坐标系下的位移变换矩阵为

$$[R]=\begin{bmatrix} l_{x'} & l_{y'} & l_{z'} \\ m_{x'} & m_{y'} & m_{z'} \\ n_{x'} & n_{y'} & n_{z'} \end{bmatrix} \quad (3)$$

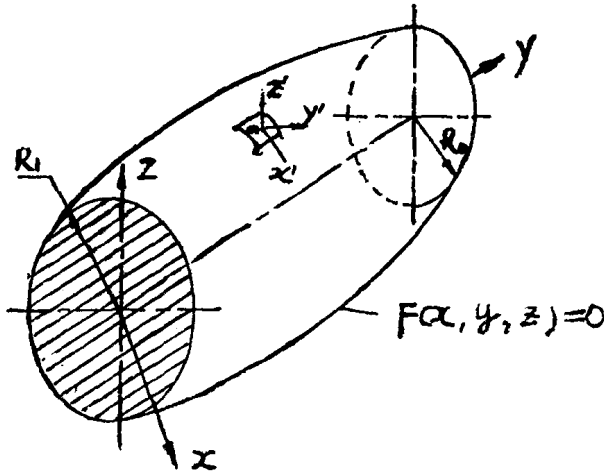


图 1 工作辊曲面与转动坐标系

具体求解过程详见文献^[2]。

当轧件表面节点在波前区“成熟”时，需要对相应的子刚度矩阵作转动变换，以求得局部坐标系中的位移增量。回代时，将 $x'my'$ 坐标系下的位移向量前乘矩阵 $[R]$ 即可。

2 非线性有限元方法

压力加工中的金属变形均属大变形范畴。在分析物体形态改变时，不仅要考虑变形前的初始构形，还要考虑变形后的现时构形对应力、应变的影响。

根据大变形有限元理论的能量共轭关系，考察在 t 时刻和 $t+\Delta t$ 时刻两相邻构形，忽略体力按虚功方程可以得到在 Δt 时间内虚功表达式

$$\int_V \Delta S_{ij} \delta(\delta \Delta u_i / \delta x_j) dvol = \int_{AT} \Delta F_i \delta u_i dA \quad (4)$$

式中 ΔS_{ij} ——第一Pilo应力增量张量；

$\delta \Delta u_i / \delta x_j$ ——位移梯度张量；

ΔF_i ——表面力增量； Δu_i ——表面位移增量。

由于微元体刚性转动不引起应力状态改变，因此，第一Pilo应力增量 ΔS_{ij} 与Jaumann应力 $\Delta \sigma'_{ij}$ 存在如下矩阵关系^[3]

$$[\Delta S] = [\Delta \sigma'] - \frac{1}{2} ([Q] + [Q]^T) [\sigma] - \frac{1}{2} [\sigma] ([Q] + [Q]^T) + [\sigma][Q] \quad (5)$$

式中 $[Q]$ ——位移梯度； $[\sigma]$ ——Euler应力；

Prandtl-Reuss本构方程可写为

$$d\sigma_{ij} = 2G \left[d\epsilon_{ij} + \delta_{ij} d\epsilon_{kk} \left(\frac{\mu}{1-2\mu} \right) - \alpha^* \sigma'_{ij} \cdot (\sigma'_{kl} d\epsilon_{kl} / S) \right] \quad (6)$$

式中 $S = 2/3 \sigma^2 (1 + 2(1 + \mu)/3E \cdot H')$; α^* 为载荷判定因子。

单元刚度方程为

$$\{\Delta f\}_n = [K]_n \{\Delta d\}_n \quad (7)$$

其中 $[K]_n = [K^o]_n + [K^e]_n + [K^s]_n$

$[K^o]_n$ ——应力校正矩阵; $[K^e]_n$ ——纯变形矩阵;

$[K^s]_n$ ——等体积变形矩阵。

采用正割模量法对非线性方程组进行迭代计算, 算得的数据可以直接进行跟踪图象处理。

3 计算条件

辊径 $D = 100$ (mm) 压下量 $r = 8\%$ 坯料尺寸 $3.8 \times 80 \times 0.4$ (mm)

摩擦层厚 $FLT = 1 \mu m$ 摩擦系数 $m = 0.1$

角位移增量 $\Delta \alpha = 0.00109$ 弧度

带材硬化函数 $Y = 197 + 180 \ln[(e_p + 0.98)/0.98]$ (MPa)

坯料的四分之一被分割 1260 个节点 760 个砖块单元, 轧辊辊径最大沉陷量 $\Delta D = -20$ (μm)

4 结果分析

由于辊径沿轴向变化, 轧辊辊面线速度沿轴向分布不均, 致使轧辊在转动过程中的对轧件产生不均匀压下, 在变形区入口侧产生不均匀变形。

在凹辊面作用下, 轧后带材横断面呈中凸状, 其变化过程可见文献^[2]。在水平面内, 带材两侧边缘网格畸变十分剧烈, 首先在入口侧发生正向剪切, 到达出口时又转化为负向剪切。由于辊径中部小于边部, 使入口处带材厚度尺寸在中部增加而在边部出现预压下变形 (图2), 这种现象用一般解析理论是无法解释的。图2表明, 轧件在变形区之外所产生的预变形对后张力分布会产生重大影响, 在研究后张力分布模型时, 应予以高度重视。

图3为金属网格相对变形图 (“/”表示变形及流向)。宽展变形发生在带材两侧边

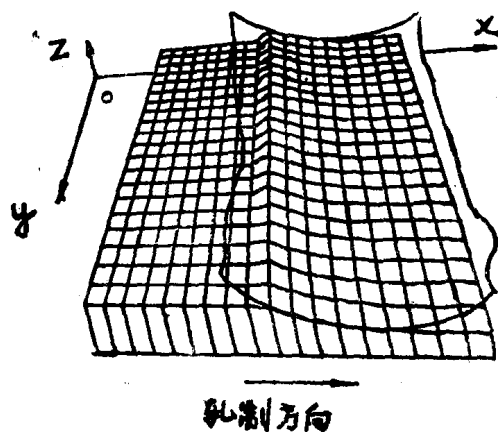


图2 轧件变形

缘,在变形区之外(入口处)产生预拉伸变形且在边缘出现整体刚性移动单元。在变形区之内,有一列单元不发生纵向延伸变形,这是由于 xoz 平面内的剪切变形对延伸变形产生一定补偿所致。

在凹辊面作用下,铅垂应力分量 σ_z 在各个横断面上的分布如图 4 所示,图中曲线标号

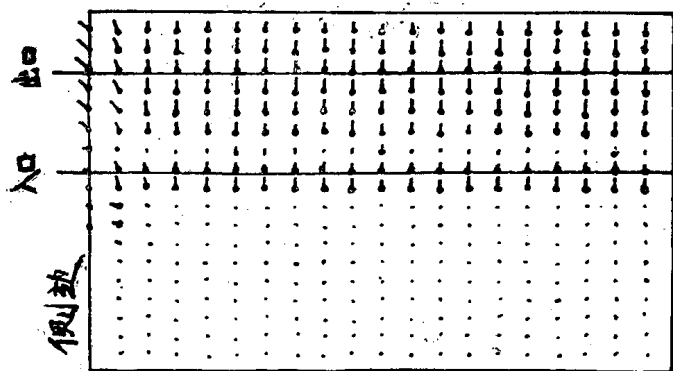


图 3 表面金属网络相对变形

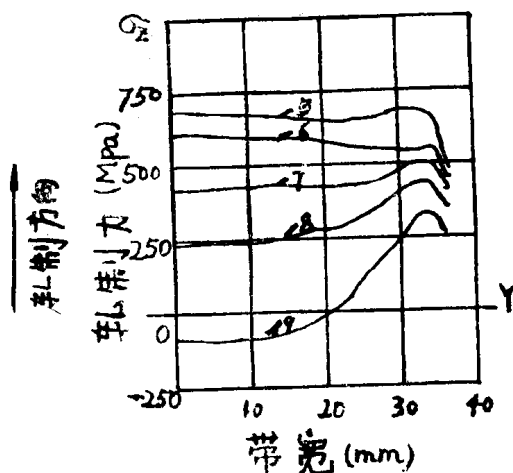


图 4 轧制力沿带宽分布

为横断面序列号。在变形区中部,轧制力沿带材宽度变化较为平缓,仅在边部产生压力峰值(横断面序号5、6、7)。而在入口侧,轧制力在边部产生突变且在入口断面上(序号9)的带材中部产生拉应力。这是由于凹辊面作用使带材中部(入口侧)隆起所致。

5 结 论

研究轧后带材横断面厚度分布是研究板形缺陷产生机理的重要内容。采用作者所建立的有限元模型及新编程序《EPFEP3》是分析不同辊缝形状对金属变形影响的有力工具。

在凹辊面作用下,变形区之外(入口侧)变形十分剧烈,带材中部隆起使带厚增加,应力分布在两侧边缘产生峰值。边缘剪切变形在水平面内由正值转变为负值。

参 考 文 献

- 1 Yasuhisa, Tozawa. 考虑轧辊变形的冷轧三维变形分析,世界塑性加工技术译文集、机械工业出版社,1987. 12(907~915)
- 2 杜凤山. 三维弹塑性有限元法模拟板带轧制过程. 东北重型机械学院博士论文. 1990.3
- 3 Liu, C. (刘才) Ph.D. thesis university of Birmingham. 1984

薄板轧制过程中的三维接触摩擦问题*

杜凤山 刘 才 连家创

(燕山大学)

摘要 本文利用金属流动反作用原理建立了新的摩擦力学模型,提出了摩擦元刚度二元修正理论并将其编入三维弹塑性双重非线性有限元程序«EPFEP3»。通过对板带轧制过程的计算机模拟,结果表明,在不用对摩擦大小、方向及中性点位置作任何假定的情况下,有效地解决了接触摩擦问题。实验结果也证明了该模型的可靠性。

关键词 接触摩擦, 双重非线性有限元, 摩擦元, 板带轧制。

引言

在压力加工过程中,工具与工件间的接触摩擦问题一直是工程理论界研究的热点。处理这一问题主要存在两大难点:一是摩擦力的大小及分布规律无法用精确的解析式表示;二是摩擦力的方向受中性点位置影响不能直接给定。针对这些问题,许多研究者在应用有限元法求解压力加工问题时,提出了多种形式的摩擦模型。

Kirfer^[1]在应用三维弹塑性有限元法分析矩形坯轧制时,采用了光滑与粘着两种极端情况下的摩擦模型,文中附加了过多假设和规定。Nagamatsu^[2-4]在处理简单镦粗时,预先给定接触面金属相对工具表面切向流动位移函数进行有限元编程,使用该法必须事先做大量实验以测定相对变形量的大小。chen^[5]在应用刚塑性有限元法分析环镦粗以及 Oh^[6]在分析任意边界形状的金属塑性成形时,假设摩擦力 f 与表面金属流动速度 v 的关系为 $f = -mkv/|v|$ 及其修正式,计算结果同低摩擦环压缩实验比较仍有一定差距。Zienkiewicz^[7]在分析热挤压问题时,在工具和工件间引入一层薄单元。Sharman^[8]在应用小变形有限元分析挤压成形问题时,用一层薄单元模拟工件表面上的摩擦力,文中未论及如何解决单元畸变问题。Hartley^[9]、Liu^[10]利用有限元方法分别分析了环压缩与板坯轧制问题,在处理边界摩擦时,也引入了没有任何物理意义的摩擦层,利用 β 因子 ($\beta = m/(1-m)$) 修正摩擦元刚度,取得了较好的使用效果。但是,文中未论及摩擦层厚度变化对剪力增量的影响,同时该模型同板带轧制情况相比仍有一定差距。直接引用时,出现应力及变形不稳定现象。

基于上述原因,笔者建立了新的接触摩擦模型,提出了关于摩擦刚度的二元修正法^[11],进行有限元编程之后,收到了显著的实用效果。

1 摩擦元力学模型

在高速冷轧薄带过程中,由润滑油、灰尘、气体等周围介质作用在轧辊和轧件之间产生一层极薄的高强度隔离层,它起着传递轧制力和摩擦力的作用。然而,传统有限元分析

* 国家教委优秀年轻教师基金资助项目

一般都忽略摩擦介质作用, 仅考虑摩擦限制金属流动, 这同实际轧制情况相差甚远。因此, 在建立接触摩擦力学模型时, 不仅要考虑摩擦的阻碍作用, 还应考虑金属流动方式对摩擦的反作用。

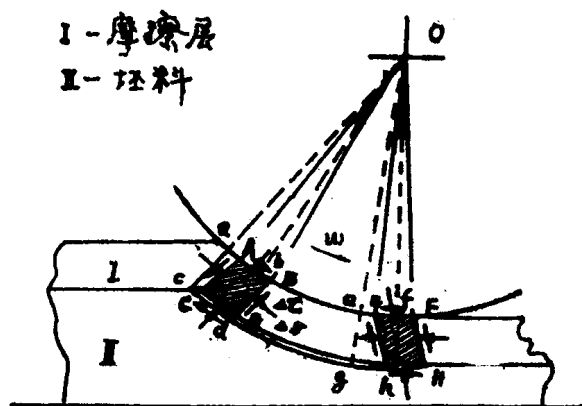


图 1 摩擦元力学模型

如图 1 所示 (实为三维模型), 摩擦上层节点与辊面相固连, 下层节点与坯料相连接, 摩擦层厚度可调。在稳态轧制过程中, 给定轧辊角位移 $\Delta\alpha$ 以后, 后滑区摩擦元由初始构形abcd变为现实构形ABCD (阴影部分)。此时, 由于接触表面金属相对辊面的滞后作用而使摩擦元产生剪力增量 $\Delta\tau > 0$; 在前滑区, 由于前滑作用致使现时构形EFGH产生剪力贡献 $\Delta\tau < 0$; 这样, 在前、后滑区之间一定存在不发生剪切变形的摩擦元使其剪力增量 $\Delta\tau = 0$ 。这种处理方法同goodman^[12]提出的节理元有相近之处, 但是这里不采用应力转移法来保证摩擦元为纯弹性。在小增幅条件下, 摩擦元能保证其自身的弹性性质而与其变形历史无关。

2 摩擦元刚度二元修正法

按位移求解的有限元方法, 在考虑几何非线性时, 元素内部应变增量是位移梯度张量和转动张量的函数

$$[\Delta\epsilon] = [R]^T ([Q]^T + [I]) - [I] \quad (1)$$

按Prandtl-Reuss流动准则和Mises屈服条件, 其本构关系为

$$\{\Delta\sigma\} = [D_n]\{\Delta\epsilon^{cr}\} \quad (2)$$

式中 $\{\Delta\sigma\}$ —— Jaumann应力; $[D_n]$ —— 弹塑性本构矩阵; $\{\Delta\epsilon^{cr}\}$ —— 线性化与转动无关应变, 详见文献^[11]。单元节点力增量与位移增量的关系为

$$\{\Delta f\} = [K_{n-1}]\{\Delta d\} \quad (3)$$

式中 $[K_{n-1}]$ 为在大变形条件下的刚度矩阵。引入摩擦元以后, 摩擦元刚度矩阵为

$$[K_{ef}] = \beta \cdot [B]^T [D] [B] \cdot V \quad (4)$$

式中 β 为摩擦因子; $[B]$ 为几何矩阵; $[D]$ 为本构矩阵; V 为摩擦元体积, 将其代入式 (3), 则

$$\{\Delta f\} = ([K_{n-1}] + [K_{ef}])\{\Delta d\} \quad (5)$$

其中单元刚度矩阵 $[K_{n-1}]$ 与 $[K_{ef}]$ 同阶。