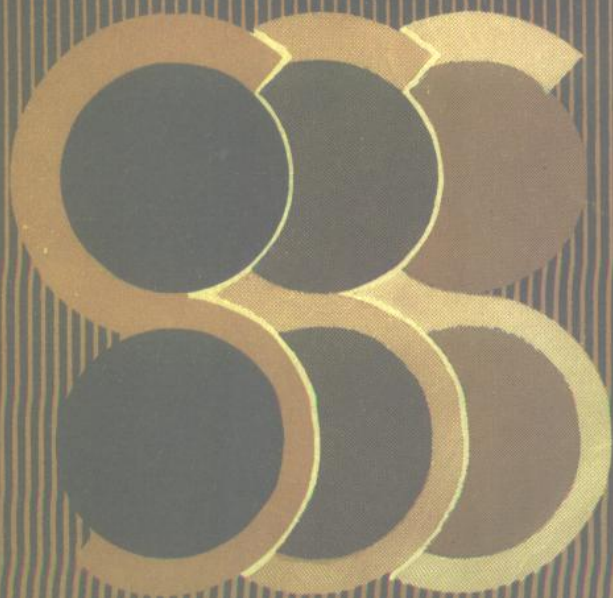


轧钢理论文集



中国金属学会轧钢学术委员会基础理论

轧钢理论文集

中国金属学会轧钢学术委员会基础理论组 编

冶金工业出版社

内 容 简 介

本文集由中国金属学会轧钢学术委员会基础理论组选编了轧钢理论发展与展望、轧制力、金属变形规律、摩擦机理、数学模型、控制轧制、钢管的旋压与连轧、异步轧制与不对称轧制等方面的论文45篇。其中前30篇由1979年8月召开的全国轧钢理论讨论会推荐,后15篇由1980年10月全国轧制数学模型会议推荐。这些论文总结了我国近几年在轧钢理论方面的主要科研成果,可供从事轧钢技术工作的同志参考。

轧 钢 理 论 文 集

中国金属学会

轧钢学术委员会基础理论组 编

冶金工业出版社出版

(北京市灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 15 3/4 字数 417 千字

1982年12月第一版 1982年12月第一次印刷

印数00,001~2,000册

统一书号: 15062·3880 定价1.95元

前 言

中国金属学会轧钢学术委员会基础理论组于1979年8月在西安召开了全国轧钢理论讨论会。会上宣读并交流了关于轧钢理论发展与展望、轧制力、摩擦机理、金属变形规律、数学模型、控制轧制、钢管的旋压与轧制、异步轧制与不对称轧制等方面的论文60余篇。大会评选出30篇论文，经基础理论组正副组长朱泉、张强、徐有容、贺毓辛组成的审阅小组审阅，由朱泉、赵志业校订定稿。轧钢学术委员会基础理论组又于1980年10月在昆明召开了全国轧制数学模型会议。会上又推选出论文15篇，经张强、潘德惠、严子平、吴隆华、贺毓辛、赵以相审稿，由贺毓辛、赵以相校订定稿。今将这两部分论文共45篇汇编成这本《轧钢理论文集》，供从事轧钢技术工作的同志参考。

我国的轧钢理论研究工作二十世纪五十年代才得到发展的。特别是近几年，在数学模型、轧制力计算和变形研究、控制轧制、轧制润滑和轧钢新工艺等方面取得了不少研究成果。但是，必须看到我国轧钢理论研究工作，如力能参数和变形计算方法的研究、金属塑性的研究、摩擦和润滑机理的研究等基础研究工作，还相当薄弱，不能适应生产发展的需要。今后要加强提高钢材性能质量、扩大钢材品种、充分利用富有资源、降低能源消耗、提高成材率和新工艺、新设备、新理论等方面的研究工作，力争做到科研走在生产前面。

今后我们将结合学术会议的召开，继续进行轧钢学术论文的选编工作。

中国金属学会轧钢学术委员会基础理论组

1980年12月

目 录

1. 轧钢理论研究发展情况和研究方向的探讨·····	1
2. 试谈轧制理论的发展·····	32
3. 论三维空间轧制变形场研究的发展·····	39
4. 影响数学模型精度的几个轧制理论问题·····	47
5. 冷轧压力公式及外区影响的研究·····	53
6. 关于平辊轧制压力的实用计算式·····	71
7. 冷轧板材接触弧长度的确定及轧制力计算·····	87
8. 考虑轧件弹性变形时冷轧薄板轧制压力的计算·····	97
9. 考虑轧件弹性变形时冷轧变形区长度的确定·····	105
10. 冷轧带钢轧制力的计算·····	113
11. 不等直径辊轧制板带材时轧入条件的研究·····	129
12. 三辊式不对称轧机的力参数计算理论·····	136
13. 考虑外区影响的冷轧压力模型·····	150
14. 冷连轧过程变形抗力和摩擦系数的非线性估算·····	163
15. 热连轧带钢卷取温度控制数学模型的分析·····	170
16. 用正交法建立卷取温度数学模型·····	177
17. 关于冷连轧加减速过程的张力补偿及其速度设定 曲线的探讨·····	190
18. 轧辊压扁弧长的研究·····	197
19. 2800精轧机数学模型的研究·····	203
20. 异步轧制实验研究·····	210
21. 全异步轧制的理论解析及实现·····	219
22. 楔横轧理论的初步探讨·····	227
23. 连续轧管的断续轧制状态和变形模型·····	236
24. 大直径超薄壁钢管强力旋压变形的探讨·····	249
25. 圆柱芯棒轧管时单位压力及摩擦力的实验研究·····	259

26. 关于特朗斯瓦尔(Transval)三辊轧管机孔型计算理论的研究.....	281
27. 低碳钢控制轧制时组织性能变化规律的研究.....	289
28. 金属和合金的变形阻力.....	299
29. 轧制时摩擦系数的研究.....	306
30. 轧制理论公式在冷轧润滑试验中的应用.....	317
31. 轧钢自动化数学模型研制中若干理论与方法问题的探讨.....	325
32. 矢量参数变化规律的内在联系及其对轧件硬度的影响.....	333
33. 形状参数对滑动速度、滑动与纵向秒体积流量比值的影响.....	344
34. 冷轧变形抗力模型.....	357
35. 冷轧时摩擦系数的研究.....	363
36. 前滑模型的实验研究.....	375
37. 最小可轧厚度数学模型.....	391
38. 最小可轧厚度新概念的确定及其计算方法.....	399
39. 冷连轧车间工艺设计数学模型.....	407
40. 冷连轧动态数学模型及模拟新方法的应用.....	421
41. 咬钢辊缝设定模型的探讨.....	432
42. 带钢冷连轧规程动态变换过渡设定值的计算及过程仿真.....	443
43. 冷连轧动态规格变换设定模型的探讨.....	458
44. 热连轧精轧机组机架间活套量的数学模型的建立.....	477
45. 板形控制技术的现状与发展.....	488

1. 轧钢理论研究发展情况 和研究方向的探讨

朱 泉 白光润 叶 茂 赵志业

周忠民 王占学 郑国禄

近三十年是生产技术和科学研究飞速发展的时期，作为钢铁材料主要生产环节之一的轧钢生产，在生产规模、生产技术和品种质量上都出现了崭新的面貌。

在带钢生产方面，总的发展趋势是连续化、自动化、高速度、大型化和高精度。目前带钢热连轧的轧制速度已达30米/秒以上，生产规模达到600万吨/年。热轧宽带钢的厚度最薄可达0.8毫米，最厚可达25.4毫米。厚度在5毫米以下的热轧带钢公差为 ± 25 微米。冷轧薄带钢的最高轧制速度已达41米/秒。厚度为0.15~3.5毫米的冷轧带钢公差可达 ± 4 微米。在自动化方面已实现了计算机多级控制系统。厚度自动控制、液压压下和液压弯辊、热轧润滑、层流冷却和控制轧制等新技术的应用渐趋普遍。

中厚板生产正向加大板宽、提高轧制精度、改善板形和生产过程自动化的方向发展。

钢管生产向着扩大管坯来源、研制新的穿孔和轧管工艺设备的方向发展。采用离心连铸机连铸圆管坯和压力铸造圆管坯以代替轧制圆管坯；采用压力穿孔法将初轧或连铸方坯穿成空心圆坯等成了重要的研究方向。连续轧管、张力减径、三辊式轧管、热挤压异形管等新技术新装备不断出现并渐趋完善。

型钢生产也在向连续化、高速度和自动化的方向发展，连续式或半连续式型钢轧机、H型钢轧机在发达国家已渐趋普遍。轻

型薄壁钢材和冷弯型钢继续发展。经济钢材、周期断面钢材、复合钢材和为机械制造业提供的精密坯料，如轴材、圆截面周期断面、齿轮、蜗杆、螺杆等特殊方法轧制的钢材也都有新的发展。

为了提高钢材性能，人们对控制轧制进行了大量的研究。控制轧制可以减少珠光体的产生，细化并强化铁素体晶粒，也可以获得低碳马氏体、索氏体等组织，从而显著地提高低碳钢、低合金钢的强度和韧性。

通过控制热轧、冷轧及热处理的工艺条件来控制有利夹杂（如 AlN ）的溶解和析出过程，可以获得高取向度的织构钢材，如日本研究成功的 Hi-B 电工钢板，以及具有饼形晶粒的深冲钢板等。

随着上述轧钢生产技术的重大发展，近年来轧钢理论研究也有很大进展。现代轧钢理论的研究工作具有以下特点：

- 1) 充分利用最新物理方法对轧制过程进行综合研究；
- 2) 广泛采用连续介质力学、计算数学和电子计算机的最新成就；
- 3) 从连续介质力学和金属物理学两方面对金属变形中的应力和变形状态进行综合分析。

采用电子计算机进行轧钢生产自动控制，要求建立精确的、结构简单的在线控制数学模型，促进了轧钢理论的发展。近年来，为了提高轧制过程的力能参数和金属变形的计算精度，为了适应型钢轧制及板形问题等三维问题的研究需要，发展了不少新的计算方法。过去惯用的工程法不断精确化，滑移线法得到更多的运用，根据最小功原理的变分法、上界法以及有限元法等都得到了运用。在研究工作中广泛地运用了连续介质力学的研究成果，运用了变分法、复变函数和数值计算法等数学方法。

电子计算机不仅是完成自动在线控制的必备工具，也是轧制理论研究的有力手段。数字计算机的应用为克服在轧制理论研究中运用连续介质力学的数学上的困难提供了条件。使用模拟计算机可以快速进行变形过程的应力应变分析，可以模拟轧钢过程的

动态工艺过程。实行“计算机轧钢”可以简化试验研究过程。

在钢与合金的塑性研究方面，近些年来由于尖端技术发展的需要，曾集中相当大的力量对低塑性合金钢与合金的热加工性能、各种主要工艺因素对金属热加工性能的影响以及提高金属塑性的措施进行了研究，并取得了很大进展。

由于建立自动控制数学模型和计算轧钢过程力能参数的需要，各国对系统地测定金属的流变性能和积累这方面的研究资料都给予很大的注意。

近年来出现了专用的模拟试验研究装置，如法国钢铁研究院的扭转模拟试验机和西德马科斯普朗克钢铁研究院研制的由程序控制计算机控制的能够完全模拟加热、变形和冷却过程的高速试验装置。这就为研究钢与合金的变形性能和变形加工过程对组织性能的影响提供了有力的手段。

摩擦和润滑是轧钢过程极为重要的研究方面，是为变形和力能研究提供边界条件的基础研究工作。但过去这方面的工作进行得较少，近来在轧钢工艺润滑剂和润滑方法方面作了很多研究。在热轧润滑油和喷射装置的研究上已取得很大进展，在热轧钢板和型钢试验中都取得了降低轧机负荷、减少轧辊磨损和减薄可轧厚度的良好效果。

还应指出，国外在研究轧钢生产实现自动化过程中，针对出现的轧钢理论和实践问题，大都组织了许多部门共同参加的大规模的研究协作，其中包括专业研究机构、高等院校、设计部门和生产单位，如日本和苏联都是这样作的。这是轧钢理论研究工作的新趋向。

下面从几个主要方面谈谈轧钢理论研究的发展情况及对今后研究方向的一些看法。

一、轧制力能参数计算及测试方法的研究

当代轧钢生产向连续化、自动化和高速度的发展和高效率电子计算工具的采用，促进了轧制理论的研究。下面对一些求解方

法的现状加以概述。

1. 惯用的工程法

现有平均单位轧制压力 ($\bar{p}$) 的理论计算公式都是以 T. 卡曼 (Karman) (1925年) 或 E. 奥罗万 (Orowan) (1943年) 方程为基础导出的。这种工程方法日趋精确化, 主要在以下方面有所改进:

1) 在解力平衡微分方程时采用了更精确的摩擦条件, 如摩擦系数沿接触弧是变化的, 对高速的带润滑的冷轧考虑了液体摩擦规律等;

2) 把变形抗力 σ 作为变形区瞬时尺寸的函数代入方程中联立求解;

3) 研究高速轧制时把惯性力加入力平衡方程式中求解;

4) 考虑张力、轧辊弹性压扁和轧件的弹性恢复;

5) 为解决板、带钢轧制的板形问题, 最近有用工程法求解考虑金属横向流动的三维问题。

应指出, 工程法没有考虑外区对 $\bar{p}$ 的影响, 可是外区是厚件轧制时影响 $\bar{p}$ 的主要因素。所以以卡曼或奥罗万方程式为基础的工程法只适于轧制薄件的情况。

2. 滑移线法

滑移线理论是本世纪二十年代提出的, 五十年代中期才开始被应用到轧制问题上, 目前有了新的发展。

1957年 J.M. 亚历山大 (Alexander) 假定单位摩擦力 $t = k$, 作出轧薄件时的滑移线场和速端图, 按数值计算求出变形区内的应力分布。六十年代中期 M.Я. 勃罗甫曼 (Бровман) 假定接触弦上的单位摩擦力 t 为某一常数, 可作出满足应力和速度近似边界条件的轧制厚件 ($\frac{l}{h} < 1$) 和中厚件 ($\frac{l}{h} = 2 \sim 3$, l 、 h 分别为变形区长度、轧件平均厚度) 的滑移线场, 并按数值计算出变形区各点的应力。七十年代初 В.Ф. 波达朴金 (Потапкин) 等假定接触面存在滑动区和粘着区, 用联解应力和速度的方法作出满

足应力和速度边界条件的滑移线场。和勃罗甫曼作的滑移线场相比，这种滑移线场的重要特点是 $\frac{l}{h} < 1$ 时塑性区不一定集中在轧件水平对称轴的一点上。按此滑移线场求出了应力分布和 $\frac{\bar{p}}{2k}$ 的数值解，并写出了 $\frac{\bar{p}}{2k}$ 与 $\frac{l}{h}$ 的关系方程。后来又按此滑移线场进而求出轧制力矩。按同样方法还作出了热轧薄件 $\left(\frac{l}{h} > 2.5\right)$ 的滑移线场。作此滑移线场时， t 的分布规律是按实测资料。和勃罗甫曼等作的滑移线场相比，按该滑移线场能算出在变形区入口的中心层出现拉应力。

此外，还有人以实测接触应力为边界条件作滑移线场，用数值解来确定变形区各点的应力，从而找到存在拉应力的危险区，以便找出避免由此拉应力而使轧件拉裂的有效措施。

应指出，滑移线法的重要成就是能求出平面变形状态下变形区各点的应力分布，以及假定在没有接触摩擦条件下轧厚件和中厚件时，求出外端作用引起的平均单位压力增值。但滑移线法尚不能解三维问题。目前已开始研究解决对硬化和速度敏感的材料及各向异性材料的滑移线场问题。

3. 变分法

五十年代中期，И.Я.塔尔诺夫斯基（Тарновский）等人开始应用变分法解轧制问题。近几年来В.К.斯米尔诺夫（Смирнов）等人进一步应用这种方法求解平辊轧制矩形件和孔型轧制的力能参数和变形参数等三维问题。为了简化计算，一般单位摩擦力 t 沿接触面取平均值，即 $t = \psi k$ （ ψ ——摩擦指数，靠实验确定）。求解时，先设定含有待定系数的描绘变形区几何模型和金属流动速度的参数方程，用电子计算机对这些方程进行数值解。通过一次计算便可同时得到延伸系数、宽展系数、前滑系数、轧制力和力矩。然后把得到的数值回归成反映主要影响因素的近

似方程。这种求解方法的精度主要取决于设定变形区几何模型和金属流动速度的参数方程以及所取平均摩擦力或 ψ 值的精度。

4. 上界法

上界定理证明：对刚-塑性材料设定的速度场只满足运动许可条件（包括位移或速度的边界条件和体积不变条件）和塑性条件，未必满足静力许可条件（包括力平衡条件和应力边界条件），所确定的功率与实际功率相比给出上界值。由此上界功率求出的变形力为变形力的上界，这种解法简称为上界法。

上界法在七十年代才开始被用于解轧制问题。如五弓等假定轧制时接触面全粘着，或者同时存在滑动和粘着，用电子计算机求出数值解，并作出 $\frac{\bar{p}}{2k}$ 与 $\frac{l}{h}$ 和摩擦系数 μ 的关系曲线。由此曲线明显可见， $\frac{\bar{p}}{2k}$ 有最小值，并且随着 f 的减小，此最小值向 $\frac{l}{h}$ 增大的方向移动，冷轧时与 $\frac{\bar{p}}{2k}$ 最小值对应的 $\frac{l}{h} \approx 3$ ，这与最近的实验结果相符。

上界法不限于解平面问题，也可解三维问题。这种方法的精确度取决于设定满足运动许可的速度场和所取接触摩擦规律的正确性。

5. 有限元法

所谓有限元法，形象地说就是以化整（“整”是指变形体）为零（“零”是指单元）和由零及整的方式来解析变形体的一种数值算法。这种方法是在六十年代随着电子计算机的高速化和大型化而发展起来的。目前主要有以下两种方法：

1) 有限元弹-塑性解析法，这是把变形体看成弹-塑性的连续体的一种解析方法。前几年玉野和柳本曾用这种方法对小压下量的板带平整问题进行过解析，并得到了许多有价值的结果，如轧件在进轧辊入口前就产生了变形，其纵向应力为拉应力等。

2) 有限元刚-塑性解析法，这是把大塑性变形加工过程中的

工件看作刚-塑性连续体的一种解析方法。用它可以求出变形力的最小上界值。

有限元法在求解轧制问题中的应用,目前刚刚开始,有许多问题需要解决,如大塑性变形的非线性问题,速度场和包括摩擦力在内的边界条件设定问题等。

通过分析轧制力能参数计算方法的研究现状,我们提出以下几点看法:

1) 为了发展现代化轧钢生产和满足采用高效率电子计算机的需要,应不断提高轧制力能参数的计算精度。这就必须对上述各种求解方法的实质和运用范围有正确理解,并找出提高各种求解方法精度的条件。

2) 除了有限元弹-塑性解析法外,目前其它求解方法一般均把轧件看作刚-塑性体。前者适于弹性变形不能忽略的小变形情况;后者适于可以忽略弹性变形的大塑性变形情况。

用满足静力许可条件和塑性条件的工程法求得的解应为下界解;用满足运动许可条件的速度场求得的解应为上界解;用同时满足静力许可条件和运动许可条件的滑移线法和变分法求得的解应为精确解。但由于这些解法中满足的不是真正的静力和运动许可条件(如所取的摩擦条件和所建立的速度场不真),有时按下界法也可能得到过高的结果,按上界法也可能得到过低的结果,精确解法也可能得到极不精确的结果。如有限元法,虽然方法先进,但由于包括摩擦等边界条件难以正确确定,也得不到精确的结果。有的方法虽然并不理想,在偶合情况下也可能得到与实际相符的结果。由上可见,只有正确确定包括摩擦条件在内的静力许可条件和运动许可条件,才能显出各种求解方法的本来面目,否则难以对各种求解方法的精度作出恰当的评价。在没有正确确定这些条件之前,只能从实验和理论上粗略指出各种求解方法的大致适用范围。

3) 工程法适于轧制薄件。随着轧制速度的提高应考虑惯性力,冷轧时随轧制速度的提高和润滑质量的改进,应考虑液体摩

擦条件, 并应把变形抗力 σ_s 作为变量代入联解的方程式中求解。在高速热轧和带润滑的热轧与温轧时, 应采用包括滑动和粘着的混合摩擦条件, 但目前这方面还有许多问题没有弄清楚。对冷轧极薄件 ($l/\bar{h}$ 特大的情况), 目前研究得还很不充分。为解决板形问题, 应进一步研究轧件质点横向流动的三维问题。

4) 滑移线法的关键在于构成满足应力和速度边界条件的滑移线场, 后者多靠直观和经验, 其解没有唯一性, 并限于解平面变形问题。在轧制中厚件和薄件时, 由于接触摩擦规律未弄清, 用滑移线法求解看不出明显的优越性, 但滑移线法用于求解轧制厚件问题是有效的, 因为业已证明轧制厚件时摩擦条件对力能参数影响不大。以实测接触应力为边界条件作出滑移线场, 求变形体内的应力分布, 对研究变形过程机理和找出存在拉应力的危险部位, 进而找出改善产品质量的措施, 是一项有意义的工作。

5) 变分法和上界法 (包括有限元刚-塑性上界法) 既适于解平面问题, 也适于解型钢轧制等三维问题。关键在于设定变形区几何模型和金属流动速度场, 以及正确确定接触摩擦条件和平均单位摩擦力。最近在上界法的基础上又提出一种上界法的基元技术 (也叫积木法)。这种方法是把事先完全掌握其应力和应变特性的数种标准模式小块编成子程序贮存在计算机内。当对其它变形过程求解时, 就把这些标准小块布满该变形工件的实体。因为后者具有一定的形状, 那些小块便按一定关系组合。将这些关系输入电子计算机, 通过计算便可求出每一小块的局部力学特性, 进而计算出整个工件的变形力。这种方法目前在锻造上已经应用, 估计这种方法将来有可能用于解型钢轧制等三维问题。

6) 有限元弹-塑性解析法, 适于解小压下轧制问题, 如带钢的平整等。由于这种方法有些问题 (如非线性问题, 摩擦等边界条件难以精确确定等) 尚未解决, 以及比其他方法计算量大, 所以目前在研究轧制问题上进展较慢。

7) 由上可见, 各种求解方法都要求精确确定接触摩擦规律, 因此接触摩擦是今后轧制理论研究的重要课题。应寻求更精

确的测定方法和仪器来测定各种轧制条件(尤其是高速轧制条件)下单位摩擦力沿接触弧的分布、平均单位摩擦力以及摩擦系数 μ 或摩擦指数 ψ 等。为此建立高速试验轧机是十分必要的。

8) 为了正确建立金属流动速度场和变形区几何模型的参数方程, 必须进一步研究金属在变形区内的流动规律。除了提高惯用的坐标网格法的精度外, 还应寻求更精确的研究金属流动的新方法。

9) 应采用精确测定金属变形抗力(σ_s)的新方法和新设备, 尤其是高温和高变形速度下的 σ_s 。目前, 在国内这方面的工作尚未引起足够的重视, 国产钢号在各种变形温度、变形速度和变形程度下的变形抗力数据甚为缺乏。实际上, 虽然使用较精确的求解方法, 但由于 σ_s 的数据不准确, 也会导致很大的误差。国外, 最新的试验机是采用液压伺服技术的高速形变机。它可在广泛的速度范围内实现无级调速, 既可按等变形速度工作、也可按可变变形速度制度工作, 全部用电子计算机控制, 通用性强, 模拟对象广。我国应尽早装备这种试验机, 以便在广泛的轧制变形条件下试验确定国产钢号的 σ_s 。(在轧板时最好直接测量平面变形抗力 K , 再根据 $K=1.15\sigma_s$ 求出 σ_s), 并回归成实用的数学模型。

10) 为了精确地求出总轧制力, 必须精确确定轧制时轧辊与轧件接触面积的水平投影。其中包括计算轧板时轧辊弹性压扁和轧件弹性恢复的精确公式以及包括型钢和钢管轧制时接触面积的精确计算公式, 并应从复杂的数值解回归出适于一定条件下的简化公式。

11) 考虑各种新轧制变形过程的特点, 应选用适宜的方法求解, 以便弄清这些变形过程的机理以及稳定和提高产品质量。为了简化, 可把复杂的变形过程有根据地化为简单的变形过程(如平面变形和轴对称变形)。先按近似的工程法(在近似的边界条件下, 联解近似的力平衡微分方程和塑性条件)求解, 因为用这种方法得到的公式能反映主要因素对变形过程的影响, 能使我们初步认识变形过程的机理。而后, 再进一步精确化。

12) 采用较精确的分析方法进行较麻烦的数值计算, 可以进一步弄清变形过程的机理, 从而可以确定应当取舍的因素, 然后对所研究的过程做出有根据的简化。在此简化条件下再来推导工程上实用的数学模型, 这种模型在生产实践上稍加修正便可应用。这种做法比一般用纯数学统计而不考虑变形过程机理所得到的统计模型普遍性会大些。

13) 应用上述各种方法精确求解时, 必须联解许多方程组(其中包括用一般方法难以求解的微分方程) 这就需要采用电子计算机进行数值解, 只有离线计算这才是可行的。可是用于在线控制和一般工程计算, 则要求简化的数学式, 这就需把得到的数值回归成反映主要影响因素的在一定条件下适用的简化式。因此, 要求研究轧制理论的科技人员, 既要会使用电子计算机, 又必须掌握多元回归分析。

在轧制力能参数的测试技术方面, 近来测试的可靠性、稳定性和精度都有很大提高。测试方法按传感器的结构可分为电阻式、电容式、压电式和压磁式等多种, 但目前普遍使用的仍是电阻式。在电阻式测试方法中应变片是核心。而应变片在制作和性能上都有很大发展。新的品种有 1×1 毫米微型箔式电阻应变片、高灵敏系数的弓形应变片、使用温度达 700°C 的高温应变片和半导体应变片以及陶瓷胶焊接式应变片等。

作为测试电路中的放大器使用的应变仪也有很大进步, 国内生产的Y6D-3A型、Y8DB-5型应变仪等可以代表国内70年代水平。值得指出的是遥测应变仪的出现, 它的优点是可以用于各种恶劣环境, 特别是用于不便集流的测试点和测试人员不易接近的部位。1970年以来, 我国华东电子仪器厂制作的Y1Y-11型遥测应变仪, 重庆大学机械系研制的YYB1-1型遥测应变仪和最近华东电子仪器厂研制成功的Y6Y-12型遥测应变仪是无线电遥测静态电阻应变仪。这种应变仪特别适用于旋转及往复运动构件的应变测量。

二、纵轧变形的研究

为了不断扩大钢材品种，提高其质量和精度，降低金属、轧辊和电能消耗及生产成本；特别是为了适应轧钢生产的连续化、高速化和自动化，对于轧制时金属变形的计算和控制精度的要求日益提高。现代科学技术的发展和电子计算机的使用，为这方面的研究提供了有利条件，这就使近二十年来的纵轧变形研究有了更大的进展。今就纵轧变形的研究概况分述如下。

1. 矩形件的轧制

从1958年И.Я.塔尔诺夫斯基提出解决金属压力加工中的金属流动问题需应用连续介质力学和变分法之后，根据各种压力加工过程都服从于总变形功（或能量或功率）最小的规律和变分原理，导出了计算轧件展宽的公式，其形式为：

$$\frac{\Delta b}{\Delta h} = \psi \left(\frac{B_0}{l}, \frac{h_p}{l}, \mu \right)$$

式中 B_0 ——轧前轧件宽度；

l ——变形区长度；

h_p ——轧前与轧后轧件的平均高度；

μ ——摩擦系数。

В.К.斯米尔诺夫就是在此基础上，根据平面变形得出了在光辊上轧制矩形件时计算延伸系数的公式，其形式为：

$$\lambda = \varphi \left(\frac{H_0}{H_1}, \frac{D}{H}, \psi \right)$$

式中 H_0 、 H_1 ——分别为轧制前、后的轧件高度；

D ——轧辊直径；

ψ ——摩擦指数。

长期以来，大家只认识到金属的化学成分是通过所生成的氧化铁皮成分和性质影响外摩擦系数的，从而影响轧件的变形。В.С.别尔诺夫斯基（Берновский）等的研究说明除了上述影响之外，轧制时轧件中相的成分对金属变形也有较大影响。