

2011年鞍山市自然科学 学术成果优秀论文集

李 平 主编



辽宁科学技术出版社
LIAONING SCIENCE AND TECHNOLOGY PUBLISHING HOUSE

2011年鞍山市自然科学 学术成果优秀论文集

ISBN 978-7-5381-7267-6



9 787538 172676 >

定价：80.00元

2011年鞍山市自然科学 学术成果优秀论文集

李 平 主编

辽宁科学技术出版社

沈 阳

主 编：李 平

副主编：王尔莉 程 斌 杨 建 刘 军 刘东风
王 宁

编 委：(以姓名首字笔画为序)

成之光 任瑞平 连 琦 肖爱民 宋 华
张素艳 官元春 俞美蓉 唐 洁 黄 强
章 杨 惠忠波

© 2011 版权归鞍山市科学技术协会所有, 授权辽宁科学技术出版社使用

图书在版编目(CIP)数据

2011年鞍山市自然科学学术成果优秀论文集 / 李平主编. —沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2011.12

ISBN 978-7-5381-7267-6

I. ①2… II. ①李… III. ①自然科学—文集 IV. ①N53

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第256520号

出版发行: 辽宁科学技术出版社

(地址: 沈阳市和平区十一纬路29号 邮编: 110003)

印 刷 者: 沈阳新华印刷厂

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 12

字 数: 270千字

印 数: 1~1000

出版时间: 2011年12月第1版

印刷时间: 2011年12月第1次印刷

责任编辑: 李伟民

特邀编辑: 王奉安

封面设计: 嵘 嵘

责任校对: 辛 晶

书 号: ISBN 978-7-5381-7267-6

定 价: 80.00元

前 言

当今世界，科技已成为支撑和引领经济发展和社会进步的重要因素。科技发展从来没有像今天这样深刻地影响着社会生产和生活的方方面面，从来没有像今天这样深刻地影响着人们的思想观念和生活方式，从来没有像今天这样深刻地影响着国家和民族的前途命运。

为了促进鞍山市各学科发展和人才成长，促进鞍山市科技与经济结合，组织引领全市广大科技工作者积极投身于推进鞍山经济建设，充分发挥学术成果的科技性、社会性和广泛性，激励全市科技工作者为建设创新型鞍山作出积极贡献，鞍山市科协、市委组织部、市人力资源和社会保障局开展了2011年鞍山市自然科学学术成果奖评审工作。为了更好地展示鞍山市科技人员的科技成果，为鞍山市科技工作者提供学术交流的平台，现将评选出的优秀论文出版成集。

本论文集的编辑出版如有不尽如人意之处，诚望论文作者和广大读者予以谅解。

编 者

2011年11月

目 录

有限元/位错密度相结合的方法求解空化水喷丸工艺产生的残余应力	韩冰	001
农民体育健身工程实施效果的研究	刘志敏 丁振峰	010
超高强度海洋平台用钢板的研制与开发	王华 李静 韩鹏 赵素华	015
钢铁企业焦化厂节能照明设计技术的研究	崔远海	020
取向硅钢高温退火样品晶粒尺寸、取向及磁性能关系的研究	付勇军 蒋奇武 金文旭 杨平	025
无取向硅钢中高牌号产品瓦楞缺陷的控制技术	高振宇 张智义 李亚东 李文权	031
某磁铁矿选矿厂旋流器结构参数优化试验研究	高志喆 于凤 姚茂斌 张文竹	036
高炉喷吹炉顶煤气技术的进展	胡俊鸽 车玉满 周文涛	042
经济型X70管线钢热轧厚卷板的研制	黄国建 张英慧 黄明浩 马小军 关菊	047
互惠分组教学模式在高校体育专业教学中的应用研究	李迎春	052
冶金露天矿山转坑内开采的挂帮矿体回收	梁庆壮	057
关于新股发行制度改革思考	林煜	061
岩石锚杆基础在冶金厂房设计中的应用	刘洪滨	064
浅谈我国工程机械产品外饰设计	梅云	068
2150ASP热轧带钢板形控制技术的研究.....	史乃安 王晓森 孟钢 何安瑞	071
HFW焊管生产中板卷对接焊缝跟踪系统的开发	孙吉	075
轴对称CCP放电腔室的数值模拟	王虹宇	080

基于 IEC61850 的数字化电能计量系统检验装置原理及应用分析

.....王世辉 胡绍刚 董晓刚 林丽君 083

电子信息工程在医院护理管理体系中的应用性研究

.....魏丽群 徐继红 艾心勇 赵玉 090

双组分竞争吸附等温线的模型修正

吴秀红 林炳昌 096

某选厂生产工艺流程技术问题诊断与优化措施研究

.....杨晓峰 宋均利 张丛香 103

负压加载同种异体骨复合自体骨髓移植的实验研究

.....张贵阳 于镜贺 英强 109

取向硅钢二次晶粒分布的一种表征方法

张静 金文旭 蒋奇武 114

鞍钢 1700ASP 中薄板坯连铸供冷轧用低碳钢中氮化物的研究

.....张文 谷春阳 阎东宇 刘威 118

取向硅钢冷变形织构的模拟研究

张海利 金文旭 蒋奇武 122

模拟移动床纯化卡波前列腺素甲酯

周卫红 兰绍鹏 王际达 林炳昌 127

管线钢冶炼过程夹杂物行为研究

常桂华 栗红 陈本文 赵刚 134

直流辉光光谱法快速测定合金钢中 16 种元素含量

.....邓军华 于媛君 戚淑芳 梁慧智 曹新全 李化 134

带电处理 220 kV 垂直开启式隔离开关接点发热的研究

.....丁涛 何忠伟 姜兴业 陈昱达 135

调整粗轧板坯头部弯曲变形的简便控制方法

.....高颖男 王文杰 王海峰 杨明凯 135

电除尘整流装置总进线断路器的容量选择

关恒祝 刘正魁 136

桉木醇的制备

胡君一 徐英黔 徐国波 王康 肖国勇 136

矿用三牙轮钻头改进的研究

纪文胜 137

马兰种子及其种皮中挥发组分的 GC-MS 分析

.....姜显光 侯冬岩 回瑞华 李铁纯 刁全平 曾成 137

基于精确重心法的家电下乡物流配送中心选址研究

金玉然 138

X80 管线钢连续冷却相变研究

孔祥磊 黄国建 黄明浩 徐峰 138

基于最大熵理论建立了均值-熵投资组合优化模型

.....李华 徐军委 孙秋柏 139

内燃机车电气系统的升级改造	李国刚	139
水淬工艺对TWIP钢组织和力学性能的影响	李激光 丁亚杰 彭兴东 刘津伟	140
高效镁质添加剂用于铁矿球团的试验研究	李艳茹 李金莲 任伟	140
米拔赫激光焊机的应用研究	李志强	141
基于3层交换和工业环网技术组建大型工厂主干网络的设计	梁琮 杨嘉琛	141
澳大利亚卡拉拉精矿造球性能的研究	刘杰 周明顺 翟立委 任伟 李金莲	142
1 450 mm冷连轧过程控制系统组成与功能分析	刘金刚 王文天 李志锋 王军生 俞小峰	142
微波消解-ICP-AES法测定荞麦、燕麦、大麦中多种微量元素	吕琳琳	143
TLF12000激光焊机在冷轧联合机组的应用	吕茂林 张国强	143
组织支持感知、工作满意度与任务绩效和组织公民行为的关联性实证研究	苗仁涛	144
升温速度对电工钢组织和性能的影响	庞树芳 金文旭 毛卫民 蒋奇武	144
X射线荧光光谱法测定耐指纹板有机涂层中二氧化硅	曲月华 王一凌 邓军华 亢德华 张鹏 王翠艳	145
基于氧化物冶金技术的钛/铝脱氧技术应用研究	尚德礼 李德刚 吕春风 康磊 邓伟	145
计算机网络系统在医院管理中的应用	田丹	145
粮食仓储现代网络综合管理系统的设计	田湛君 金德新	146
产品设计中的人性化问题	王玲	146
中碳Ni-Cr-Mo钢中绝热剪切带的形成及特征	王勇 董恩龙 张起生 苏春霞	147
基于图像纹理特征和多级SVM的浮选过程状态识别方法	王介生 高宪文 张勇	147
冷轧辊无损检测技术在鞍钢冷轧厂的应用	王金星 代秋平 夏英丽	148
某极贫磁铁矿石选矿工艺研究	王陆新	148
鞍钢鲅鱼圈7 m焦炉焦炭质量评述	王明国 赵恒波 郑晓雷 衣鹏	149

影响鞍钢转炉渣安定性的矿物相研究

.....王向锋 张新义 于淑娟 侯洪宇 杨大正 王再义 149

X射线荧光光谱分析法熔融制样技术的探讨与应用

.....王一凌 曲月华 邓军华 150

鞍钢大型高炉炉缸冷却水需求量的计算分析王志君 王宝海 车玉满 150

国外高等教育经费来源及启示吴彩英 曾诗雨 151

平床过滤功能分析及程序设计 ...吴晓宁 王文天 王军生 翟博 金占河 151

论企业自主创新过程中的政府行为转变问题吴芷静 152

不同机械通气方式对冠状动脉旁路移植术后机体炎症介质浓度的影响

.....闫恒宇 王伟 耿树刚 张殿红 152

立方系大晶粒薄板材料面织构的定量分析游清雷 金文旭 蒋奇武 153

鞍钢炉料冶金性能动态热模拟试验研究153

.....于淑娟 刘万山 王向锋 于素荣 侯洪宇 张立国 153

变电所接地装置特性参数评估的必要性张妍 154

鞍山某铁矿3种不同类型矿石选矿试验研究张丛香 杨晓峰 154

2-(2-羟基苯基)苯并咪唑磷钼酸盐的合成及晶体结构张咏梅 155

轴对称圆柱的边界条件赵宝生 高阳 赵颖涛 周新祥 155

烧结合理配料及工艺优化周明顺 翟立委 刘杰 袁慧 156

自动控制技术在高炉煤气净化系统中的应用鲍威 156

鞍钢TRIP钢的研制开发蔡恒君 王衍平 王越 高毅 刘军友 156

休闲农业在中国的发展研究陈尔东 宋香谒 回春光 157

连续退火工艺对低碳钢屈服强度的影响丁燕勇 周成 张维艳 157

有2个下料口的圆形称重储矿槽结构内力分析

.....董景兰 潘永来 张富林 史经蒙 157

冷轧重卷机组剖分功能的实现高健 侯广宇 祁长富 158

小叶金鱼藤组织培养耿明清 158

一种新的模糊聚类算法及其应用耿新青 陶凤梅 159

550级超高强度海洋平台用钢的开发韩鹏 王华 尚成嘉 丛津功 159

电缆机械敷设问题的实际应用与分析何迅 绳有余 张继宁 朱庆军 159

鞍钢板坯连铸机电磁搅拌应用实践研究金百刚 160

肺性脑病51例早期诊断及临床观察	金东益	160
5 500 m ³ 高炉顶燃式热风炉砌筑施工工艺	金海波 吴志敏 田华中 蒋鑫	161
自适应时频峰值滤波算法处理实际地震信号	李莹 刘晓枫	161
管线钢精炼深脱硫技术研究	廖相巍 万雪峰 李德刚 王丽娟 曹东 赵刚 贾吉祥	161
鞍钢汽车用先进高强钢冷轧生产技术	刘军友 高毅 王越 蔡恒君	162
Frankel 和 Forsus 功能矫治器治疗骨性Ⅱ类错殆的临床对比研究	刘启明	162
白内障超声乳化联合玻璃体切割手术治疗增殖性玻璃体视网膜病变	刘艳秋	163
1 500 mm平整机组的自主集成与实践	柳军 廉法勇 王衍平	163
不同脱氧工艺对微合金钢组织和力学性能的影响	吕春风 尚德礼 于广文 康磊	164
针对性护理干预对预防对比剂肾病的探讨	栾莉	164
转炉煤气回收工艺技术研究	马勇 马成 耿继双 徐延浩	165
浅谈动物防疫与动物源性食品安全	庞立昕	165
电力机车电动机轴断裂原因的分析	全婉秋	166
硬性输尿管镜在保胆手术中的应用	邵杨 于海斌 李广辉	166
矿用汽车发动机冷却液发展趋势及其使用的技术要求	宋立	166
短暂脑缺血发作与磁共振关系的研究	宋或琳 董玉红	167
管线钢管屈服强度的稳定性试验	苏洪英 黄国建 徐烽 吕丹 杨承波	167
热处理对低碳硅-铌双相钢组织与性能的影响	隋晓红 李平 赵宝纯 高玉明 谢广群 杨静	168
论人民币升值对我国经济的影响	王楠楠	168
正交实验法优化胡萝卜素的提取工艺	翁霞 苏宇 田蕴婷	168
双面立式吊具在冷轧罩式退火炉的应用	许新	169
汽车用轻质TWIP钢的组织演变	严玲 刘仁东 严平沅 周敬 王锐	169
在尘肺病诊断中应用的比较	杨荷戟 刘瑞莹 刘育灵 孙萍	170
连退机组炉区高温计寿命提高	杨继辉	170
脑卒中吞咽障碍患者吞咽功能的康复护理	杨静月	171

高钛低碳钢中Nb, Ti的析出行为	杨颖 侯华兴 史乃安 李向科	171
性激素结合球蛋白在妊娠期糖尿病早期筛查及早期干预效果的研究	邵巧兵 喻红岩	172
企业实施环境经营的策略	张本越 王丹	172
南果梨果实各部位脂肪酸组成GC-MS分析.....	张博 冯帆 辛广 李铁纯	173
CD44v6在骨肉瘤、骨巨细胞瘤及骨软骨瘤中的表达	张贵阳 于镜贺 英强	173
浅析建立医院药品管理特色档案	张文彦	174
渔业管理中的单种群模型	张玉娟 陈兰荪	174
加工工艺对含2.0%Si冷轧无取向硅钢再结晶组织的影响	张智义 毛卫民 高振宇 陈春梅 李亚东	175
并联型APF补偿典型电流型谐波源负载的仿真研究 ...	郑冰 王峰 朱连成	175
急性低灌注各种危险因素与脑血管病临床分析	周丹 富艳辉	176

有限元/位错密度相结合的方法 求解空化水喷丸工艺产生的残余应力

韩冰

(辽宁科技大学, 辽宁鞍山 114051)

摘 要: 结合有限元方法和位错密度法 (FEM/DDM), 提出了空化水喷丸在材料表面引起的宏观和微观的残余应力的预测方法。通过双线性弹塑性有限元方法来进行预测宏观的残余应力。采用有限元方法/位错密度法的数值模拟结果与实验测量的数据基本吻合。

关键词: 空化水喷丸; 有限单元法; 位错密度法; 残余应力

1 引言

空化水喷丸技术是一种新型表面强化处理技术, 将残余压应力引入到材料的表层及次表层来提高各成分的疲劳强度寿命^[1-3]。过去大部分研究都集中在实验评价方面, 包括残余应力场测定、表面形态和疲劳性能评价等方面。到目前为止, 关于产生残余压应力的机理几乎尚未报道。有限元单元法最初应用在喷丸过程中是1999年, Meguid等对一颗子弹来预测表面的残余压应力的弹塑性分析的动态喷丸过程进行了分析。Hu, Ding 和 Ye 等也用有限元分析法代替一个复杂的实验过程来预测激光冲击强化产生的残余应力的分布。

随后, 有学者对水射流喷丸进行了相似的研究, 2004年, Kunaporn 等第1个提出有限元方法, 利用商业有限元软件研究力学行为并预测水喷丸处理后材料的残余应力^[4], 通过有限元模拟预测的残余应力与在材料近表面区的实验结果基本一致。部分学者在高压水射流处理在材料近表面产生的残余应力方面已经做了很多研究。Rajesh 等应用瞬态有限元分析预测用高压水滴处理后材料产生的残余应力, 结合Reichardt 的理论和液体撞击理论, 应用冲击压力模拟液滴的自然撞击。随后, 提出了多液滴碰撞模型, 预测水射流喷丸后材料产生的残余应力, 这种方法考虑了高速液滴撞击在材料表面产生的冲击压力的分布, 代替静态压力分布, 使用瞬态弹塑性有限元模型分析预测水射流喷丸后表面的残余应力。在这种瞬态弹塑性有限元分析的方法中, 认为水喷丸作用在表面上的压力大小是由于高速液滴冲击作用, 不是静止的压力作用在材料表面。另外, Daniewicz 和 Cummings 建立了稳态水射流撞击在对称弹塑性区域的有限元模型, 并且采用FEM模拟WJP工艺特性。

一般来说, 残余应力包括宏观的残余应力和微观的残余应力2种。1999年, Han 和 Ju 提出一种方法, 预测空化水喷丸处理的材料近表层产生的残余应力。该方法成功预测了纯钛材料残余应力区的量级和深度。结果显示, 测量深度在0~50 μm 范围

内的残余应力值, 高于预测的结果。在该模型中, 并没有考虑高密度位错这样的微观变形造成的微观残余应力部分, 这导致预测结果与实验结果之间的差异。微塑性变形, 如高密度位错等通常会产生残余压应力。

本研究中, 同时考虑了宏观与微观残余应力, 采用了更精确的FEM/DDM模型计算位错密度对残余应力的影响(图1)如图1(a)显示一个典型的弹塑性材料的应力—应变曲线。当产生宏观塑性变形时, 产生了宏观残余应力。图1(b)给出一示意图, 说明残余应力的产生以位错和位错积累为基础。当应用冲击波时, 位错密度逐渐增加, 并且成大量堆积的状态。因为密排六方晶滑移系较少, 容易在位错聚集的位置产生形变双晶体, 这些微观塑性变形产生微观残余应力。综上所述, 本研究中结合有限元方法位和位错密度法(FEM/DDM), 建立新模型来预测WCP在纯钛材料近表层产生的残余应力区的大小和深度。

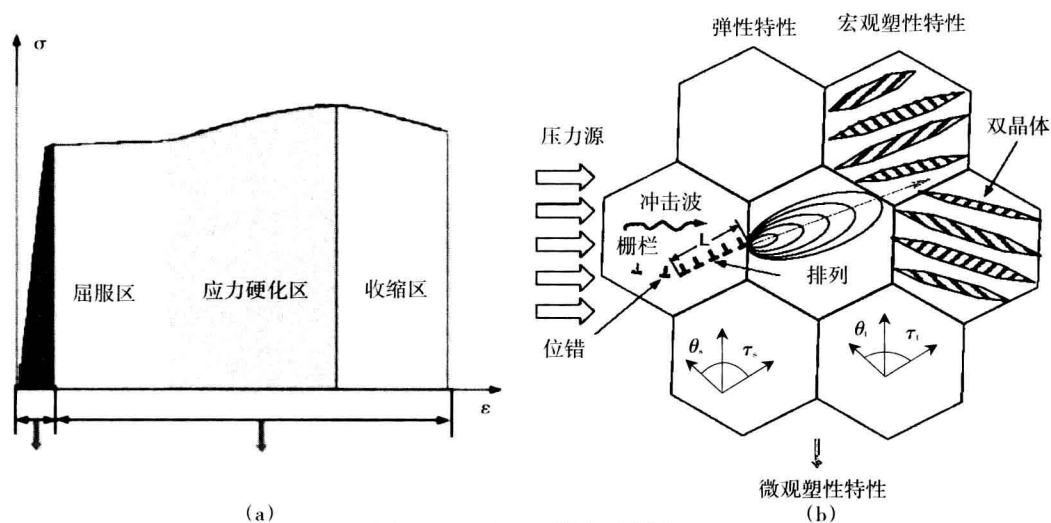


图1 FEM/DDM模型示意图

2 数学模型

2.1 有限元模型

在单轴应变条件下, 在冲击波传递的过程中, 最高的弹性应力定义为 Hugoniot 弹性极限 (HEL)。当外加应力大于 HEL 值时, 将会发生永久变形。假设在冲击波传播的方向外加应力超过 HEL 值时, 材料发生屈服, 在单向应变条件下, 动态屈服强度 σ_y^{dyna} 定义为:

$$\sigma_y^{dyna} = HEL \frac{(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (1)$$

式中, ν 为泊松比; HEL 是冲击波传递的过程中最高弹性极限。

同时, 假设靶材料在分析中是完全弹塑性, 且各向同性, 均一的特点。根据 Von-Mises 准则定义塑性应变, 并根据式 (1), 定义动态屈服强度 σ_y^{dyna} 。

根据胡克定律, 表面塑性应变 ϵ_p 可以表示为:

$$\varepsilon_p = \frac{-2HEL}{3\lambda + 2\mu} \left(\frac{P}{HEL} - 1 \right) \quad (2)$$

式中, P 为冲击压力, 是一个关于持续压力脉冲的函数; λ 为Lame常数, μ 为Lame常量, WCP产生的残余应力 σ_{FEM} 可以写成:

$$\sigma_{FEM} = \sigma_0 - \left[\frac{\mu\varepsilon_p(1+\nu)}{(1-\nu)+\sigma_0} \right] \left[1 - \frac{4L_p(1+\nu)}{\pi r_p} \right] \quad (3)$$

式中, r_p 为影响半径; σ_0 为初始残余压力; L_p 为塑性影响的深度。

根据上述介绍, 可以应用LS-DYNA和ANSY软件模拟三维的WCP加工过程中宏观塑性应变引起的宏观残余应力。

2.2 位错密度模型

2.2.1 位错产生条件

Jordan等提出了一个位错密度 σ_{ex} 的定性估计参数。他们假定关于一个滑移系的错位密度, 这些滑移应变与与附加的剪切应力 $\sigma_e^{(n)}$ 成比例:

$$\sigma_e^{(n)} = \begin{cases} \left| \sigma_{RS}^{(n)} \right| - \sigma_{CRS} & \text{when } \left| \sigma_{RS}^{(n)} \right| \geq \sigma_{CRS} \\ 0 & \text{when } \left| \sigma_{RS}^{(n)} \right| \leq \sigma_{CRS} \end{cases} \quad (4)$$

式中, 上标 n 表示第 n 个滑移系; 从ANSYS坐标系到滑移坐标系的应力转变计算得到 $\sigma_{RS}^{(n)}$, 为第 n 个滑动系的分剪切应力; σ_{CRS} 是临界剪切应力。

考虑到晶体包含 N 个等效滑移系统, 总的等效剪切应力 σ_{ex} 写成:

$$\sigma_{ex} = \sum_{n=1}^N \sigma_e^{(n)} \quad (5)$$

如果假设位错密度正比于总的等效剪切应力 σ_{ex} , 可以用 σ_{ex} 作为一种定性估计位错密度的方法, σ_{ex} 为正值, 说明了晶体内部发生了位错。这样描述位错密度的方法需要材料常数和滑动系统, 因此, 该方法可用于位错密度的计算。

2.2.2 HAS模型

定量测定位错密度与定性测定相比, 提供了更多有用的信息。在单晶体位错密度的定量测定中, 利用HAS模型作为关于时变的非弹性应变的本构方程。1986年, Dillon等第1次使用HAS模型分析了在晶体增长过程中的定量位错密度。

在晶体生长过程中, 高温下多数单一晶体中, 产生了时变的蠕变变形。根据位错动力学模型, 单晶体的蠕变本构方程被称为HAS模型, 蠕变应变速率与位错密度相关。在该模型中, 给出了单向应力状态下的蠕变应变速率 $d\varepsilon^c/dt$ 和移动位错密度率 dN_m/dt :

$$dN_m/dt = v\delta N_m \quad (6)$$

式中, t 为时间; N_m 为移动位错密度; v 为位错速度; δ 为增值速率参数。上述模型中的参数 v 和 δ 计算如下:

$$v = k_0(\tau_{eff})^p \exp(-Q/kT) \quad (7)$$

$$\delta = K(\tau_{eff})^i \quad (8)$$

式中, k_0 为平衡单位材料常数; p 为材料常数; Q 为佩尔斯势; k 为波尔斯曼常数; T 为绝对温度; K 为材料常数; λ 为材料常数。

在式(7)和(8)中, 参数 τ_{eff} 表示晶体上的剪切应力效果, 在下面方程中给出了定义:

$$\tau_{eff} = \tau_a - D\sqrt{N_m} - \tau_d \quad (9)$$

式中, τ_a 为应用剪切应力; D 为应变硬化系数; N_m 为移动位错密度; τ_d 为位移和杂质原子之间相互作用引起的拉应力。

考虑到晶体的各项异性, 给出了第 n 个滑移系的有效剪切应力:

$$\tau_{eff}^{(n)} = \left| \sigma_{RS}^{(n)} \right| - D\sqrt{N_m} - \tau_d \quad (10)$$

式中, $\sigma_{RS}^{(n)}$ 为第 n 个滑移系的分切应力。

根据上述推论, 位错密度变化率 dN_m/dt 可以表示为:

$$dN_m^{(n)}/dt = Kk_0 N_m (\exp(-\frac{Q}{kT})) \left(\left| \sigma_{RS}^{(n)} \right| - D\sqrt{N_m} - \tau_d \right)^{p+\lambda} \quad (11)$$

根据式(4), 当 $\left| \sigma_{RS}^{(n)} \right| - D\sqrt{N_m} - \tau_d \geq 0$, 时, 位错密度变化率 $dN_m/dt \geq 0$, 位错速度上升并且位错密度出现连续性。

在 t 时刻的第 n 个滑移系的位错密度如下表述:

$$(N_m^{(n)})_t = (N_m^{(n)})_{t-\Delta t} + (dN_m^{(n)}/dt)\Delta t \quad (12)$$

式中, $(N_m^{(n)})_{t-\Delta t}$ 为在 $t-\Delta t$ 时刻的第 n 个滑移系的位错密度。在 t 时刻总位错密度为:

$$N_m = \sum_{n=1}^N \left| (N_m^{(n)})_t \right| \quad (13)$$

式中, N 为滑移系的数量。

2.2.3 DDM模型中的残余应力

利用化学腐蚀、光学显微镜和X射线衍射的方法, Danyluk等分别测量了位错密度和晶片增长的主要纹理方向。得到的结果与利用红外传播偏光器得到的残余应力进行了比较。并建立了一个模型来解释在随机挑选出的EFG晶片里, 位移密度和残余应力耦合的结果。

晶片增长的应力随着位移密度而增加, 而其他形式至今仍并未解释清楚达到临界分辨剪切应力的源项, 初始应力松弛。这里给出了在位移密度和残余应力之间负的平方根的关系。式(14)很好地解释了实验数据的特性。

$$\sigma_{DDM} = -A\mu b\sqrt{N_m} + \sigma_0 \quad (14)$$

式中, σ_{DDM} 为位错引起的残余应力; A 为关于未知源项的常数; μ 为剪切模量; b 为伯格矢量的大小; σ_0 是初始应力。

根据以上陈述, 可以进行由位错密度引起的微观残余应力的瞬时和连续性的数值模拟。

2.3 FEM/DDM模型

本研究不仅考虑到宏观的塑性应变, 而且考虑微观塑性应变, 给出了由WCP引起的总的残余应力 $\sigma_{residual}$:

$$\sigma_{residual} = \sigma_{FEM} + \sigma_{DDM} \quad (15)$$

式中, σ_{FEM} 为宏观塑性变形引起的分残余应力, 可以从有限单元法中获得其值; σ_{DDM} 为宏观塑性变形引起的分残余应力, 可以从位错密度法中获得其值。

根据式 (3) 和 (14), 总的残余应力 $\sigma_{residual}$ 可以写为

$$\sigma_{residual} = - \left[\frac{\mu \varepsilon_p (1 + \nu)}{(1 - \nu) + \sigma_0} \right] \left[1 - \frac{4L_p (1 + \nu)}{\pi r_p} \right] - A\mu b \sqrt{N_m} + \sigma_0 \quad (16)$$

根据式 (16), WCP 产生的总残余应力 $\sigma_{residual}$, 可以通过结合有限元方法和位错密度方法获得。

2.4 FEM/DDM 分析步骤

利用上述方法模拟冲击波的传播, 在三维空间利用 LS-DYNA 和 ANSYS 软件模拟 WCP 处理的材料的残余应力分布和表面的变形。本次研究中, 仍然采用相同方法建立纯钛模型, 模拟了在同一点上几个连续的冲击波, 对结果进行了分析。

图2中显示了FEM模型结果中动态应力变化。根据曲线的形状, 每一个冲击波作用下动态应力变化的规律都相似。在DDM模型中, 分解切应力 $|\sigma_{RS}^{(n)}|$ 在FEM计算中是一个动态应力的周期函数, 它可以表示为:

$$|\sigma_{RS}^{(n)}| = |\sigma_{dyna}^t + \sigma_{dyna}^{t+\Delta t}| / 2 \quad (17)$$

式中, σ_{dyna}^t 为求解时间 t 的动态应力值; $\sigma_{dyna}^{t+\Delta t}$ 为求解时间 t 的动态应力值; Δt 为在FEM计算中足够精度下的合适的时间步长。

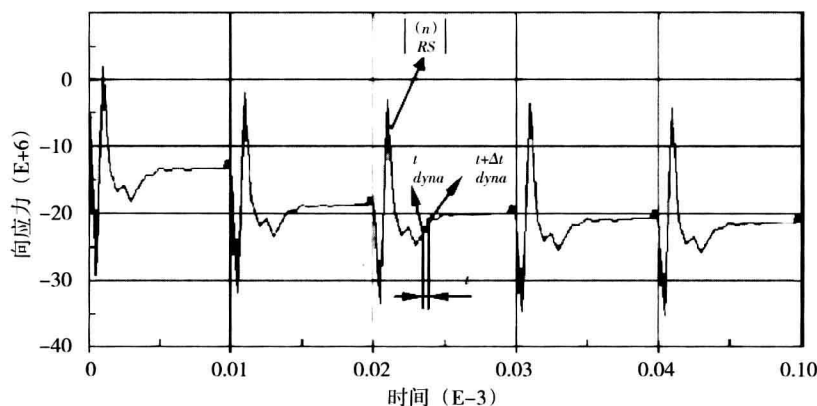


图2 FEM模型结果中的动态应力变化

采用一个 $1 \times 10^7 \text{ 1/m}^2$ 位错密度标准 (在一定控制下的理想的低维持位错密度) 作为初始位错密度 $(N_m^{(n)})_0$ 。在FEM模型中, 根据不同输出时间步长的计算结果, 在DDM模型中合适的时间步长 Δt 应少于 $2 \times 10^{-7} \text{ s}$, 可以确保计算结果的精度。因此, 根据新的FEM-DDM模型, 应用C程序代码可以计算WCP引起的残余应力, 在图3中给出了计算步骤。