

中国核科学技术进展报告

（第五卷）

——中国核学会2017年学术年会论文集

第5册

- ▲ 核材料分卷
- ▲ 辐射防护分卷

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

中国核科学技术进展报告. 第五卷, 中国核学会 2017 年学术年会论文集. 第 5 册, 核材料、辐射防护 / 中国核学会主编. — 北京: 中国原子能出版社, 2018. 4

ISBN 978-7-5022-8804-4

I. ①中… II. ①中… III. ①核技术—技术发展—研究报告—中国 IV. ①TL—12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 016085 号

内 容 简 介

中国核学会 2017 学术双年会于 2017 年 10 月 16—18 日在山东省威海市召开。会议主题为“安全、绿色、和谐、发展”。大会共征集论文 1 400 篇, 经过专家审稿, 评选出 701 篇较高水平论文收录进《中国核科学技术进展报告(第五卷)》, 报告共分为 10 册, 并按 26 个二级学科设立分卷。

本册为核材料和辐射防护分卷。



中国核科学技术进展报告(第五卷) 第 5 册

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

策划编辑 付 真

责任编辑 张书玉

特约编辑 秦子淇

装帧设计 赵 杰

责任校对 冯莲凤

责任印制 潘玉玲

印 刷 保定市中华美凯印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 890 mm×1240 mm 1/16

印 张 25.75 字 数 713 千字

版 次 2018 年 4 月第 1 版 2018 年 4 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-8804-4 定 价 120.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

中国核学会 2017 年 学术年会大会组织机构

大会名誉主席 王寿君

大会主席 顾 军

执行主席 李冠兴

大会副主席 (按姓氏笔画排序)

王 森 刘永德 孙汉虹 余剑锋 张延克 张维岩
祖 斌 贺 禹 赵 军 康克军 詹文龙 雷增光

高级顾问 丁中智 马栩泉 王乃彦 王大中 张国宝

杜祥琬 陈佳洱 胡思得 钱绍钧 穆占英

学术委员会

主 任 李冠兴

副主任 叶奇蓁 邱爱慈 陈念念 赵志祥 程建平

成 员 (按姓氏笔画排序)

王贻芳 卢文跃 叶国安 司胜义 田佳树 华跃进
张永学 张志俭 张志忠 张金带 李建刚 杨华庭
陈炳德 陈森玉 罗志福 罗顺忠 姜 宏 赵宏卫
赵振堂 唐传祥 柴国早 彭先觉 曾毅君 樊明武
潘传红 潘自强

组委会

主 任 雷增光

常务副主任 于鉴夫

副主任 王 志 庄火林

委 员 (按姓氏笔画排序)

丁有钱 马文军 王丽瑶 王国宝 石金水 帅茂兵
朱科军 刘 伟 刘亚强 孙 晔 李景烨 苏艳茹
张 建 张 勇 杨海峰 陈东风 陈怀璧 陈 伟
胡绍全 郑卫芳 段旭如 郝朝斌 黄 伟 彭太平
解新芳 魏素花

秘书处

主任 秦昭曼

副主任 徐若珊 张 玮 黄海英

成 员 (按姓氏笔画排序)

于清妍 王 宇 王 凯 叶 琦 龙 云 刘世伟
孙俊燕 张宝珠 李 钢 李小禹 李 静 沈 莹
杨 爽 苏明煜 杜婷婷 陈 旭 陈晓鹏 胡 静
耿庆云 秦子淇

主办单位 中国核学会

承办单位 中国核工业建设集团公司

协办单位	中国核工业集团公司	国家电力投资集团公司
	国家核电技术公司	中国广核集团有限公司
	清华大学	中国工程物理研究院
	中国科学院	中国华能集团公司
	中国大唐集团公司	

技术支持单位 各专业分会及省级核学会、哈尔滨工业大学(威海校区)

专业分会 铀矿地质分会、铀矿冶分会、核能动力分会、核材料分会、同位素分离分会、核化学与放射化学分会、辐射防护分会、核化工分会、核物理分会、计算物理分会、粒子加速器分会、核电子学与核探测技术分会、脉冲功率技术及其应用分会、核聚变与等离子体分会、辐射物理分会、辐射研究与应用分会、同位素分会、核农学分会、核医学分会、核技术工业应用分会、核情报分会、核技术经济与管理分会、核测试与分析分会、核安全分会、核工程力学分会、铀系物理与化学分会

省级核学会 北京市核学会、湖南省核学会、江西省核学会、广东省核学会、四川省核学会、浙江省核学会、湖北省核学会、福建省核学会、黑龙江省核学会、陕西省核学会、辽宁省核学会、甘肃省核学会、山西省核学会、吉林省核学会、新疆自治区核学会、安徽省核学会、河南省核学会、江苏省核学会、上海市核学会、天津市核学会、贵州省核学会、山东省核学会

中国核科学技术进展报告

(第五卷)

总编委会

主 任 李冠兴

副主任 叶奇蓁 邱爱慈 陈念念 赵志祥 程建平

委 员 (按姓氏笔画排序)

王贻芳	卢文跃	叶国安	司胜义	田佳树
华跃进	张永学	张志俭	张志忠	张金带
李建刚	杨华庭	陈炳德	陈森玉	罗志福
罗顺忠	姜 宏	赵红卫	赵振堂	唐传祥
柴国早	彭先觉	曾毅君	樊明武	潘传红
潘自强				

编委会办公室

主 任 于鉴夫 潘启龙

副主任 王 志 李 涛 秦昭曼 谭 俊

成 员 (按姓氏笔画排序)

王 丹	王 朋	王 笑	左浚茹	付 凯
付 真	李新邦	刘 岩	孙凤春	宋翔宇
朱彦彦	肖 萍	张关铭	张书玉	张宝珠
赵志军	赵 明	胡晓彤	秦子淇	徐若珊
韩 霞	蒋焱兰			

核材料分卷

编委会

主任 李冠兴

副主任 (按姓氏笔画排序)

马文军	王晓敏	吴庆生	李友良
畅欣	胡晓丹	黄玉才	蒙大桥

委员 (按姓氏笔画排序)

马晓娟	王玉岭	王虹	冉木子
田春雨	刘马林	孙浩楠	朱国胜
江小川	李阳	李爱军	杨启法
郑绪华	侯丽楠	姚美意	赵文金
袁改焕	钱跃庆	温丰	

辐射防护分卷

编委会

主任 潘自强

副主任 常学奇

委员 (按姓氏笔画排序)

任晓娜	刘开武	刘森林	孙全富
吴宜灿	张金涛	李洋	杨华庭
苏旭	陈栋梁	陈晓秋	曾志

前 言

《中国核科学技术进展报告(第五卷)》是中国核学会 2017 学术双年会优秀论文结集。

2015 年以来,中国核科学技术领域亮点频出,喜讯不断:中国三代压水堆核电“华龙一号”全球首堆示范工程穹顶吊装圆满完成;全球首条高温气冷堆燃料元件生产线投料生产;北京正负电子对撞机重大改造工程(BEPCII)建成;大亚湾实验测得最精确的反应堆中微子能谱;国际热核聚变实验堆超热负荷第一壁原型件率先通过国际权威机构认证;国际首座微堆低浓化成功实施;用于激光核物理研究的 OPCPA 超高峰值功率激光系统处于国际同类装置领先水平;玲龙一号(ACP100)模块式小型堆全球首个通过 IAEA 安全审查;中国先进大型铀纯化转化生产线建成投产;自主化核级数字化仪控系统平台“和睦系统”研制成功与规模化应用……

以上所取得的成绩首先得益于中国共产党的坚强领导。习近平总书记 2015 年对核工业创建六十周年重要批示指出,“要坚持安全发展、创新发展、坚持和平利用核能,全面提升核工业的核心竞争力,续写我国核工业新的辉煌篇章。”总书记的重要批示确立了核工业发展新的指导思想,开启了核工业发展的新时代。其次,得益于成千上万中国核科技工作者顽强拼搏、锐意进取、不畏挫折、无私忘我的工作精神,正是广大核科技工作者勇于登攀、勇于创新,才攻克了一个又一个科技难关,不断推动中国核科技事业蓬勃发展,推动核行业向前进步。

中国核学会 2017 学术双年会于 2017 年 10 月 16—18 日在山东省威海市召开,由中国核工业建设集团公司承办。会议主题为“安全、绿色、和谐、发展”。学术年会报告分为大会报告、分会场口头报告和张贴报告;同期举办核医学科普讲座、“高温气冷堆与四代核能”高端论坛、青年论坛、妇女论坛等多层次的专题论坛。年会发布了中国核学会“2015—2017 年度中国十大核科技进展”和《宣传绿色核能 建设美丽中国——科普行动宣言》;进行了优秀论文及团队贡献奖颁奖活动。来自核能动力、铀矿地质、核材料、核安全等 20 多个分会的 84 篇论文获得中国核学会 2017 年学术年会优秀论文奖。核工程类专业工程教育认证、核专利信息服务两个团队获得团队贡献奖。

大会共征集论文 1 400 篇,经过专家审稿,评选出 701 篇较高水平论文收录进《中国核科学技术进展报告(第五卷)》公开出版发行。《中国核科学技术进展报告(第五卷)》分

为 10 册,并按 26 个二级学科设立分卷。

《中国核科学技术进展报告(第五卷)》顺利结集、出版与发行,首先感谢中国核学会全体分支机构和 22 个省级(地方)核学会的鼎力相助;其次感谢总编委会和 26 个(二级学科)分卷编委会全体同仁的严谨作风和治学态度;再次感谢中国核学会秘书处和出版社工作人员,在文字编辑和校对过程中做出的具体贡献。

《中国核科学技术进展报告(第五卷)》编委会
2018 年 3 月 10 日

核材料
Nuclear Material

目 录

缺口效应对 7178 铝合金拉伸性能及断口形貌的影响

.....李 昂, 张 毅, 高 蔚, 等 (1)

控制棒组件 RCCA 服役失效机理及在役检查对策

.....李玉龙, 刘 峰, 詹 杰 (8)

环氧树脂体系固化反应动力学研究毕 艳 刘 渊 杨佩雯 (13)

核燃料元件制造执行系统业务建模方法研究和应用

.....李学锋, 李建平, 杨丽丽 (18)

箱型管座结构的焊接变形控制 秦国鹏, 张丽英 (24)

核用小直径锆合金棒材超声探伤方式分析 欧江武, 韩 承, 夏健文 (31)

微型 $\text{UO}_2\text{-Mo}$ 燃料性能的多物理场全耦合分析 刘 荣, 蔡杰进 (37)

基于电解技术的防异物板孔系加工设备的设计 李林冲 (45)

核燃料元件金相图谱的建立 李至博, 韩 承, 袁 野, 等 (53)

重水堆用钴调节棒组件钴芯块电镀镍工艺研究

.....杨 勇, 朱振平, 魏东波, 等 (60)

挤压工艺对铀锆合金管表面质量的影响

.....撒兴瑞, 王晓眉, 辛秀广, 等 (66)

国内某核电站弯管失效分析及裂纹扩展行为研究

.....尹开锯, 唐 武, 王 浩, 等 (71)

ATF 用 FeCrAl 合金发展历程概述 涂蒙河 胡 勇 (77)

A 元素对铝合金组织和强度的影响 张 毅, 陈开媛, 李 昂, 等 (82)

基于 PID 和 PWM 的研磨装置研制 李 辉 (87)

核燃料元件 MES 系统的设计与应用 李海东, 吴艳鑫, 赵 勇 (94)

SZA-4 锆合金耐腐蚀性能研究杨忠波, 袁改焕, 邱 军, 等 (101)

316Ti 在超临界水中的应力腐蚀行为研究 张 强, 唐 睿 (107)

UO₂ 核芯制备用还原炉气流分布模拟分析及改进
.....张 宇, 陈文岩, 高 明, 等 (126)

包覆颗粒 SiC 层制备过程中的流态化优化研究
.....刘逸波, 张 宇, 刘 博, 等 (133)

MOD 法制备 Al₂O₃ 阻氟涂层及其表征王 龙, 罗晓芳, 王佳恒, 等 (138)

回收铀经济性及影响因素研究 戴 定, 伍浩松 (144)

铁素体/马氏体钢冲击试验中的尺寸效应 柴 磊, 杜爱兵 (151)

冷却速率对铸态铀铌合金中铌分布特征影响初步研究
.....马 荣, 陈 冬, 唐清富, 等 (157)

带肋铝合金管挤压成型数值模拟研究赵瑞瑞, 蔡振方, 聂 皓 (162)

高温气冷堆核燃料元件生产线核材料衡算体系建立方法研究
.....温 丰, 刘丽莎, 袁 磊, 等 (167)

溶解氧对 310S 钢超临界环境中应力腐蚀开裂的影响
.....刘金华, 龚 宾, 姜 峨, 等 (173)

缺口效应对 7178 铝合金拉伸性能及断口形貌的影响

李 昂, 张 毅, 高 蔚, 吴 福, 赵 凯, 吴 雷

(核工业理化工程研究院, 天津 300180)

摘要: 利用不同缺口半径的拉伸试样, 对 7178 铝合金 (T6 态挤压板) 的缺口效应进行研究。实验结果显示, 缺口半径 0.5~4.5 mm 的 7178 铝合金缺口 $\phi 3$ 试样 (应力集中系数 1.94~3.83) 强度对缺口是不敏感的。有限元计算结果和断口分析表明, 缺口半径的减少将导致在拉伸过程中试样缺口部位更趋向于三向应力状态。相同缺口半径试样中心部分的应力三维度明显高于缺口根部的应力三维度。由于三向应力的作用, 断口中心部分晶粒变形受到约束, 晶界处容易诱发应力集中及二次裂纹, 晶间断裂的比例有所增加; 边缘剪切区域存在明显的等轴型韧窝。

关键词: 缺口敏感性; 拉伸性能; 7178 铝合金; 应力三维度; 断口分析

7 系高强铝合金具有高比强度、比刚度, 耐腐蚀性好, 加工性能和焊接性能优异等优点, 是广泛应用于航空航天、兵器装备及核工业等领域中的轻量化结构材料。美国铝业公司 (Alcoa) 在 7075 铝合金的基础上, 通过提高 Zn、Mg、Cu 的合金含量、优化热处理工艺参数等途径, 研制出同时兼具强韧性的 7178 铝合金^[1]。由于设备结构的要求, 多数金属部件不可避免地存在截面突变的台阶或孔结构, 即形成应力集中的缺口。受缺口效应的影响, 铝合金材料的变形、断裂过程会发生明显的变化, 在复杂应力的作用下缺口部位常成为部件结构失稳、变形断裂的起源^[2]。在部件的设计过程中, 仅依靠 7178 铝合金光滑试样的性能指标是不够的, 尚需考察缺口效应对铝合金性能的影响程度。目前关于高强铝合金缺口效应的报道相对较少。

本文通过对 7178 铝合金挤压板缺口试样 (沿挤压方向) 进行拉伸实验, 研究不同缺口尺寸下 7178 铝合金对缺口拉伸的敏感性。结合试样拉伸过程的有限元模拟及断口观察结果, 计算不同缺口尺寸拉伸试样的应力状态分布, 分析光滑试样与缺口试样断裂形貌的异同。根据应力状态的计算结果, 尝试建立 7178 铝合金缺口试样力学性能与断口形貌之间的联系, 为后续部件设计、材料应用、失效分析提供指导及帮助。

1 实验材料及研究方法

实验中采用北京航空材料研究院提供的 7178 铝合金挤压板, 挤压比 80%, 热处理状态为 T6 态, 化学成分见表 1。沿挤压板的挤压方向 (L 方向) 制取光滑、不同尺寸缺口拉伸试样, 其中缺口半径设置为 0.5 mm、1.5 mm、4.5 mm, 对应编号分别为 NR05、NR15、NR45, 平行试样数量为 3 件, 拉伸试样具体尺寸见图 1 所示。

表 1 7178 铝合金挤压板的化学成分

单位: wt. %

Zn	Mg	Cu	Mn	Cr	Fe	Si	Al
6.7	2.4	1.8	0.3	0.2	0.3	0.3	余量

在室温下, 将图 1 所示的 7178 铝合金拉伸试样在三思纵横 UTM 5105X 电子万能试验机进行拉伸性能实验, 拉伸速度为 2 mm/min。在实验的过程中, 记录光滑试样加载的工程应力应变曲线及缺

作者简介: 李昂 (1985—), 男, 天津, 工程师, 工学硕士, 主要从事铝合金材料性能研究工作

口试样的载荷-位移曲线。将光滑试样的工程应力应变曲线修正为 7178 铝合金的真应力应变曲线，修正后的真应力应变曲线用做缺口试样拉伸过程有限元模拟的性能输入参数。采用 FEI 公司的 QUANTA-400 型扫描电镜 (SEM) 对拉伸试样断口进行观察，试样在观察前置入酒精中进行超声波清洗，以去除表面附着的灰尘污物。

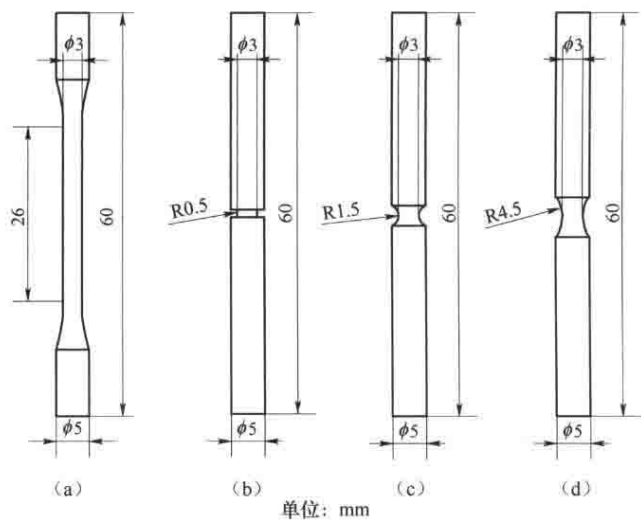


图 1 拉伸试样尺寸参考图
(a) 光滑试样; (b) 缺口试样 NR05; (c) 缺口试样 NR15; (d) 缺口试样 NR45

2 实验结果与讨论

2.1 缺口尺寸对 7178 铝合金加载曲线的影响

图 2 是 7178 铝合金光滑试样、不同尺寸缺口试样的加载曲线。从图 2 中可以看出，7178 铝合金缺口试样的加载曲线均高于光滑试样，且缺口试样加载弹性段的直线斜率均大于光滑试样的弹性段斜率。

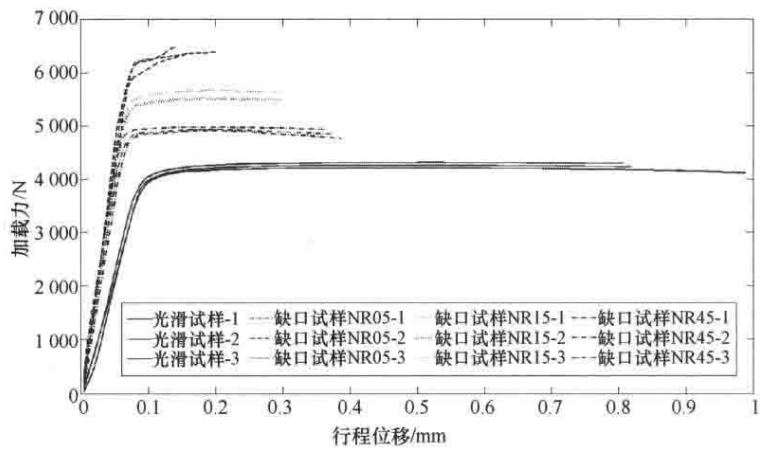


图 2 7178 铝合金拉伸试样加载曲线的对比

根据应力集中系数计算公式^[3]:

$$K_t = 1 + 2\sqrt{a/\rho} \tag{1}$$

其中: a —试样缺口深度, ρ —缺口半径。缺口试样 NR05、NR15、NR45 的应力集中系数 K_t 分别为

3.83、2.63、1.94。随着缺口半径的减小，缺口试样的应力集中系数有所升高，缺口试样载荷峰值逐步提高，弹性阶段的斜率亦有所增加，而断裂位移则逐渐减小，如图 2 所示。

材料的缺口敏感性通常用缺口敏感度 NSR (notch sensitivity ratio) 来表征。当 NSR 的计算值大于等于 1 时，表示材料对缺口不敏感；当 NSR 值明显小于 1 时，表示材料对缺口敏感，且 NSR 值越小表示材料对缺口越敏感^[4]。拉伸缺口敏感度的计算公式为：

$$NSR = R_{mm} / R_m \tag{2}$$

其中： R_{mm} —缺口试样抗拉强度； R_m —光滑试样抗拉强度。根据该公式，计算了不同应力集中系数下 7178 铝合金的缺口敏感度 NSR ，如图 3 所示。

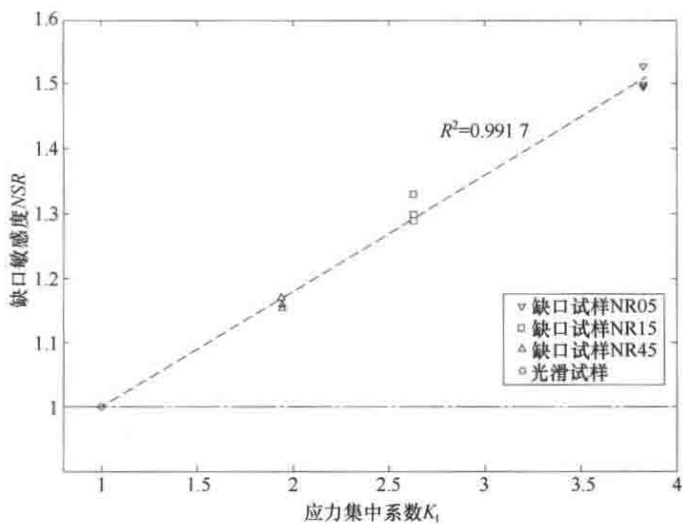


图 3 7178 铝合金拉伸试样应力集中系数与缺口敏感度的关系

从图 3 中可以看出，随着应力集中系数的增加，试样的抗拉强度及缺口敏感度逐渐提高，即使缺口半径等于 4.5 mm 时，其试样的缺口敏感度仍大于 1。结合相关计算数据，拟合得到了 7178 铝合金缺口试样应力集中系数 K_t 及缺口敏感度 NSR 的线性关系式（见拟合式 3），拟合直线与实测数据拟合程度良好，线性相关度 R^2 为 0.9917。

$$NSR = 0.1801K_t + 0.8199 \tag{3}$$

根据 NSR 判据及拟合表达式 (3)，缺口半径 0.5~4.5 mm 的 7178 铝合金缺口 $\phi 3$ 试样（应力集中系数 1.94~3.83）对缺口是不敏感的。

2.2 缺口尺寸对加载过程中试样截面应力状态的影响

利用商用软件 abaqus 6.9 对 7178 铝合金不同尺寸缺口拉伸试样的加载过程进行有限元模拟，在建模的过程中，由于缺口试样形状是轴对称的，因此，有限元模型采用轴对称平面应变模型。对试样轴对称面的 1/2 建模，网格单元类型为 CAX8R（轴对称二次缩减积分单元）。将 7178 铝合金的真应力应变曲线（如图 4 所示）、泊松比 0.27 作为材料性能参数输入到有限元模型中。模型的对称边界分别施加对称约束。网格划分的原则是越靠近缺口根部网格越密，缺口前端的最小网格尺寸为 50 μm 。加载方式采用位移加载，加载至模型最大等效应力达到光滑试样的抗拉强度后停止。

由图 5 可见，不管是光滑试样还是不同尺寸的缺口试样，加载过程模拟曲线与实测曲线的吻合程度均较好，说明所建立的有限元模型可以比较准确地预测 7178 铝合金在不同缺口尺寸下的加载及变形行为。提取在弹性加载段内缺口试样最小横截面不同位置处的平均应力 σ_m 和等效应力 σ_e ，计算缺口试样最小横截面的应力三维度 (σ_m/σ_e) 分布，结果如图 6 所示。

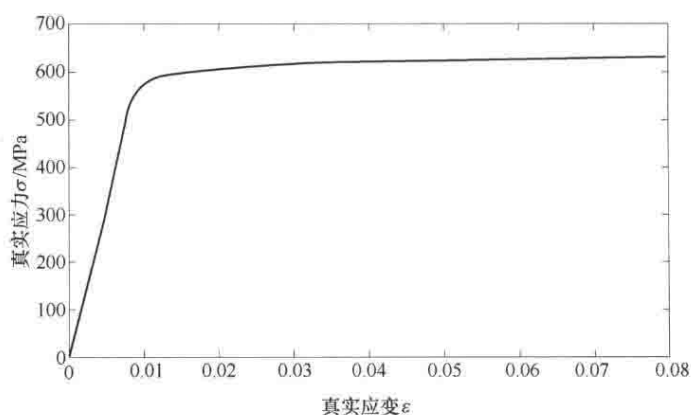


图4 7178 铝合金的真应力应变曲线

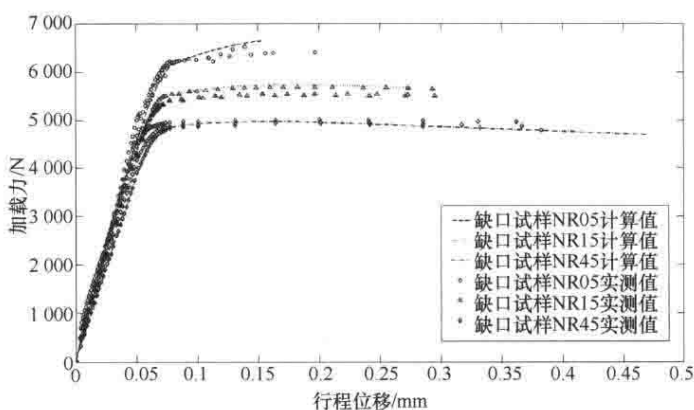


图5 不同尺寸缺口试样拉伸曲线计算值与实测值的对比

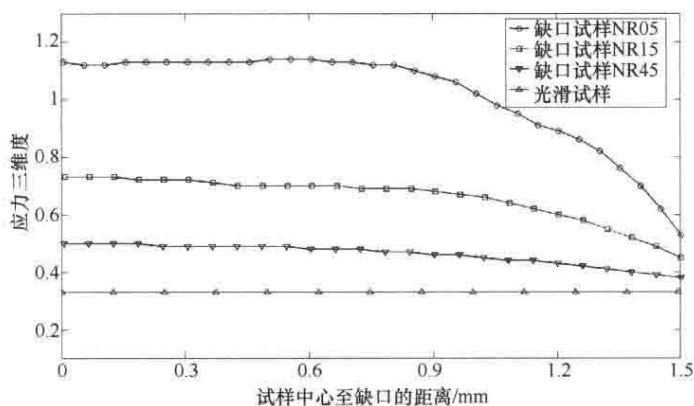


图6 不同尺寸缺口试样最小横截面上应力三维度的分布

从图6可以看出,随着拉伸试样缺口尺寸的不同,最小截面处的应力三维度分布曲线存在明显的差异。光滑试样的应力三维度始终为0.33(单轴拉伸状态),缺口试样NR05、NR15、NR45的应力三维度分别处于0.53~1.14、0.45~0.73、0.38~0.50的范围内。在同一条分布曲线上,从试样中心到缺口根部,随着距离的增加,应力三维度先近似不变后减小,例如在缺口试样NR05的分布曲线上,在距离试样中心大约0.8 mm的区域内,应力三维度计算值基本为1.13~1.14,至缺口根部应力三维度降低为0.53,但该值仍高于单轴拉伸状态对应的0.33。

应力三维度能综合反映应力场中三向应力状态和材料变形的约束程度,在一定范围内,应力三维度越高,造成材料变形的剪应力比例就越低,要达到相同应变所需的应力值就会升高,所以,相对较高的应力三维度会造成材料的屈服强度、抗拉强度相对提高,这就解释了图2和图5中试样缺

口半径越小，对应加载曲线位置越高的原因。同理，应力三维度的提高会使材料塑性变形困难，材料抗拉强度升高，致使材料断裂的驱动力增强，材料提前发生断裂。

2.3 缺口对拉伸试样断口形貌的影响

图 7 为光滑、缺口拉伸试样的断口低倍图像。从图 7 (a) 中可以看出，7178 铝合金光滑试样的断口相对较平，未见明显的二次裂纹，在断口边缘存在剪切区域。相比图 7 (a)，图 7 (b) 中缺口拉伸试样 NR15 呈杯-锥状断口，断口中部区域较为不平坦，缺口试样属于多源型断裂模式。在断口中上部存在一条明显的垂直于主断裂面的二次裂纹。该二次裂纹的产生与缺口试样的三向应力状态有关。裂纹起源仍位于中部区域，参考图 6 的计算结果，说明该缺口试样的裂纹萌生主要受应力三维度的影响。断裂过程对缺口并不敏感，这与拉伸性能的实验结果基本一致。

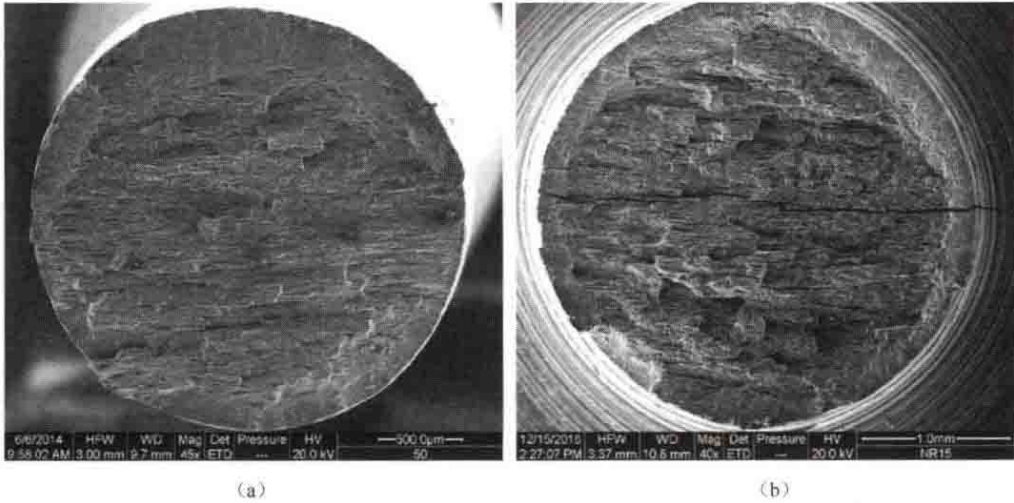


图 7 7178 铝合金拉伸试样断口形貌
(a) 光滑试样；(b) 缺口试样 NR15

在光滑试样的中心部位存在明显的晶粒变形及剪切脊，在剪切脊的边缘可以观察到细小的半椭圆状韧窝，属于韧性断裂的典型特征^[5]，同时在部分区域伴随有晶间断裂现象的发生。造成光滑试样主断裂面的裂纹主要沿大角度晶界扩展。在放大图像中也可以见到多条相对较窄的二次裂纹，如图 8 (a) 所示。这些二次裂纹的扩展平面同样垂直于主断裂面。

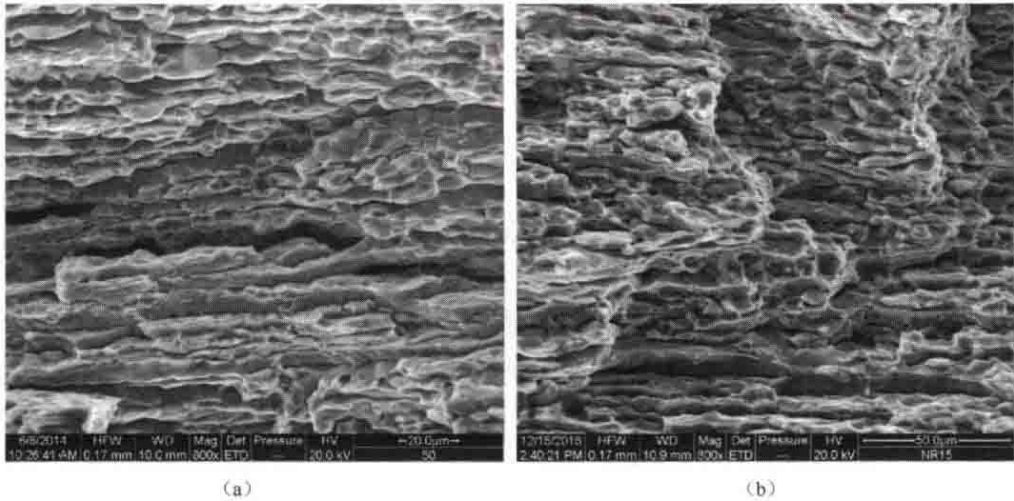


图 8 7178 铝合金拉伸试样中心部位形貌的对比
(a) 光滑试样；(b) 缺口试样 NR15

与光滑试样断口相比,图 8(b)的缺口试样中心部位上除了晶粒变形及剪切脊外,还可以观察到更大比例的晶间断裂现象,造成主裂纹面的裂纹中有部分沿小角度晶界扩展,这将会对试样的塑性应变产生不利的影响,具体测试结果参见图 2。

应力三维度越高,造成晶粒变形的等效应力比例越低,晶粒变形受到约束。富集在晶界位置处的残留第二相(硬脆相)会导致 7178 铝合金(T6 态)的晶间强度低于晶内强度。而较低的晶间强度会加剧铝合金材料内部在晶界处的应力集中,从而导致材料自晶界处断裂的倾向性增加。由于缺口三向应力状态的作用,材料在断裂过程中受垂直于加载方向的应力明显高于光滑试样的受力,而高强铝合金挤压板在沿 L-T 方向上的晶界强度较弱(残留第二相体积百分数较高)^[6],在应力三维度较高的情况下,垂直于 S 方向的晶粒层间就会发生大面积开裂的现象。

剪切面的韧窝形貌主要受应力三维度、等效塑性应变的影响,其中应力三维度控制断口上韧窝的大小,而等效应变控制着韧窝的深浅和方向^[7]。剪切区域的应力三维度越高,则材料所受平均应力(σ_m)相对越大,促使微孔洞长大的驱动力越大,断口上的等轴型韧窝所占面积比较大,半椭圆型韧窝和剪切面所占成分比较小;反之,试样中的应力三维度越低,则等效塑性应变相对较大,微孔洞长大的驱动力越小,断口形貌中半椭圆型韧窝和剪切面所占比例较大。在本研究中,受缺口效应的影响,缺口试样 NR15 断裂过程中的应力三维度明显高于光滑试样,所以缺口试样在边缘部分的剪切断裂区域存在明显的等轴型韧窝,而光滑试样断口边缘区域是由大量相对平整的剪切面组成,如图 9 所示。

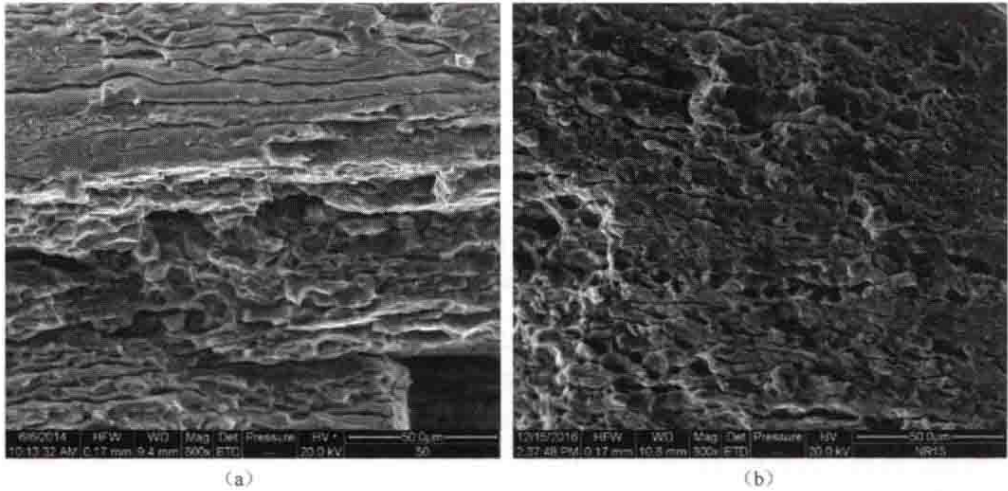


图 9 7178 铝合金拉伸试样边缘部位形貌的对比
(a) 光滑试样; (b) 缺口试样 NR15

3 结 论

- (1) 利用不同缺口尺寸拉伸试样的实测数据,拟合得到了 7178 铝合金应力集中系数 K_t 及缺口敏感度 NSR 的线性关系式: $NSR = 0.1801K_t + 0.8199$ 。该拟合直线与实测数据拟合程度良好,线性相关度 R^2 为 0.9917。
- (2) 结合以上拟合关系式,随着缺口半径的减小,缺口试样的应力集中系数及缺口敏感度均有所增加。根据 NSR 判据,缺口半径 0.5~4.5 mm 的 7178 铝合金缺口 $\phi 3$ 试样(应力集中系数 1.94~3.83)对缺口是不敏感的。
- (3) 有限元计算结果表明,相同缺口半径试样中心部分的应力三维度明显高于缺口根部的应力三维度。缺口半径的减少将导致在拉伸过程中的试样最小横截面处更趋向于三向应力状态,其中缺口半径 4.5 mm、1.5 mm、0.5 mm 的试样最小截面应力三维度的范围分别为 0.38~0.50、0.45~0.73、0.53~1.14。