

# 铝合金耳片连接件结构参数对其断裂特性影响的有限元法模拟

伍黎明,何宇廷,张海威,张 腾

(空军工程大学 航空航天工程学院,西安 710038)

**摘要:**建立了7000系列铝合金含孔边穿透裂纹斜耳片连接件的三维有限元模型,模拟研究了单边裂纹与双边裂纹两种损伤模式下耳片外内径比值、斜切角、裂纹长度等结构参数对裂纹尖端I型应力强度因子 $K_I$ 值的影响规律。结果表明:在相同等效裂纹无量纲长度下,单边裂纹与双边裂纹两种损伤模式的裂尖 $K_I$ 值随裂纹扩展或斜切角增加的变化规律基本一致;外内径比值大于2的耳片有利于进行损伤容限设计及检查;在相同的裂纹长度下,斜切角15°至25°左右的耳片裂纹扩展速率比直耳片的有明显下降。

**关键词:**耳片连接件;有限元法;断裂特性;应力强度因子

中图分类号: TB301; TH122 文献标志码: A 文章编号: 1000-3738(2013)012-0092-04

## Finite Element Simulation of the Effect of Structure Parameters of Aluminium Alloy Lug Attachment on Its Fracture Characteristic

WU Li-ming, HE Yu-ting, ZHANG Hai-wei, ZHANG Teng

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** The 3-D finite element model for 7000 series aluminium alloy lug attachment with through cracks was established to study the effects of the lug's structure parameters such as ratio of outer radius to inside radius, bevel angle and crack length under two types of damage model of single-edge crack and double-edge crack, on I-type stress intensity factor  $K_I$  by simulation. The results show that in the same equivalent crack dimensionless length the effects of crack growth and bevel angle on  $K_I$  in the two types of damage model were basically accordant. Lugs with  $R_2/R_1 > 2$  benefited the damage tolerance design and examination. For the lug with 15°—25° bevel angles, the value  $K_I$  was obviously less than the straight lug's at the same crack length.

**Key words:** lug attachment; finite element method; fracture characteristic; stress intensity factor

## 0 引言

耳片连接件是现代工程结构中最重要的疲劳与断裂关键件之一<sup>[1]</sup>,其失效常常会引起灾难性后果。近年来,国内外对于耳片连接件受力分析及疲劳特性的研究已取得一定的进展。航空航天部制定了耳片、螺栓的强度分析手册和连接件的疲劳分析手册,

其中给出了影响耳片连接强度和疲劳特性的因素以及耳片的常见破坏方式等。文献[2—4]均采用仿真计算等方法对不同受载角度的耳片进行了静强度分析,研究了耳片在不同受载方向下的承载能力。文献[5—7]研究了直耳片与非对称耳片受纵向拉载或受斜向拉载情况下的孔边应力分布情况,计算了裂纹尖端的应力强度因子。但是,对于耳片连接件的构型,特别是外内径比值、斜切角度等对其孔边裂纹扩展特性的影响尚未做研究。文献[8]虽提出耳片应力强度因子的一般趋势为随斜削角的增大而减小,但未对二者关系进行深入研究。

出于简化的考虑,作者以反映裂纹尖端应力场强度的关键控制量——应力强度因子 $K$ 为考察对

收稿日期:2012-09-30;修订日期:2012-11-30

基金项目:国家“863”计划项目(2009AA04Z406);国家自然科学基金资助项目(50975284);陕西省自然科学基金资助项目(SJ08E107)

作者简介:伍黎明(1985—),男,山西运城人,博士研究生。  
导师:何宇廷教授

象,采用有限元模拟的方法系统地研究了含单边裂纹和双边裂纹两种损伤模式耳片各结构参数的改变对其裂尖 I 型应力强度因子  $K_I$  的影响规律,并就耳片斜切角对其孔边疲劳裂纹扩展特性的影响规律进行了分析,得出一些有益的结论,希望对工程中耳片的损伤容限设计及使用具有一定的参考价值。

## 1 有限元分析

耳片材料为 7000 系列铝合金,其弹性模量为 70 GPa,泊松比为 0.33;销钉材料为合金钢,弹性模量设为 200 GPa,泊松比为 0.3。图 1 为耳片受纵向钉载的边界条件示意图。基于此,运用有限元软件 ANSYS 建立耳片与销钉的三维接触模型,网格划分采用 SOLID 186 单元,网格划分结果如图 2 所示。采用面-面接触建立销钉和耳孔的接触对。接触单元选择 ANSYS 软件中用来定义 3-D 接触对的 Contact174 和 Targe170 单元。目标面取耳孔内边,接触面取孔销柱面,摩擦因数设为 0.15。选取销钉柱两底面上的所有节点,并将其各方向自由度设为零。在耳片横截面上施加大小为负值的面压力,从而模拟销钉对耳孔施加的纵向拉力。进行非线性求解后裂纹尖端及耳孔区域变形放大 10 倍后的应力云图如图 3 所示。

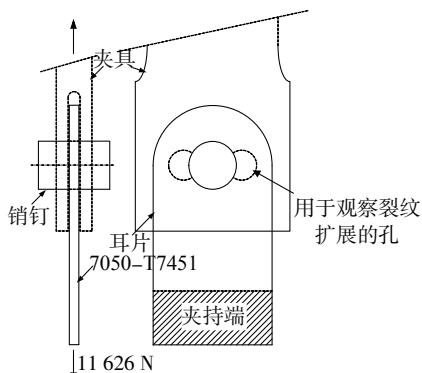


图 1 耳片受纵向钉载的边界条件

Fig. 1 Boundary conditions of lug subjected to longitudinal pin load

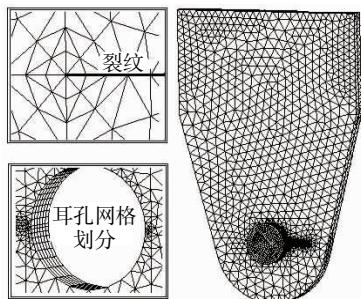
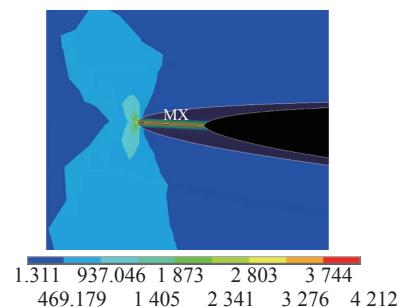
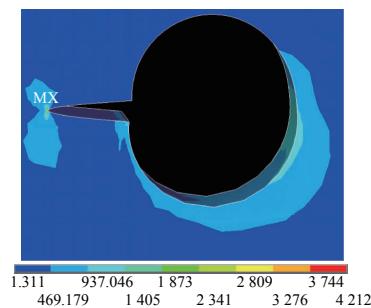


图 2 网格划分结果

Fig. 2 Mesh results



(a) 裂纹尖端应力云图



(b) 耳孔周边应力云图

Fig. 3 Von Mises stress distribution contour map for stress around crack tip (a) and stress around pin hole (b)

为验证有限元求解应力强度因子的准确性,将文献[9]开展的 7050-T7410 对称斜耳片受纵向拉伸载荷剩余强度试验中不同裂纹长度的剩余强度作为有限元分析的载荷,计算相应裂纹长度下的应力强度因子,计算结果见表 1。

表 1 试样应力强度因子计算结果

Tab. 1 Calculation results of stress intensity factor of samples

试样	1号	2号	3号	4号
裂纹长度 /mm	15.59	16.121	17.195	17.05
剩余强度 /kN	34.59	29.76	25.87	26.62
应力强度因子 /(MPa · m <sup>1/2</sup> )	37.52	33.25	31.45	32.83

通过查《民机结构耐久性与损伤容限设计手册》续表 8-12,得知 7075 铝合金的平面应变断裂韧度  $K_{Ic}$  值在 25~35 MPa · m<sup>1/2</sup> 之间。可见,有限元计算得到的耳片裂纹失稳扩展临界应力强度因子值与手册中测得的断裂韧度  $K_{Ic}$  基本一致,从而验证了有限元模拟的准确性。

## 2 有限元模拟结果与讨论

耳片常见的损伤模式有耳孔单边裂纹与双边裂纹。作者研究的双边裂纹特指双边等长裂纹,根据

图4,定义裂纹无量纲长度为裂纹长度 $a$ 与外内径之差( $R_2-R_1$ )的比值,即 $a/(R_2-R_1)$ ;单条裂纹无量纲长度,在单边裂纹中为裂纹无量纲长度,在双边裂纹中为一条裂纹无量纲长度;等效裂纹无量纲长度,在单边裂纹中为裂纹无量纲长度,在双边裂纹中为两条裂纹无量纲长度之和。

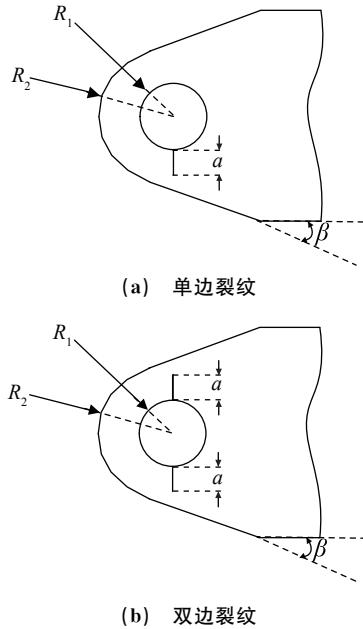


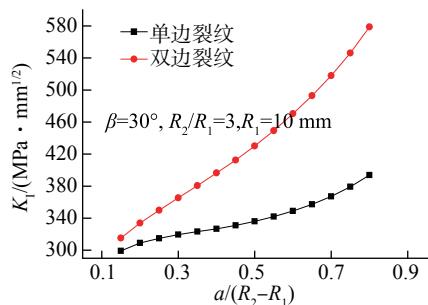
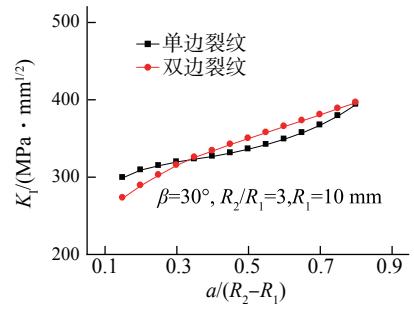
图4 两种裂纹扩展损伤模式

Fig. 4 Damage patterns for two kinds of crack growth:  
(a) single-edge crack and (b) double-edge crack

对耳片的两种损伤模式,从相同单条裂纹无量纲长度和相同等效裂纹无量纲长度两个方面进行了对比分析,研究耳片的裂纹无量纲长度、外内径比值、斜切角等结构参数的改变(耳片厚度均为6.7 mm)对裂纹尖端应力强度因子 $K_I$ 的影响规律。

## 2.1 裂纹无量纲长度对 $K_I$ 的影响

图5,6反映了斜切角 $\beta=30^\circ$ ,外内径比值 $R_2/R_1=3$ ,内径 $R_1=10$  mm,裂纹无量纲长度 $a/(R_2-R_1)$ 从0.15增至0.8(间隔0.05)的两种损伤模式下 $K_I$ 值的变化对比。

图5  $K_I$  随单条裂纹无量纲长度变化规律Fig. 5 Variation of  $K_I$  with single crack dimensionless length图6  $K_I$  随等效裂纹无量纲长度变化规律Fig. 6 Variation of  $K_I$  with equivalent crack dimensionless length

可以看出,随着裂纹无量纲长度的增加,具有相同单条裂纹无量纲长度的单边裂纹损伤模式,随裂纹扩展其裂尖 $K_I$ 值的增大较双边裂纹损伤模式相比较为平缓;而在相同等效裂纹无量纲长度下,两种损伤模式的裂尖 $K_I$ 值变化规律基本一致。

## 2.2 外内径比值对 $K_I$ 的影响

由图7,8可见,在相同裂纹无量纲长度下,两种损伤模式的 $K_I$ 值皆随外内径比值的增加而减小。特别是对于 $R_2/R_1 < 2$ 的单边裂纹耳片,其裂纹尖端 $K_I$ 值随裂纹扩展而增大的速率明显比 $R_2/R_1 > 2$ 的耳片快,这在实际情况中应表现为 $R_2/R_1 < 2$ 的

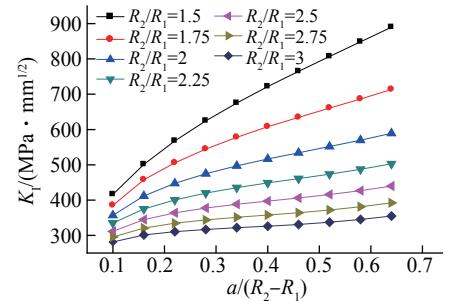


图7 不同外内径比值下单边裂纹耳片 $K_I$ 值随 $a/(R_2-R_1)$ 的变化趋势( $\beta=30^\circ$ ,  $R_1=10$  mm)

Fig. 7 Variation of  $K_I$  with  $a/(R_2-R_1)$  for lugs with single-edge crack at different ratios of  $R_2$  to  $R_1$

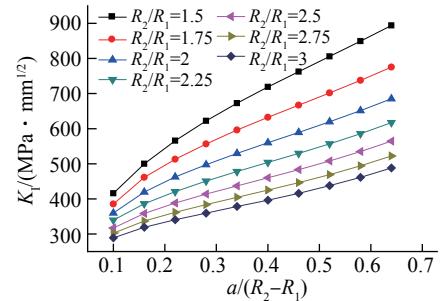


图8 不同外内径比值下双边裂纹耳片 $K_I$ 值随 $a/(R_2-R_1)$ 的变化趋势( $\beta=30^\circ$ ,  $R_1=10$  mm)

Fig. 8 Variation of  $K_I$  with  $a/(R_2-R_1)$  for lugs with double-edge crack at different ratios of  $R_2$  to  $R_1$

耳片裂纹扩展速率持续增大;  $R_2/R_1 > 2$  的耳片裂纹扩展存在 Paris 三区,有利于损伤容限设计及检查。

### 2.3 斜切角对 $K_I$ 的影响

图 9, 10 反映了内径  $R_1 = 10$  mm, 裂纹无量纲长度  $a/(R_2 - R_1) = 0.35$ , 外内径比值  $R_2/R_1 = 3$ , 斜切角  $\beta$  从 5°增至 43°(间隔 2°)时两种损伤模式下  $K_I$  值的变化对比。

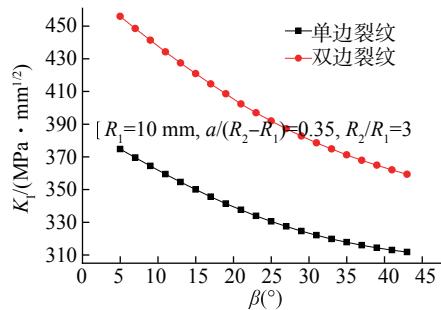


图 9 相同单条裂纹无量纲长度下  $K_I$  随斜切角  $\beta$  变化规律

Fig. 9 Variation of  $K_I$  with  $\beta$  in same single crack dimensionless length

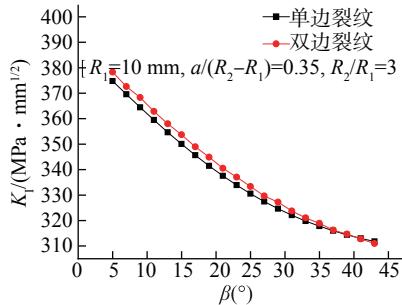


图 10 相同等效裂纹无量纲长度下  $K_I$  随斜切角  $\beta$  变化规律

Fig. 10 Variation of  $K_I$  with  $\beta$  in same equivalent dimensionless length

由上两图可见,随着斜切角的增大,两种损伤模式的  $K_I$  值皆呈下降趋势。具有相同单条裂纹无量纲长度的单边裂纹损伤模式,其  $K_I$  值较双边裂纹损伤模式的普遍低;而在相同等效裂纹无量纲长度下,两种损伤模式的  $K_I$  值大小与变化规律基本一致。

由图 11,12 可见,在相同裂纹无量纲长度下,两种损伤模式的  $K_I$  值皆随斜切角度的增大而减小。由于单边裂纹的增长对耳片孔边的应力分布产生了影响,耳孔无裂纹侧刚度较大,在裂纹稳定扩展过程中分担了较高的应力,从而使  $K_I$  值的增长曲线呈 S 型。而双边裂纹扩展模式则不存在这种现象,裂纹端部始终是高应力集中区,并随裂纹扩展持续增大。

从图 11,12 还可以看出,当斜切角增至 15°与 20°左右时,  $K_I$  值相对于直耳片有明显的下降。这在实际的裂纹扩展中表现为在相同的疲劳裂纹长度

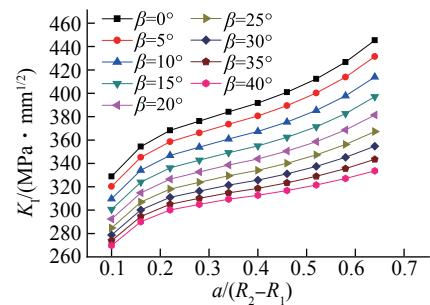


图 11 单边裂纹耳片在不同斜切角下  $K_I$  值随  $a/(R_2 - R_1)$  的变化趋势 ( $R_2/R_1 = 3$ ,  $R_1 = 10$  mm)

Fig. 11 Variation of  $K_I$  with  $a/(R_2 - R_1)$  for lugs with single-edge crack at different bevel angles

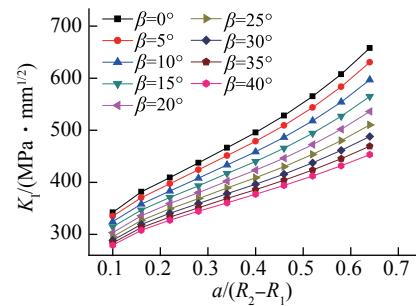


图 12 双边裂纹耳片在不同斜切角下  $K_I$  值随  $a/(R_2 - R_1)$  的变化趋势 ( $R_2/R_1 = 3$ ,  $R_1 = 10$  mm)

Fig. 12 Variation of  $K_I$  with  $a/(R_2 - R_1)$  for lugs with double-edge crack at different bevel angles

下,斜耳片的裂纹扩展速率要比直耳片的小,即斜耳片的疲劳寿命应比直耳片的长。

### 3 结 论

(1) 耳片在相同等效裂纹无量纲长度下,单边裂纹与双边裂纹两种损伤模式的裂尖  $K_I$  值随裂纹扩展或斜切角增加的变化规律基本一致。

(2) 对于  $R_2/R_1 < 2$  的单边裂纹耳片,其裂纹尖端  $K_I$  值随裂纹扩展而增大的速率明显比  $R_2/R_1 > 2$  的耳片大,  $R_2/R_1 > 2$  的耳片有利于进行损伤容限设计及检查。

(3) 在相同的裂纹长度下,斜切角 15°与 20°左右的斜耳片的裂纹扩展速率比直耳片的有明显下降,继续增加斜切角度对抗裂纹扩展能力无明显提升。

### 参 考 文 献:

- [1] RIGBY R, ALIABADI M H. Stress intensity factors for cracks at attachment lugs[J]. Engineering Failure Analysis, 1997, 4(2): 133-146.

(下转第 100 页)

- [5] ZANG S L, GUO C, THUILLIER S, *et al*. A model of one-surface cyclic plasticity and its application to springback prediction[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2011, 53:425-435.
- [6] BOUVIER S, GARDEY B H, TEODOSIU C. Characterization of the strain-induced plasticity anisotropy of rolled sheets by using sequences of simple shear and uniaxial tensile tests[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 174: 115-126.
- [7] THUILLIER S, MANACH P Y. Comparison of the work-hardening of metallic sheets using tensile and shear strain paths[J]. International Journal of Plasticity, 2009, 25: 733-751.
- [8] BOUVIER S, HADDADI H, LEVEE P, *et al*. Simple shear tests: Experimental techniques and characterization of the plastic anisotropy of rolled sheets at larger strains[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 172: 96-103.
- [9] THOMAS F B. Three-dimensional deformation field measurement with digital speckle correlation[J]. Applied Optics, 2003, 42(32):6383-6396.
- [10] 张阳,臧顺来,郭翔,等.基于数字散斑应变测量法的薄板各向异性力学性能研究[J].材料工程,2012(4):6-11.
- [11] 张树祥.任意角度受载的耳片强度分析[J].机械设计,1992(1):22-25.
- [12] 刁文琦.耳片接头的静强度可靠性分析与计算[J].飞机设计,1993(1):59-72.
- [13] 陈秀华.飞机平尾升降舵接头耳片承载能力分析与试验[J].计算机辅助工程,2009,18(1):18-21.
- [14] WALKER C A, MCKELVIE J, HYZER J B. An analysis of residual stress patterns resulting from hole expansion in an infinite plate, a thick cylinder, and an asymmetric lug[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1997, 27(1):75-87.
- [15] SATISH KUMAR K, DATTAGURU B, RAMAMURTHY T S. Analysis of a cracked lug loaded by an interference fit pin [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1996, 38: 967-979.
- [16] Vogwell J. Failure in lug joints and plates with holes[J]. Engineering Failure Analysis, 1995, 12(2):129-135.
- [17] 黄其青.对称与非对称斜削耳片危险部位及应力强度因子的有限元分析[J].航空学报,1998,19(4):466-470.
- [18] 伍黎明,何宇廷,安涛,等.斜耳片连接件应力强度因子表达式的计算研究[J].机械强度,2013,35(1):83-88.

## (上接第 95 页)

- [1] 张树祥.任意角度受载的耳片强度分析[J].机械设计,1992(1):22-25.
- [2] 刁文琦.耳片接头的静强度可靠性分析与计算[J].飞机设计,1993(1):59-72.
- [3] 陈秀华.飞机平尾升降舵接头耳片承载能力分析与试验[J].计算机辅助工程,2009,18(1):18-21.
- [4] WALKER C A, MCKELVIE J, HYZER J B. An analysis of residual stress patterns resulting from hole expansion in an infinite plate, a thick cylinder, and an asymmetric lug[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1997, 27(1):75-87.
- [5] SATISH KUMAR K, DATTAGURU B, RAMAMURTHY T S. Analysis of a cracked lug loaded by an interference fit pin [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1996, 38: 967-979.
- [6] Vogwell J. Failure in lug joints and plates with holes[J]. Engineering Failure Analysis, 1995, 12(2):129-135.
- [7] 黄其青.对称与非对称斜削耳片危险部位及应力强度因子的有限元分析[J].航空学报,1998,19(4):466-470.
- [8] 伍黎明,何宇廷,安涛,等.斜耳片连接件应力强度因子表达式的计算研究[J].机械强度,2013,35(1):83-88.

## “第 17 届全国残余应力学术会议暨国际残余应力研讨会”纪要

由中国机械工程学会材料分会、中国机械工程学会失效分析分会及中国物理学会 X 射线衍射委员会共同举办,由上海交通大学和爱派克测试技术(上海)有限公司承办的“第 17 届全国残余应力学术会议暨国际残余应力研讨会”于 2013 年 10 月 28 日至 11 月 2 日在上海朱家角召开。来自国内外共 183 家单位的 285 名代表参加了本次学术会议,共收到学术交流论文 142 篇。

会议开幕式由专业委员会秘书长上海交通大学姜传海教授主持,简要汇报了会议筹备过程之后,首先由专业委员会主任西安交通大学徐可为教授致辞,他总结了近几年我国残余应力研究与应用领域的可喜进展。随后上海交通大学材料科学与工程学院党委书记徐渊教授代表承办单位致辞,热烈欢迎来自国内外的与会代表。国外同行 Vincent-Ji 教授和 Mohammed-Belassel 博士介绍了国际残余应力领域的新技术和发展动态,为我们提供了宝贵经验。机械工程学会材料分会总干事长胡军发表了重要讲话,充分肯定了多年来本专业委员会的工作成绩,并对今后工作提出了更高的期望。

简单而隆重的开幕式后进行了学术交流,主要内容包括:①重要装备制造加工中残余应力,②关键零部件使用服役中的残余应力,③新材料及新工艺中的残余应力问题,④残余应力消除与调控技术,⑤残余应力与材料性能,⑥残余应力与零部件失效分析,⑦喷丸强化技术与残余应力,⑧微观应力与组织结构,⑨残余应力的测试与计算,⑩与残余应

力有关的其它问题。

残余应力界老前辈王仁智研究员及何家文教授等做了精彩的专题报告,传授了宝贵的理论知识和前沿研究成果,与会代表受益匪浅。学术交流共进行了两天,本次会议出现一批高水平的年轻同志,在会上积极交流、踊跃发言,增加了新生的力量。会议期间,还举办了为期一天的 X 射线应力测试技术培训班,收到了预期的效果。应我国残余应力行业的迫切需要,专业委员研制出 200 余套件的残余应力标样,免费分发给各位与会代表,得到了一致的好评。此外,还展示了国内外相关领域新型仪器和设备,安排厂商技术人员解答代表们感兴趣的问题。

会议期间,召开了专业委员会全体委员及资深委员会议,肯定了前两年的工作成绩,确定了今后两年的工作方向和目标,仍然要坚持残余应力基础研究与工程应用并重,并侧重解决我国重大技术装备、工艺与材料、基础元器件和集成系统中的残余应力相关问题。“第 18 届全国残余应力学术会议暨国际残余应力研讨会”拟定于 2015 年下半年召开,目前国内已有多家单位积极申报承办,专业委员会将经过充分协商、调研和慎重考虑后再确定。衷心感谢承办单位上海交通大学和爱派克测试技术(上海)有限公司对会议付出的辛勤劳动,十分感谢《机械工程材料》和《理化检验-物理分册》编辑部的大力支持,特别感谢各家赞助单位。

中国机械工程学会材料分会残余应力专业委员会

2013 年 11 月 5 日