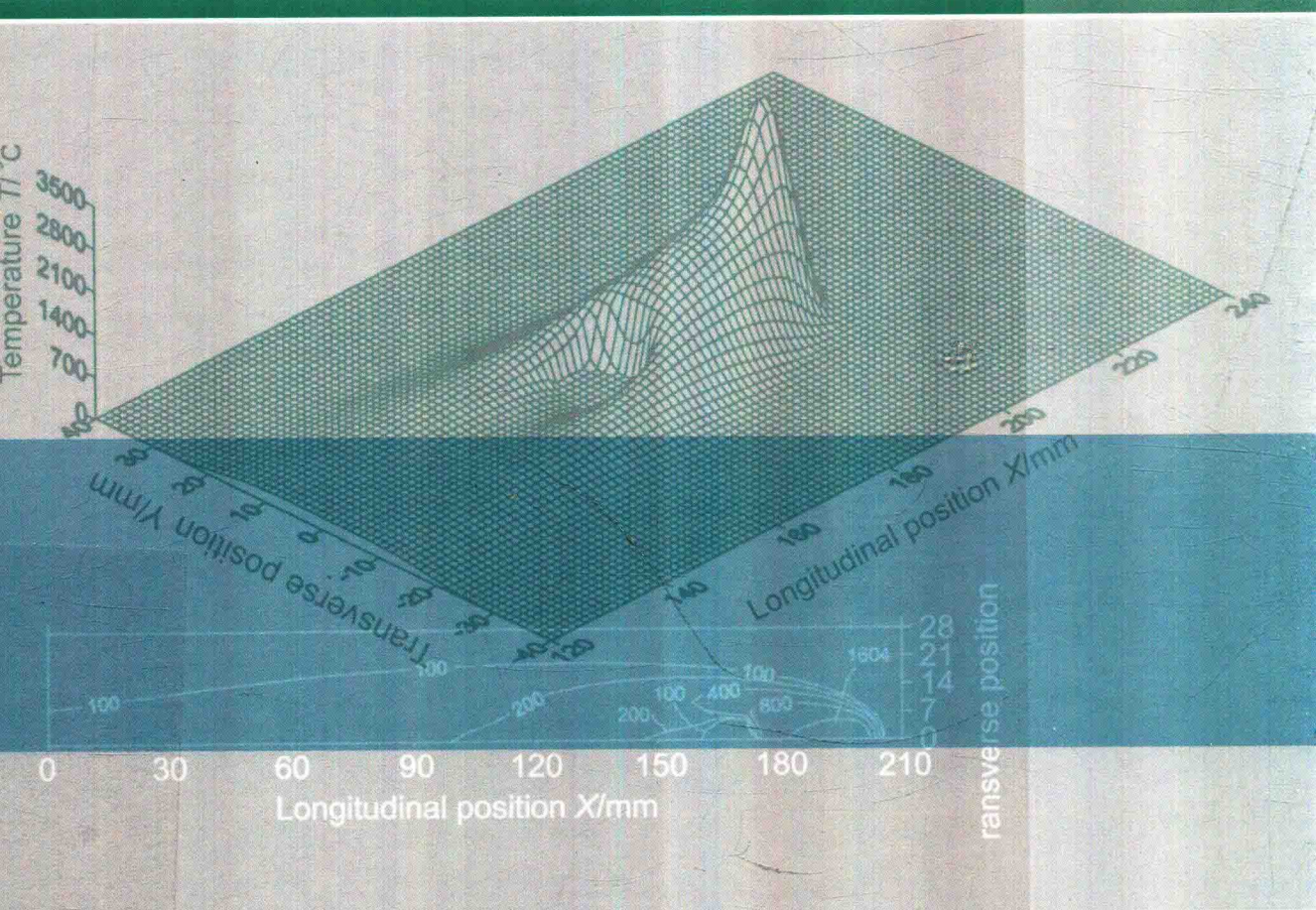


中國工程院 院士文集

天橋文集



航空工业出版社

关桥文集

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本文集包括了关桥主要著作的四个领域：焊接应力与变形论著与文章；航空特种焊接技术发展的论述；焊接科技体制、学科发展和学会工作方面的论述；国内外学术会议上发表的英、俄文论著。

本文集记录了关桥院士长期从事航空特种焊接制造技术与焊接结构学研究的成果，尤其是对焊接力学基础研究和焊接结构完整性研究方面的贡献；阐述了建立“低应力无变形焊接”的理论与工程实践；列举了近60年来在科研和工程第一线，主持和指导多项航空工业发展所急需的特种焊接新技术的开发与应用，培养了一批专业科研人才，为新型飞行器的研制和企业的技术改造提供了先进技术，开拓了我国航空特种焊接制造技术的诸多重要发展方向。

本文集可供焊接及相关领域的工程技术人员和管理人员，亦可供高等院校相关专业的教师和学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

关桥文集/关桥著. --北京:航空工业出版社,
2018.1

(中国工程院院士文集)

ISBN 978-7-5165-1347-7

I. ①关… II. ①关… III. ①航空工程—焊接—生产
工艺—文集 IV. ①V261.3-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第266885号

关桥文集

Guan Qiao Wenji

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话: 010-84936597 010-84936343

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2018年1月第1版

2018年1月第1次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 50.5 插页: 2 字数: 1288千字

印数: 1—500

定价: 258.00元

《中国工程院院士文集》总序

二〇一二年暮秋，中国工程院开始组织并陆续出版《中国工程院院士文集》系列丛书。《中国工程院院士文集》收录了院士的传略、学术论著、中外论文及其目录、讲话文稿与科普作品等。其中，既有早年初涉工程科技领域的学术论文，亦有成为学科领军人物后，学术观点日趋成熟的思想硕果。卷卷《文集》在手，众多院士数十载辛勤耕耘的学术人生跃然纸上，透过严谨的工程科技论文，院士笑谈宏论的生动形象历历在目。

中国工程院是中国工程科学技术界的最高荣誉性、咨询性学术机构，由院士组成，致力于促进工程科学技术事业的发展。作为工程科学技术方面的领军人物，院士们在各自的研究领域具有极高的学术造诣，为我国工程科技事业发展做出了重大的、创造性的成就和贡献。《中国工程院院士文集》既是院士们一生事业成果的凝练，也是他们高尚人格情操的写照。工程院出版史上能够留下这样丰富深刻的一笔，余有荣焉。

我向来以为，为中国工程院院士们组织出版《院士文集》之意义，贵在“真善美”三字。他们脚踏实地，放眼未来，自朴实的工程技术升华至引领学术前沿的至高境界，此谓其“真”；他们热爱祖国，提携后进，具有坚定的理想信念和高尚的人格魅力，此谓其“善”；他们治学严谨，著作等身，求真务实，科学创新，此谓其“美”。《院士文集》集真善美于一体，辩而不华，质而不俚，既有“居高声自远”之淡泊意蕴，又有“大济于苍生”之战略胸怀，斯人斯事，斯情斯志，令人阅后难忘。

读一本文集，犹如阅读一段院士的“攀登”高峰的人生。让我们翻开《中国工程院院士文集》，进入院士们的学术世界。愿后之览者，亦有感于斯文，体味院士们的学术历程。

徐匡迪

二〇一二年

代 序

关桥与低应力无变形焊接法

关桥 研究员、中国工程院院士。男，汉族，出生于1935年7月，山西人，毕业于苏联莫斯科鲍曼高等工学院；现任北京航空制造工程研究所研究员，科学技术委员会副主任，“高能束流加工技术”重点实验室学术委员会主任，“航空连接技术”重点实验室学术委员会主任，曾任北京航空航天大学兼职教授、博士生导师，国际焊接学会学术委员会委员，中国焊接学会理事长，国际焊接学会副主席。

主要业绩 长期从事航空焊接制造技术与焊接结构学研究，在焊接力学基础研究及特种焊接应用研究中取得了一系列开拓性、创造性的成果。率先开展了航空结构脉冲氩弧焊及扩散焊等工艺及设备研究，攻克了新机试制多项技术关键，为航空生产技术改造提供了先进技术与装备。在焊接力学及其工程应用研究中，采用试验与数值分析方法，揭示了控制焊接应力与变形的动态过程机理，取得突破性进展。发明了“低应力无变形焊接法”，攻克了长期危及飞行器和运载火箭薄壳结构安全和可靠性的焊接变形难题。先后获国家发明二等奖、部科技进步奖一等奖等多项奖励。1989年被国务院授予国家级有突出贡献的专家，同年获“全国先进工作者”称号。1991年获航空工业个人成就最高奖——航空金奖。1994年当选为中国工程院院士。1995年获国家发明奖二等奖。1996年获光华科技基金一等奖。1998年获何梁何利基金技术科学奖。1999年获国际焊接学会（IIW）终身成就奖——荒田吉明奖（Y. ARATA 奖）。2004年获英国焊接研究所（TWI）BROOKER 奖章。2005年获中国焊接学会“中国焊接终身成就奖”。2006年获“航空报国突出贡献奖”。2006年获中国机械工程学会“科技成就奖”。2010年获乌克兰三级功勋勋章。2011年获中航工业制造所“航空报国突出贡献奖”。2012年获中航工业制造所建所55周年“创新图强”杰出成就奖。2016年获中国航空航天月桂奖——“终身奉献奖”。

在航空、航天器上，为减轻自身重量，大量采用薄壁焊接结构，以提高有效载荷。但是，用熔焊方法制造这类薄壁承力结构时，由于移动热源（无论是电弧、等离子弧，还是电子束或激光束等）对金属构件的局部不均匀加热，在焊接熔池附近会产生极大的温度梯度，引起焊接应力和变形。在完成焊接后，由于热源离去，焊接瞬时的热应力和变形动态过程随即转化为在室温条件下的焊接残余状态的应力和变形。在薄壁焊接结构件上，焊接残余应力和变形的直观表现形态多为构件的失稳翘曲变形。这是在制造航空、航天重要承力薄壁焊接构件时，造成产品质量不稳定、结构几何形状偏离设计技术要求的主要问题，并直接危及飞行器结构的安全和可靠性。因此，控制焊接应力和变形的产生、发展过程，不但是当代焊接力学研究领域中的前沿课题，而且也决定着在航空、航天新型结构设计中，先进的焊接技术是否能得以合理应用的关键所在。

半个世纪以来，随着新的焊接方法在金属结构制造中越来越广泛地应用，人们与焊接应力和变形作斗争的技术也不断地发展和完善。通常所采取的工艺措施，是利用相应的装备，强迫冷却焊缝，降低焊接热输入，以减小焊接应力和变形。在实际生产中，这些方法的应用各有其局限性，很难做到没有变形或定量地控制残余应力水平。由于人们尚未寻找到理想的控制焊接应力与变形的办法，而从焊接原理引出的焊接残余应力与变形不可避免的认识，一直困扰着各国的焊接科技工作者。因此，在缺乏有力的理论指导的生产实践中，往往多停留于采取焊后减小已经产生的残余应力与变形的消极工艺措施，如焊后矫正等。这些消极的、不得不采取的工艺措施，不但费时耗资，而且还会在一些特殊材料的航空、航天薄壁焊接结构上形成材质损伤隐患。现代科学技术的发展，尤其是航空、航天等高技术的迅猛发展，为焊接技术的进步提供了有力的需求牵引，使焊接技术成为国内外制造工程中最活跃的领域；同时，也为焊接力学的学科发展提出了许多新的课题，要求有新的进展和突破。

与焊接应力和变形不可避免的传统认识相悖，关桥不但从理论上论证了“低应力无变形焊接法”的可行性，而且在生产实践中创造性地突破了薄板焊接变形控制的难关，证明了在焊接过程中定量、主动地控制焊接应力和变形的重要实用价值，取得了显著的技术经济成效。多年来，他潜心研究的一系列成果，丰富了焊接力学的学科内涵，提出了焊接不协调应变的“静态”和“动态”控制模型，引出了焊接力学研究的新方向，建立了焊接应力与变形控制的系统理论。

在20世纪60年代和70年代，关桥完成了多项飞行器特种焊接新技术研究和新型号机种研制的技术攻关任务。他从大量影响飞行器薄壳焊接结构完全性和可靠性的因素中，提炼出一个构思：必须从理论分析和试验研究两个方面同时着手，解决前人未曾攻克的难题——能动地、定量地控制焊接应力与变形，使焊接结构具有低应力无变形的结构完整性，确保飞行器焊接结构的质量。众所周知，控制焊接应力与变形，从来就是焊接工程界和学术界的热点问题。焊接是一种制造技术，但同时又是一个复杂的专业学科，它是现代科技多学科交融的结晶，包括了材料工程、冶金、传热传质、物理化学、力学、机械、电子等学科，是一门边缘学科。因此，当控制焊接应力与变形问题涉及到这些学科的交叉与综合，需要定量地而不是定性地进行分析时，就必须对前人已有的理论知识进一步深化和发展。

早在 20 世纪 60 年代初,当钛合金焊接结构刚开始应用于飞行器结构时,关桥就在自己的研究论文中深入地阐明了传统理论分析中“平截面假设”的局限性,以及这种假设对钛合金等这类具有特殊热物理性能的新结构材料的不适用性。他还论证了焊接残余应力峰值的大小与材料特性随温度变化的函数关系(材料的弹性模量、屈服应变、线膨胀系数),引出了在特定的焊接温度场中的“内拘束度”概念,证明了焊缝中的残余应力峰值将取决于“内拘束度”判据 I

$$I = \frac{\sigma}{\alpha ET}$$

式中: I ——焊接温度场中某点的内拘束度;

σ ——在被考察点的实际温度应力值;

α ——材料的线膨胀系数;

E ——材料的弹性模量;

T ——被考察点的实际温度。

就其物理意义而言,内拘束度就是在焊接温度场中某点的实际应力值与该点的温度应变受到完全拘束时的应力值的比值。理论分析表明,对于轴对称型瞬时线热源的径向和切向内拘束度均为 $I = 1/2$;只有当移动热源的速度趋近于 ∞ 时,才会出现平截面假设的条件,这时 $I = 1$ 。关桥还论证了由材料特性所决定的极限塑变比 $\alpha T_k / \varepsilon_s(0)$ 判据对于焊接残余状态所起的决定作用。 T_k 为材料处于零应力时的温度, $\varepsilon_s(0)$ 为材料的室温屈服应变值。基于这些论述,他正确地解释了钛合金、铝合金等新型飞行器结构材料焊接残余应力峰值低于材料屈服强度的内在机理。作为焊接力学的新论点,这一理论被国内外焊接专业教科书广为接受。

70 年代,计算机技术与有限元分析方法(简称有限元法)的结合已经显示了对于焊接力学发展可能做出的贡献,焊接时十分复杂的非线性传热和非线性热弹塑性力学过程的定量分析已成为可能。关桥在国际学术交往中敏锐地指出了在焊接力学研究的热点和前沿领域中的片面性:过多地依赖于有限元计算而忽视真实物理过程模拟的验证。他主持并开拓了焊接力学研究领域中的一个新方向——建立理论计算模型与实验分析验证相结合。他和他的研究小组以及他的学生们开展了焊接瞬态热应变云纹测试及云纹图像计算机处理技术的研究。正如后来评审该项成果的专家鉴定委员会所认定的“这是一项高难度的应用技术基础研究课题”。关桥所领导的课题组成功地解决了焊接瞬态热应变云纹测试的难题,其中包括高温、瞬间、大梯度热应变的云纹图像显示,定时连续记录全应变场信息,并建立计算机云纹图像数据处理系统。如图 1 所示,原来是看不见的微观的焊接热应变动态过程,借助于研制成功的焊接云纹仪可以直观地显示出来,并进行定量分析计算。

1992 年,关桥在国际焊接学会(IIW)于马德里举行的第 45 届年会上发表了题为《高温云纹测试法对焊接热应变分析有限元程序的验证》的论文。在讨论中,第十专业委员会主席、国际著名断裂力学和焊接力学专家、英国曼彻斯特大学 F. M. Burdekin 教授给予了高度评价,他指出:“对当前众多的焊接力学有限元分析计算机软件程序进行试验验证是必要的,而且是非常重要的;这是把已开发的软件能可靠地用于工程实践的

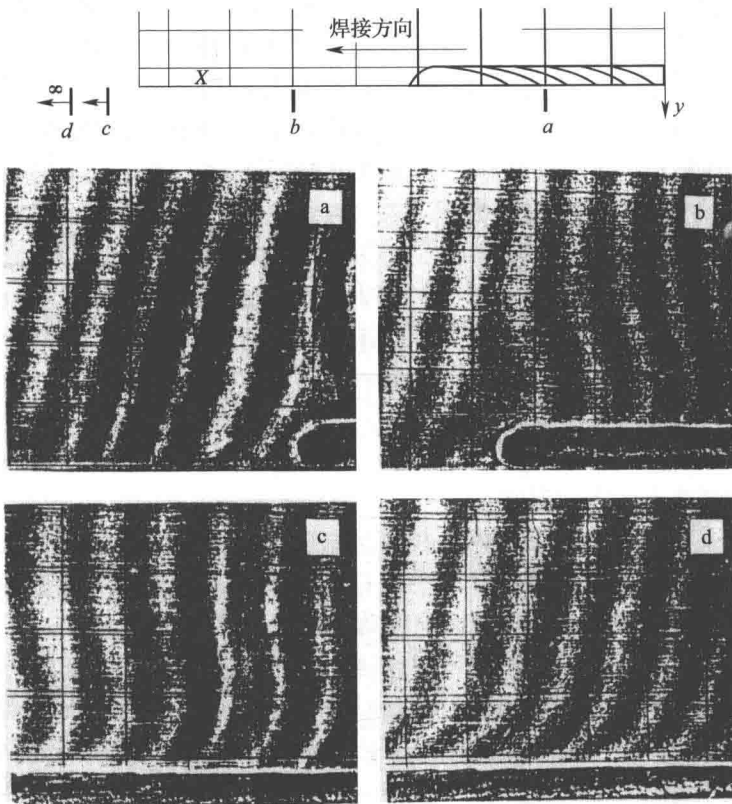


图1 焊接过程中电弧附近云纹图像所显示的金属运动规律
 a—电弧开始进入画面右下方；b—电弧位于画面下侧中间；
 c—电弧已离开画面；d—室温下的残余状态

关键所在，而这种验证也正是多年来关桥教授所追求的目标。”为了推动焊接力学这一重要学科方向的发展，Burdekin 教授建议由该专业（焊接残余应力与断裂）委员会通过决议，将这篇论文在国际焊接学会的权威性刊物 *Welding in the World* 杂志上发表 (Vol. 31, No. 5, 1993)。关桥和他的研究小组所取得的这项研究成果在国际上受到的重视印证了国内专家鉴定委员会于 1990 年所做出的结论：该项研究成果的水平及取得的实际结果均处于国际领先地位。

在焊接力学研究中，关桥锲而不舍地对焊接过程热应变的探索目的在于实现能动地控制焊接不协调应变；同时也实现从定性的、概念性的认识到精确的、定量的分析计算的飞跃。正如关桥在 80 年代初于北京航空航天大学开设“焊接力学问题选讲”课程时所指出的“焊接专业学科从定性的、概念性的知识发展到定量的、精确的理论，必须通过物理数学模型的建立和正确的试验验证；在定性认识和定量分析之间架设桥梁，才能把专业基础知识应用于求解工程实际问题”。

在 70 年代末，当关桥探索飞行器薄壳焊接结构变形控制理论和实施方案时，曾对苏联 Burak 等人用温度场控制焊接变形的论述进行了试验验证。结果表明，在前人的工作中并没有解决薄壳构件（尤其是 4mm 以下的薄件，飞行器构件多属这

类) 在焊接过程中的瞬态失稳问题, 从而导致给定的温差拉伸失效, 这一点在理论和实践中均被忽略。必须采用不同于传统认识的新方案, 来解决航空、航天器构件在焊接过程中的面外失稳变形, 以保证预置温度场所提供的温差拉伸的有效性。在这些机理性分析与试验的基础上, 关桥提出了“低应力无变形焊接法”的新构想。

图2为低应力无变形(Low-Stress No Distortion, LSND)焊接法原理示意。 T 为给定的预置温度场分布曲线; σ 为与 T 相对应的温差应力分布曲线; P_1 与 P_2 是两个外加的拘束力, 用以阻止工件的瞬态面外失稳变形。图上分别标出1、2、3的三个不同的冷却—加热—冷却区域。预置温度场的最高温度 T_{\max} 和 P_2 距焊缝中心线的距离分别为 H 和 G 。 σ_{\max} 是在焊缝区的最大温差拉伸应力值。这样, 由预置温度场和构件拘束条件所形成的温差拉伸效应会跟随焊接热源, 并在熔池前后控制着焊接热应变和应力的产生和发展, 直至焊后, 在室温条件下达到残余状态。

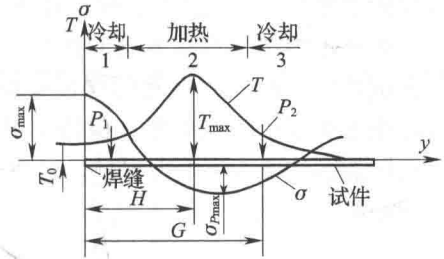


图2 低应力无变形 (LSND) 焊接法原理示意图

理论分析和系统实验结果表明, 预置温度场只是实现低应力无变形 (LSND) 焊接的必要条件而并非充分条件。外加拘束力 P_2 可有效地防止薄壁工件的瞬态面外失稳变形, 避免失稳带来的温差拉伸效应减弱和内应力场势能降低。可见, 这种双支点加压系统所形成的拘束条件是构成 LSND 焊接法得以实施的充分条件。在 LSND 焊接法中, 必要条件和充分条件相辅相成, 实现了控制薄板焊接应力与变形中的新突破; 在完成焊接后, 工件保持完全无变形的状态, 平整如初。

图3所示为采用普通焊接方法和采用 LSND 焊接法的对比。图3(a)为焊缝区不协调应变量 ε_x^p 的分布规律, 在普通焊接后(见曲线1), ε_x^p 在5A06(LF6)铝合金1.5mm厚板焊缝区的最大值为 -15×10^{-4} , 但在 LSND 焊后(见曲线2), ε_x^p 的最大值已减小

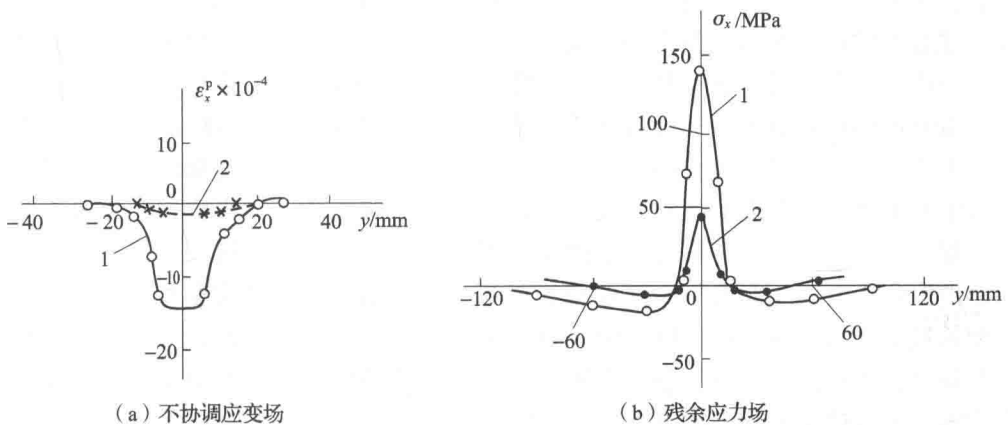


图3 采用普通焊接方法(见曲线1)和LSND焊接法(见曲线2)所得不协调应变场和残余应力场的对比

到在工程上可以忽略不计的程度。在图3 (b) 上可以看出, 普通焊后的残余应力分布规律如曲线1所示, 焊缝中的拉应力峰值 $\sigma_{x\max}$ 可达140MPa; 而在LSND焊后(见曲线2), 这个峰值降低了约70%, 在焊缝以外的压应力值也相应地降到可以忽略不计的程度, 远低于工件受压的临界失稳应力, 不再发生压屈失稳变形。通过调整工艺参数, 不但可以定量地控制 $\sigma_{x\max}$ 值, 而且还可以使残余应力场重新分布, 以有利于变形控制。

图4所示为两种焊接方法的残余宏观变形对比。从图4 (a) 照片可以直观地看出, 铝合金试件(1.6mm)在普通焊后失稳翘曲变形严重(上部试件); 而在LSND焊后, 试件完全没有发生失稳变形, 保持了焊前的平直状态(下部试件)。若以试件在焊后偏离原始平面的挠曲度 f 作为判据, 对比两种焊接方法的效果, 在图4 (b) 上可见, 采用LSND焊接后, $f = 0$ 。

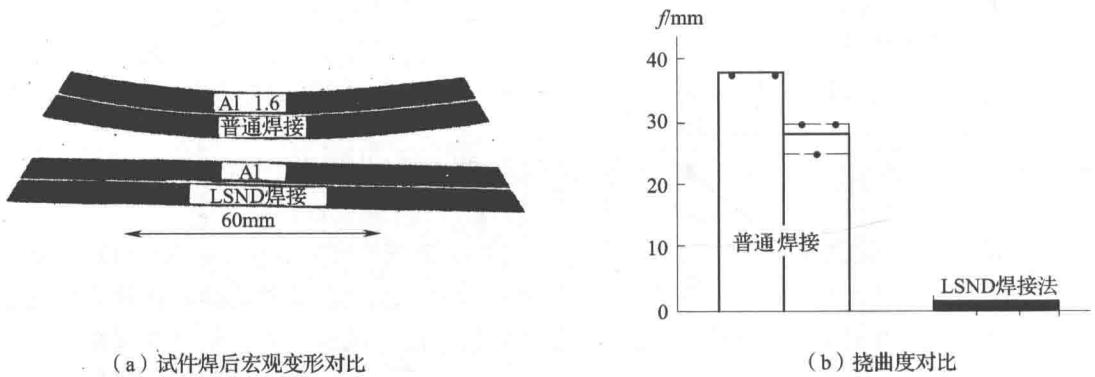


图4 LSND焊接与普通焊接对比

在LSND焊接法取得了突破性进展后, 1987年, 关桥带着这项已获准中国发明专利(专利号: 87100959.5)的新技术, 应英国皇家学会的邀请, 作为皇家学会对华研究员, 在剑桥英国焊接研究所领导了“低应力无变形焊接”课题组, 对这项新技术继续进行了卓有成效的深入合作研究和技术开发, 进一步发展了已取得的成果。英国皇家学会会员、著名国际焊接力学专家、英国焊接研究所所长 A. A. Wells 博士称赞这是一项奇迹般的突破, 并向皇家学会主席 G. Porter 教授推荐作为中英学者合作研究的新贡献, 由中英双方共同申报欧洲和国际专利, 以利于技术市场的开拓。

关桥和他的课题组在深入开展应用技术基础研究的同时, 把低应力无变形焊接法直接用于攻克飞行器制造工程中薄壳结构焊接变形的难关。利用发明的方法原理, 设计制造了专用装备, 实现了航空发动机生产和新机研制中的无变形焊接, 排除了质量隐患, 提高了产品质量和可靠性, 取得了良好的经济效益。新型航天运载火箭的燃料贮箱是由铝合金制成的典型薄壳焊接结构, 为了保证结构的几何完整性, 对制造提出了苛刻的技术要求: 焊后筒体母线的不直度应不大于1/1000。因此, 焊接变形问题成了新型航天运载火箭研制中的技术关键。关桥指导课题组, 用低应力无变形焊接法突破了许多常规方法不能解决的难题, 不但使箭体燃料贮箱保持了良好的结构几何完整性, 而且还进一步改善了焊接接头的力学性能, 排除了原来生产中经常出现的质量隐患, 提高了火箭箭体的整体质量和可靠性。

1993年，中国航天工业总公司和中国航空工业总公司先后召开了有关薄壁结构低应力无变形焊接技术的两项研究成果专家评审鉴定会。专家们高度评价了关桥和他领导的课题组所取得的成就，认为“低应力无变形焊接法科研成果在理论上证明了直接在焊接过程中积极控制方法的可行性；经过实践，突破了生产技术难题，是一项创造性的发明成果，构思新颖，效益显著，实用效果突出”。专家们还一致认为“这项成果属于在焊接结构变形控制领域中的重大突破，对保证航空、航天工业中薄壁焊接结构的可靠性、完整性有重大作用，对焊接力学学科发展做出了重要贡献。此项发明成果为国内外首创，属国际领先水平”。

关桥把由预置温度场控制的低应力无变形焊接法定义为“静态控制”焊接不协调应变的方法。为了适应在工程应用中焊接操作的多样性，他又指导研究组向“动态控制”的新方向迈进。“动态控制”的新构想是：不再依赖于静态的预置温度场，直接利用移动热源所形成的准定常温度场，以热沉（Heat Sink）跟随热源，形成一个移动的热源—热沉多源系统。由这个多源系统所确定的准定常畸变温度场如图5(a)所示，图5(b)为准定常畸变温度场的等温线。与正常的焊接温度场的最大区别在于：在热源的高峰温度之后，即跟随有一个由热沉吸热所形成的温度低谷，在二者之间产生极大的温度梯度；由此，形成了在刚凝固的熔池附近高温金属上的动态温差拉伸效应。

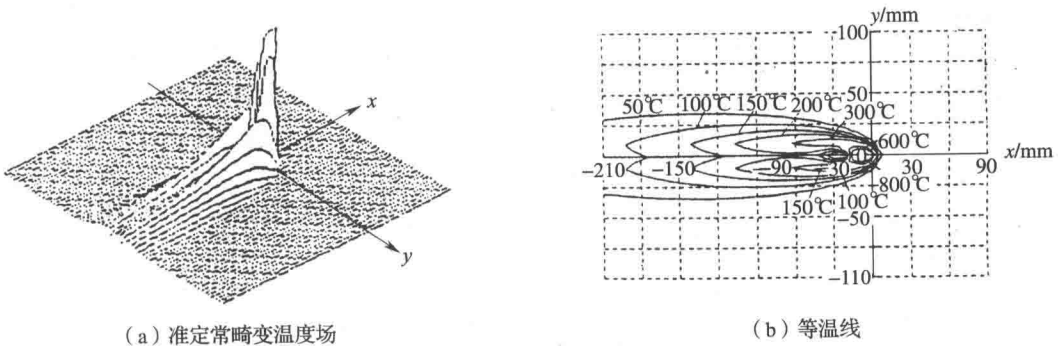


图5 热源—热沉系统的准定常畸变温度场及其等温线

试验结果也已表明，动态控制低应力无变形焊接法不但可以直接在焊接过程中定量地控制不协调应变的产生和发展过程，获得无变形效果，而且这种方法适用于复杂、空间曲线焊缝的多样性操作。动态控制 LSND 焊接法为焊接力学的发展及工程应用又展现了新的前景。

目 录

第 1 篇 焊接应力与变形

焊接应力与变形	(3)
钛合金薄壁焊接构件的残余应力、变形和强度	(78)
航宇薄壳结构的低应力无变形焊接新技术	(196)
动态控制的低应力无变形焊接新技术	(204)
低应力无变形焊接新技术——薄板构件的 LSND 焊接法	(212)
预变形工艺研究	(219)
焊接瞬态热应变的云纹测试	(228)
焊接力学问题选讲	(235)
焊接力学实验	(320)
焊接力学在航空构件上的应用	(333)
薄板氩弧点状加热应力应变过程的数值分析	(345)
焊接瞬态热应变的云纹测试技术	(356)
焊接热源有效利用率的测试算法	(360)
推广应用焊缝滚压工艺中的几个问题	(374)
“释放法”测定焊接残余应力——采用 YCY 型机械应变仪测试技术	(383)
钛合金薄壁构件的焊接应力与变形	(390)
薄壁圆筒单道环形对接焊缝所引起的残余应力与变形	(399)

第 2 篇 航空特种焊接技术

航空特种焊接技术的发展	(409)
真空电弧焊接与钎焊技术研究	(424)
《航空制造工程手册——焊接》分册绪论	(429)
我国航空工业中的焊接技术进展	(432)
新型结构材料的焊接/连接技术面临的挑战	(439)
某发动机薄壁机匣焊接生产与熔化极脉冲氩弧焊工艺的应用	(444)

高能束流加工技术——先进制造技术发展的重要方向	(458)
我国高能束流焊接技术的发展	(467)
关于建立“高能束流加工技术”国家级实验室的建议	(475)
搅拌摩擦焊——未来的连接技术(摘要)	(477)
飞行器制造工程中的科学技术问题	(478)
飞行器结构整体化制造工程中的焊接/连接/成形技术	(485)
高能束焊接/加工与固态连接技术的创新发展	(494)
航空特种焊接/连接技术体系的形成和发展	(496)
广义增材制造	(506)
航空特种焊接/连接技术与广义增材制造	(513)
大厚度钛合金结构电子束焊接制造基础研究	(528)
焊接/连接与增材制造(3D打印)	(529)
高能束焊接、加工与增材制造	(539)

第3篇 焊接学会、科技体制、学科发展

把握市场经济 改革运行机制 增强自主能力 走向世界科技 ——在第七次全国焊接学术会议上的工作报告	(551)
《中国焊接学会30周年纪念文集》前言	(557)
焊接学会30年	(558)
吸收外来技术重在创新	(575)
从英国焊接研究所的经费来源看我国科技体制改革中的“体制”与 “机制”之间的关系	(579)
为《焊接结构生产工艺、机械化与自动化图册》出版所写的译序 ——向我国焊接界推荐一本好书	(583)
《焊接热效应——温度场、残余应力、变形》中文版序	(585)
在“中国航空工业院士丛书”首发式上的发言	(587)

第4篇 英、俄文论著

Efforts to Eliminating Welding Buckling Distortions —from Passive Measures to Active In-Process Control	(591)
A Survey of Development in Welding Stress and Distortion Controlling in Aerospace Manufacturing Engineering in China	(599)
Low Stress No-Distortion Welding for Aerospace Shell Structures	(617)
Dynamic Control of Welding Distortion by Moving Spot Heat Sink	(626)
Progress of Welding Technology in Aviation Industry	(632)

Success of the 47th Annual Assembly of IIW	
—A Milestone in Development of Welding in China	(642)
Verification of FE Programs for Welding Thermal Strain	
—Stress Analysis Using High Temperature Moiré Measurement	(648)
Moiré Analysis of Thermal Strain During Welding	(654)
Preface (Proc. of the Int. Conf. on “New Advances in Welding and Allied Processes”, 8 ~ 10 May 1991, Beijing, China)	(659)
Low Stress No-distortion (LSND) Welding	
—A New Technique for Thin Materials	(661)
A Study of Specific Characteristics in Transient Welding Strain - Stress Formation	(677)
СНЯТИЕ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ТОНКОЛИСТОВЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ	(685)
УСТРАНЕНИЕ СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ТОНКОЛИСТОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ОТ4-1 и ВТ5-1 ПУТЕМ ПРОКАТКИ ШВОВ РОЛИКАМИ	(695)
Control of buckling distortions in plates and shells	(702)
Thermal Tensioning Effects to Prevent Welding Buckling Distortions in Manufacturing of Thin - Walled Aerospace Shells and Panels	(743)
Generalized Additive Manufacturing Based on Welding/Joining Technologies ...	(757)
Low Stress No Distortion Welding Based on Thermal Tensioning Effects	(767)
自述——把握机遇、奋斗奉献	(787)
编后语	(790)

第 1 篇 焊接应力与变形

焊接应力与变形^①

焊接应力与变形是直接影响焊接结构性能、安全可靠性和制造工艺性的重要因素。它会导致在焊接接头中产生冷、热裂纹等缺陷，在一定的条件下还会对结构的断裂特性、疲劳强度和形状尺寸精度有不利的影响。在构件制造过程中，焊接变形往往会引起正常工艺流程中断。因此掌握焊接应力与变形的规律，了解其作用与影响，采取措施控制或消除，对于焊接结构的完整性设计和制造工艺方法的选择，以及运行中的安全评定都有重要意义。

1 基本概念^[1~6]

1.1 产生机理、影响因素及其内在联系

图1给出了引起焊接应力和变形的主要因素及其内在联系^[6]。焊接时的局部不均匀热输入（图1上部）是产生焊接应力与变形（图1下部）的决定因素。热输入是通过材料因素、制造因素和结构因素所构成的内拘束度和外拘束度（图1右侧）而影响热源周围的金属运动，最终形成了焊接应力和变形。从图1的左侧可见，材料因素主要包含有材料特性、热物理常数及力学性能等，因温度变化而异（热[膨]胀系数 $\alpha=f(T)$ ，弹性模量 $E=f(T)$ ，屈服强度 $R_{eL}=f(T)$ ， $R_{eL}(T)\approx 0$ 时的温度 T_k 或称“力学熔化温度”，以及相变等）；在焊接温度场中，这些特性呈现出决定热源周围金属运动的内拘束度。制造因素（工艺措施、夹持状态）和结构因素（构件形状、厚度及刚度）则更多地影响着热源周围金属运动的外拘束度。

焊接应力和变形是由多种因素交互作用而导致的结果。通常，若仅就其内拘束度的效应而言，焊接应力与变形产生机理可表述如下：焊接热输入引起材料不均匀局部加热，使焊缝区熔化；而与熔池毗邻的高温区材料的热膨胀则受到周围材料的限制，产

^① 此文原载于《焊接手册》（第3版修订本）。第3卷焊接结构第1篇焊接结构基础第4章“焊接应力与变形”。作者：关桥；审者：赵海燕。中国机械工业学会焊接学会编，机械工业出版社于2015年6月出版。