

文章编号:1002-025X(2010)07-0001-04

# 爆炸焊数值模拟研究进展

王建民<sup>1</sup>, 王艳芳<sup>1</sup>, 张 燕<sup>2</sup>

(1.海军后勤技术装备研究所, 北京 100072; 2.海军工程质量监督站, 北京 100161)

**摘要:** 由于爆炸焊的瞬时性和不可接触性, 爆炸焊数值模拟研究尤为重要。本文对爆炸焊近年来在数值模拟方面的研究进行了综述, 重点分析了目前爆炸焊数值模拟研究中存在的问题与不足, 阐述了未来爆炸焊数值模拟研究的发展方向。

**关键词:** 爆炸焊; 数值模拟; 焊接参数; 研究现状

**中图分类号:** TG456.6      **文献标志码:** B

## 0 前言

爆炸焊是上世纪 40 年代 Carl 最早发现的一种焊接技术<sup>[1]</sup>, 自投入工业应用以来, 国内外广大学者对其进行了大量研究。目前, 爆炸焊技术已在化工、石油、造船、军事、核工业、航空航天等领域有了广泛的应用。

由于爆炸焊过程的不可接触性和瞬时性, 直接对爆炸焊过程进行试验研究尚存在一定困难, 对爆炸焊进行数值模拟研究就显得尤为必要。此外, 爆炸焊工艺复杂, 焊接过程参数较多, 既包括碰撞速度、碰撞角、间隙等, 又包括炸药类型、装药密度、爆速等。通过对爆炸焊的数值模拟可方便地了解爆炸焊过程, 优化焊接参数, 有效地减少试验次数, 降低试验成本, 因此, 对爆炸焊进行数值模拟研究具有重要意义。近年来, 国内外许多学者在爆炸焊数值模拟研究方面进行了大量研究, 取得了重要进展, 这些研究大大方便了爆炸焊焊接工艺参数的选取, 进一步揭示了爆炸焊机理, 使人们进一步了解了爆炸焊过程。

## 1 爆炸焊的基本理论

爆炸焊是利用炸药爆炸瞬间产生的巨大能量作为能源使金属产生塑性变形、熔化, 并达到原子间结合的一种焊接技术, 其原理是依靠爆炸产生的冲击和摩擦作用把待焊金属表面的氧化膜破碎并清除, 使新鲜的金属表面裸露, 利用爆炸产生的高压脉冲载荷推动

两金属或多种金属高速撞击而焊接在一起。当炸药一端被引爆后, 爆炸产物形成高压脉冲载荷, 直接作用在覆板上, 覆板被加速, 在几微秒内, 覆板速度达几百米/秒。它从起始端开始, 依次与基板碰撞, 当两金属板以一定角度相撞时会产生很大的碰撞压力, 且大大超过金属的动态屈服强度, 因而碰撞区产生高速度的塑性变形, 同时伴随有热效应。此时碰撞面的性质类似于流体, 这样在两金属板的内表面将形成两股运动方向相反的金属射流, 一股是碰撞点前的自由射流向未结合的空间高速喷出, 冲刷金属表面的氧化膜, 使金属露出了新鲜的清洁表面, 为两种金属的结合提供了条件。另一股是在碰撞点之后的凸角射流, 它被凝固在两金属板之间形成两金属的冶金结合<sup>[2]</sup>。

## 2 爆炸焊数值模拟研究现状

自上世纪 80 年代开始, 国内外许多科技工作者开始用计算机数值模拟技术研究爆炸焊机理、辅助确定保障焊接试验参数。尤其是近年来, 随着计算机技术的发展, 人们对爆炸焊数值模拟研究技术也不断深入, 进一步促进了爆炸焊技术与理论的发展。综合国内外专家近年来对爆炸焊数值模拟的研究现状, 爆炸焊数值模拟研究分为爆炸焊过程数值模拟和爆炸焊焊接参数计算机辅助设计两个方面。

### 2.1 爆炸焊过程数值模拟研究现状

最早进行爆炸焊过程数值模拟研究的学者是 Oberg, 他在上世纪 80 年代初首次采用拉格朗日方法模拟了爆炸焊过程中射流的产生<sup>[3]</sup>, 从而揭开了人们对爆炸焊数值模拟研究的序幕。

Akihisa 在 1997 年利用弹塑性材料的二维有限差分方法模拟了爆炸焊过程中波状界面的产生过程, 在研究中 Akihisa 以对称铜板爆炸焊接过程为研究对象, 经数值计算, 结果表明该模型可较好地模拟爆炸焊过程中波状界面的形成, 并且得出波状界面的波高和波长比与涡流状区域中心的纵间距和横间距比分别接近于常数 0.3 和 0.22 的结论<sup>[4-5]</sup>。这种模拟研究对界面成波机理的认识具有一定的指导意义, 但这种模型是在假设波状界面和涡街的产生是由界面剪切流的速度分布不均和垂直方向上的周期性扰动引起的, 因此具有一定的局限性, 它可以较好地解释对称碰撞条件下波状界面的产生, 但却不能对非对称条件下爆炸焊波状界面的产生给予很好的解释。

Akbari 对爆炸焊的数值模拟进行了深入研究, 他利用威廉斯堡状态方程与 AUTODYN 软件结合模拟了爆炸焊的全过程, 分析了爆炸焊过程中的压力分布、速度分布、剪切应力分布和塑性应变分布, 并重点模拟了爆炸焊射流、平直和波状界面的形成, 且数值模拟的波形大小和射流速度与试验结果基本一致, 认为并能按焊接要求确定爆炸焊焊接参数<sup>[6-8]</sup>。因而对大面积复合板的工业化生产具有重要的实用价值, 但该软件无法模拟两金属表面的黏着过程, 也无法模拟粗糙表面金属的爆炸焊过程, 认为只有在网格密度划分足够细的情况下才能出现射流。该方法克服了以往只能模拟高爆炸药的限制, 具有积极的意义。

Mohammad T 等人采用 ABAQUS 有限元方法分析了爆炸焊过程, 通过数值模拟探讨了爆炸焊工艺参数对界面结合处应力和应变的影响, 确定了碰撞区域应变和剪切应力的影响因素, 并且通过试验对数值模拟结果进行了验证, 数值模拟结果发现, 有限元网格尺寸对爆炸焊过程中射流的出现有重要影响<sup>[9]</sup>。该结果同 Akbari 的研究结果类似, 但 Mohammad 对此现象未能很好地解释。

刘成等人采用间隙元法模拟了金属圆管的爆炸焊问题, 并对爆炸焊全过程进行了详细的分析<sup>[10]</sup>, 认为爆炸焊是大面积的粘弹塑性接触问题, 当爆炸产生的压力达到某一临界值时, 内管和外管即可接触产生焊接, 由此得到实现焊接所需的最低爆炸压力, 即最小装药密度。但这种方法只从力学角度分析了爆炸焊的

接触问题, 对于爆炸焊过程中装药量的确定具有一定的指导作用, 但对爆炸焊界面的结合机理不能很好地解释, 因此具有一定的局限性。

Grignon 等人利用 Raven 软件对 6061 T0 铝合金的爆炸过程进行了数值模拟, 模拟出了爆炸焊接界面的射流和平直界面的产生, 计算表明随着碰撞角与两金属间距离的增大, 焊接结合面的结合形式由波形界面逐渐变为平直面, 同时物理试验结果与数值模拟结果的吻合度比较好<sup>[11]</sup>, 但他没解释界面产生结合的标准。

谢飞鸿等人采用瑞利-里兹法计算模型, 根据弹性力学的变分原理, 计算了碰撞点处的瞬时应力场, 同时对不同的碰撞角和碰撞压力进行了模拟计算, 获得了碰撞点处的应力场分布的基本规律<sup>[12]</sup>, 其研究对了解爆炸载荷作用下材料的性能及材料结合具有一定的指导作用。

笔者等人通过 MSC.Dytran 软件对爆炸焊过程进行了三维动态数值模拟研究, 通过研究获得了爆炸焊过程中覆板的碰撞压力、碰撞速度的分布特点及规律, 并通过理论、经验公式进行了验证<sup>[13]</sup>。其研究虽能较好地模拟爆炸焊焊接过程, 但缺乏试验验证数据, 并且没有对爆炸焊的其他参数进行模拟。

薛治国等人利用非线性有限元程序 ANSYS/LS-DYNA 对大面积钛/钢复合板的焊接过程进行了数值模拟, 通过模拟获得了爆炸焊过程中的应力应变分布图, 并重点分析了覆板的应力情况, 给出了覆板上几个特殊点的应力、等效塑性应变等随时间的变化曲线, 从理论上分析了爆炸焊焊接裂纹产生的原因, 对合理选择爆炸焊焊接参数、预防裂纹产生具有重要意义<sup>[14]</sup>。

Mamalis 等人研究了超导粉末陶瓷与金属的爆炸焊过程, 建立了有限元模型模拟爆炸焊过程中压力、温度分布及粉末尺寸的变化<sup>[15]</sup>。首次采用数值模拟方法研究了爆炸焊过程中的温度分布特点, 对进一步研究爆炸焊界面金属特性及界面结合机理具有积极意义。

由前述可以看到, 对爆炸焊过程进行的数值模拟研究多集中于爆炸焊界面应力、压力的分布及爆炸焊射流、界面形态上, 较少有学者通过数值模拟研究基、覆板的结合过程, 因此, 今后爆炸焊数值模拟研究应重点模拟基、覆板的结合过程, 深层次地揭示爆

炸焊接界面的结合机理。

## 2.2 爆炸焊参数辅助计算研究现状

爆炸焊参数多,通过试验确定爆炸焊参数成本高、危险性大、再现性差,因此为降低试验成本,许多学者通过计算机辅助设计爆炸焊焊接试验参数。

Vaidyanathan 等开发了爆炸焊计算机辅助设计系统,该程序不仅能根据焊接材料的性质选择最合适的炸药品种、最适宜的焊接载荷,而且能预估焊接界面的结合状态和强度,大大方便了不同金属爆炸焊焊接参数的选取<sup>[16]</sup>。

王宇新等人根据覆板运动速度的列契特公式应用计算机编程,给出了覆板在炸药滑移爆轰波的作用下的飞行姿态仿真曲线,并利用该程序辅助选取了较为合适的爆炸焊焊接参数<sup>[17-18]</sup>,其研究方便了爆炸焊焊接参数的选取,对于减少重复试验,降低试验成本具有积极意义。其后,王宇新、高勇军等人利用爆炸焊窗口的半经验关系式,通过计算机编程建立了爆炸焊窗口计算机仿真系统<sup>[19]</sup>。该系统可对多种金属的爆炸焊窗口进行模拟验证,并且提供了2种不同坐标系下的双金属焊接窗口,用户可以使用计算机模拟的焊接窗口曲线去指导试验和工程实践。张振远采用拟合方法,按参数下边界条件优化的原则,建立了爆炸焊参数计算的计算机辅助设计系统<sup>[20]</sup>。

文献根据爆炸焊窗口理论,综合分析了相关爆炸焊焊接参数的计算方法,利用 Visual C++ 编制了爆炸焊焊接参数计算机辅助设计程序,减少了试验次数,方便了爆炸焊焊接参数的选取<sup>[21]</sup>。此外,樊新民等人也根据爆炸焊窗口理论编制程序并用于绘制了钽-钢爆炸复合的焊接性窗口<sup>[22]</sup>。

陈健美等人在机械振动理论的基础上建立了钢坯爆炸焊的解析计算模型,通过此模型获得了爆炸加工的动态响应特性,并获得了焊接性能的影响参数,为工程实践中优化参数和动态分析提供了有效工具<sup>[23]</sup>。

高勇军等人利用计算机辅助设计对爆炸焊焊接参数进行了计算,通过计算绘制了不锈钢与普通钢的爆炸焊的焊接性窗口<sup>[24]</sup>。

文献[25]对爆炸焊的温度进行了分析计算,该文献采用有限差分方法,在热传导效应的基础上求解了金属粉末爆炸烧结过程中的温度场分布,并且通过计

算表明,爆炸焊引起的温升随来流速度和碰撞角度的增加而升高,其研究对于了解爆炸焊过程中的温度分布特点及研究爆炸焊界面的结合机理具有重要意义。

## 3 结论

综上,近年来国内外学者通过数值模拟建立了各种各样的数理模型对爆炸焊进行了大量研究,但这些研究主要集中在爆炸焊焊接参数的辅助选取和爆炸焊过程中某些试验现象的仿真上,虽然对爆炸焊研究具有一定的促进作用,但还不能深入地揭示爆炸焊焊接机理,指导爆炸焊工业生产。

爆炸焊是一个非常复杂的过程,其过程涉及到爆炸物理学、金属冶金学等诸多学科,目前尤其缺乏材料在高温高压下的性能数据,给爆炸焊数值模拟研究带来一定困难,迄今尚没有一种较好的数理模型可完全模拟爆炸焊过程,因此,爆炸焊数值模拟研究在数理建模、仿真软件设计等诸多方面仍需进行大量研究,尤其是今后应在金属冶金学机理基础上建立模型,研究爆炸焊的黏着过程,进一步揭示爆炸焊焊接界面的结合机理。

## 参考文献:

- [1] 李晓杰, 闫鸿浩, 王金相, 等. 爆炸焊接技术回顾与展望[J]. 襄樊职业技术学院学报, 2003, 2(2): 17-21.
- [2] 郑远谋. 爆炸焊接和金属复合材料及其工程应用[M]. 湖南长沙: 中南大学出版社, 2002.
- [3] Oberg A, Schweitz J A and Olsson H. Computer modeling of the explosive welding process [C]. Proceedings International Conference on High Energy Rate Fabrication, San Antonio, Texas, USA, 1984: 75-84.
- [4] Akihisa Abe. Numerical simulation of plastic flow field near the bonding surface of explosive welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 85(1-3): 162-165.
- [5] 王飞, 顾月兵, 陆明. 爆炸焊接生成波状界面的数值模拟[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2004, 5(2): 64-68.
- [6] Akbari Mousavi A A, Al-Hassani S T S. Simulation of explosive welding using the Williamsburg equation of state to model low detonation velocity explosives [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 6(31): 719-734.
- [7] Akbari Mousavi A A, Al-Hassani S T S. Numerical and experimental studies of the mechanism of the wavy interface formations in explosive/impact welding [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids,

- 2005, 53: 2 501-2 528.
- [8] Akbari Mousavi A A, Burley S J and Al-Hassani S T S. Simulation of explosive welding with anfo mixtures[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2004, 29(3): 188-196.
- [9] Mohammad T, Jafar M. Finite element simulation of explosive welding [C]. 2008-49<sup>th</sup> Scandinavian Conference on Simulation and Modeling. Oslo Norja, 2008, 10.
- [10] 刘成, 赵福兴, 匡震邦. 圆管内包爆炸焊接的数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 1999, 39(2): 64-66.
- [11] Grignon F, Benson D, Vecchio K S, et al. Explosive welding of aluminum to aluminum; analysis, computations, and experiments[J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(10): 1 333-1 351.
- [12] 谢飞鸿, 罗冠炜, 廖军生, 等. 金属爆炸焊接界面应力场数值计算分析[J]. 焊接学报, 2006, 27(10): 26-28.
- [13] 王建民, 朱锡, 刘润泉. 爆炸焊接三维数值模拟[J]. 焊接学报, 2007, 28(5): 109-112.
- [14] 薛治国, 李付国, 吕利强. 大面积钛/钢复合板爆炸焊接过程的数值模拟[J]. 焊接技术, 2007, 36(6): 12-15.
- [15] Mamalis A G, Vottea I N, Manolakos D E. Explosive compaction/cladding of metal sheathed/superconducting grooved plates: FE modeling and validation[J]. Physica C: Superconductivity and its Applications, 2004, 408-410(1-4): 881-883.
- [16] Vaidyanathan P V, Ramanathan Ar. Computer-aided Design of Explosive Welding System [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1993, 38(3): 501-516.
- [17] 王宇新, 杨文彬, 李晓杰. 爆炸焊接二维复板飞行姿态计算机仿真[J]. 爆破器材, 1999, 28(5): 1-4.
- [18] 高勇军, 王耀华, 王伟策, 等. 爆炸焊接计算机辅助设计中参数的计算[J]. 解放军理工大学学报, 2000, 1(4): 73-76.
- [19] 王宇新, 孙明, 杨文彬, 等. 双金属爆炸焊接窗口计算机仿真[J]. 爆破器材, 2002, 31(5): 29-31.
- [20] 张振逵. 爆炸焊接参数计算机辅助设计[J]. 舰船科学技术, 1996, 35(1): 28-33.
- [21] 王铁福. 爆炸焊接参数的计算机辅助设计[J]. 高压物理学报, 2004, 18(3): 245-251.
- [22] 樊新民, 张越. 爆炸复合参数的计算机辅助设计[J]. 南京理工大学学报, 1996, 20(6): 509-512.
- [23] 陈健美, 周卓夫, 张新明, 等. 粘弹性地基钢板爆炸焊接的计算模型[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(6): 551-560.
- [24] 高勇军, 王耀华, 王伟策, 等. 爆炸焊接计算机辅助设计中参数的计算[J]. 解放军理工大学学报, 2000, 1(4): 73-76.
- [25] 闫鸿浩, 李晓杰, 奚进一. 多层非晶薄带爆炸焊接温度场模型[J]. 高压物理学报, 2002, 16(1): 65-69.

作者简介: 王建民 (1979—), 博士, 主要从事爆炸焊研究。

## 欢迎订阅 2010 年《机械设计》杂志

●中国机械工程学会机械设计分会会刊 ●中文核心期刊 ●中国科技论文统计用刊 ●学位与研究生教育指定中文重要期刊

《机械设计》杂志是中国机械工程学会机械设计分会会刊, 中文核心期刊, 中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊), 学位与研究生教育指定中文重点期刊, “中国核心期刊(遴选)数据库”、“中国学术期刊综合评价数据库”、“中国学术期刊(光盘版)”、“万方数据数字化期刊群”收录刊源。《机械设计》影响因子在同类科技期刊中名列前茅。本刊多次荣获天津市优秀期刊奖、天津市一级期刊。

本刊主要栏目: 设计领域综述、专题论文、应用技术与实例分析(含设计理论与方法、创新设计、有限元设计、虚拟设计、优化设计、并行设计、计算机辅助设计、智能设计、机电一体化、零部件设计、可靠性与失效分析、机构学与机械动力学、机械传动、振动与冲击、测试与实验技术、方案设计, 新技术新工艺等)等, 是企业、科研、设计单位专业技术人员及高等院校师生的良师益友。

本刊发行量大、覆盖面广, 年传递信息量200多万字。

刊 期: 月刊 开本: A4 页数: 96页 单价: 8.00元 年订价: 96.00元

国内总发行: 天津市邮政报刊发行局

邮发代号: 6-59

国外总发行: 中国国际图书贸易总公司

邮发代号: M7315

订 购 处: 全国各地邮局均可订阅, 也可直接向本编辑部邮购

杂志社地址: 天津市河北区南口路40号

邮政编码: 300232

电 话: (022) 27343427

E-mail: jxsj@chinajournal.net.cn

欢迎订阅, 欢迎投稿, 欢迎刊登广告

