

戴为志 刘景凤 编著



建筑钢结构 焊接技术

JIANZHU GANGJIEGOU
HANJIE JISHU
—— NIAOCHAO
HANJIE GONGCHENG SHIJIAN

—— “鸟巢” 焊接工程实践



化学工业出版社

戴为志 刘景凤 编著



建筑钢结构 焊接技术

JIANZHU GANGJIEGOU
HANJIE JISHU
—— NIAOCHAO
HANJIE GONGCHENG SHIJIAN

—— “鸟巢” 焊接工程实践

T64457.11
5



化学工业出版社

· 北京 ·

国家体育场“鸟巢”钢结构焊接工程所涉及的 14 项焊接技术基本覆盖了现场建筑钢结构焊接工程的全部焊接技术,同传统焊接技术相比较在技术和理论上有一定建树和突破,因此代表了当今建筑钢结构焊接技术的发展趋势,具有较大的推广应用价值。

本书应用工程中大量的第一手资料,比较系统地总结了国家体育场“鸟巢”钢结构焊接工程所涉及的全部焊接技术,采用国际通行的“案例教学”的模式,以工程总结为基础,以先进的施工技术和组织管理思想为主要线索,对焊接技术应用理论进行了深入浅出的分析和阐述,适合业内人士学习和参考。

本书的主要读者是从事建筑钢结构制作安装的工程技术人员、设计人员(含深化设计人员);工程技术管理人员,商务、行政管理人员;项目经理;监理工程师。并可以作为高级焊接技师、高级焊工,大专院校材料专业、焊接专业、机械制造专业的参考书籍。还可以作为建筑钢结构工程招、投标的参考资料;编写《焊接工艺评定方案》、《焊接方案》并指导实施的技术参考。

图书在版编目(CIP)数据

建筑钢结构焊接技术——“鸟巢”焊接工程实践/戴
为志,刘景凤编著. —北京:化学工业出版社,2008.1
ISBN 978-7-122-01803-8

I. 建… II. ①戴…②刘… III. 体育场-建筑结构:
钢结构-焊接工艺 IV. TG457.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 205255 号

责任编辑:马燕珠 郭乃铎
责任校对:王素芹

文字编辑:陈 喆
装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 25 $\frac{3}{4}$ 彩插 2 字数 624 千字 2008 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 59.00 元

版权所有 违者必究

作者的话

在北京建造国家体育场“鸟巢”，占有“天时、地利、人和”。

2008年北京奥运上应天运、下合民心，盛世盛会，举国欢畅、举世瞩目；可谓占尽天时，这是其一。

“鸟巢”全焊钢结构可称世界之最。在中国，钢结构的“娘家”就在北京。北京有很多知名度很高的单位，中冶集团建筑研究总院、廊坊管道局、首钢、燕山石化、北京钢铁设计院、北京钢铁研究总院、中国钢结构协会、中国工程建设焊接协会等，可谓专家如云，行家里手数不胜数，集中国钢结构精英的北京，有强大无比的技术支持，肯定是“鸟巢”的坚强后盾。

国家体育场“鸟巢”所在地位于北京紫禁城中轴线东侧，种种迹象证明，所占的22公顷土地绝对是一块福地，承受“龙脉”的滋润，紫气东来，肯定造福于中国人，可谓占尽地利，这是其二。

中国的中央政府、北京市政府、建设部、北京市建委以及北京市各级政府、官员无不重视“鸟巢”的建设。北京市民主动为“鸟巢”做贡献，关心“鸟巢”，支持“鸟巢”，有慰问工人的、有给“鸟巢”工人免费摄影的、有在炎热夏季免费为“鸟巢”工人送酸梅汤的等，以各种实际行动尽己之能培育“鸟巢”的成长。北京人爽朗、热情、以国事为重的优秀品质在“鸟巢”工程中表现得淋漓尽致，可谓占尽人和，这是其三。

2006年9月17日，国家体育场“鸟巢”钢结构支撑塔架卸载的成功，标志着世界上最复杂的钢结构工程提前顺利建成。“天时、地利、人和”使国家体育场“鸟巢”得天独厚，“鸟巢”的今天完全在情理之中。

然而，国家体育场“鸟巢”的建设过程并不是一帆风顺的，可以说“结局是辉煌的、过程是痛苦的”。

众所周知：一开始，对国家体育场“鸟巢”的设计褒贬不一，钢结构设计过分复杂，质量指标要求很高。造成了“三难”的局面：“设计难、画图难、制作施工更难”。以至于国外有人看笑话，预言：中国人建不起“鸟巢”。实事求是地说：不仅仅在中国，就是在世界上任何一个国家，建设“鸟巢”绝非易事，这是综合国力的较量，是科技实力、施工实力的大比拼。

当年，在北京的奥运工程确实有不少困难，甚至举步维艰。奥运工程的第一个下马威就是焊接，由于奥运工程要求高、工作量大，所需要的合格焊工奇缺、焊接质量（一次合格率）有待提高。北京各级领导十分着急，北京市建委领导到处为“鸟巢”找焊工；尽管“鸟巢”钢结构焊接工程尚未开工，但北京人的热情已扑面而来，使“鸟巢”人心里有阵阵暖流流遍全身。

当“鸟巢”工程即将开始的时候，焊工果然成为了“鸟巢”工程的第一难题，“鸟巢”厚板、超强钢、全位置焊接（重点是仰焊）和100%UT-BI的要求吓退了不少焊接高手。然而，正是这具有挑战性的焊接工程也吸引了不少仁人志士，不少优秀焊工参加到这个具有历

史意义的工程中来，可是，由于工程量太大，合格焊工人数仍然是“杯水车薪”，远远不能解决问题。时不我待，工期非常紧迫，怎么办？“自古华山一条路”，那就是自己培训焊工；此举，不得已而为之，引起一片哗然；外协单位的领导心疼钱，怕培训后掌握绝招的焊工跳槽；个别人对此持怀疑态度，就是在培训班开班典礼之后，仍指责为：“花架子”。事实上，外界的反应是有一定道理的，因为我国的焊工市场没有形成，焊工水平参差不齐，假如，焊工水平的提高不能达到预期目标，希望的局面不能如期而至，个人荣辱事小，如果影响“鸟巢”建设，将无法向“江东父老”交代；我们负不起这个责任。工程压力、外界压力促使我们更加坚定、更加努力，我们深知：我们正在做一件前人想做而没有做成、看似平凡而难度极高的事，于是便更加投入、更加认真，不敢有丝毫懈怠，半点马虎。

焊工要经过“验证”和选拔，其工作量相当大，根据不完全统计：验证考试焊工 911 名，录取 832 名（含工厂焊工），从中挑选 265 人强化培训，这个工作量恐怕在全国的建筑钢结构焊接工程中也绝无仅有！在中冶集团建研总院焊接研究所、首钢焊工培训中心的全力协助下，半军事化的严格训练，一支焊接铁军悄然形成，200 名焊接高手（A 证）成为了“鸟巢”钢结构焊接工程的弄潮儿，加上现场“验证”考试合格近 300 名焊工（B 证），这支由近 500 名焊工组成的浩浩荡荡的名副其实的正规铁军，忠实地执行全面质量管理的各项规定，不折不扣地按《国家体育场“鸟巢”钢结构焊接管理规程》工作，在特殊的焊接岗位上克服一个又一个困难，取得了一个又一个胜利；首战 13 号柱脚，连续奋战 64 小时，耗尽近 6 吨焊材，厚板焊（含厚板仰焊）一次合格率高达 100%；厚板焊接靠的是军团实力，工程中不允许有丝毫马虎，倘若有一个焊工思想不集中，整条焊缝将“前功尽弃”；首战成功，显示整个军团实力无坚不摧。此战，为“鸟巢”工程开了一个好头，破除了神话、坚定了焊工必胜的信心。

一个好的开头会给工程带来好运，就是成功的一半，事实果真如此，“鸟巢”的钢结构焊接工程一路过关斩将，捷报频传，整个工程焊缝一次合格率高达 99.7%，令人信服地成为了建筑钢结构焊接工程之典范。

人是第一要素，是最积极、最可贵的力量。然而，单凭热情是建不好“鸟巢”的。还需要深厚的专业知识功底、科学严谨的工作方法、实事求是的工作态度。

Q460E-Z35 钢原打算国外进口，可是，国外知名企业望而却步，表示爱莫能助。据查：Q460E-Z35 是建筑钢结构的顶级钢材，厚度为 110mm 的钢板在全世界第一次使用。于是，在北京市领导的关心下，国内钢铁企业知难而进，克服了种种困难，终于炼出了建筑钢结构的顶级钢材 Q460E-Z35。为了联手攻克 Q460E-Z35 钢具有探索性和极大风险的焊接性试验难关，舞阳钢铁公司慷慨解囊相助，送给“鸟巢”三块钢板，从物质方面给予“鸟巢”极大的支持，于是，第一次由施工单位牵头进行的攻坚战打响了。

对 Q460E-Z35 钢材而言，原有可焊性试验的方法要进行有机组合，个别试验方法还需要进行改进，可以想象，在不到三个月的时间内，完成全部试验项目，准确地揭示 Q460E-Z35 的焊接性实质，的确有很大风险。假若，三个月之后得出的结论不确定，或者失败，工程肯定陷入混乱，那么，“鸟巢”钢结构的完工日子将遥遥无期，形成的这个局面谁也无法收拾。有谁愿意充当这千古罪人的角色呢？“鸟巢”人就是背负着这沉重的思想负担和压力，充分展示聪明才智，一步一个脚印，进行了科学、严谨的探索性试验。所幸的是，在专家和 中冶集团焊接研究所以及参战人员的共同努力下，Q460E-Z35 试验结果令人满意；准确的结论对“鸟巢”焊接技术路线的制定起到了决定性的作用。同时，在试验过程中进行了焊接工

艺评定，形成了 Q460E-Z35、Q460E-Z35 + GS20Mn5V 的焊接工艺规程，为摘取“鸟巢”皇冠上的明珠提供了强有力的技术支持。

对全焊钢结构而言，焊接是决定整个系统安全运营的关键工序。“鸟巢”钢结构焊接工序在专业排序中名列第一；“一焊、二吊、三卸载”，这一重要的排序引起了“鸟巢”参战人员对焊接工序的高度重视，形成了人人学习焊接、人人关心焊接的局面。尽管如此，在攻克焊接难关的过程中仍然是一波三折。

习惯势力是最可怕的势力，在建筑钢结构领域内，尽量避免仰焊和不采用远红外电加热技术已经成为行业习惯。“鸟巢”钢结构全部采用 BOX 结构，特别是顶面主结构采用了双曲线马鞍型复杂结构，控制焊接应力应变相当困难，如果不采用仰焊技术，主结构所有节点上翼缘均得开一人孔，把下翼缘的仰焊坡口改为平焊坡口，焊工在 BOX 箱体内焊完平焊并检验合格后，再焊上翼缘的两条平焊缝和两条横焊缝。这种节点设计完全是为了“避免仰焊”所造成的。业内专家有人评价这种节点是最差设计。从控制焊接应力应变的角度上看，这种评价是很有道理的，假若“鸟巢”采用该设计，其后果难以想象。因为“鸟巢”特殊结构决定了控制结构初始应力的难度。24 榀门式钢架中有 22 榀贯通或基本贯通，最大跨度为 259m 左右，如果采用该设计，那么控制焊接应力应变的对称施焊工艺不能应用，上下翼缘受热不均，必然带来收缩量的一致。上下弦杆同时不均匀的变形，足可以使结构发生严重变形而影响结构的安全与美观，使本来就十分复杂的结构体系变得更加复杂。所以说“鸟巢”钢结构工程因此必须使用仰焊技术。

远红外电加热同火焰预热相比有不可替代的优越性，特别是在焊接 Q345GJD、Q460E-Z35 钢材时，远红外电加热能够使整条焊缝受热均匀，而且温度可控，减少了不均匀的加热和冷却产生的附加应力，对防止冷、热裂纹起到了十分重要的作用。

“细节决定成败”，这两项工作现在看来比较简单，但当年还是颇费周折，当人们没有认识到而坚持要做的工作，尽管是正确的，也有很大的冒险性，可能得不到公众支持而导致失败。“鸟巢”领导充分理解这一点，应用说服和行政干预的手段，在短期内成功地解决了这两大难题。

值得一提的是：国家体育场“鸟巢”钢结构焊接工程，始终不懈地坚持贯彻全面质量管理的基本思想，在工程的各个环节中把管理和技术有机地结合在一起，使每一个环节始终保持受控状态，因此，工程质量愈来愈好，工程进度愈来愈快，形成了许多特色管理思想和特色技术。经过总结和提高，国家体育场“鸟巢”钢结构焊接工程现场管理从此有了比较完整的管理经验，可供建筑钢结构焊接工程参考。这应该说：也是国家体育场“鸟巢”钢结构焊接工程对建筑钢结构工程的一大贡献。本书用了很大的篇幅作了详细的阐述，但是，由于管理科学博大精深，准确表达难度很高，因此，仍然有不够完善和详细的地方，敬请读者原谅。

正是因为“鸟巢”钢结构工程中碰到和解决了大量的焊接技术问题，丰富了我们的实践经验，逐步地形成了一个思想体系，所以希望能够简化书本上难以消化和掌握的东西，修改不完善不确切的理论，成为大家一看就懂、一学就会、一用就成功的应用技术理论，从书本上来到实践中去，从实践中回到书本上去，反过来又用书本指导工程，形成良性的 PDCA 循环，这对保证钢结构焊接质量来说将带来革命性的进步，应当说是一个比较大胆的创举。

焊接应用技术理论的真经在“应用”。工程中讲的是保证质量、降低成本，而只降成本不保证质量的做法我们是坚决反对的，用经营者的话来说，保证基本成本，达到优良的性

价比。

本书的宗旨就是讲究“应用”。全书共分十三章，大量应用了“鸟巢”钢结构焊接工程的第一手资料和在工程进行过程中形成的文章来阐述一些基本观点和基本经验，同时也参考一些焊接方面的经典文献，力求用最浅显的文字来说明焊接的复杂理论问题。在本书的内容中包括收集的三篇“工法”、两篇“鸟巢”以外工程的“焊接专项方案”以及我国首次进行的Q420钢焊接性试验的内容。不难发现：本书坚持走自己的路，博采众长，努力创新。

我们希望“鸟巢”钢结构焊接管理、焊接技术能有很多次的重复和再现，希望读者能真正有所收获，并在工程中不断总结经验，有所发现、有所发明、有所创造、有所前进！希望后续建筑钢结构工程赶上和超过“鸟巢”。

在本书的构思和资料准备阶段，我们得到了广大工程技术人员的支持，从他们那里收集到了十分有价值的第一手资料，这是不可多得的宝贵财富。同时，也得到了北京高等院校的支持，北京石油化工学院以蒋力培教授为代表的焊接研究所深入“鸟巢”工地，进行弧焊机器人的应用研究；薛龙、邹勇、张卫义教授冒着寒风、夜以继日，同“鸟巢”人一样“摸、爬、滚、打”，在他们的艰苦努力下，具有自主知识产权的弧焊机器人试焊工作取得成功，并进行了详细的技术总结，留下了宝贵资料；可以说，本书的形成是集体劳动的成果，是集体智慧的结晶。根据为本书提供资料和帮助的程度，这些工程技术人员排名如下。

北京城建精工：芦广平，田玉明，孙练彬，李海斌，封叶剑，张春雷，梁伟平（封面及部分摄影），邓远华，崔明芝；

中冶集团建筑研究总院焊接研究所：申献辉，马德志；

长江精工：高良，贾宝华，崔巍，张伟，沈李强；

上海宝冶：陈才发；

沪宁钢机：曹晓春；

北京城建集团：王大勇，万里程。

在本书写作过程中，得到了中冶集团建筑研究总院焊接研究所、北京城建集团、长江精工等单位领导的大力支持。

中冶集团建筑研究总院焊接研究所张友权先生是“鸟巢”钢结构焊接工程的参与者，负责焊工的“验证”考试和强化培训工作，他丰富的经验、扎实的理论功底使焊工受益匪浅；他全力支持本书的写作，并在策划和运作过程中起到了举足轻重的作用。

国家体育场“鸟巢”城建国华钢结构分部总工程师李久林先生，在工程一开始就提出了全面系统总结焊接技术的思想，给我们很大的启发，奠定了写作的思想基础。

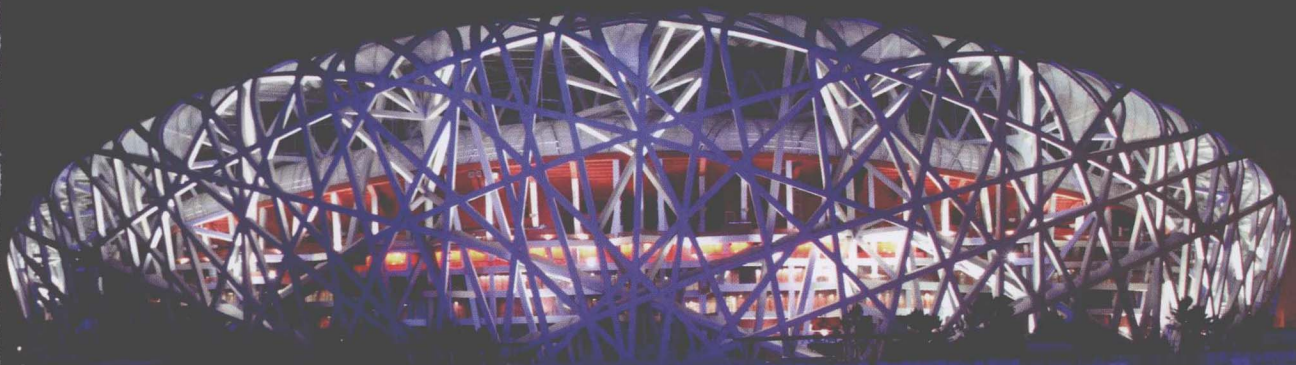
长江精工钢结构（集团）股份有限公司董事长方朝阳、总裁孙关富、总工程师黄明鑫为本书提供了许多帮助，使这项工作得以顺利进行，在2008年奥运会到来之际出版发行，为奥运献礼！

在此，对他们的大力支持和对本书的贡献表示由衷的感谢！

编著者

2008年2月于北京

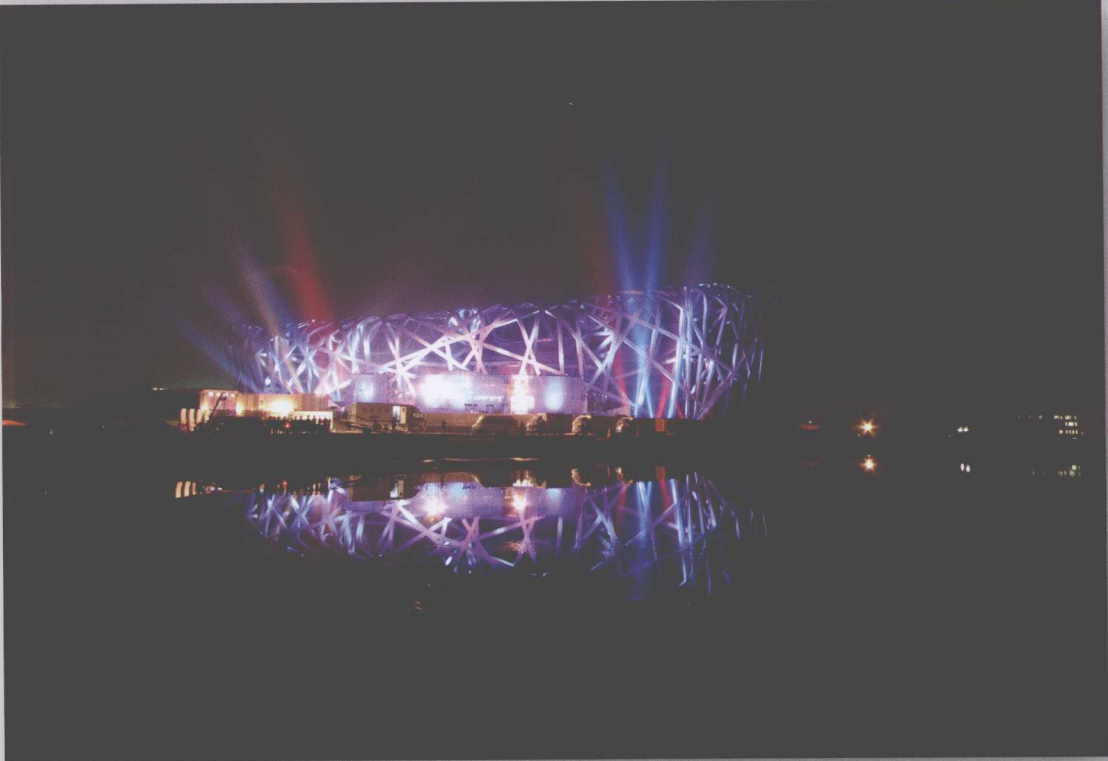
建筑钢结构 | “鸟巢” JIANZHU GANGJIEGOU
焊接技术 | 焊接工程实践 HANJIE JISHU
—— MIAOCHAO
HANJIE GONGCHENG SHIJIAN



建筑钢结构
焊接技术

“鸟巢”
焊接工程实践

JIANZHU GANGJIEGOU
HANJIE JISHU
MAOCHAO
HANJIE GONGCHENG SHIJIAN

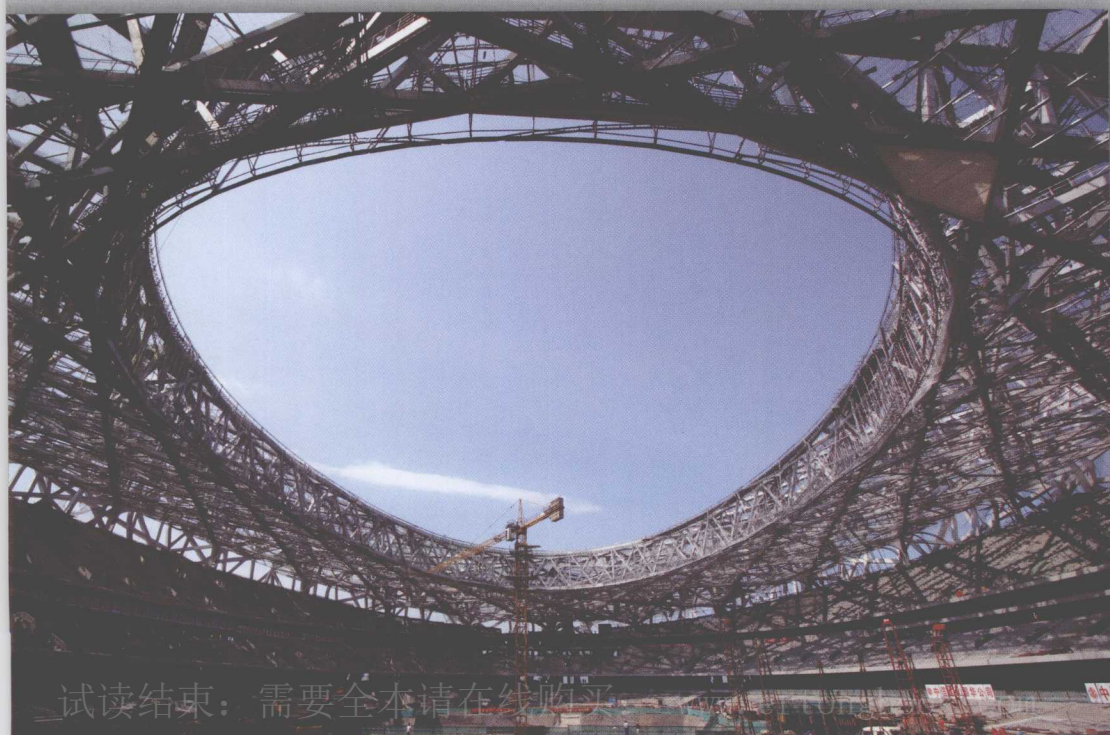
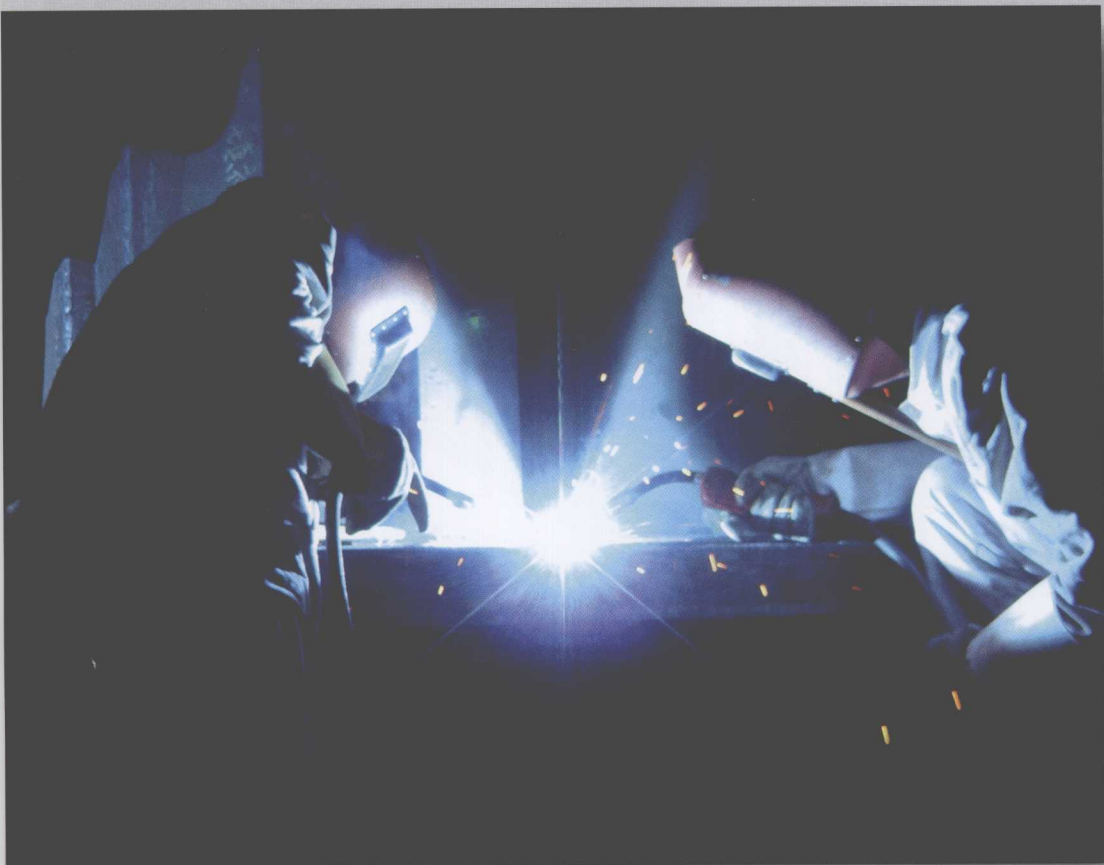




建筑钢结构
焊接技术

“鸟巢”
焊接工程实践

JIANZHU GANGJIEGOU
HANJIE JISHU
——
NIAOCHAO
HANJIE GONGCHENG SHIJIAN



试读结束：需要全本请在线购买

目 录

第一章 建筑钢结构焊接技术特点及发展趋势	1
一、我国建筑钢结构焊接工程中的典型工程	2
二、从“鸟巢”钢结构焊接工程看建筑钢结构焊接技术的特点及发展方向	5
(一) 新钢种焊接性试验将是建筑钢结构焊接工程中的重点和难点	6
(二) 厚板焊接将成为建筑钢结构的主要焊接技术	9
(三) 低温焊接技术将得到大规模的推广	11
(四) 仰焊技术将得到大规模的推广	11
(五) 同焊接常见裂纹作斗争是焊接技术的长期工作	12
(六) 建筑钢结构厚板焊接工程要防“层状撕裂”产生	13
(七) 铸钢及其异种钢的焊接将会成为建筑钢结构焊接工程中的又一个重点	14
(八) 复杂建筑钢结构焊缝宽间隙焊接技术将成为焊接界共同攻关的课题	15
(九) 钢结构体系初始应力的控制将成为焊接技术的又一主攻方向	17
三、机器人(自动焊技术)有可能成为建筑钢结构焊接工程技术发展的另一个方向	18
小结	19
参考文献	19
第二章 国家体育场“鸟巢”钢结构焊接工程全面质量管理	21
一、工程概况	22
二、钢结构安装工程施工程序	25
三、建立钢结构焊接质量保证体系、开展全面质量管理工作	25
四、做好充分的技术、思想准备	33
(一) 焊接结构安全运营定性分析及焊接缺陷对钢结构工程的影响	33
(二) 焊接缺陷对焊缝性能的影响及相关分析	34
五、QC 成果	39
(一) 国家体育场工程概况及钢结构工程概况	39
(二) 现场实施	44
小结	56
参考文献	56
第三章 新钢种焊接性试验研究技术	57
一、焊接性试验研究的定义及其内涵	58
二、选择钢材(材料)焊接性试验研究方法的原则	60
三、影响钢材(材料)焊接性的因素	60

四、焊接性试验研究的技术路线	62
(一) 焊接应用技术理论分析	62
(二) 焊接性试验研究	63
(三) 焊接性试验研究的主要内容	63
五、ASTM A913 Gr60 (QST), (Q420) 高强钢在建筑钢结构工程中应用的焊接性 试验研究	63
(一) 材料复验	63
(二) 工作流程	64
(三) 焊接性试验	64
(四) 再热裂纹敏感性研究	69
(五) 结论	73
六、Q460E-Z35 焊接性试验研究方案 (摘选)	74
(一) 研究技术路线	74
(二) 主要研究内容	74
(三) 钢材焊接性试验和防止焊接冷裂纹焊接参数的确定	75
七、Q460E-Z35 焊接性试验研究结果摘选	76
(一) 钢材的复验	76
(二) 焊接材料选择原则	77
(三) 焊接冷裂纹敏感性试验	78
(四) 斜 Y 坡口焊接裂纹试验	83
(五) 钢板热切割试验	91
(六) 钢板热矫正试验	96
(七) Q460E-Z35 钢 SMAW、GMAW、FCAW-G 刚性对接接头焊接试验	96
(八) Q460E-Z35 + Q345GJD、Q460E-Z35 + GS20Mn5V 异种钢刚性接头焊接试验	107
(九) Q460E-Z35 厚板焊接工艺评定	113
小结	118
参考文献	118
第四章 国家体育场“鸟巢”钢结构安装工程特色焊接技术	119
一、国家体育场钢结构埋设件压力埋弧焊新工艺的开发与应用	121
(一) 钢结构埋设件	121
(二) 钢板材料	122
(三) 焊机改造	122
(四) 焊接工艺评定	123
二、柱脚拼装焊接技术理论依据阐述分析	126
(一) 排定整体焊接顺序	128
(二) 典型焊接工艺及分析	129
三、柱脚拼装焊接技术	130
(一) 焊接材料选择	131
(二) 焊接材料的保管与使用	132

(三) 焊接符号	133
(四) 焊接顺序	134
(五) 电加热板的设置	149
(六) 特殊部位焊接方法	150
(七) 焊接工艺表	150
(八) “鸟巢”钢结构焊接 C14 柱脚现场拼装焊接工艺指导书	151
四、“鸟巢”钢结构立柱拼装焊接技术	158
五、CO ₂ 气体保护焊大流量防风技术应用	160
六、Q460E-Z35 钢焊接应用技术	164
(一) Q460E-Z35 钢焊接工艺评定试验	164
(二) Q460E-Z35 钢现场焊接工艺	166
七、异种钢焊接技术	168
(一) 异种钢焊接概述	168
(二) 异种钢焊接的技术特点及问题	169
(三) Q460E-Z35 与 GS20Mn5V 可焊性分析及焊接难点	169
(四) 焊接方法的选择	171
(五) 焊接材料的选择	172
(六) 焊前预热及后热	172
(七) 焊接工艺	173
(八) 结论	174
小结	174
参考文献	174
第五章 国家体育场“鸟巢”钢结构工程焊接工艺评定	175
一、建筑钢结构焊接工艺评定的定义及其特点	176
(一) 焊接工艺定义	176
(二) 焊接工艺评定定义	177
(三) 建筑钢结构焊接工程焊接工艺评定的目的	177
(四) 建筑钢结构焊接工程焊接工艺评定的特点	177
(五) 建筑钢结构焊接工程焊接工艺评定的地位和作用	178
二、建筑钢结构焊接工艺评定的具体实施	178
三、国家体育场“鸟巢”钢结构焊接工程焊接工艺评定方案	181
参考文献	181
第六章 建筑钢结构工程低温焊接技术应用研究	183
一、建筑钢结构低温焊接的可行性及其理论分析	184
(一) 国家体育场“鸟巢”钢结构焊接工程对冬季施工提出了严格要求	184
(二) 建筑钢结构焊接工程冬季施工可行性理论分析	184
二、国家体育场“鸟巢”钢结构焊接工程低温焊接试验方案设计	186
(一) 低温焊接试验项目设定原则	186

(二) 低温焊接试验项目设计	188
三、低温焊接试验结果分析	188
(一) 试验环境温度及天气情况	188
(二) 试板外观及超声检测结果分析	189
(三) 试板力学性能检测结果分析	189
(四) 低温焊接探索性试验结果初步分析	190
四、重要认识	194
五、国家体育场“鸟巢”钢结构低温焊接试验结果汇总	194
六、低温焊接试验成果应用原则	195
七、国家体育场“鸟巢”钢结构低温焊接规程	196
小结	196
参考文献	196
第七章 国家体育场“鸟巢”钢结构工程控制焊接应力应变技术浅释	197
一、焊接技术在国家体育场“鸟巢”钢结构焊接工程中控制应力应变的地位和作用	198
二、国家体育场“鸟巢”钢结构焊接工程概况及特点	200
(一) 焊接施工特点	200
(二) 焊接施工难点	201
(三) 焊接方法	201
三、焊接技术要求	201
四、马鞍形双向曲面应力应变控制的基本思想	202
(一) 基本分析	202
(二) 工艺措施	204
五、控制国家体育场钢结构应力应变具体措施	205
(一) 焊接工程的总体思路	205
(二) 主结构焊接的指导思想	206
(三) 次结构的焊接顺序	208
(四) 局部焊接顺序	209
(五) 焊接参数	210
(六) 焊材匹配与选用	210
(七) 预热和后热	210
(八) 焊接变形与应力控制措施	211
(九) 采取预留收缩余量的措施	211
(十) 适当采取局部矫正及补偿措施	211
六、检验的项目和内容	211
(一) 焊缝的外观检查	212
(二) 无损检测	212
七、现场焊后缺陷的返修	212
八、焊工培训及主要设备投入计划	213

小结.....	213
参考文献.....	214
第八章 建筑钢结构焊接工程层状撕裂的产生机理及防止技术	215
一、建筑钢结构焊接工程主要产生的裂纹种类.....	216
(一) 纵向裂纹	216
(二) 横向裂纹	216
(三) 弧坑裂纹	216
(四) 沟式裂纹	217
(五) 焊趾裂纹	217
(六) 根部裂纹	217
(七) 焊道下和热影响区裂纹	217
(八) 发纹	217
二、层状撕裂定义、种类、产生机理及特征.....	217
(一) 冶金因素	219
(二) 力学因素	219
(三) 层状撕裂的危害	220
(四) 防止层状撕裂的技术措施	220
三、预防为主是防止层状撕裂产生的主要技术措施.....	222
(一) 抓好焊接接头坡口设计关	222
(二) 抓好设计选材关	223
(三) 抓好确认最佳焊接工艺关	225
四、层状撕裂处理技术.....	226
五、层状撕裂处理的工程实例.....	226
参考文献.....	230
第九章 仰焊技术在建筑钢结构焊接工程中的应用	231
一、仰焊技术在“鸟巢”项目中的应用.....	232
二、“鸟巢”钢结构焊接工程应用仰焊技术的原因	233
三、仰焊技术的由来、发展及技术关键.....	233
四、仰焊技术实施要点.....	236
五、实例.....	237
小结.....	244
参考文献.....	244
第十章 国家体育场“鸟巢”钢结构焊接工程“合拢”技术	245
一、国家体育场“鸟巢”钢结构焊接合拢工程概况.....	247
(一) 合拢工程必须在夜间进行	247
(二) 合拢口必须同时进行	248
(三) 数量多, 合拢组织难度大	248

二、合拢定义和技术要点	249
(一) 合拢及合拢焊缝定义	249
(二) 钢结构体系转换后的特点	249
(三) 合拢温度的确定原则	250
(四) 国家体育场“鸟巢”钢结构合拢温度确定的基本思想	250
(五) 温度监测的必要性	251
(六) 温度监测方法	251
三、合拢方案及其实施	252
(一) 合拢段安装工艺措施	255
(二) 合拢准备工作	255
(三) 合拢顺序	256
(四) 合拢口焊接	256
(五) 合拢焊缝负载转移技术	257
小结	258
参考文献	259
第十一章 奥运“鸟巢”工程机器人自动焊探索	261
一、机器人自动化焊接发展现状	262
二、焊接机器人在奥运“鸟巢”工程中的应用	263
(一) 工艺试验	263
(二) 横焊试焊	264
(三) 立焊试焊	265
(四) 仰焊试焊	265
三、对比分析	266
小结	266
参考文献	267
第十二章 国家体育场“鸟巢”钢结构焊接工程工法汇编	269
一、Q460E-Z35 高强度特厚钢板焊接工法	270
(一) 特点	270
(二) 适用范围	270
(三) 施工程序	271
(四) 施工原理	271
(五) 工艺流程和操作要点	271
(六) 机具设备	277
(七) 劳动组织	278
(八) 质量标准	279
(九) 安全措施	279
(十) 技术经济指标及经济效益分析	281
(十一) 工程实例	281