

# 焊接接头高应变速率条件下的冲击韧度测试技术

于 琴<sup>1</sup>, 巩水利<sup>2</sup>

(1. 西北核技术研究所, 西安 710024; 2. 西安交通大学 焊接研究所, 西安 710049)

**摘要:** 为满足焊接接头在冲击载荷作用下的冲击韧度研究要求, 结合气炮加载式 Hopkinson 装置与 Charpy 冲击三点弯曲试样测试技术, 建立了一套在气炮式 Hopkinson 压杆装置上进行高应变速率条件下的冲击韧度测试系统, 较好地解决了测试中所遇到的加载、记录、数据处理以及动态效应等技术难题, 并就相关影响因素进行了讨论。通过对 E5015 焊接接头 V 形缺口试样及带预制裂纹的 V 形缺口试样在此系统上进行冲击韧度测试, 取得了较理想的结果, 表明该系统设计思想正确, 测试结果可靠。

**关键词:** 焊接接头; 冲击韧度; 测试技术; 高应变率

中图分类号: TG115.5 文献标识码: A 文章编号: 0253—360X(2001)03—71—05



于 琴

## 0 序 言

承受爆炸冲击载荷作用的焊接接头, 其冲击韧度的好坏, 直接关系到爆轰容器等焊接结构的安全。因此, 在高应变速率条件下焊接接头的冲击韧度测试就成为首先要解决的问题。

关于高应变速率条件下焊接接头冲击韧度的测试技术和试验装置, 必须解决能达到规定加载速率的试验装置、载荷、试样变形与时间诸参量的同时记录以及所测信号的标定、动态效应处理等问题, 因

此, 技术难度较大, 迄今为止尚无定型的标准试验方法。本文结合气炮加载式 Hopkinson 装置与 Charpy 冲击三点弯曲试样测试技术, 对焊接接头不同部位进行了高加载速率条件下的 V 形缺口试验和带预制裂纹的 V 形缺口冲击试验, 对高加载速率条件下的冲击韧度的测定进行了尝试, 取得了良好结果。

## 1 试验装置与测试系统

图 1 为焊接接头断裂韧度测试系统示意图。它

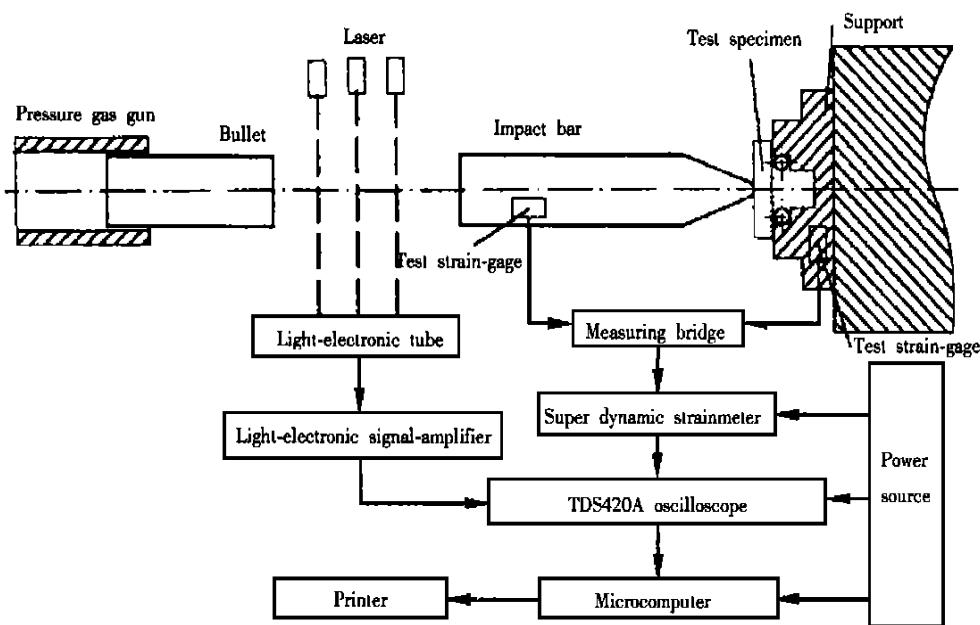


图 1 焊接接头动态冲击韧度测试系统示意图

Fig. 1 The measuring system diagram of impact toughness of welded joint

由加载装置和信号测量系统组成。工作过程是由高压气炮发射子弹, 子弹以一定的初速度撞击冲击杆, 由粘贴在支座上的电阻应变传感器将冲击电信号变化过程传输给超动态应变仪, 再经由记录系统进行处理。

### 1.1 加载装置

加载装置采用某研究所自行研制的 Hopkinson 压杆试验装置中的加载系统, 如图 2 所示。该装置充分比较了国内外双破膜发射装置、电磁阀发射装置、拉杆式发射装置及球阀发射装置的特点, 设计了采用具有独到之处的气动式发射机构, 保证了阀门的快速开启。该装置通过改变气室气压、发射管长度及弹重可连续实现弹速从 2~60 m/s 的调整。

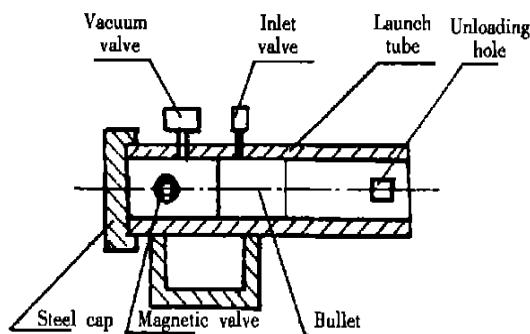


图 2 Hopkinson 加载装置

Fig. 2 Hopkinson loading equipment

在炮管的尾部设计安装一钢帽, 目的是为了加工方便和擦洗炮管容易。为了实现炮弹装填容易, 在炮管尾部安装一真空阀。当打开真空阀, 开启真空泵, 使炮管内形成真空, 炮弹便会在炮管内外气压差的作用下自动退回到发射位置。在距炮口端 200 mm 处设计有四个卸气孔, 使炮弹在撞击前运行速度稳定。

### 1.2 测试系统

测试系统构成如图 1 所示。其工作原理及过程如下: 由激光管、光电管、测速前置电路及 TDS 数字存储示波器构成弹速测量系统, 同时作为应变测量的触发开关。由电阻应变片、测量桥盒、超动态应变仪及 TDS 数字存储示波器构成应变测量系统。

应变测量系统采用半桥温度自补偿测量电桥, 要求其对地绝缘阻抗大于 500 MΩ, 以消除环境温

度及其它因素对测量的影响。测量用电阻应变片选用型号为 BE120—2AA(11), 阻值为  $120.0 \Omega \pm 0.1 \Omega$ , 灵敏系数为  $2.17\% \pm 1\%$ , 敏感栅尺寸为  $2 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。超动态应变仪具有灵敏度高、量程宽、漂移小、频响高达 2 MHz 的优点, 确保了试验数据准确、可靠地测量。记录仪器选用先进的数字存储示波器, 其实时采样速率高达 4 G/s, 带宽 1 GHz, 最大记录长度 130 K, 而且具有延时正负触发、延时外触发和信号自触发等功能。试验后可对数据进行必要的前期处理和分析, 也可通过 GPIB 接口卡将试验数据传送到微型计算机进行备份处理和打印。所有的采集记录系统都由高精密净化电源供电, 减少了测试系统中的误触发和干扰。

弹速测量系统采用的是基于光电开关原理而研制的激光探针法测速系统。子弹在飞行过程中依次遮断三路激光, 在遮光过程中产生三个光电信号, 通过前置电路放大处理送至示波器, 精确读取三束光依次遮断的时间间隔  $t_1$ 、 $t_2$ , 由事先精确测得的三束光的间距  $s_1$ 、 $s_2$ , 可计算获得弹速  $v_1 = s_1 / t_1$  及  $v_2 = s_2 / t_2$ , 然后求出平均速度  $v = (v_1 + v_2) / 2$ 。根据测量结果,  $v_1$  和  $v_2$  的测试误差小于 3%, 保证了试验数据的可靠和准确。

## 2 试样与标定

### 2.1 试件的制备

试件用材料为常用的压力容器用钢 16MnR, 经实测, 其化学成分和力学性能如表 1 所示。试件采用两块  $150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 16 \text{ mm}$  钢板对接而成。试板的焊接采用 E5015 低氢钠型焊条多层焊接, 焊接工艺参数为: 焊条规格  $\phi 3.2 \text{ mm}$ , 焊接电流  $110 \text{ A} \pm 2 \text{ A}$ , 电弧电压  $27 \text{ V} \pm 2 \text{ V}$ , 焊接速度  $90 \sim 95 \text{ mm/min}$ , 直流反接, 焊接坡口均为单 V 形坡口, 如图 3 所示。需要说明的是, 在选取焊接试板时, 一定要使焊接接头的方向垂直于板材的轧制方向。试板焊接时不刚性固定, 处于自由状态, 采用多道焊。施焊时, 预热和层间温度控制在  $125^\circ\text{C} \pm 15^\circ\text{C}$  之间, 使焊接自然冷却, 同时使每道焊缝在坡口立边上的熔深尽可能地保持一致, 并且使最后一层焊道堆敷在立边一侧。

表 1 16MnR 钢的化学成分和力学性能

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of 16MnR steel

Chemical compositions (mass fraction, %)					Tensile strength $\sigma_b / \text{MPa}$	Yield strength $\sigma_s / \text{MPa}$	Elongation $\delta(\%)$
C	Mn	Si	S	P	550	350	21
0.19	1.40	0.45	0.023	0.015			

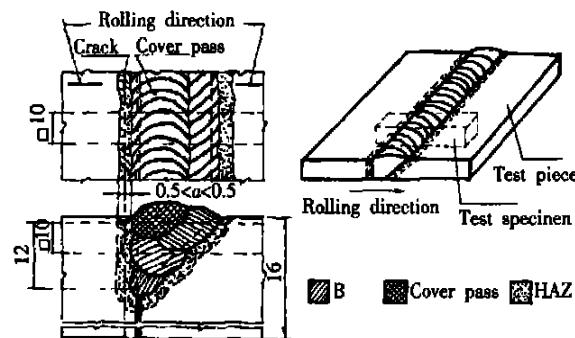


图3 试板焊接图及试样的选取位置

Fig. 3 Welding plates and selection of test specimen

三点弯曲冲击试样包括标准的 Charpy V 形缺口试样和带预制疲劳裂纹的 Charpy V 形缺口试样两种。试样经刨削、磨削等机加工成形,然后经表面腐蚀显出接头不同区域。V 形缺口经成形刀具加工,其尖端  $r=0.25$  mm 由成形刀具压制形成,带疲劳裂纹的 Charpy V 形缺口冲击试样是在 V 形缺口尖端电火花切割 1 mm 深后再经疲劳试验机预制到长 1.5 mm 左右的疲劳裂纹。

Charpy V 形缺口和带疲劳裂纹的 Charpy V 形缺口位置分别选取在热影响区、中间焊缝及母材处。这里要特别注意,由于热影响区较窄,因此在选取其缺口位置时,为了便于同焊缝及母材进行比较,V 形缺口位置选取必须选在立边坡口一侧。

## 2.2 试样的标定

采用常规的静态标定加载方法进行载荷—应变标定。标定时选取母材的 Charpy V 形缺口试样,试样的静态标定在 WE-30 型液压式万能试验机上进行,采用 YJ-20 静态应变仪实施测量。经数据筛选,确定压力与应变关系为

$$p=13.15\epsilon,$$

式中:  $p$  的单位为 kg;  $\epsilon$  单位为  $10^{-6}$ 。试样的标定实际是试样所承受的冲击载荷对应的应变测量。实践证明,若把应变计直接粘贴在冲击杆上,会造成记录曲线出现较大的振荡,使结果难以分析;若粘贴在试样上,在静态(准静态)或较低的冲击速度载荷条件下,惯性力影响可忽略,记录曲线可供分析。但当冲击速度较高时,试样的屈服点会随着温度和加载速率而改变,同时惯性力影响不可忽略。为了克服因冲击而产生的强烈干扰共振及上述影响,将测量冲击载荷的应变计直接粘贴在支座两侧。

## 3 测量数据的分析与处理

图4 为冲击试样所获得的电压—时间曲线示意

图。从图中可以看出,整个记录过程约 200  $\mu$ s 左右,而实际有效加载时间只有 40  $\mu$ s 左右,时间历程短,冲击前后冲杆的速度变化很小,可以假定在整个试样变形过程中冲杆的运行速度是不变的,即试样以均匀的冲击速度变形,于是从记录的时间  $t$  就可以得到位移  $\Delta$ ,把  $P-t$  曲线的  $t$  坐标折算成  $\Delta$  坐标,  $P-\Delta$  曲线下的面积就是试样断裂所消耗的功。依据这一思想设计的计算流程图如图 5 所示。

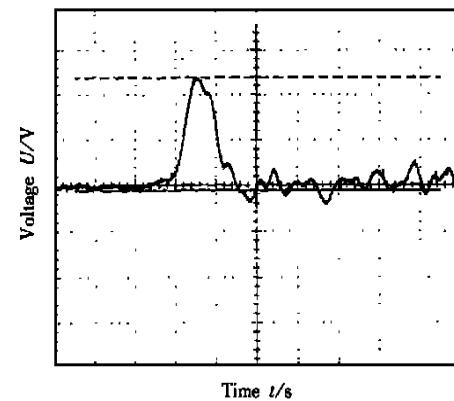


图4 三点弯曲 Charpy V 形缺口冲击试样的电压—时间曲线示意图

Fig. 4 Voltage-time curve diagram of three point bend specimen

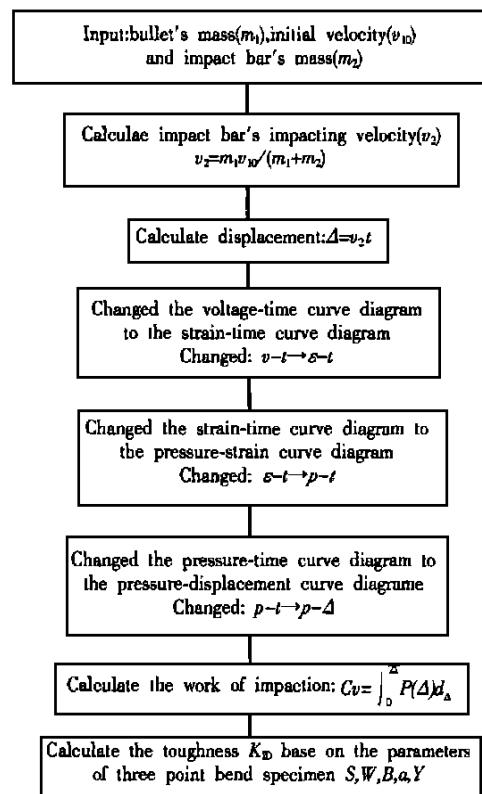


图5 数据分析计算流程

Fig. 5 Data processing program

## 4 试验中有关问题的分析讨论

### 4.1 试验思想方法的合理性

采用应力强度因子  $K$  参量衡量材料的冲击韧度, 是线弹性断裂静力学条件下才适合的。它对三点弯曲冲击试样即 Charpy 冲击试样要求应满足小范围屈服和平面应变两个条件。对于金属材料, 能满足  $K$  参量使用要求的只是  $\sigma_s > 1200 \text{ MPa}$  的高强度钢、厚截面的中强度钢 ( $\sigma_s > 500 \sim 1000 \text{ MPa}$ ) 及低温下的中低强度钢<sup>[1]</sup>。在这些情况下, 裂纹尖端塑性区尺寸很小, 可近似看成理想弹性体, 而应用线弹性静力学来进行分析时, 所带来的误差在工程计算中是允许的。对于焊接接头动态力学试验的结果证明, 在动态冲击载荷作用条件下, 焊接接头及各区域的屈服强度均高于 500 MPa, 材料趋向于硬脆<sup>[2,3]</sup>, 能够满足小范围屈服条件。Charpy 冲击试样冲击断裂时的应力状态是平面应变状态, 因此, 采用 Hopkinson 气炮加载装置结合 Charpy 三点弯曲冲击试样建立的焊接接头动态冲击断裂韧度测试技术, 思想方法是正确的。

### 4.2 加载方式对测试结果的影响

过去常用的三点弯曲冲击试验中, 动态载荷的施加是由冲杆或摆锤打击试样而完成的, 开始并不接触, 这样就造成了一种现象, 就是时间效应。它与静态三点弯曲试样的根本不同在于后者加力点与试样一开始就是接触的, 力是极缓慢地加上去的, 而在动态试验中, 力是通过快速运动的锤(或冲击杆)突然作用在试样上的。在这种情况下, 就产生了所谓的接触脱离 (Loss of Contact, 简称 LOC) 现象<sup>[4]</sup>, 试样与锤和支座的这种接触脱离现象一般要持续到  $t=3\tau$  ( $t$  为时间间隔;  $\tau$  为试样中的横波, 从冲击点传递到支座所需时间) 左右, 如图 6 所示。时间对试验装置的影响和材料的动态性能完全不同, 在测量中怎样正确处理这两种不同的效应是十分重要的。从图 6 可以看出, 支座要在冲击锤与试样接触之后约 600  $\mu\text{s}$  左右才开始记录到非零的载荷信息, 此段时间间隔  $t$  约比试样中的横波从冲击点传递到支座所需时间多 3 倍。为了减轻这一现象, 本试验采用了撞击杆与试样及支座三者在冲击加载前直接接触, 如图 1 所示, 直接测量支座受力情况, 这样由子弹打击撞击杆, 而不是直接冲击试样, 从而使应力脉冲在撞击杆中均匀传播再传至试样到支座, 避免了脉冲干扰及产生振荡干扰, 同时从图 4 可以看出, 应力脉冲从撞击杆传至支座, 迟到时间只有大约 60 ~ 80  $\mu\text{s}$ , 大大缩短, 同时通过支座来获取试样冲

击的应力脉冲值, 可以减小振动干扰和惯性效应。

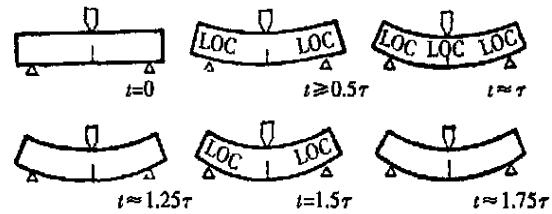


图 6 接触脱离现象

Fig. 6 The loss of contact phenomenon

尽管采用直接测量支座力及使撞击杆试样和支座直接接触以减小振动干扰和惯性效应, 但是仍然不能从根本上消除干扰。文献[5]给出试验结论, 证实试验记录的载荷时间曲线是由试样上真正承受载荷与时间的关系以一定周期衰减振动的应力波叠加而成, 而试样承受的真实载荷力使曲线平滑地通过振动谱线的中心。据此, 在测量数据分析处理过程中增加了数字滤波电路和负值整零处理, 使在数据计算时克服由于振荡而带来的干扰, 减小了结果误差。

## 5 测量结果的可靠性分析

为了进一步验证试验方法原理及测试结果的真实可靠, 与示波冲击试验进行了对比, 结果如表 2 所示。从表中结果对比可以说明, 采用 Hopkinson 压杆气炮加载—三点弯曲冲击试样的试验方法实现焊接接头高冲击速率下的断裂韧度测试是可行的, 结果是真实可靠的。

表 2 E5015 焊接接头 V 形缺口断裂韧度两种试验方法的结果对比

Table 2 Result comparison of two sorts of testing methods

Test methods	Impacting velocity $v_W$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Impacting velocity $v_{HAZ}$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Impacting velocity $v_B$ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
Oscilloscopic impact test	159.72/5.12	60.56/5.12	45.34/5.12
Hopkinson gas gun loading impact test	161.08/5.12	59.18/5.21	41.53/5.20

Note: W: weld zone; HAZ: heat-affected zone; B: base metal

## 6 结 论

(1) 采用 Hopkinson 气炮加载, 使加载速率可调范围宽, 使  $\kappa$  可达  $10^7 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$ , 能够实现高加载速率下的冲击试验。

(2) 试验时采用撞击杆、试样及支座预先接触,

直接测量支座载荷历史方法与测量系统采用数字滤波电路及测量数据负值整零处理三者结合,较好地克服了测量振动及惯性效应,使测量结果真实可靠。

(3) 测量系统采样具有灵敏度高、速度快、抗干扰能力强、测量精度高等特点。

## 参考文献:

- [1] 石德珂,金志浩.材料力学性能[M].西安:西安交通大学出版社,1998.97~99.
- [2] 巩水利,张建勋,裴怡,等.焊接接头动态力学的应变率效应

- [J].西安交通大学学报,2000,34(11):82~85.
- [3] Clifton R J. Mechanical properties at high rates of strain [M]. London: London Institute of Physics, 1980. 16~20.
- [4] 范天佑.断裂动力学引论[M].北京:北京理工大学出版社,1990. 341~342.
- [5] 林君山.低合金钢低温下形变与断裂的动态效应研究[D].西安:西安交通大学,1989. 42~44.

**作者简介:** 于琴,女,1974年出生,硕士研究生,工程师。主要从事机械设计与制造及焊接技术研究工作,获得部委级科技进步奖6项,发表论文6篇。

(编辑:董卫国)

## 高科技企业介绍

### 时代集团公司

时代集团公司成立于1984年,公司现已发展成为具有一定规模的高科技企业。主要从事检测仪器和焊接设备的研制开发、生产与销售业务,兼作相关贸易,具有进出口自营权。1997、1998年技工贸总收入分别为2.6、2.8亿元,年生产规模为1.2~1.5亿元,注册资金为1000万元。

时代集团公司是时代集团的核心企业,全国22家全资子公司是集团的紧密层企业,在美国、香港、中亚、荷兰等地建有4个海外子公司和40多个专业代理机构。现从业人员600余人,80%为大专以上学历,拥有一批高素质的科研人员和成熟的企业管理人才,遍布全国的子公司和销售网点形成了公司强大的销售网络。为保证产品的竞争力和技术领先,集团在京设立了6个、京外设立1个开发科研部门,每一年要推出10余个新型或改进型产品。

时代集团公司坚持“科技立司、产业立司、出口立司”的原则,本着“国内一流、世界先进”的产品开发目标及不断国产化、系列化,不断创新的开发路线,已陆续开发时代里氏硬度仪、粗糙度仪、涂层测厚仪、测振仪、X光探伤机、时代逆变弧焊机、气保焊机、变频器、无功补偿装置等8大系列30余个品种的高新技术产品,分别列入国家级、北京市的新产品试制计划、火炬计划、重大科技成果推广项目,多次荣获科技进步奖、优秀新产品和开发项目奖等。

经过十几年的努力,已在5个领域即:检测仪器、焊机、变频、无功补偿装置、软件开发了近50个具有自主知识产权的产品。时代集团生产的无损检测仪器系列产品已出口欧美、澳大利亚、新西兰、中东、南美以及东南亚等40多个国家和地区。其中,时代里氏硬度仪等检测仪器已批量进入海外市场,并占有80%国内市场份额,近50%的海外市场份额。国际著名的劳斯莱斯、现代、大宇、福特、通用、雷诺、波音、匹兹堡钢铁公司等大企业已批量购买了时代产品。为扩大时代产品在欧美市场销售,荷兰、法国、英国、德国等国家的外国企业都已聚集于时代集团名下,将自己百年字号更名为“欧洲时代”、“德国时代”、“美国时代”、“英国时代”,成为时代集团在海外的分支机构。时代集团在焊机领域仅进入5年,选择的是以国外最新一代功率器件IGBT为主开关器件的逆变焊机开发道路。在没有参考样机消化吸收的条件下,时代公司的开发人员进行了自主设计,经过两年的市场考验,产品从不成熟到成熟,市场从不接受到逐渐地普及,终于在时代公司的带动下,几年时间里中国掀起了“逆变热”,大大加速了这个技术在中国市场的推广,时代公司也因此成为中国最大的逆变手工、氩弧、气保焊机的制造商,时代焊机成为中国许多行业及重点工程推荐的产品及品牌,占国内市场份额的40%,成为中国焊机界第一家获得ISO 9001体系认证的企业。几年来,时代集团坚持走技术创新之路,又相继进入了变频器、无功补偿装置等行业。时代集团在高技术创新的模式上发生很大的变化,从依靠自己的队伍进行在同一技术起跑线上的焊机开发模式,逐步发展到依靠社会科研力量与企业自己队伍相结合,共同进入仪器、焊机、变频、无功补偿装置、软件等技术领域的技术发展模式。1999年5月,以时代集团为依托的“北京市精细五金和小型电子产品示范基地”正式成立以来,公司相继与北京工业大学、哈尔滨工业大学、北京机床研究所、北京航空航天大学、北京光电技术研究所、北京精细工程研究所、北方交通大学等院所成立了“虚拟设计公司”,即开展产学研合作。利用大专院校和科研院所的科研实力和雄厚的优势,利用时代公司在已进入的产业领域中的地位及市场运作能力,针对各科研院所、院校的专业特长、科研能力制定不同的合作方式,如全委托方式、分工合作方式、成果转让、“OEM”运作等方式,发挥各自的长处,优势互补,相互促进,共同发展。经过公司的努力争取,时代公司已成为中关村企业博士后流动站攻关单位,每年将保持4名博士毕业生在时代公司做研究开发工作。

时代集团愿与全国各大专院校、科研院所密切合作,共同努力创造出“时代仪器 中国名牌”,“时代焊机 中国品牌”,“国内领先、世界一流”的业绩,为促进我国焊接科技事业的发展做出贡献。

(时代集团公司 供稿)