

两种规格超细晶粒钢的激光焊接

彭 云¹, 王 成¹, 陈武柱¹, 田志凌²

(1. 清华大学 机械工程系, 北京 100084; 2. 北京钢铁研究总院, 北京 100081)

摘 要: 超细晶粒钢依靠生成微米级或亚微米级的铁素体, 使钢的强度和韧性大大提高。本文分析了超细晶粒钢的焊接性及激光焊接的特点, 进行了超细晶粒钢的激光焊接试验, 并与等离子弧焊接、MAG 焊接进行了比较。超细晶粒钢激光焊接接头粗晶区有较好的韧性。采用较小的激光功率并配合较慢的焊接速度, 可减小粗晶区硬化倾向。终轧温度较高的 SS400 钢激光焊接接头强度高于母材。深度轧制钢激光焊接接头出现再结晶软化区, 当软化区宽度较窄时, 不影响整体接头强度。SS400 钢和深度轧制钢激光焊接接头均有好的弯曲塑性。

关键词: 超细晶粒钢; 焊接性; 激光焊接; 组织; 力学性能

中图分类号: TG457 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2001)01-31-05



彭 云

0 序 言

钢铁材料由于综合性能好, 资源丰富, 价格便宜, 而成为使用最为广泛的金属材料。提高钢材的强度和韧性, 一直是人们努力追求的目标。添加合金元素和控制冶金组织, 是实现这一目标的基本途径。其中依靠工艺措施获得强韧性好的组织, 可使钢材在不增加合金含量的情况下, 强度、韧性获得提高, 从而提高性能/价格比。1935 年再热淬火工艺在工业生产中开始应用, 随后再热淬火及回火工艺被采用, 获得了高强韧性的钢。1962 年, 英国在连续热轧钢带生产线上成功地采用了激冷技术。70 年代开始控轧技术被用于生产管线钢, 该技术在钢中添加微合金元素, 如 Mo、Nb、V、Ti, 以扩大奥氏体无再结晶温度范围(A_3 之上), 在这一温度范围内进行集中轧制。1980 年开始应用的 TMCP (Thermo-Mechanically Controlled Processing) 技术, 实际上是控轧和激冷技术的结合, 该技术依靠控轧和控制始冷温度、终冷温度、冷却速度, 将组织组成比, 如铁素体、珠光体、贝氏体、马氏体的比例, 控制在一定水平, 从而获得所需要的强度和韧性^[1]。

超细晶粒钢是 TMCP 技术基础上发展起来的新一代钢种, 其依靠形变诱导形核及控轧控冷, 生成晶粒大小在微米级或亚微米级的铁素体, 从而使钢的强度和韧性都大大提高。

1 超细晶粒钢的焊接特点

超细晶粒钢焊接时, 热影响区高温区转变为奥氏体, 在随后的冷却过程中随 $t_{8/5}$ 冷却时间不同, 转变为不同的组织。当 $t_{8/5}$ 较短, 组织为下贝氏体时, 韧性好。当 $t_{8/5}$ 较长, 组织为上贝氏体和侧板条铁素体时, 韧性恶化。

超细晶粒钢的化学成分为含碳量较低的 C-Mn 为主要合金成分的钢种, 多层焊时, 前一焊道热影响区经受后一焊道峰温在 A_{c1} 和 A_{c3} 之间热循环时, 前一焊道热影响区粗晶区碳化物溶解产生的可扩散碳在奥氏体中聚集, 部分高碳奥氏体可转变为韧性很差的 M-A 组元^[2]。

超细晶粒钢焊接时, 有时会发生热影响区软化现象, 其原因为组织软化和再结晶软化。当软化区宽度较窄时, 拘束强化效应可降低或避免软化区对接头力学性能的影响。采用高能量密度热源快速焊接, 可减小软化区宽度, 有利于防止软化引起接头力学性能降低^[3]。

超细晶粒钢的低含碳量使其热影响区淬硬倾向较低, 因此热影响区产生冷裂纹的倾向较小。由于焊缝金属为凝固态组织, 未受到母材同等的工艺处理, 为了使焊缝具有与母材同等的强度, 需在焊缝金属中添加合金元素。焊接时热影响区金属可能先于焊缝金属发生奥氏体向铁素体的转变, 导致扩散氢从热影响区向焊缝扩散, 这种情形与普通低碳钢的焊接相反。因此, TMCP 钢焊接时, 更可能在焊缝金

属中产生冷裂纹。考虑高强 TMCP 钢焊接时的预热温度时, 应按照焊缝金属的成分进行计算^[4]。

TMCP 钢焊接时, 当焊速较快, 有可能产生凝固裂纹。由于凝固裂纹是当焊缝金属处于脆性温度区间时, 应变速率大于临界应变速率时产生的, 因此尽可能降低焊接应力、应变, 并采用适当的焊接速度, 可防止凝固裂纹的产生。

TMCP 钢焊后不能进行包括正火、正火加回火、以及淬火加回火的热处理, 但可进行消除应力热处理。

2 激光焊接的特点

激光焊接分为传导焊和深熔焊。当能量密度较小时, 能量从表面传导进入母材, 熔池浅而宽。当能量密度较大时, 焊接时母材被急速加热至熔化温度, 熔池的高温使金属蒸发而形成一深孔, 能量通过深孔传向母材, 产生深而窄的熔池, 形成深熔焊, 这时焊缝和热影响区的宽度都很窄。图1所示为以 5 kW 激光, 3.5 m/min 焊速, 焊接 SS400 钢板产生的深熔焊缝横截面形状, 3 mm 厚钢板可一次焊透。

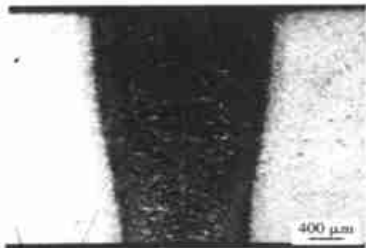


图 1 激光熔深焊接头横截面形状
Fig. 1 Cross section shape of deep penetration laser welding
($P=5\text{ kW}$, $v=3.5\text{ m/min}$)

激光焊的快速加热冷却, 有利于降低焊接热对母材的影响。较短的 $t_{8/5}$ 可使热影响区粗晶区转变

为下贝氏体为主的韧性较好的组织。对于薄板和中厚板, 可一次焊透, 避免多层焊时易生成的 M-A 组元。窄的软化区可降低或避免其对接头整体力学性能的影响。小的焊接应变和焊接残余应力可降低产生凝固裂纹和冷裂纹倾向。焊缝金属的快速冷却有利于其转变为强度较高的组织 (如下贝氏体为主的组织), 和母材的高强度匹配, 从而避免冷速较慢时, 需加入较多起强化作用的合金元素而引起的淬硬性、热裂纹倾向增大的问题。对于 Nd: YAG 激光, 光束可通过光导纤维传导到焊接部位, 有利于焊接形状复杂的结构。

3 超细晶粒钢的激光焊接试验

3.1 试验材料及设备

试验采用两种规格的超细晶粒钢。一种为屈服强度 400 MPa 级的 SS400 钢, 铁素体平均晶粒尺寸为 $9\text{ }\mu\text{m}$; 另一种为该钢再经深度轧制, 有加工硬化, 屈服强度达到 800 MPa 级的钢, 铁素体平均晶粒尺寸为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 。SS400 钢板厚为 3 mm, $\sigma_s=360\text{ MPa}$, $\sigma_b=460\text{ MPa}$, 其化学成分如表 1 所示。深度轧制钢板厚为 1.6 mm, $\sigma_{0.2}=715\sim825\text{ MPa}$, $\sigma_b=885\sim1\,020\text{ MPa}$, 其化学成分如表 2 所示。

激光功率低于 3 kW 规范焊接时, 使用 3 kW 快速轴流 CO₂ 激光器, 激光模式为 TEM₀₀+TEM₀₁, 聚焦镜为焦距 127 mm 的 ZnSe 透镜。激光功率大于 3 kW 时, 使用 6 kW Turbo 型射频激励快速轴流 CO₂ 激光器, 激光模式为 TEM₀₀, 聚焦镜为焦距 200 mm 的铜抛物镜。焊接过程中采用 Ar 作为保护气体, 进行不填丝熔焊。为进行比较, 对 SS400 超细晶粒钢进行了等离子弧焊和 MAG 焊, 观察其热影响区组织。以上各种焊接方法、焊接规范参数的选定, 均以保证一次焊透为原则。

表 1 SS400 钢化学成分(%)
Table 1 Chemical compositions of SS400 steel

C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Cr	Mo	Ni
0.171	0.09	0.36	0.013	0.013	0.025	0.01	0.02	0.01	0.03

表 2 深度轧制钢化学成分(%)
Table 2 Chemical compositions of deeply rolled steel

C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	O	N
0.18	0.21	0.60	0.016	0.020	0.008 2	< 0.005	0.017	0.005 9

3.2 试验结果与讨论

3.2.1 金相组织

试验用的两种超细晶粒钢主要利用形变诱导形核来细化铁素体晶粒, 钢中没有加入能形成高温稳定颗粒的微合金元素, 因此进行普通电弧焊时, 粗晶区原奥氏体晶粒长大严重。图 2a、b 分别为 MAG 焊和等离子弧焊热影响区粗晶区的金相照片, 可以看到奥氏体晶粒长大到 200 μm 左右。为了改善超细晶粒钢的焊接性, 在钢中加入诸如能形成高温稳定颗粒 TiN 的 Ti 等微合金元素, 则可对奥氏体晶粒的长大产生钉扎, 保持较细的原奥氏体晶粒, 有利于降低热影响区韧性恶化倾向^[9]。

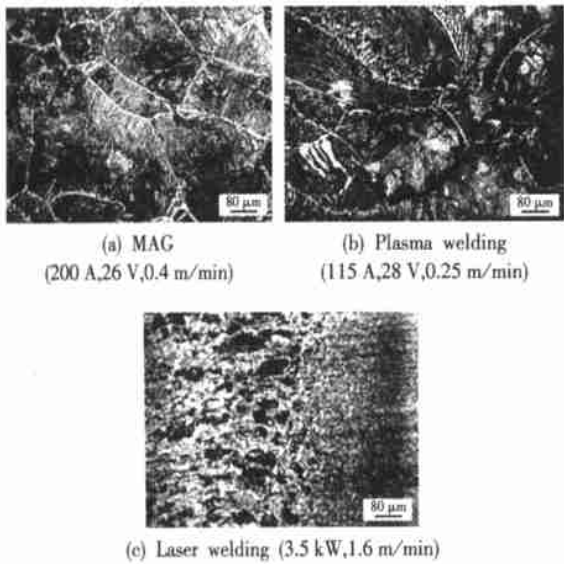


图 2 MAG 焊、等离子弧焊和激光焊热影响区粗晶区
Fig. 2 Coarse grain zone of HAZ of MAG plasma welding and laser welding

采用激光对超细晶粒钢进行焊接时, 由于激光焊接热循环的升温速度和冷却速度很快, 粗晶区高温停留时间很短, 奥氏体晶粒没有充分的时间长大, 因此能够保持较小的原奥氏体晶粒尺寸, 如图 2c 所示, 奥氏体的平均晶粒尺寸为 20 μm, 仅为 MAG 焊和等离子弧焊的 1/10 大小, 热影响区宽度在 0.55 ~ 0.70 mm 范围。

图 3 为 SS400 超细晶粒钢激光焊接接头的一组金相组织照片, 焊缝和粗晶区组织为 B_L + M (少量) + (P + F) (少量), 随焊接线能量增大, M 减少, P + F 增多, 细晶区、不完全重结晶区和母材的组织为 F + P。

图 4 为深度轧制超细晶粒钢激光焊接接头的一组金相组织照片。焊缝和粗晶区组织为 B_L + M (少量) + (P + F) (少量), 随焊接线能量增大, P + F 增多, B 和 M 略有减少。细晶区、不完全重结晶区和

母材组织为 F + P + B_L (少量)。

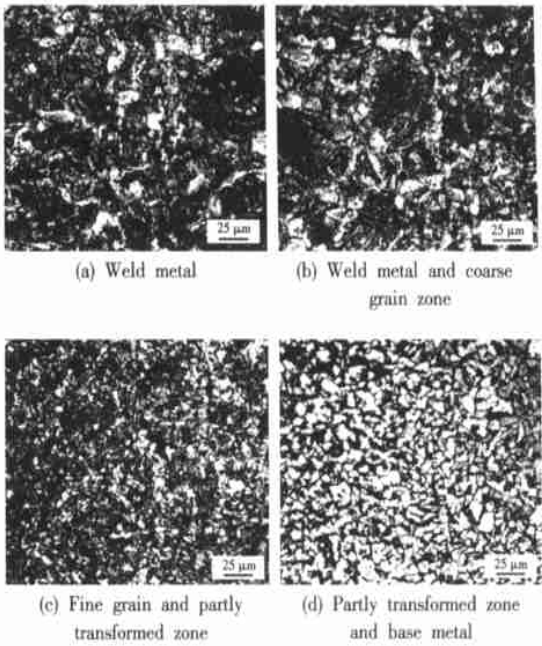


图 3 SS400 钢激光焊接接头各区域组织
Fig. 3 Microstruture of different zone of laser welded joint of SS400 steel
(P= 4 kW, v= 1.5 m/min)

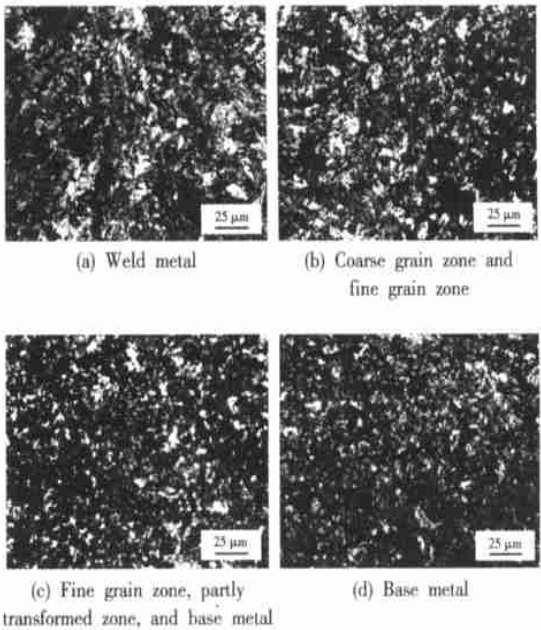


图 4 深度轧制钢激光焊接接头各区域组织
Fig. 4 Microstructure of different zone of laser welded joint of deeply rolled steel
(P= 1.2 kW, v= 1 m/min)

从超细晶粒钢激光焊接接头的组织分析可以看到, 采用适当的线能量进行焊接, 焊缝和粗晶区组织主要由下贝氏体组成。下贝氏体是韧性较好的组织, 对防止接头韧性恶化有利。比较分析图 2a、b 可以看到, MAG 焊和等离子弧焊粗晶区中, 组织中有

较多的上贝氏体,在原奥氏体晶界有先共析铁素体生成,并有一定的侧板条铁素体,这些组织对韧性都是有害的。因此适当地缩短 $t_{8/5}$ 时间,对获得韧性较好的组织是有利的。

3.2.2 激光焊接接头力学性能

用热模拟机模拟 SS400 钢激光焊接粗晶区的焊接热循环,峰温为 $1\,320\,^{\circ}\text{C}$, $t_{8/5}=1\,\text{s}$,将试样加工成横截面尺寸为 $10\,\text{mm}\times 2.5\,\text{mm}$ 的 V 形缺口艾氏冲击试样,母材也加工成同样尺寸的试样。艾氏冲击试验按 GB 4158—84 进行。试验的结果,粗晶区和母材冲击功均为 $15\,\text{J}$ 。可见,经过激光焊接热循环后,粗晶区韧性与母材处于同一水平。而深度轧制钢由于板厚太薄 ($1.6\,\text{mm}$),无法进行冲击试验。

图 5a、b 分别为 SS400 钢和深度轧制钢实际激光焊接接头的硬度分布。图 5a 表明,SS400 钢没有出现软化区,这是因为激光焊的冷速快,细晶区具有较高的硬度,另一方面该钢终轧温度较高,经焊接热循环后不会再结晶。当激光功率为 $2.1\,\text{kW}$ 或 $2.4\,\text{kW}$,焊速为 $1\,\text{m/min}$ 时,热影响区最高硬度在 $\text{HV}\,325$ 以下,淬硬倾向不大。当激光功率和焊接速度均提高时,热影响区最高硬度增高,因此,采用较低激光功率配合较慢焊速对防止产生冷裂纹有利。同时,较慢的焊接速度有利于防止焊缝金属产生凝固裂纹。由图 5b 可见,深度轧制钢存在一软化区。分析焊接接头金相组织可知,该软化区对应于再结晶区,这是因为该钢终轧温度较低,存在加工硬化,焊接时,在峰温低于相变温度的热循环作用下,产生回复和再结晶。当线能量减小时,软化区宽度减小。

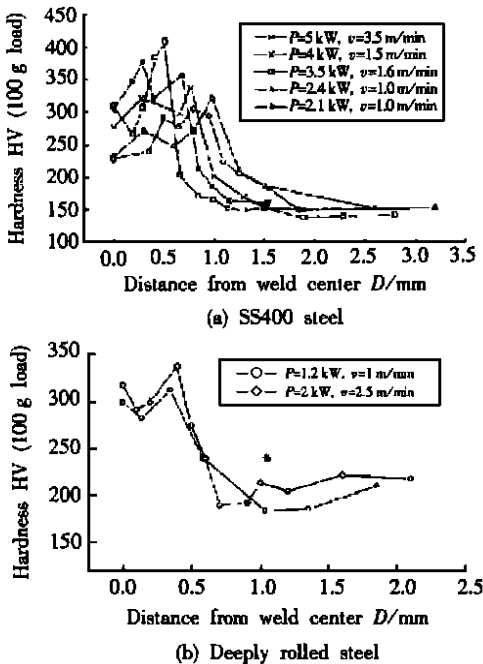


图 5 激光焊接接头硬度分布

Fig. 5 Hardness distribution of laser welded joint

图 6 是 SS400 钢激光焊接和等离子弧焊接、MAG 焊接的接头硬度分布。可以看到,激光焊接热影响区硬化区域硬度较电弧焊高得多,但硬化区宽度则窄得多。

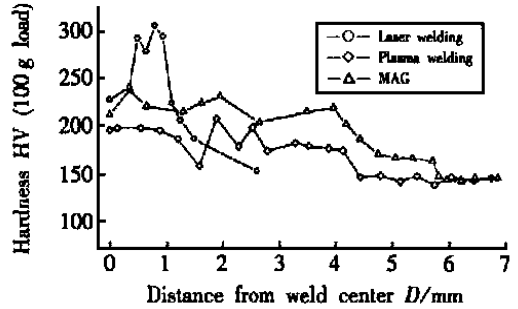


图 6 SS400 钢激光焊、等离子弧焊和

MAG 焊接接头硬度分布

Fig. 6 Hardness distribution of welded joints of laser welding, plasma welding,

MAG of SS400 steel

对 SS400 钢激光焊接接头进行拉伸试验,试样均断在母材,表明焊接接头强度高于母材。深度轧制钢激光焊接接头进行拉伸试验,低线能量焊接接头试样断在母材,高线能量焊接接头试样断在软化区。表明由于拘束强化作用,较窄的软化区不影响接头整体强度。

SS400 钢和深度轧制钢激光焊接接头进行弯曲试验,弯曲角为 180° ,接头无裂纹,表明接头有较好的塑性。

4 结 论

(1) 激光焊接焊缝和热影响区窄,熔深大,加热、冷却速度快,适合焊接对热敏感的超细晶粒钢。

(2) 采用较小的激光功率并配合较慢的焊接速度,可减小粗晶区硬化倾向。对 $3\,\text{mm}$ 厚 SS400 钢,应采用 $2.1\,\text{kW}$ 功率, $1\,\text{m/min}$ 焊速焊接。对 $1.6\,\text{mm}$ 厚深度轧制钢,为减小软化区宽度,应采用 $2\,\text{kW}$ 功率, $2.5\,\text{m/min}$ 焊速焊接。

(3) 超细晶粒钢激光焊接接头粗晶组织以韧性较好的下贝氏体为主, $3\,\text{mm}$ 厚 SS400 钢粗晶区韧性可达到与母材同等水平。

(4) 终轧温度较高的 SS400 钢激光焊接接头无软化区,接头强度高于母材。深度轧制钢激光焊接接头出现再结晶软化区,当软化区宽度较窄时,不影响整体接头强度。

(5) SS400 钢和深度轧制钢激光焊接接头有好的弯曲塑性。

参考文献:

[1] Yurioka N. TMCP steels and their welding [J] . Welding in the World, 1997, 43(2): 2 ~ 17.

[2] Lee S, Kim B C, Kwon D. Correlation of microstructure and fracture properties in weld heat-affected zones of thermomechanically controlled processed steels [J] . Metallurgical Transactions A, 1992, 23 (10): 2803 ~ 2816.

[3] Inoue T, Hagiwara Y. Fracture behavior of welded joints with HAZ under dematching [C] . Proceedings of the Ninth International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering 1990 Volume III: Materials Engineering-Part A, Feb. 18-23, 1990. 253 ~ 260.

[4] Irving B. Weld cracking takes on some new twists [J] . Welding Journal, 1998 77(8): 37 ~ 40.

[5] Tian D W, Karjalainen L P, Qian B, Chen X. Nonuniform distribution of carbonitride particles and its effect on prior austenite grain size in the simulated coarse-grained heat-affected zone of thermomechanical control-processed steels [J] . Metallurgical and Materials Transactions A, 1996, 27(12): 4031 ~ 4038.

作者简介: 彭 云,男,1963 年 3 月出生,博士,高级工程师。研究方向为激光材料加工、材料焊接、焊接材料和材料加工过程计算机模拟。完成多项国家科技攻关项目,在国内外发表论文 30 余篇,编写学术专著 1 部,起草国家标准 2 项,获国家发明专利 1 项。

(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 1 000 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,国际著名的劳施莱斯、现代、大字、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 中国名牌”,“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)