

TC4 钛合金 TIG 焊接头组织对性能的影响

内蒙古工业大学 材料科学与工程学院(呼和浩特市 010051) 高晓刚 董俊慧 韩 旭

摘要 在不同热输入条件下对 3 mm 厚 TC4 钛合金进行 TIG 焊接,焊后接头表面呈银白色且无外观缺陷。利用光学显微镜观察分析了焊接接头各区的组织变化规律,并划分了焊接接头区域,进一步对断口处晶粒大小、针状马氏体 α' 相尺寸进行测定,研究了它们与抗拉强度之间的关系。结果表明:接头细晶区与粗晶区之间晶粒尺寸具有突变趋势;随着晶粒尺寸的增加,焊接接头抗拉强度在逐渐降低;针状马氏体 α' 相尺寸长短对抗拉强度的影响不明显,其强化作用更倾向于马氏体 α' 相的编织效果和单向集束形态;细化晶粒对焊接接头的强化效果要优于马氏体 α' 相本身的强化作用。

关键词: 钛合金 TIG 焊 晶粒 马氏体 抗拉强度

中图分类号: TG407

0 序 言

钛合金低密度、高比强度和高耐蚀性的优势使其广泛应用于当今航空航天领域^[1-4],产品制造过程中焊接工序必不可少。因焊接热循环作用,钛合金焊接接头组织发生了较大变化^[5-6],严重影响着焊接接头的质量和微区性能,因而对其组织的分析研究十分重要。夏晓洁等人^[7]研究了高强高韧钛合金中初生 α 相的体积分数、相界面密度对塑韧性、屈服强度的影响规律,侧重于相含量。试验将从晶粒和马氏体尺寸上着手,分析焊接接头各区组织变化规律,并对断口处晶粒、马氏体进行测定,研究它们与抗拉强度之间的影响关系,以为钛合金 TIG 焊接工艺优化提供参考依据,也为建立组织-性能关系模型^[8-9]奠定基础。

1 试验方法

试验母材为 3 mm 厚 TC4 板材,焊丝是从母材上剪取的窄条,母材不需开坡口,焊前对母材表面和焊丝进行酸洗,去除表层氧化膜。设备采用美国 Miller Square Wave 250 TIG 焊机,直流正接,分别在四种热输入条件下焊接。焊枪的氩气流量为 15 L/min,整个焊接过程在充满氩气的玻璃箱内进行。利用对称施焊和分段退焊的方法来减小焊接变形。焊后采用光学显微镜对腐蚀后的金相试样进行了各区组织观察,并对拉伸断口区域视场内晶粒大小以及针状马氏体 α' 相尺寸进行了测定。

2 试验结果及分析

2.1 TC4 钛合金焊接接头宏观组织形貌

图 1 为 TC4 钛合金 TIG 焊接接头的宏观组织形貌。图中看出,接头经历了 $\alpha + \beta \rightarrow L \rightarrow$ 高温 $\beta \rightarrow \alpha'$ 的相转变过程后,组织可明显划分为母材区、过渡区、细晶区、粗晶区和焊缝区。室温下母材组织为等轴状 α 相和 β 相的机械混合物, β 相依附在基体 α 相周边均匀分布,并测得 α 相的含量为 59.21%,平均晶粒尺寸为 4.75 μm 。焊缝区和热影响区晶粒组织比较粗大。粗晶区与细晶区同属热影响区组织,它们之间晶粒尺寸具有突变趋势。

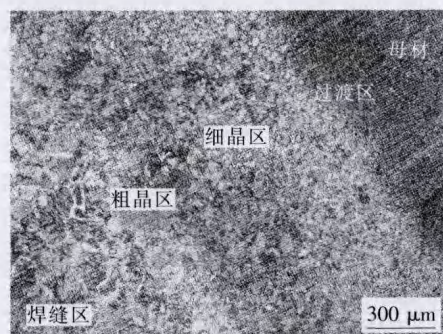


图 1 TIG 焊接头宏观组织形貌

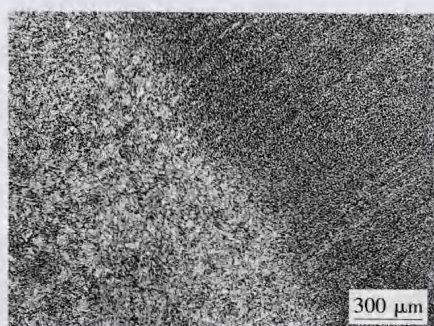
2.2 TC4 钛合金焊接接头组织转变过程

冷却速度决定着焊接接头热影响区的组织形貌及产物^[10]。图 2 为焊接接头各区在光学显微镜下的低倍金相组织。图 2a 为母材与细晶区交界处组织,之间是过渡区,过渡区组织发生了部分相变,晶粒尺寸接近母材且区域很窄。细晶区组织在相变点以上温度短暫停

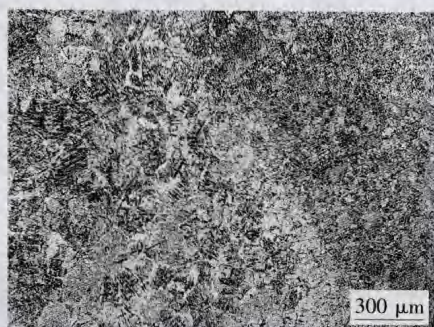
收稿日期: 2016-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51165027)

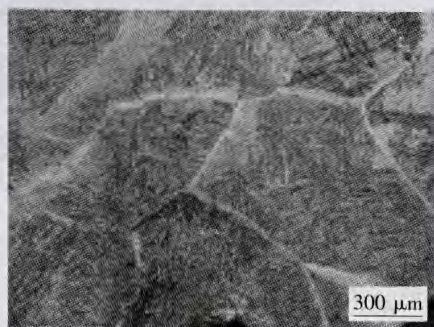
留并很快冷却,较母材组织有所长大。图 2b 为细晶区与粗晶区之间组织。粗晶区峰值温度接近熔点且高温停留时间长,加上处于相变点以上温度的 β 相原子扩散系数大,导致晶粒过分长大。相比粗晶区,细晶区组织在相变以上温度停留时间短,没有足够长大时间,晶粒较细小。由图可见,它们之间的分界线明显,突变特征显著,也从侧面反映出 β 相原子扩散速率的大小。图 2c 为靠近焊缝中心的组织,该区在相变温度以上停留的时间最长,冷却最慢,高温 β 相向 α' 相的过渡较充分, β 相晶粒严重粗大且圆整度变差,晶界曲率趋向平直,并具有柱状晶特征,生长方向垂直于温度梯度方向。



(a) 母材-细晶区



(b) 细晶区-粗晶区



(c) 焊缝区

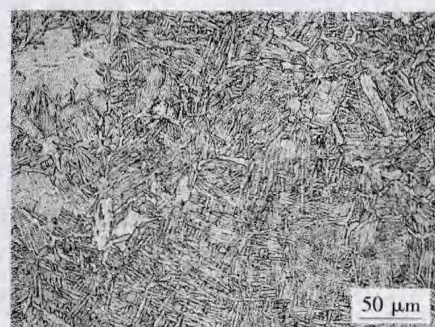
图 2 焊接接头低倍金相组织

图 3 为焊接接头各区在光学显微镜下的高倍金相组织。从图 3a, 3b 看出, 位于相变温度以上的热影响

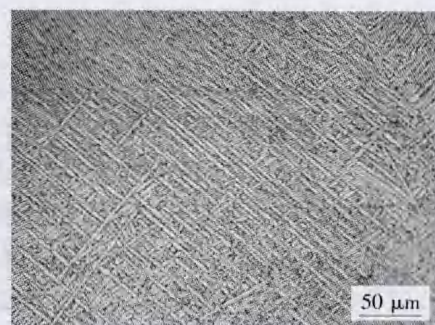
区原始 α 相发生了同素异构转变, 出现层片状的晶界 α 相和短粗状的次生片状 α 相, 但晶界 α 相较模糊, 晶粒内部的 α 相呈现细小的短棒状, α 相和 β 相熔合趋势明显, 相界模糊。X 射线衍射物相分析结果显示该区还存有少量的 α' 相, 且越靠近焊缝马氏体 α' 相的含量越多。图 3c 中 β 相晶粒消失, 但 β 相晶界会被保留, β 相转变成了长宽比大的马氏体 α' 相, 物相分析结果显示其相成分单一。马氏体 α' 相可以按照 12 种取向关系^[11]形核并长大, 各束交错排列, 具有较大纵横比并相互交织成网状, 形成了一种具有网篮状特征的组织结构。



(a) 母材-热影响区



(b) 热影响区



(c) 焊缝区

图 3 焊接接头高倍金相组织

2.3 TC4 钛合金焊接接头拉伸断口处晶粒大小

图 4 为各试样在断口处的晶粒大小。晶粒度宏观上决定了焊接接头的强度、硬度和塑性等力学性能, 微

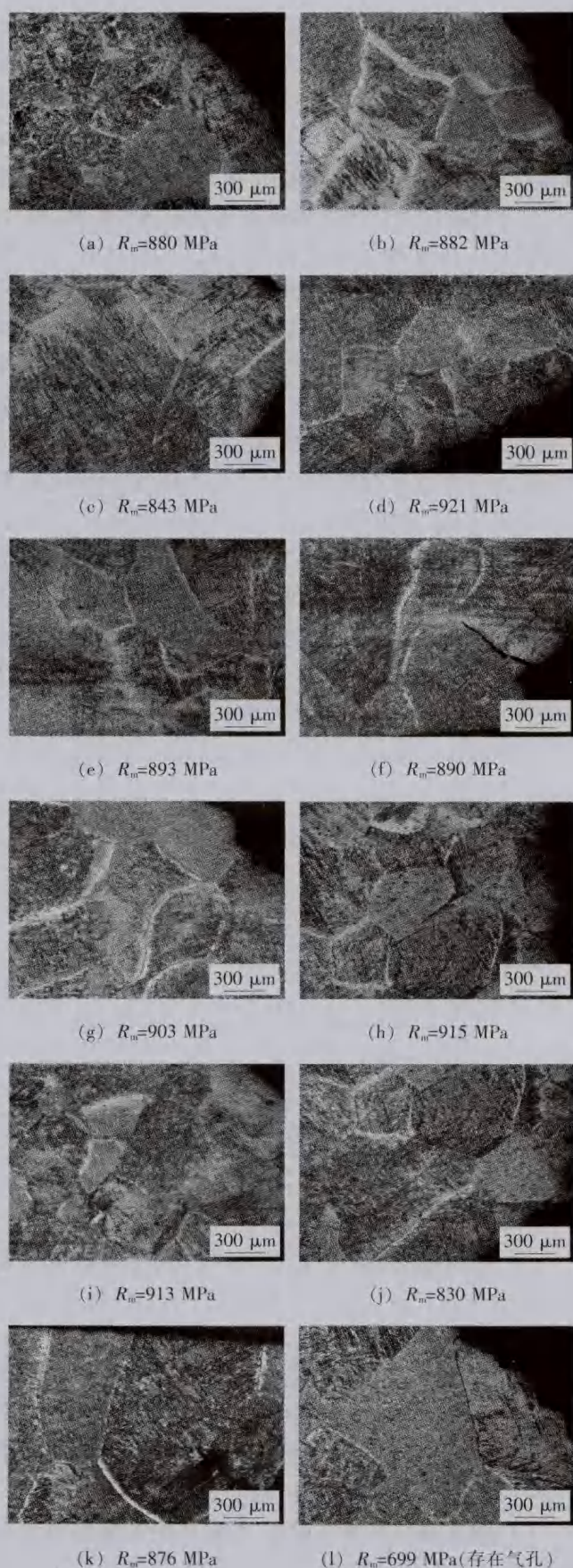


图4 12组试样的断口处晶粒大小

观上决定了裂纹的扩展形式。因此,研究晶粒大小与接头力学性能之间的关系具有重要意义。通过对断裂试样统计,断裂位置均处在粗晶区,此区域的组织冷却速度较低,过热的 β 相晶内易转变生成束状片层 α 相,具有魏氏组织特征,这种组织的拉伸性能和塑性很差。由图4可见,在相同位置处的晶粒形貌并不完全一致,这是由于原子受热激活的作用在晶界处单向跳跃,当前晶粒与周围晶粒局部协调长大的缘故。参照YB/T 4290—2012《估评金相截面上所见最大晶粒尺寸级别(ALA 晶粒度)的标准试验方法》要求,对图5中12个断裂试样进行了平均晶粒尺寸的测定,并分析了它们与抗拉强度 R_m 的关系。

图4l试样在断裂位置侧面附近存在有焊接缺陷,暂不作为分析数据。图5为焊接接头断口处晶粒大小与抗拉强度 R_m 的关系。由图可见,随着晶粒尺寸的增加,焊接接头的抗拉强度降低趋势明显。细小的晶粒可使组织内部晶界面积增加,并降低位错密度,从而使应力集中变小,有利于材料强度的提高。进一步表明,控制粗晶区晶粒的过分长大是提高钛合金焊接接头力学性能的重要途径。此外,晶粒尺寸也影响着 α 相晶团尺寸、 α 相片层厚度等参数^[12-13]。

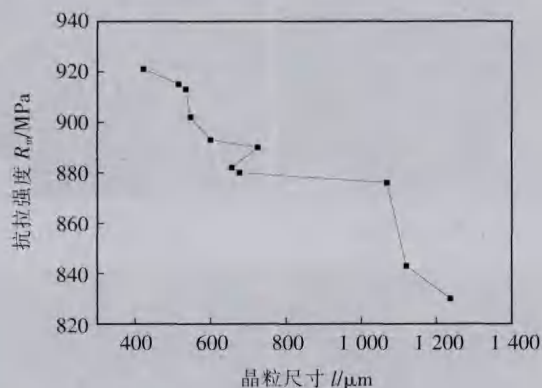


图5 接头断口处晶粒大小与抗拉强度的关系

2.4 焊接接头拉伸断口处针状马氏体 α' 相尺寸

图6为各试样断口处的针状马氏体 α' 相形貌。在可见区域内测量不同位置针状马氏体尺寸并取均值作为衡量马氏体尺寸长短的依据。马氏体的生长方式取决于冷却速度的快慢,当冷却速度较慢时,具有六方结构的马氏体 α' 相沿晶界向晶内形核长大,形成细长且相互平行排列的针状 α' 相;当冷却速度很快时,长针状的马氏体 α' 相生长遭到破坏,并打乱了正常的生长方向,最终会形成短小且无规则排列的针状 α' 相。

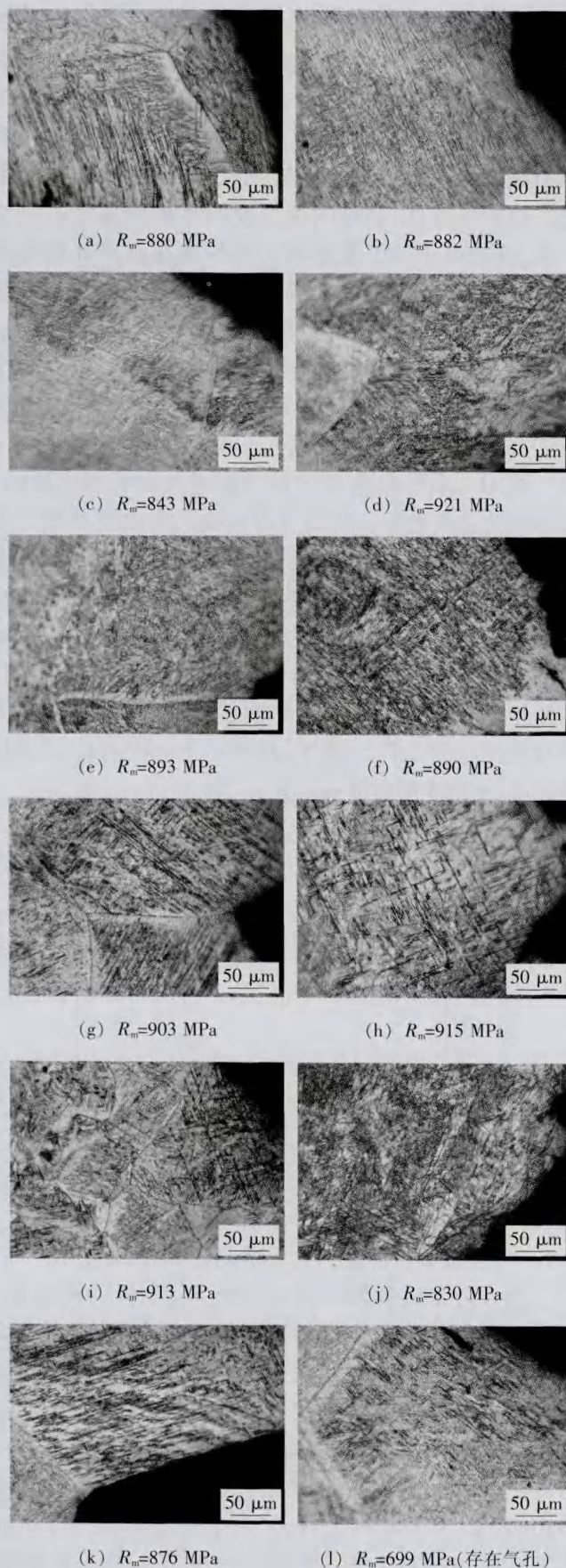


图6 12组试样的断口处针状马氏体 α' 相尺寸

图7为焊接接头断口处针状马氏体 α' 相尺寸与抗拉强度 R_m 的关系。由图可见,针状马氏体 α' 相尺寸长短对TC4钛合金焊接接头抗拉强度的影响不明显,试验数据呈现离散分布的状态。抗拉强度在900 MPa以上的试样,马氏体针状尺寸同样在一个较大范围内(27~134 μm)波动。其中抗拉强度最优的图6d,6h,6i中的针状马氏体 α' 相分布及长度比较均匀,具有一定程度的编织,且不存在大量的局部单向集束;强度最小的图6c,6j中的马氏体 α' 相呈短棒状,分布不均且较杂乱,虽有交错,但不存在严格意义上的编织,拉伸过程中 α' 相承载力有限;图6i,6f,6b,6a,6k试样的抗拉强度居中,组织中存在大量的单向集束,甚至整个断口晶粒内全部是相互平行的细长针状马氏体 α' 相构成的集束。综上所述,抗拉强度大小与针状马氏体 α' 相的编织效果和单向集束有关,其中编织状针状马氏体 α' 相的力学性能要优于未编织的短棒状马氏体 α' 相,相互平行分布的单向集束马氏体 α' 相强度介于二者之间。与细晶强化作用相比,马氏体 α' 相对钛合金的强化效果不显著,在这一点上,它不同于钢中的马氏体相。

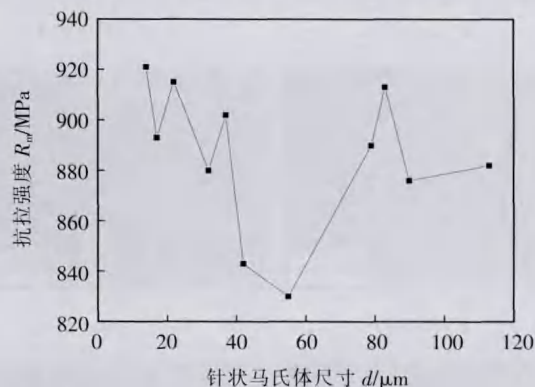


图7 接头断口处针状马氏体尺寸与抗拉强度的关系

3 结 论

(1) 经历焊接热循环之后,TC4钛合金焊接接头组织可划分为母材区、过渡区、细晶区、粗晶区和焊缝区。粗晶区与细晶区之间晶粒尺寸具有突变的趋势。

(2) 受冷却速度和高温停留时间的影响,焊缝及热影响区的 β 相晶粒严重粗化且圆整度逐渐变差。热影响区组织为 α 相、 β 相和马氏体 α' 相,焊缝区组织为单一呈网篮状特征的马氏体 α' 相。

(3) 随着晶粒尺寸的增加,焊接接头的抗拉强度在降低,相比马氏体 α' 相的强化效果,细晶强化作用更加显著。

(4) 针状马氏体相尺寸的长短对焊接接头抗拉强度的影响不明显,其强化作用更倾向于马氏体 α' 相的编织效果和单向集束分布。

参 考 文 献

- [1] 王 廷,谢志尚,冯吉才,等. 钛合金与异种金属的高能束焊接研究现状[J]. 焊接,2015(10):18-22.
- [2] 邱桂琳,倪家强,赵兴旺,等. 飞机钛合金电阻点焊压痕深度控制研究[J]. 焊接,2014(4):47-50.
- [3] 刘艳梅,都 强,倪家强,等. 钛合金潜弧双面焊接接头组织和性能分析[J]. 焊接,2014(2):24-27.
- [4] 金和喜,魏克湘,李建明,等. 航空用钛合金研究进展[J]. 中国有色金属学报,2015,25(2):280-289.
- [5] 周水亮,赵海涛,齐铂金. Ti-6Al-4V 钛合金超音频脉冲 TIG 焊[J]. 焊接学报,2010,31(10):50-52.
- [6] 张旺峰,王于会,李 艳,等. TA15 钛合金的相变、组织与拉伸性能[J]. 中国有色金属学报,2010,20(1):524-527.
- [7] 夏晓洁,吴国清,黄 正,等. 固溶时效处理对高强高韧钛合金显微组织与力学性能的影响[J]. 北京航空航天大学学报,2015,41(7):1294-1298.

- [8] 张永志,董俊慧. 两种预测焊接接头力学性能的模糊神经网络[J]. 焊接学报,2011,32(11):104-107.
- [9] Malinov S, Sha W. Application of artificial neural networks for modeling correlations in titanium alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 365(1-2): 202.
- [10] 宋奎晶,魏艳红,马 瑞,等. TA15 钛合金焊接热影响区组织演变的数值模拟[J]. 焊接学报,2014,35(2):28-31.
- [11] 季亚娟,刘燕冰,张田仓,等. TC4/TC17 线性摩擦焊接接头组织及力学性能[J]. 焊接学报,2012,33(10):109-112.
- [12] 卢金文,赵永庆,葛 鹏,等. Ti-Mo 系钛合金 β 晶粒长大规律及晶粒尺寸对硬度的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2013,42(11):2269-2272.
- [13] 张建勋,董丽娜,张林杰,等. 钛合金 TIG 焊接接头晶粒尺寸非线性梯度特征[J]. 焊接学报,2012,33(12):1-4.

作者简介: 高晓刚,1985 年出生,博士研究生,助理工程师。主要从事焊接质量与控制研究工作。



化工版焊接类精品图书推荐

《现代焊接工程手册》(共四卷)

◎权威性: 由中国工程建设焊接协会组织编写的一部大型工具书, 十余个工程建设行业的上百位长期工作在施工一线, 并且具有丰富学识和实践经验的焊接专家参加了组织、编写和审核工作。

◎创新性: 以工程建设焊接技术为主要内容, 以国内外相关标准和技术要求为主线, 以典型的工程应用最新案例来指导

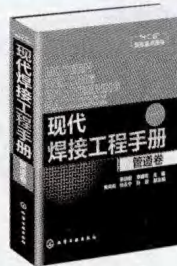
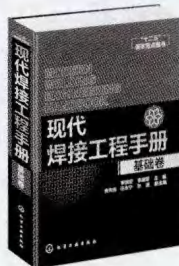
焊接生产实践的专业工具书。

◎实用性: 以突出的实用性为编写宗旨, 在内容上力求理论与实践结合, 先进性与实用性兼顾。以焊接工程实践为对象, 精简理论阐述, 增加国内外焊接标准要求, 汇集国内工程建设焊接领域的成功实践和技术, 稍做调整即可直接应用。

◎手册共四卷, 每卷各自成书, 读者可按需要选用。

书 名	书 号	作 者	定价(元)	出版时间
现代焊接工程手册 基础卷	978-7-122-25228-9	段 斌 马德志	288.00	2016 年 1 月
现代焊接工程手册 结构卷	978-7-122-25009-4	戴为志 段 斌	168.00	2016 年 1 月
现代焊接工程手册 容器锅炉卷	978-7-122-22289-4	李 涛	150.00	2016 年 1 月
现代焊接工程手册 管道卷	978-7-122-22832-1	李颂宏 李建军	248.00	2016 年 1 月

“十二·五”国家重点图书



如有焊接类图书出版,请与编辑联系。联系电话:010-64519270