

# 机器人遥控焊接力觉传感与控制进展

魏秀权, 李海超, 高洪明, 吴 林

(哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 为了完成遥控焊接过程涉及的非结构化环境接触任务, 机器人遥控焊接系统需要具有力觉传感与控制功能。通过对机器人力控制理论和工业机器人集成力控制策略研究的综述, 结合遥控焊接非结构化环境接触任务中存在的主要问题, 提出了适合遥控焊接任务特点的力控制策略, 并从双向力反馈遥操作、接触力控制以及力觉精确建模三个方面分析了力觉传感与控制技术在机器人遥控焊接领域中的应用, 最后探讨了机器人遥控焊接力觉传感与控制研究的发展趋势。

**关键词:** 力觉传感; 力控制; 机器人遥控焊接

中图分类号: TP242 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2007)11-108-05



魏秀权

## 0 序 言

对于核电站设备维修、海洋工程水下施工以及空间站建设维护等需要焊接技术的极限环境任务, 操作者往往只能远离现场, 以遥控焊接的方式完成焊接作业。早期的遥控焊接系统大多是针对特定任务开发的专用设备。随着机器人遥操作技术的不断发展及其在相关领域中的成功应用, 许多研究者开始将机器人遥操作引入焊接领域, 开发基于遥控机器人的能够适应任务变化的柔性遥控焊接系统。

在机器人遥控焊接系统中, 由于操作者身处工作现场之外, 无法直接感知远端机器人的任务环境, 只能通过与机器人一同进入现场的传感器获取远端环境信息。目前应用的传感手段主要是视觉传感和触觉传感。视觉传感是宏观非接触的被动感知方式, 其特点是获取的信息量大; 而触觉传感是在接触面发生的微观的主动感知方式, 其特点是作用与反馈同时发生, 实时性强, 精确度高。

力觉是触觉中最复杂的感知形式, 需要采用六维力传感器获取力和力矩信息。对于涉及与环境接触的机器人操作任务, 基于力觉传感的接触力控制是完成接触任务的必要条件。此外, 力觉传感可以在操作过程中实时提供精确信息, 对视觉传感进行有效补充, 还可以在光线条件较差或者工作范围受限制的情况下代替视觉传感<sup>[1]</sup>。

在遥控焊接任务中, 常常会涉及焊接接头打磨以及焊接工具装配等与环境发生接触的操作, 迫切需要机器人遥控焊接系统具有力觉传感与控制功能。文中第一部分是对机器人力控制理论研究的综述, 讨论了机器人柔顺性、经典力控制策略以及机器人力控制分类; 第二部分是工业机器人集成力控制策略的研究现状; 第三部分分析了力觉传感与控制技术在机器人遥控焊接领域的应用, 针对双向力反馈遥操作、机器人接触力控制以及力觉精确建模等问题进行了讨论; 最后对机器人遥控焊接力觉传感与控制研究的发展趋势进行了展望。

## 1 机器人力控制

机器人的控制问题可以从概念上分为位置控制和力控制两类。尽管许多研究者很早就开始致力于机器人力控制问题的研究, 但是自1956年第一台工业机器人诞生以来, 几乎所有的工业机器人都属于位置控制型, 机器人力控制大多还停留在试验室研究阶段<sup>[2]</sup>。在工业生产中, 力控制的成功应用仅限于采用简单力控制策略的打磨和修边等任务。复杂的力控制策略在实际应用中还存在许多问题, 例如控制算法的计算量过大, 缺少动力学模型的精确参数, 缺少可靠耐用的力传感器等<sup>[3]</sup>。

### 1.1 机器人柔顺性

基于位置伺服控制的机器人通过控制每个独立关节电机的码盘位置, 可以实现很高的定位精度, 但同时也使机器人具有很高的位置伺服刚度, 接触过

程中很小的位置偏差会产生很大的接触力。因此,仅仅依靠机器人的位置伺服,无法满足接触任务的要求,机器人必须具有对接触环境的顺从能力,这种能力被称为柔顺性。机器人的柔顺性可以通过被动和主动两种方式来获得<sup>[4]</sup>。被动柔顺通过辅助的柔性机构,使机器人在与环境接触时能够对外部作用力产生自然的顺从;主动柔顺则是利用力觉反馈信息,根据机器人力控制策略主动地控制接触力。

最早最典型的被动柔顺装置是麻省理工学院 Draper 试验室设计开发的微偏心柔顺装置 RCC (re-mote center compliance)。RCC 实际上是一个具有 6 个自由度的弹簧,安装在机器人腕部和末端执行器之间,可以实现位置伺服机器人对接触环境的被动柔顺,完成精度要求较高的接触任务<sup>[5]</sup>。被动柔顺装置的响应速度很快,但专用性强,适应性差,柔顺范围有限,本身不具备对机器人的控制能力。为了克服被动柔顺存在的不足,需要研究机器人的主动柔顺控制问题,即机器人力控制问题。

机器人力控制研究开始于 20 世纪 50 年代,当时 Goertz 开发了最早的电伺服式主从双向力反馈遥操作机械臂。此后, Rothchild 等人于 60 年代研制了具有力反馈功能的人造肘。到了 70 年代,开始用计算机代替人来实现力反馈自动控制,控制策略分为逻辑分支反馈和连续反馈两种<sup>[6]</sup>。现在通常所谓的机器人力控制是指力觉传感器直接与机器人控制器构成力伺服控制闭环的连续力反馈控制。这方面的研究开始于 20 世纪 70 年代,具有代表性的工作是 Whitney<sup>[7]</sup> 提出的阻尼控制、Salisbury<sup>[8]</sup> 提出的刚度控制以及 Mason<sup>[9]</sup> 提出的关节柔顺概念和约束运动控制理论。20 世纪 80 年代初期, Hogan<sup>[10]</sup> 在刚度控制和阻尼控制的基础上提出了阻抗控制, Raibert 和 Craig<sup>[11]</sup> 根据关节柔顺概念和约束运动控制理论提出了力位混合控制。阻抗控制和力位混合控制是机器人力控制研究领域中最经典的两种力控制策略。

## 1.2 阻抗控制与力位混合控制

阻抗控制是将外界环境等效为导纳,将机器人等效为阻抗,采用关节转矩作为控制作用操作量,通过调节末端执行器的机械阻抗特性建立位置误差与环境接触力之间的联系,把机器人力控制问题转化为机械阻抗调节问题的机器人力控制策略。基于阻抗控制的机器人可以等价为一个以外接触力为输入的质量—弹簧—阻尼系统,末端执行器的机械阻抗取决于系统的惯性系数、阻尼系数和弹性系数。阻抗控制可以使机器人末端执行器以期望的柔顺阻抗状态与环境发生接触,不需要精确已知的任务环境模型,也不需要接触发生的瞬间进行控制模式

转换。但由于阻抗控制的输入是期望的末端执行器机械阻抗,无法实现对接触力的直接控制。

力位混合控制是根据精确已知的任务环境约束条件,将任务空间分解为自由空间和约束空间两个子空间,并通过选择矩阵分别在自由空间和约束空间进行位置控制和力控制的机器人力控制策略。为了使位置控制和力控制互不矛盾地并存,控制作用操作量采用能够叠加的机器人关节转矩。通过力位混合控制可以使机器人末端执行器沿着期望的位置轨迹以期望的接触力完成接触任务。力位混合控制将约束环境作为不会变形的刚体考虑,并且假设自由空间和约束空间是两个互补的正交子空间。

阻抗控制和力位混合控制都是高度理想化的控制策略。对于阻抗控制,由于接触几何模型的不确定性,给定的机器人末端执行器阻抗特性未必能够满足任务需要,往往以损失位置伺服精度为代价,使机器人在与环境接触的过程中具有足够的柔顺性。对于力位混合控制,环境模型存在误差,接触过程存在变形和摩擦力等因素都不满足力位混合控制的理想约束假设,导致位置控制方向上存在接触力,而力控制方向上存在运动。

## 1.3 经典力控制策略的发展

由于没有考虑机器人动力学和笛卡尔坐标系下位置控制环与力控制环的动态耦合,经典力位混合控制在稳定性和精度上存在的问题。20 世纪 80 年代中期, Khatib<sup>[12]</sup> 提出了机器人运动—力控制操作空间理论,实现了力位混合控制系统的动力学解耦; Yoshikawa<sup>[13]</sup> 也对基于机器人动力学的力位混合控制问题进行了研究。

为了克服阻抗控制和力位混合控制的局限性,许多研究者提出了一些新的机器人力控制策略。20 世纪 80 年代末期, Anderson 和 Spong<sup>[14]</sup> 综合了阻抗控制和力位混合控制的思想,提出了混合阻抗控制策略,在通过力位混合控制调节位置和力的同时,通过阻抗控制调节机器人末端执行器的机械阻抗特性。此后,许多学者将自适应控制、变结构控制、学习控制等现代控制策略以及神经网络控制、模糊控制等智能控制策略应用于机器人力控制研究,进行了初步的尝试,取得了一些成果,但都限于对经典力控制策略的优化,尚未形成独立的控制策略。

## 1.4 机器人力控制分类

按照被控制量的不同进行划分,机器人力控制可以分为直接力控制和间接力控制<sup>[15]</sup>。直接力控制直接设定接触力的期望值,而间接力控制通过设定期望的机械阻抗参数,间接地控制机器人与环境的接触力。阻抗控制属于间接力控制,而力位混合

控制则属于直接力控制。按照控制作用操作量的不同进行划分,机器人力控制可以分为基于转矩伺服的力控制和基于位置伺服的力控制。转矩伺服型力控制的操作量是关节转矩,阻抗控制和力位混合控制都属于力矩伺服型力控制。位置伺服型力控制的操作量是关节位置。几乎所有的工业机器人都是采用位置伺服的工作方式,无法直接控制关节转矩,导致力矩伺服型力控制很难应用在工业机器人上。为了使机器人力控制向通用化和实用化方向发展,迫切需要实现工业机器人的力控制集成。因此,许多学者都针对位置伺服型力控制策略进行了研究。

## 2 工业机器人力控制策略

力环包容位置环控制是最典型的位置伺服型力控制策略。20 世纪 80 年代后期,许多学者对力环包容位置环控制策略进行了研究,其中 De Schutter 等人<sup>[16]</sup>的工作最具代表性。该方法通过外环力控制器对内环位置控制器的输入进行调整,最终通过适当的位置控制命令来实现期望的接触力。外环力控制器是根据环境模型进行设计的,在实际应用中由于大多数的接触环境都是无源静态系统,通常可以将环境简化为线性弹簧模型。

20 世纪 90 年代初期,Chiaverini 等人<sup>[17]</sup>在力环包容位置环控制和力位混合控制的基础上提出了并行控制策略,力控制器和位置控制器并行存在,采用了力控制器高于位置控制器的优先级策略,通过优先级较高的力控制器确定机器人与环境的接触状态。系统仿真结果表明,该方法不需要精确的环境模型就能够实现接触过程中力和位置的调节,并于 20 世纪 90 年代中期,实现了转矩伺服型机器人的并行控制<sup>[18]</sup>。

20 世纪 90 年代末期,为了将并行控制应用在工业机器人上,Caccavale 等人<sup>[19]</sup>和 Chiaverini 等人<sup>[20]</sup>分别通过分解任务空间加速度控制和动力学模型补偿的方法改进并行控制,两种方法都可以将并行控制中力控制器的控制作用操作量由关节转矩转换为关节加速度,实现位置伺服型并行控制。

在上述工作的基础上,Caccavale 等人<sup>[21]</sup>于 2005 年发表了关于在工业机器人中集成力控制的文章,给出了如图 1 所示的交互作用控制策略。其中,内环是工业机器人的运动控制器,外环是采用基于位置伺服型并行控制的交互作用控制器。交互作用控制器根据期望接触力、期望运动轨迹以及接触力反馈,生成相应的参考运动轨迹,作为运动控制器的输入。

实现工业机器人力控制的另一种方案是采用主

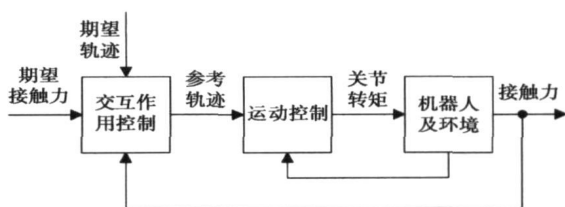


图 1 工业机器人交互作用控制策略示意图

Fig 1 Schematic drawing of interaction control strategy for industrial robot

动柔顺与被动柔顺相结合的控制策略,通过力觉传感器来感知机器人腕部所受的力和力矩,根据被动柔顺装置的刚度系数,将力信息转换为相应的位置姿态调整量,通过运动控制器使机器人绕被动柔顺装置的柔顺中心适量的平移和旋转,使末端执行器处于最佳的位置和姿态,保证接触操作的顺利完成。

交互作用控制和主动柔顺与被动柔顺相结合的控制策略实现工业机器人集成力控制的核心思想都是通过位置控制间接实现力控制,前者是通过控制算法实现的,而后者则是通过机电结构实现的。

## 3 遥控焊接力觉传感与控制

典型的焊接操作过程包括焊前准备、施焊过程和焊后检验三个阶段,根据不同阶段的任务特点,采取适当的控制策略是提高遥控焊接系统性能的关键<sup>[22]</sup>。最早的机器人遥控焊接系统出现于 20 世纪 70 年代初期,主要用于核反应堆部件的维修。1976 年,Raimondi<sup>[23]</sup>最先将力觉传感与控制应用于遥控焊接领域,实现了双向力反馈主从机器人的 TIG 焊接。1995 年,哈尔滨工业大学的吴威等人<sup>[24]</sup>对主从式焊接机器人的力觉临场感技术进行了研究。在上述研究中,都采用了在焊枪上安装力觉导引头的方式对焊缝进行接触跟踪。由于施焊过程的控制参数多、精确性和实时性要求高,因此遥控焊接任务的施焊过程不宜采用基于力觉临场感的遥操作方式。力觉传感与控制技术应该侧重于遥控焊接任务的遥示教、环境建模以及接触操作的双向力反馈控制和接触力控制,施焊过程应该以以上述工作为基础,在焊缝跟踪传感器的辅助下,以自主的方式完成。2006 年,刘立君<sup>[25]</sup>首先针对遥控焊接力觉遥示教技术开展了相关的工作。

在焊前准备阶段,依靠视觉传感通常只能建立粗略的任务环境模型。通过力觉传感与控制技术,不仅可以测量接触点的精确空间位置,还能够获取

接触面的几何特征信息。因此,在视觉粗略建模基础上,通过力觉传感对任务环境进行精确识别,无疑是建立高精度任务环境模型的有效途径。

为了完成遥控焊接任务,需要将焊接操作的各个阶段分解为若干个子任务,通过任务规划确定子任务的执行顺序和相应控制策略。根据机器人末端执行器与作业对象的关系,机器人遥控焊接子任务可以分为非接触任务、结构化环境接触任务和非结构化环境接触任务三类。引导弧焊机器人焊枪到达焊缝起始点以及施焊的整个过程属于非接触任务;从辅助工作台上更换工具的过程是典型的结构化环境接触任务;而诸如焊前准备阶段待焊工件的切割打磨、专用焊接设备的装配以及焊后检验阶段的接触式探伤等都属于非结构化环境接触任务。

对于非接触任务,主要应用视觉传感,在宏观引导过程中,采用基于视觉临场感的主从遥操作或者基于视觉建模的监督控制;在微观施焊过程中,采用基于视觉传感的焊缝自主跟踪。力觉传感用于辅助精确建模和意外碰撞检测。对于结构化环境接触任务,可以通过本地端预先任务示教和远端遥再现的方式自动完成。力觉传感用于接触力状态监测。

针对机器人遥控焊接的研究主要集中在非接触任务和结构化环境接触任务问题上,对于非结构化环境接触任务的研究较少。

对于焊前准备和焊后检验阶段中涉及的非结构化环境接触任务,可以采用遥操作控制、自主控制和监督控制三种不同的工作模式来完成。当采用基于视觉临场感和力觉临场感的遥操作控制模式时,力觉传感是实现双向力反馈遥操作的基础,力觉传感器与主端力反馈输入设备、操作者以及从端机器人构成双向遥操作控制闭环。当采用自主控制模式时,力觉传感是实现机器人末端执行器与任务环境接触力控制的基础,力觉传感器直接与从端机器人控制器构成力伺服控制闭环。当采用基于环境模型的监督控制方式时,力觉传感可以在视觉建模的基础上,建立任务环境精确模型,并以被动柔顺方式完成接触任务。

综上所述,针对机器人遥控焊接领域中的非结构化环境接触任务,开展双向力反馈遥操作、机器人接触力控制以及力觉精确建模等力觉传感与控制技术的研究,对于机器人遥控焊接向实用化方向发展具有重要意义。

## 4 结 语

从通用性和实用性角度考虑,机器人遥控焊接

系统一般采用以位置伺服型工业机器人为平台的体系结构,机器人本体具有很高的刚性。同时,遥控焊接领域涉及的任务环境几乎都是刚性很高的金属材料。因此,机器人与任务环境的接触是“硬接触”过程。由于力传感器带宽和机器人伺服周期的限制,对于“硬接触”过程无法实现稳定控制<sup>[26]</sup>,必须在机器人遥控焊接系统中加入能够吸收机器人与环境相互作用的被动柔顺装置。为了克服被动柔顺存在的问题,需要对工业机器人进行位置伺服型力控制,实现主动柔顺性。因此,采用主动柔顺与被动柔顺相结合的接触力控制策略是完成机器人遥控焊接接触任务的理想方案。

为了实现遥控焊接接触任务的自主控制,机器人遥控焊接系统可以采用设定接触力临界值的混合式控制策略,在视觉传感建立全局任务环境模型的基础上,通过图形仿真和离线编程进行任务规划。在任务执行过程中,当接触力小于临界值时,机器人遥控焊接系统保持被动柔顺状态;当接触力大于临界值时,通过主动的接触力控制完成接触操作。尽管力觉传感在涉及与环境接触的作业中必不可少,但视觉传感仍是遥控机器人识别非结构化环境的主要手段,视觉传感和力觉传感的融合控制是当前机器人自动化领域的研究热点<sup>[27]</sup>。

## 参考文献:

- [1] 殷跃红,朱剑英.智能机器力觉及力控制研究综述[J].航空学报,1999,20(1):1—7.
- [2] Yoshikawa T. Force control of robot manipulators[C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation. USA: San Francisco, 2000: 220—226.
- [3] Craig J. 机器人学导论[M]. 闵超,李成群,陈心颐等译.北京:机械工业出版社,2006.
- [4] 蒋新松. 机器人学导论[M]. 沈阳:辽宁科技技术出版社,1993.
- [5] 日本机器人学会. 机器人技术手册[M]. 宗光华,刘海波,程君实等译.北京:科学出版社,1996.
- [6] Whitney D. Historical perspective and state of the art in robot force control[J]. International Journal of Robotics Research, 1987, 6(1): 3—14.
- [7] Whitney D. Force feedback control of manipulator fine motions[J]. ASME Journal of Dynamic System Measurement and Control, 1977, 99(2): 91—97.
- [8] Salisbury J. Active stiffness control of a manipulator in cartesian coordinates[C] // Proceedings of the 19th IEEE Conference on Decision and Control. USA: Albuquerque, 1980: 95—100.
- [9] Mason M. Compliance and force control for computer controlled manipulators[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 1981, 11(6): 418—432.

- [10] Hogan N. Impedance control: an approach to manipulation: part I-theory; part II-implementation; part III-applications[J]. *ASME Journal of Dynamic System Measurement and Control*, 1985, 107(1): 1—24.
- [11] Raibert M, Craig J. Hybrid position/force control of manipulators[J]. *ASME Journal of Dynamic System Measurement and Control*, 1981, 103(2): 126—133.
- [12] Khatib O. A unified approach for motion and force control of robot manipulators: the operational space formulation[J]. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987, 3(1): 43—53.
- [13] Yoshikawa T. Dynamic hybrid position/force control of robot manipulators-description of hand constraints and calculation of joint driving force[J]. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1987, 3(5): 386—392.
- [14] Anderson R, Spong M. Hybrid impedance control of robotic manipulators[J]. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1988, 4(5): 549—555.
- [15] De Schutter J, Bruyninx H, Zhu W, *et al.* Force control: a bird's eye view[C] // *IEEE DSS/RAS International Workshop on Control Problems in Robotics and Automation: Future Directions*. USA: San Diego, 1997: 1—18.
- [16] De Schutter J, Van Brussel H. Compliant robot motion II: a control approach based on external control loops[J]. *International Journal of Robotics Research*, 1988, 7(4): 18—33.
- [17] Chiaverini S, Siciliano B, Villani L. The parallel approach to force/position control of robotic manipulators[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1993, 9(4): 361—373.
- [18] Chiaverini S, Siciliano B, Villani L. Parallel force/position control schemes with experiments on an industrial robot manipulator[C] // *Proceedings of the 13th World Congress of IFAC*. USA: San Diego, 1996: 25—30.
- [19] Caccavale F, Natale C, Siciliano B *et al.* Resolved-acceleration control of robot manipulators: a critical review with experiments[J]. *Robotica*, 1998, 16(5): 565—573.
- [20] Chiaverini S, Siciliano B, Villani L. A survey of robot interaction control schemes with experimental comparison[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1999, 4(3): 273—285.
- [21] Caccavale F, Natale C, Siciliano B *et al.* Integration for the next generation: embedding force control into industrial robots[J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2005(9): 53—64.
- [22] 李海超. 焊接遥操作机器人系统及人机协作控制策略的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [23] Raimondi T. Remote handling in the joint european tonus (JET) fusion experiment[C] // *Proceedings of the 24th Conference on Remote System Technology*. USA: Washington, District of Columbia, 1976: 188—195.
- [24] 吴 威, 蔡鹤皋, 吴 娟, 等. 主从式焊接机器人力觉临场感技术[J]. *焊接学报*, 1996, 17(2): 122—127.
- [25] 刘立君. 遥控焊接力觉遥示教技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [26] Doh N, Chung W, Youm Y. On hard contact force control[C] // *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Japan: Takamatsu, 2000: 1528—1533.
- [27] Siciliano B. Control in robotics: open problems and future directions[C] // *IEEE Conference on Control Applications*. Italy: Trieste, 1998: 81—85.

**作者简介:** 魏秀权, 男, 1982 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机器人遥控焊接、力觉传感与控制、虚拟环境标定。发表论文 2 篇。

**Email:** wxq1982@hit.edu.cn

dual-arc welding method. Finally, the actual arc igniting course was observed and analyzed by high speed video camera.

**Key words:** welding; plasma arc; metal inert-gas arc; arc igniting; Paschen law

### **Mechanical properties and microstructure of X70 butt joint welded by self-shielded flux cord wire**

PAN Chuan<sup>1</sup>, YU Ping<sup>1</sup>, TIAN Zhilin<sup>1</sup>, XUE Zhenkui<sup>2</sup> (1. China Iron & Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China; 2. Pipeline Research Institute of CNPC, Langfang 065000, Hebei, China). p93—96

**Abstract:** The present paper deals with the research work of self shielded flux cored wire (FCAW-S) for X70 large diameter pipe. Welding procedure qualifications tests and mechanical properties tests were carried out by Pipeline Research Institute of CNPC to assess field weldability and should be in accordance with API 1104 and the additional standard requirements. The results of welding procedure qualifications tests show that the self-made FCAW-S has good all-positions weldability, detachability, arc stability and less spatter loss coefficient and total amount of weld fumes. The tensile strength of the weld is about 730—760 MPa and the average impact absorbing energy at  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  is 125 J. Tests results show that this self-made FCAW-S can provide a qualified weld for X70 pipeline steel. The microstructure of X70 butt joint weld exhibits acicular ferrite, polygonal ferrite, proeutectoid ferrite, bainite morphology but shows no weidmanstalen structure in HAZ (heat-affected zone) coarse grain zone. The main microstructure in columnar crystal zone and HAZ coarse grain zone is bainite. Bainitic microstructure in the butt joint indicated this self-made FCAW-S have the capability to meet all mechanical properties requirements of this welding material.

**Key words:** X70 Pipeline steel; self-shielded flux cored wire; properties; microstructure

### **Welding technology and microstructure and properties of welded joint of high strength and hardness alloy steel for tandem GMAW**

FENG Yuehai, WANG Kehong, WANG Jianping, GU Minle (Department of Materials Science & Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China). p97—100

**Abstract:** Tandem GMAW (gas metal arc welding) is high efficiency welding technology for high strength and hardness alloy steel in heavy vehicles was studied. Austenitic stainless steel wire was adopted to make welding process experiment for high strength and hardness alloy steel, and the performance and microstructure of the joint were researched. The experiment results proved the good joint of high strength and hardness alloy steel was attained with tandem GMAW.

**Key words:** tandem; welding parameters; joint properties; microstructure

### **Engineering estimation method of 5A06 aluminum alloy's material properties by PDS**

ZENG Zhi, WANG Lijun (School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China). p101—104

**Abstract:** The 5A06 aluminum alloy is one kind of basic welding materials, but its thermo physical parameters, especially at the high temperature, have been hardly determined under the general project condition, which have great influence on the accuracy of engineering computation. The best annealing temperature of 5A06 Al alloy was confirmed with engineering experiment, based on the rebound after annealing, and the finite element model was built, and the thermo physical parameters were estimated with the probability design system (PDS) in the finite element software ANSYS. The analysis indicated that the obtained material attribute values accord with the project reality. The use of the probability design system provides one of the phenomenological effective methods for the solution of the unknown material attributes.

**Key words:** 5A06 aluminum alloy; probability design system; material properties; annealing

### **Stress-strain cycles of titanium alloy welding process**

LI Ju<sup>1</sup>, GUAN Qiao<sup>1</sup>, SHI Yaowu<sup>2</sup>, GUO Delun<sup>1</sup> (1. Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China; 2. School of Material Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China). p105—107

**Abstract:** The welding thermal elasto-plastic stress-strain cycles diagram (shortly WSS diagram) describes the welding stress-strain relation on the whole. The stress-strain cycle in every area is the necessary part of the WSS diagram. The stress and strain relations of the points with different distances from the weld centerline on the specimen were investigated. The states of stress and strain of some point on the specimen during the welding process could be derived. On the basis of these results, the stress and strain relation in the each area of WSS diagram can be derived, and the diagram is described quantitatively, which make it easy to understand the WSS diagram. The results showed that the longitudinal stress-strain cycles are different in the different areas in the diagram. During the cooling process, weld and the zone nearby are in the unloaded states.

**Key words:** titanium alloy; welding; stress; strain

### **Review and prognosis of state of arts on force sensing and control for robotic remote welding**

WEI Xiuquan, LI Haichao, GAO Hongming, WU Lin (State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p108—112

**Abstract:** Force sensing and force control are crucial for the successful execution of contact manipulation in unstructured environment for robotic remote welding. In this paper, research on the theory of robot force control and the strategy of embedding force control into industrial robots are reviewed. Focusing on the fundamental issues in contact task, appropriate force control strategies for remote welding are presented. The using of force sensing and control technology in some aspects of robotic remote welding field, such as bilateral force-feedback teleoperation, contact force control and force-based precise task environment modeling, are emphasized. At last, some research topics and investigation trends are proposed.

**Key words:** force sensing; force control; robotic remote welding