

含铌管线钢 的焊接性和耐酸性

冶金工业出版社

014009410

TG142.1
09

含铌管线钢的焊接性和耐酸性

中信微合金化技术中心 编译



北京
冶金工业出版社
2013

TG 142.1
09



北航

C1698073

012800310

内 容 简 介

本书收录了全球一流钢铁企业、下游用户和研究单位关于高等级管线钢焊接性和酸性环境用管线钢的最新研究应用成果,共计 34 篇文章。本书分为两部分:第一部分为含铌管线钢的焊接性,主要介绍高钢级、大厚壁管线钢的开发和应用,共 22 篇文章;第二部分为含铌管线钢的耐酸性,主要介绍抗酸管线钢的开发和应用研究,共 12 篇文章。

本书可供管线钢、埋弧焊和野外环焊等领域的科研工作者使用,同时也可作为其他领域低合金高强度钢的研发工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

含铌管线钢的焊接性和耐酸性/中信微合金化技术中心编译. —北京:
冶金工业出版社, 2013. 10

ISBN 978-7-5024-6390-8

I. ①含… II. ①中… III. ①含铌—钢管—可焊性—研究
②含铌—钢管—耐酸性—研究 IV. ①TG142. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 245493 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 李 梅 于昕蕾 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-6390-8

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2013 年 10 月第 1 版, 2013 年 10 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 21.75 印张; 564 千字; 336 页

89.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿信箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

编译委员会

名誉主任 付俊岩 王晓香

主任委员 郭爱民

副主任 张永青

委员 陆匠心 郑 磊(宝钢中央研究院)

张万山 黄国建(鞍钢集团钢铁研究院)

李永东 牛 涛 缪成亮(首钢研究院)

李建民 王玉田(太钢不锈钢股份有限公司)

郭 斌 徐进桥(武汉钢铁(集团)公司研究院)

吴年春 霍松波(南京钢铁股份有限公司研究院)

尚成嘉 郭 晖(北京科技大学材料科学与工程学院)

刘清友 贾书君(钢铁研究总院结构材料研究所)

霍春勇 马秋荣 吉玲康(中石油石油管工程技术研究院)

韩秀林 付彦宏 田 鹏(渤海装备研究院)

冯 斌 范玉然(中石油管道科学研究院)

王青峰 肖福仁(燕山大学)

编译者的话

长距离、大口径和高压输送管道作为油气输送最经济、最安全和不间断的运输方式，近四十年来在全球范围管带技术获得了快速发展。与世界相比，中国管道技术发展始于改革开放初期，但近二十年来随着西气东输等一系列世界级的管线工程的建设，我国无论管线钢制造技术，还是管线设计、制造施工技术均实现了跨越式发展，标志着我国管道技术已处于世界先进行列。

伴随着管线工程技术的跨越式发展，我国高强、高韧性，以及焊接性优良和满足酸性服役环境等特殊用途管线钢获得长足的进步，以铌微合金化和 HTP 技术为基础，针状铁素体和低碳贝氏体组织为代表的厚壁高钢级管线钢的成功开发，推动了我国长输管线的高速发展。正如国际管道技术权威专家 Kozasu 在总结管线钢技术发展史时指出的，“铌是管线钢成分结构和冶金学的基石”。

多年来，中信金属、中信微合金化技术中心致力于含铌高性能钢材的开发和应用研究，并借助于巴西矿冶公司（CBMM）铌微合金化技术大家庭这一国际平台，把铌微合金化及 HTP 技术引入中国，把国际最新的微合金化研究成果介绍给我国钢铁企业及管道行业，多次组织国际会议，邀请国际、国内专家进行技术访问及交流，设立研究项目推动我国管线钢的开发及管道技术的进步。例如，在西二线工程初期，中信金属、中信微合金化技术中心曾先后于 2003 年 7 月、2006 年 7 月组织邀请国内专家代表参加由巴西矿冶公司（CBMM）举办的“HTP 技术”和“石油天然气管道工程技术及微合金化钢”国际研讨会，并于 2006 年 1 月组织中石油专家考察团访问美国夏延管道项目，为我国西气东输二线管道项目成功开发和应用 X80 钢提供了重要的技术支撑和保障。依托西气东输二线管道项目和 X80 级别管线

钢,我国长输管道和高钢级管线钢开发和应用实现了质的跨越,一举跻身全球高钢级管线钢开发和应用的大国之列。正如中国工程院院士李鹤林评价,“西二线用 X80 钢国产化让我国管道业实现从追赶到引领的跨越”。

科学永无止境,应用研究趋于善美。为了继续推动管线钢应用技术的发展,中信金属的合作伙伴巴西矿冶公司(CBMM)与矿物、金属和材料学会(TMS)于2011年11月在巴西 Araxa 举办了“高钢级管线钢焊接性”国际研讨会;巴西矿冶公司(CBMM)、圣保罗大学和美国微合金钢研究院于2012年8月在巴西 Araxa 举办“酸性环境用微合金管线钢”国际研讨会。应巴西矿冶公司(CBMM)邀请,中信金属、中信微合金化技术中心组织并邀请了国内钢铁企业、石油管道行业及科研院所专家代表27人参加了国际研讨会。

会议报告主要涉及世界范围内重要的油气输送管道用高钢级管线钢设计原则、规范和力学性能分析,以及管线钢的焊接性能评价和焊接工艺研究。如针对部分专家对新一代低碳高铌 X80 钢焊接性能的质疑,国内外专家系统研究、介绍了不同焊接材料、焊接工艺对热影响区组织和韧性的影响;针对永久冻土带和地震多发地区,完善了基于应变设计理念的管线钢力学性能要求和应变能力预测;针对酸性服役环境抗氢致裂纹(HIC、SSCC)要求,系统介绍了国际抗酸管线钢的检验方法和产品设计理念。此外, ArcelorMittal 和 Salzgitter Mannesmann 专家分别介绍了 21.6mm 和 23.7mm 厚热轧卷板 and 对应螺旋埋弧焊管的研究成果,为低碳高铌 X80 钢的应用提供了更广阔的前景;EUROPIPE, Salzgitter 和 JFE 分别介绍酸性环境用厚壁、高钢级管线钢的冶金设计理念和生产经验。管线钢由于其特殊的综合力学性能要求,能够代表一个钢厂、一个国家钢铁工业的材料设计、炼钢和轧钢控制水平,以及质量管理水平,如 HTP 工艺促进了铌微合金化技术的进步;酸性环境用管线钢的开发促进了洁净钢冶炼水平和一体化质量管理水平等的提高。

为尽快地把以上两次国际研讨会上有关世界管道建设和管线钢应用的最新技术发展情况介绍给中国从事相关行业的科研工作者,促进我国石油天然气管道和钢铁工业的协同发展,在巴西矿冶公司(CBMM)的支持下,CITIC-CBMM 中信微合金化技术中心组织编译,冶金工业出版社出版了这两次国际研讨会论

文集的中文版本，以供中国钢铁、管道行业领域的专家、学者、工程师、冶金专业大专院校的教授与研究生借鉴和参考。

本论文集的编译工作得到了渤海装备研究院钢管研究所、北京科技大学、钢铁研究总院和燕山大学的领导和专家的鼎力相助，另外，首钢、宝钢、武钢、中石油管道科学院、中石油石油管工程技术研究院的领导和专家对编译文集进行了校对，在此表示衷心的感谢。

CITIC-CBMM 中信微合金化技术中心
中信金属有限公司
2013 年 8 月 9 日

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	定价(元)
铌微合金化高性能结构钢	88.00
现代含铌不锈钢	45.00
铌·高温应用	49.00
铌·科学与技术	149.00
超细晶钢——钢的组织细化理论与控制技术	188.00
新材料概论	89.00
材料加工新技术与新工艺	26.00
合金相与相变	37.00
2004 年材料科学与工程新进展(上、下)	238.00
电子衍射物理教程	49.80
Ni-Ti 形状记忆合金在生物医学领域的应用	33.00
金属固态相变教程	30.00
金刚石薄膜沉积制备工艺与应用	20.00
金属凝固过程中的晶体生长与控制	25.00
复合材料液态挤压	25.00
陶瓷材料的强韧化	29.50
超磁致伸缩材料制备与器件设计	20.00
Ti/Fe 复合材料的自蔓延高温合成工艺及应用	16.00
有序金属间化合物结构材料物理金属学基础	28.00
超强永磁体——稀土铁系永磁材料(第2版)	56.00
材料的结构	49.00
薄膜材料制备原理技术及应用(第2版)	28.00
陶瓷腐蚀	25.00
金属材料学	32.00
金属学原理(第2版)	53.00
材料评价的分析电子显微方法	38.00
材料评价的高分辨电子显微方法	68.00
X 射线衍射技术及设备	45.00
首届留日中国学者 21 世纪材料科学技术研讨会论文集	79.00
金属塑性加工有限元模拟技术与应用	35.00
金属挤压理论与技术	25.00
材料腐蚀与防护	25.00
金属材料的海洋腐蚀与防护	29.00
模具钢手册	50.00
陶瓷基复合材料导论(第2版)	23.00
超大规模集成电路衬底材料性能及加工测试技术工程	39.50
金属的高温腐蚀	35.00
耐磨高锰钢	45.00
现代材料表面技术科学	99.00



北航

C1698073

含铌管线钢的焊接性和耐酸性



含铌管线钢的焊接性

铌及其在焊接热影响区的神奇效果	Phil Kirkwood 博士, 比西矿冶公司顾问	3
高强度钢管线的设计和施工	Alan Glover Ph. D. , P. Eng, Alan Glover 冶金学咨询公司	26
含铌管线钢管焊缝用焊接金属的合金体系	John R. Procario, Teresa Melfi	37
关于马奥岛组元特征的计算	H. K. D. H. Bhadeshia	44
铌微合金化管线钢单道次及多道次焊接热影响区的 EBSD 表征 Sundaresa Subramanian, 由 洋, 聂文金, 缪成亮, 尚成嘉, 张晓兵, Laurie Collins		49
钛和氮含量对微合金高强度管线钢焊缝显微组织和性能的影响 Leigh Fletcher, Zhixiong Zhu, Muruganant Marimuthu, Lei Zheng, Mingzhuo Bai, Huijun Li, Frank Barbaro		66
管线钢热影响区的显微组织和性能	R. C. Cochrane	74
高强度管线钢管的基本焊接问题	Andreas Liessem, Ludwig Oesterlein, Hans-Georg Hillenbrand, Christoph Kalwa	92
壁厚 23.7mm 大口径 X80 螺旋焊钢管的加工及其性能 Sandrine Bremer, Volker Flaxa, Franz Martin Knoop, Wolfgang Scheller, Markus Liedtke		102
英国 X80 管线焊接工艺的开发	Neil Millwood	114
高强度管线钢可焊性的提高与可靠性判据	D-r Frantov Igor, Permyakov Igor, D-r Bortsov Alexander	123
含铌钢多道焊接热循环下的模拟热影响区微观组织的对比研究 T. Lolla, S. S. Babu, S. Lalam, M. Manohar		131
管道自动焊在短工期条件下的运用	Dr. V. R. Krishnan	140
基于应变设计管线的应变能力预测	Rudi M. Denys, Stijn Hertelé, Matthias Verstraete, Wim De Waele	149
铌微合金化对 X80 大口径管线环焊后热影响区微观组织的影响 M. Guagnelli, A. Di Schino, M. C. Cesile, M. Pontremoli		160
高强度管线钢环焊缝的缺陷和应变容量	J. R. Gordon, Gary Keith	167

高强度焊接钢管中的裂纹形成及扩展	I. Yu. Pyshmintsev, A. O. Struin, V. N. Lozovoy, A. B. Arabey, T. S. Esiev	183
螺旋焊管用大厚度 X80 管线钢的开发和焊接性评价	Martin Liebeherr, Özlem Esma Güngör, David Quidort, Denis Lèbre, Nenad Ilić	193
拥有一体化焊接技术支持的大厚度管线钢的生产	Hendrik Langenbach, Maik Bogatsch, Karina Wallwaey	199
低碳高铌 X80 管线钢焊接性能的研究	尚成嘉, 王晓香, 刘清友, 付俊岩	206
低碳高铌管线钢的焊接性能及其在 HIPERC 工程中的应用	Stephen Webster	219
西气东输二线管道工程用 X80 钢管环焊应用技术研究	赵海鸿, 靳海成, 黄福祥, 冯 斌	231

含铌管线钢的耐酸性

圣保罗大学理工学院进行的耐酸钢研究	Neusa Alonso-Falleiros	243
NACE MR0175 现在仍适用吗?	Chris Fowler 博士	250
一种新的应力导向氢致开裂实验方法的沿革	Chris Fowler 博士, J. Malcolm Gray 博士	255
海洋超深水用高韧性 API 5L X70 MS 钢管的开发	Ronaldo Silva, Marcos Souza, Luis Chad, Marcelo Teixeira	261
采用 JCOE 工艺研制的酸性服役条件大壁厚双面直缝埋弧焊管 WCL, T S Khatayat, Prasanta K. Mukherjee, Rajesh K Goyal, J Raghu Shant, Richard Hill		271
欧洲钢管酸性服役环境用钢管的生产经验及新进展	Christoph Kalwa, Hans-Georg Hillenbrand	284
安赛乐-米塔尔拉萨罗卡德纳斯(墨西哥)生产酸性服役用管线钢管用板坯的工艺和质量 控制	J Nieto, T Elías, G López, G Campos, F López, A K De	290
酸性服役 UOE 管线管的冶金设计	Yasuhiro Shinohara, Takuya Hara	297
标准及非标准氢致开裂环境下 UOE 管线管材料的合金设计	C. Stallybrass, T. Haase, J. Konrad, C. Bosch, A. Kulgemeyer	304
高强厚壁酸性服役管线管的材料设计	Nobuyuki Ishikawa, Shigeru Endo, Ryuji Muraoka, Shinichi Kakihara, Joe Kondo	312
酸性服役高强度管线钢近期发展状况	H. G. Jung, W. K. Kim, K. K. Park, K. B. Kang	323
低锰酸性服役管线钢	J. Malcolm Gray	328

含铌管线钢的焊接性

铌及其在焊接热影响区的神奇效果	3
高强度钢管线的设计和施工	26
含铌管线钢管焊缝用焊接金属的合金体系	37
关于马奥岛组元特征的计算	44
铌微合金化管线钢单道次及多道次焊接热影响区的 EBSD 表征	49
钛和氮含量对微合金高强度管线钢焊缝显微组织和性能的影响	66
管线钢热影响区的显微组织和性能	74
高强度管线钢管的基本焊接问题	92
壁厚 23.7mm 大口径 X80 螺旋焊钢管的加工及其性能	102
英国 X80 管线焊接工艺的开发	114
高强度管线钢可焊性的提高与可靠性判据	123
含铌钢多道焊接热循环下的模拟热影响区微观组织的对比研究	131
管道自动焊在短工期条件下的运用	140
基于应变设计管线的应变能力预测	149
铌微合金化对 X80 大口径管线环焊后热影响区微观组织的影响	160
高强度管线钢环焊缝的缺陷和应变容量	167
高强度焊接钢管中的裂纹形成及扩展	183
螺旋焊管用大厚度 X80 管线钢的开发和焊接性评价	193
拥有一体化焊接技术支持的大厚度管线钢的生产	199
低碳高铌 X80 管线钢焊接性能的研究	206
低碳高铌管线钢的焊接性能及其在 HIPERC 工程中的应用	219
西气东输二线管道工程用 X80 钢管环焊应用技术研究	231

014009410

TG142.1
09

含铌管线钢的焊接性和耐酸性

中信微合金化技术中心 编译



北京
冶金工业出版社
2013

TG 142.1
09



北航

C1698073

012800310

内 容 简 介

本书收录了全球一流钢铁企业、下游用户和研究单位关于高等级管线钢焊接性和酸性环境用管线钢的最新研究应用成果,共计34篇文章。本书分为两部分:第一部分为含铌管线钢的焊接性,主要介绍高钢级、大厚壁管线钢的开发和应用,共22篇文章;第二部分为含铌管线钢的耐酸性,主要介绍抗酸管线钢的开发和应用研究,共12篇文章。

本书可供管线钢、埋弧焊和野外环焊等领域的科研工作者使用,同时也可作为其他领域低合金高强度钢的研发工作者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

含铌管线钢的焊接性和耐酸性/中信微合金化技术中心编译. —北京:
冶金工业出版社, 2013. 10

ISBN 978-7-5024-6390-8

I. ①含… II. ①中… III. ①含铌—钢管—可焊性—研究
②含铌—钢管—耐酸性—研究 IV. ①TG142. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 245493 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 李 梅 于昕蕾 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-6390-8

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2013 年 10 月第 1 版, 2013 年 10 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 21.75 印张; 564 千字; 336 页

89.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿信箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

铌及其在焊接热影响区的神奇效果

Phil Kirkwood 博士, 比西矿冶公司顾问

The Old School House Cresswell, Northumberland, England, NE61 5JT

摘要: 以前的研究者认为, 为了避免不可接受的低热影响区韧性, 结构钢和管线钢的应用规范中应限制铌元素的含量, 本研究认为以上观点是错误的, 应予以彻底推翻。此外, 证明了控制碳含量和合理的使用主要合金元素总是能够允许钢厂筛选出更有吸引力、更有效的合金设计方案, 从而应用铌的独特性能获得钢板和热影响区力学性能的最佳结合。后一个目标之所以成为可能, 在于目前更加重视采用铌微合金化作为控制低合金高强度钢热影响区韧性的重要手段, 这就能保证提供给特定工程项目的钢在冶金学方面是量身定做的, 能够适应特定用途的焊接工艺。

关键词: 铌, 热影响区, 转变温度

1 引言

铌, 一直是一个笼罩在神秘之中的元素。铌最初是由英国皇家学会的查尔斯·哈契特院士于 1801 年发现的, 并命名为铌^[1]。在很长的一段时间里, 铌与钽一直难以分辨, 直到 1844 年一位德国化学家海因里希·罗斯^[2]才通过化学价态证明了这两种元素之间的细微差别。罗斯很恰当地将哈契特发现的这个元素更名为铌, 这是取自广为熟知的希腊神话中西皮罗斯国坦塔罗斯国王的一个女儿尼俄柏 (Niobe) 的名字。坦塔罗斯在人类中独受神的青睐, 被邀请分享至高无上的统治者宙斯的神食。

由于这一有趣的背景与其杰出的身世, 人们对铌成为独特的微合金化元素也许就不会感到惊讶。铌在现代钢材中应用时常产生神奇的效果, 有些甚至令人难以置信。19 世纪 30 年代末, 铌率先被确认有助于提高热轧碳锰钢的强度^[3]。当时还不完全精确了解其强化机理, 认为是由碳氮化铌析出颗粒导致的细晶强化作用的结果。其后过了相当长的时间, 铌才被广泛应用于生产各种钢材产品, 如格雷教授 (Gray)^[4]最近提醒, 铌在 1959 年首次应用于管

线钢管。格雷教授和西西里阿诺教授 (Siciliano) 在关于铌应用的全面的历史回顾中^[5]还指出, 铌的引入和应用并非没有受到挑战。起初有人指出, 在某种情况下, 添加铌会降低板材的夏比缺口韧性, 这种情况首先被归咎于魏氏体铁素体或渗碳体网状物在铁素体晶界的存在^[6,7], 其后也归咎于铌碳氮化物的沉淀硬化^[8]。幸运的是, 研究者很快就意识到, 可以通过简单地增加锰含量^[9], 以及改进轧制制度, 获得精细的铁素体晶粒尺寸来解决这个问题。

对我们所有人而言, 当我们将注意力转到热影响区时, 有一个有益的教训值得铭记。

事实上, 铌已经使它的批评者蒙羞。现在, 铌单独或与其他微合金元素匹配使用已成为一个几乎不可替代的成分设计, 广泛应用于现代高强钢的各个领域, 包括全谱系的汽车、棒线材, 以及建筑、海洋结构、桥梁、起重机、船板、液化石油气容器等结构用钢, 尤其重要的是应用需求日益增加的管线钢。

在 19 世纪 70 年代, 当充分了解铌微合金化技术对母材主要性能的影响机理后, 研究者不可避免地将注意力放在铌对热影响区的作用。在某种程度上, 这得益于海洋工程和管线

用钢焊接技术条件和规范的广泛应用和报道,以及文献报道关于铌微合金化强化效果自相矛盾的观察结果,促使研究工作者研究将铌作为一种微合金元素重点研究的价值。有时提出的规范限制过于武断,没有经过技术上的证实,显然,仔细的审查是必要的。

19 世纪 80 年代进行的一个关于微合金元素在控制 HAZ 韧性作用方面的综合性评估^[10]得出铌的一些特定行为的细节,以及如何充分发挥铌这种重要元素的使用效果。这个评述指出,HAZ 韧性首先受到显微结构的控制,其中最重要的因素是相变温度。很明显,后者受到成分和奥氏体转变成低温产物相关的临界温度范围之间的冷却速率的控制。评述进一步证明,就此而论,铌等元素具有与碳或其他主要合金元素如锰、硅、钼或镍相同的重要性。通过对铌在不同的碳含量以及大范围冷却速率内作用的比较,说明了使用这一关键元素的最优方式是必须全面协调地结合最终用途和焊接工艺的实施,精心考虑铌微合金钢的合金设计。

当然,后来的回顾几乎全部集中在粗晶热影响区 (CGHAZ) 韧性方面,因为在那个碳

含量相对较高的时代,该区不可避免地呈现出最低的韧性,更为重要的是焊接影响区存在着最常见的焊接缺陷,如氢致冷裂纹。现在,尽管几十年来含铌微合金钢取得了巨大的发展,基于如下理由,有必要在三十多年后来回顾这一课题。错误的推论固然难以完全消除,并且在最近几年,在某种程度上潜在的有价值的文献在不经意中重新引起对铌在低合金钢的 CGHAZ 以及多道焊的临界热影响区 (ICHAZ) 中特殊作用的关注。在下文的适当章节中对后者将给出更加明确的定义。

2 热影响区

在钢材焊接过程汇总中,如果焊接工艺存在问题,就会不可避免地在与母材相邻的一个区域内,因焊接热循环的影响而使其微观结构和力学性能发生显著改变。许多作者已经对这一重要区域或热影响区 (HAZ) 的特征和范围作了非常充分的描述。尽管对此已有最广泛的论述,但是对于目前的讨论,选择采用下面图 1 进行描述,这最初是由巴特 (Batte) 等人发布的^[11]。在这个非常有用的图中,指出

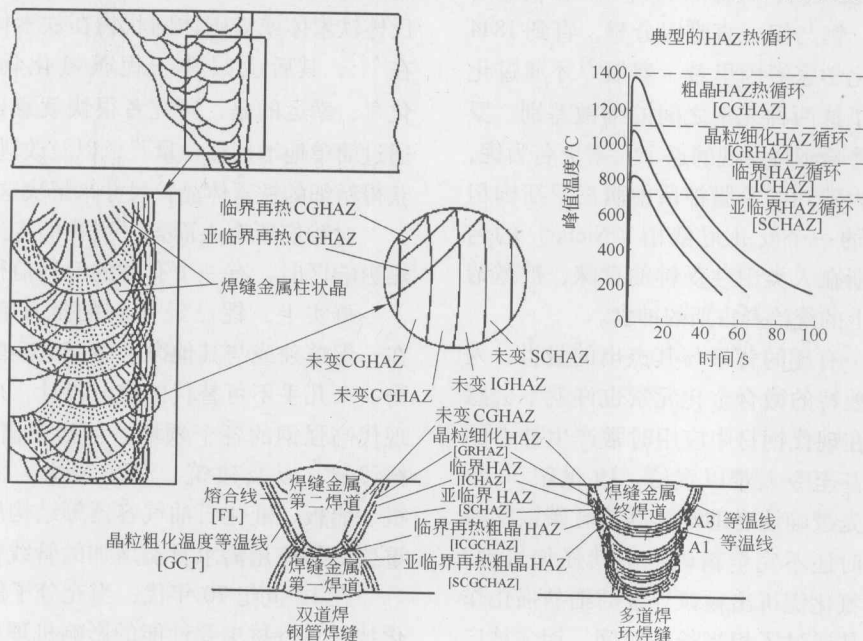


图 1 热影响区显微组织的演变

(依据巴特等人的论文^[11])

了双道焊和多道焊热影响区内最重要的各个亚区的位置和起源,在文章随后的章节中,将使用图1的术语来描述这些令人产生兴趣的区域。

下面,将重点分析高强度低合金钢焊接件中被广泛认为具有最重要意义的两个区域。粗晶热影响区(CGHAZ)是最接近焊缝自身的区域,在这个区域中,钢在冷却过程中转变为各种低温组织之前实际上已被重新奥氏体化,转变为何种低温转换产物则取决于成分、加热温度和冷却速率。临界再热粗晶区(ICHAZ)原是粗晶热影响区的一部分,由于后续焊道的热循环作用,部分转变为奥氏体组织。如巴特等人所述^[10],显然这种特殊的影响只发生在典型焊接热影响区中局部区域内,导致富碳奥氏体组织分数和尺寸的增加,其转变行为将在下文中进行更充分的讨论。显然,从这种部分再奥氏体化组织的后续转变可以预料会产生相当复杂的混合微观组织,但具体的影响都要受制于成分和焊接热循环。显然,加热速率、峰值温度和在奥氏体区的停留时间是引人入胜的关键参数,并且当从一个焊接工艺变换到另一个焊接工艺时,这些参数会发生显著的变化。对于含有钕、钒或钛等微合金元素的钢来说,这些变量尤其重要,将在下文重点论述。无论如何,与任何特殊热循环相关的冷却速率是最值得关注的,因为它是控制转变组织进而影响韧性的主要因素。

在关于热影响区的研究中,给出通过临界温度范围(800~500℃)的冷却速率,或者更确切地说是这两个温度之间冷却所用的时间已经成为惯例。在大多数论文中,后一个参数被规定为 $\Delta t_{800-500^\circ\text{C}}$ 。在生产实际过程中,该参数是一个与板厚、任何焊前预热相关的,当然,也与所采用的焊接工艺的热输入有关。在多道焊的工况下,还必须考虑前一个焊道遗留的热量。

这一复杂关系最精确的表达式是由罗森塔尔推导出的热传导方程^[12],以及与图2类似的适用于薄板的图表,该图表已纳入相应的欧洲和英国标准^[13],用于提供 $\Delta t_{800-500^\circ\text{C}}$ 数值的

导则,使用时必须考虑整个典型热输入范围内施焊的工况。使用这样的图表必须经过认真咨询,重要的是认真研究源文件^[13],以确保热传导状态(二维或三维)已得到正确的评估。

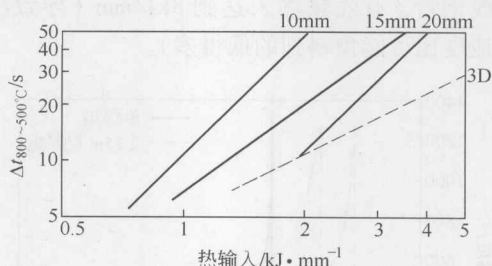


图2 二维和三维热传导条件下不同厚度钢板的冷却时间与热输入(无预热)的函数关系
(引自 BS EN 1011-2^[13])

本文的目的是给出在结构钢和管线钢焊接区间 $\Delta t_{800-500^\circ\text{C}}$ 的范围。对应于非常低的热输入——0.5~1.5kJ/mm的工况,采用金属极手工电弧焊或典型的单弧环焊工艺,即使是焊接薄板,其 $\Delta t_{800-500^\circ\text{C}}$ 冷却时间也只是少于15s。对于25~50mm的厚板,冷却时间将处于此范围的低端,为3~7s,因为此时发生的是三维热传导。对于厚度达到20mm管线钢采用埋弧焊接,双丝热输入范围为3.5~6kJ/mm的工况,冷却时间 $\Delta t_{800-500^\circ\text{C}}$ 可能在35~80s之间。而对于厚度25mm以上钢板采用电渣焊,热输入大于25kJ/mm时,可能导致冷却速率非常缓慢,冷却时间 $\Delta t_{800-500^\circ\text{C}}$ 可能大于200s。当我们将一种工况的数据和其他工况做比较时,这些图表是非常有用的,它们可以给我们一个感性的认识,并且保证所得出的结论符合特定用途的实际情况。

前已提及,对于多道焊,或者例如双焊炬环焊,必须考虑在钢板或钢管中前期焊道遗留的热量。图3是由普尔(Poole)等人给出的^[14],通过比较16mm厚X80钢管环焊的单焊炬和双焊炬焊接数据,清晰地表明了后者显著地改变了有效热循环,说明了这个因素的重要影响。显然,这对于研究热影响区的组织转变和力学性能具有重要意义。这个因素的重要

性已由陈等人在关于熔化极双焊炬脉冲气体保护环焊的论述^[15]，以及 Moeinifar 等人在关于四丝埋弧焊的论述^[16]中进一步强调指出，并进行了讨论，他们发现，对于壁厚 17.5mm 的管线钢管，有效热输入达到 8kJ/mm（导致冷却速度比可能预料到的低得多）。

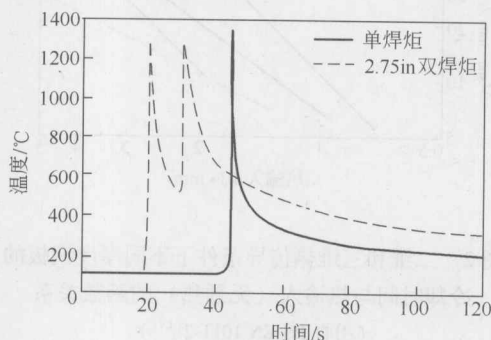


图3 在 16mm X80 管线钢管环焊接期间单焊炬和双焊炬焊接中等壁厚钢管的热过程对比
(引自 Poole 等人的著作^[14])

热影响区通常只有几毫米宽，Easterling^[17]已经注意到在焊接转变钢中可观察到的边界（通过酸蚀），其焊缝一侧对应于包晶温度，而在未受影响的母材一侧与 A_c 温度（在加热条件的下临界温度）相对应。Poorhaydari 等人^[18]已经说明了热影响区宽度的变化，在热输入为 0.5kJ/mm 时，热影响区宽度可能为 0.5mm，而在热输入达到 2.5kJ/mm 时，热影响区宽度可达 7.4mm。显然，高热输入的焊接工艺，如多弧焊或电渣焊会导致热影响区宽度的显著增加。

热影响区限定范围将会给选择适当的韧性评估试验程序带来很多问题。有关韧性的评估将在本文下面的章节讨论。因此，对单一或多元素组合作用的系统研究多采用焊接热模拟工艺，如 Gleeble 热模拟试验机或者高速热膨胀方法，它可以提供转变温度开始和结束的相关信息。此外，在实际焊接过程中，通常很难确定是钢的制造工艺还是化学成分变化对其转变行为和微观组织产生影响，焊接模拟器能够提供一种廉价、简单而快速的方法，以获得可用

于显微组织检验和力学性能测试的大量规律性试样。对这种技术也有其反面意见，认为它的试样是来自模拟处理的材料，而不能准确重现/复制实际焊接接头微小区间的冶金行为或几何约束。的确如此，但它提供了一个有用的对比研究工具，帮助我们了解在离散的焊接区域成分及冷却速率变化的冶金作用。

就个人意见而言，应用热模拟技术，对于一些影响热影响区微观组织和韧性成功进行了大量的、全面的深入研究，在本文下面章节中，作者将根据这些数据，进一步发展其理论和观点。

3 粗晶热影响区

在我们将注意力转向铌的作用以前，有必要了解早期确认的主要冶金元素可能存在的影响。许多出版的论文研究这个问题，但是我仅仅选择了很少的几篇，在我们希望了解更复杂的问题之前，这些论文是最能说明关键性问题的。

在 19 世纪 70 年代，意大利 CSM 研究院的布法利尼（Bufalini）等人^[19]完成了一项有关碳、锰、镍和钼对于粗晶热影响区韧性影响的综合研究。他们的工作采用了 Gleeble 模拟试验技术，作为一项规模宏大的试验研究工作的一部分，其目的是确认一条制造 X70 和 X80 管线钢的最佳路线。因此，强度、韧性和常规的可焊性都是同等重要的。在这项研究中，采用了两种碳含量（0.06% 和 0.12%）和三种锰含量（1%、1.5% 和 2.0%）。镍含量为 0.75% 和 1.5%，以及钼含量为 0.35% 和 0.7%。采用这些成分组合进行了系统研究，共包括 54 个试验炉批。图 4 展示了他们研究工作中的几个令人感兴趣的发现，希望有助于对这一焊接技术领域的传统智慧发起挑战。

我并不认为许多读者都能意识到，锰和镍可能对 HAZ 韧性明显有害，而碳可能至少在某些情况下会表现出对韧性有益！你何时在技术论文中见到这样的陈述或结论，提出“锰有损于 HAZ 韧性”或者“镍使 HAZ 韧性的问题进一步恶化”？或者是否你获得结论：“碳对