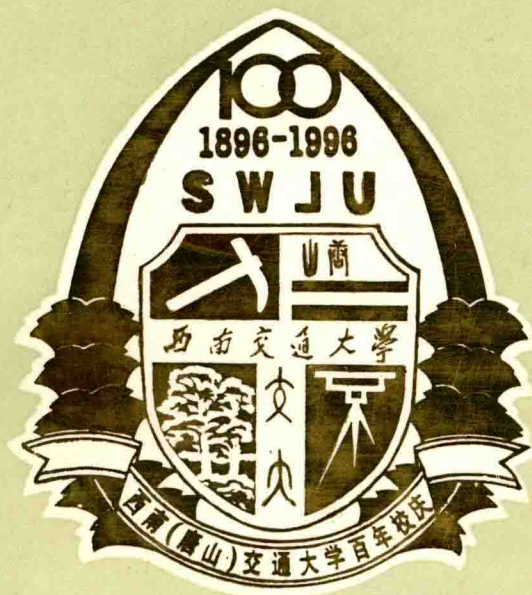


西南(唐山)交通大学 百周年校庆论文集

材料科学与工艺分册



1896—1996

西南交通大学出版社

西南（唐山）交通大学百周年校庆论文集

材料科学与工艺分册

主 编 刘世楷

副主编 王一戎 吴大兴 蔡光军

编 委 刘世楷 王一戎 吴大兴 蔡光军

西南交通大学出版社

西南(唐山)交通大学百周年校庆论文集
材料科学与工艺分册

刘世楷 主编

*

西南交通大学出版社出版发行
(成都 二环路北一段 610031)
郫县印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:8.375
字数:193千字 印数:1—400册
1996年4月第1版 1996年4月第1次印刷
ISBN 7—81022—893—5/Z·062
总定价:163.00元(本分册定价:8.50元)

总 前 言

1996年是西南交通大学建校一百周年。为了检阅改革开放以来学校在德育、教育、科研及高校管理等领域取得的成绩,反映我校作为中国近代建校最早的一所理工科大学的优良办学经验和改革创新成果,特在百周年校庆筹委会统一筹划下编辑出版了这套百周年校庆学术论文集。

我校在邓小平同志建设有中国特色社会主义理论的指导下,在铁道部、四川省和成都市的领导下,深入贯彻实施《中国教育改革和发展纲要》,始终把培养高质量人才和发展科学技术有机地结合起来,形成了教学科研两个中心。多年来,为适应国民经济和铁路现代化发展的需要,学校坚持“以学科建设为中心,以提高教育质量为本,坚持改革开放,坚持改进思想政治工作”的办学总方针,不断完善和加强德育体系的建设,形成了全员育人、全程育人、全面育人的良好局面。在学科建设方面取得重大进展,优化学科结构,建成了我国交通行业唯一的具有国际先进水平的“牵引动力国家重点实验室”,带动了学校整体水平的提高;教学改革不断深入,形成了完整的人才培养体系,在教育教学中继承和发扬我校严谨治学的优良传统,教学质量和水平不断提高,并率先在路内建立联合办学董事会,实现了办学体制改革上的新突破。科研方面通过改革,已形成包括基础研究、应用研究、开发研究在内的具有纵深配置的科研体系,整体实力明显增强,“七五”以来全校共完成各类科研项目1800多项,科研经费累计已突破2亿元。科研工作坚持面向铁路建设主战场,以“大”(大型项目)和“高”(高层次)作为学校科研的主干,组织产学研联合攻关,充分发挥多学科综合优势,着力于解决铁路现代化及国民经济发展中的重大综合性科学技术问题,成为铁路专业理论,超前发展研究和重大科技攻关的重要方面军。校办产业已建立“创效益、出人才、转成果、促学科”的发展模式,取得较大发展。在上级主管部门的领导和关怀下,通过全校师生员工的通力协作和共同努力,1994年7月我校顺利通过了由铁道部、国家教委组织的“211工程”部门预审,并已进入建设阶段。这是我校发展史上又一个新的重要的里程碑,它预示着,交通大学在21世纪初叶,必将跻身于世界一流大学的行列。

百年盛典,人生难逢。为了诚邀广大校友回母校参加庆典,学校积极筹备各项活动,包括校友联谊活动、学术交流、成果发布、科技协作等。学术论文是反映高校研究能力与学术水平的重要标志之一。学校决定以各学科为依托,编辑出版学术论文集。校庆筹备组于1995年春向全校发出征文通知,得到师生员工的热烈响应,在不到半年的时间内筹备组收到应征论文千余篇,内容涉及思想教育研究、教育研究、科学研究及改革管理等各个领域。这些论文具有广泛的代表性,反映我校“八五”期间各个方面取得的进展和成果。论文选题既紧密结合教育、科技改革实践,总结成功的经验,探索进一步增强实力、加快发展的新路子;又围绕与国民经济主战场密切相关的重大课题研究及高新技术开发,反映我校在发挥综合优势开展联合攻关及基础理论新兴学科研究方面的进展和水平。这些论文体现了前瞻性与针对性

相结合、理论研究与实践应用相结合、学术性与科技政策性相结合的学术特征。特别值得提出的是，一批青年教职工和研究生撰写的论文占了相当比例，显示我校青年科技工作者已成为一支朝气蓬勃的生力军。

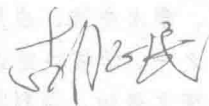
为了做好应征论文的评审与审阅，学校组成了有各学科教授、专家参加的学科评审组和编委会，在较短的时间内对提交的各类论文进行严格细致的逐篇评审，写出评审意见；校庆论文筹备组又组织专家对推荐来的论文进行两轮审阅，最后共评选出700余篇学术论文，编辑成西南交通大学学报庆祝建校百周年专刊和高等教育管理与改革正式公开出版。同时按照学科分类，编辑出版了下列分册：社会科学及思想教育研究、科技产业研究、土木工程、机械工程、材料科学、电气工程、计算机与通信工程、交通运输、管理科学、应用理科、图书情报与出版编辑、博士后论文集及研究生论文专集等，以供校庆期间开展学术交流和专题研讨用。这套校庆论文集能如期和读者见面，要特别地对在论文征集、评审、编辑、出版等方面给予指导把关和组织实施的专家和同志们致以衷心感谢，正是通过他们的热情支持和卓有成效的工作才得以向百周年校庆献上这份厚礼。

由于出版时间紧迫，海内外校友的学术论文与研究成果未及编入论文集，准备在百年校庆期间进行编印与交流。望广大校友与来宾踊跃参加，进行赐教与指导，为母校的建设与发展继续提供支持和帮助，共商学校发展宏图。

回顾过去，使我们精神振奋和自豪；展望未来，更感到任重而道远。诞生于上世纪之交的西南交通大学，将以什么样的面貌迎接新的世纪之交呢？为此，学校已确立发展的目标是：认真贯彻落实科教兴国和科教兴路、科教兴川的战略，深入进行高等教育体制改革，通过五年或更长一段时间的努力，使学校的综合实力、教育质量、学科结构、科研水平、办学效益及自我发展能力有明显提高，把西南交大建设成为国内先进、国际知名、具有铁路特色的一流理工大学，这既是上级领导对我们的殷切希望，也是几代数万名海内外校友的期望和重托，更是全校师生员工的共同心愿。

俟实扬华，日新月异。让我们发扬我校长期办学历程中形成的爱国爱校及严谨治学的传统，承扬百年，继往开来，把“211工程”建设作为创业的新起点，励精图治，开拓奋进，为实现学校改革、建设与发展的“九五”计划和“211工程”规划所确立的宏伟目标而努力奋斗！

西南交通大学校长、西南（唐山）交通大学
百周年校庆筹备委员会主任



1996年4月

前 言

1985年成立材料工程系后,金属材料 and 焊接两个专业便开始探索和规划各自的学科建设方向。1990年以后,随着系里大部分教职工迁入成都,在校各级领导的关怀与支持下,全系教职工经多方研讨,完成了学科建设规划并付诸实施。因此,“八五”期间正是这两个专业确立和实施专业学科建设的时期。在这个期间两专业承担了从国家863计划、国家自然科学基金、省、部项目到各种横向合同的课题。其中,相当一部分已在“八五”期间完成。除了部分项目成果已在工业上应用,产生了较大经济与社会效益外,还在国内外期刊和国内外学术会议上发表了近300篇论文,在国内外产生了一定的影响。

金属材料专业在“八五”期间,一面认真总结已完成的研究课题,如在国家自然科学基金重点项目等三项基金支持下的“钢中贝氏体相变”和“新型Zn—Al合金”等;另一方面,将主要力量转轨到新型材料的研究上面来,特别是复合材料及表面工程。在这期间,承担了国家863计划有关“全方位离子注入材料表面改性”的课题,并着重于这种技术的应用。课题组除了致力于金属材料的表面改性外,还开拓了热解石墨人工心脏瓣膜表面改性这个新领域。这个方向连续两次获得国家自然科学基金资助,并发展了国际合作研究。金属基复合材料的研究始于1989年,在“八五”期间,更得到两项省重点项目资助,研究“Al基复合材料强度和运用”,从而完成系列Al基合金强度、断裂机制和耐磨性研究。ZnO晶须制备是个具有新颖性的项目,受到国家基金会重视,两次给予资助,除ZnO晶须制备技术研究以外,开始转向它在功能材料上的应用研究。直流等离子体化学气相沉积无机非金属薄膜是表面工程领域的一个重要方面。本专业在此期间完成了 Si_3N_4 和金刚石等的沉积,并在沉积机制上作了较深入的探讨。

为了避免与已发表的论文重复以及受篇幅所限汇编到本论文集的论文只能部分反映本专业在“八五”期间的研究工作。

焊接专业在“八五”期间承担了“高速车铝合金型材截面形式选择”、“高速客车铝合金焊丝选择及研制”、“高速动力车轻量化车体焊接技术”属国家重大攻关项目中的三项研究任务。京九铁路孙口黄河桥建设中“焊接材料与母材强度匹配”、“宽板试验”及“焊接压力容器残余应力测试与消除”等铁道部与四川省项目。在大型水电站建设中推广了已获国家专利的钢筋窄间隙焊技术,创造了近二千万元的经济效益。与国外合作研究了高合金耐热钢焊缝金属的性能、组织。此外还进行了多项横向及开发新技术的项目,其中微型剪切试验装置国家专利,其技术经专家评定已达国际领先水平。冷轧辊堆焊修复技术及设备被国家科委列入国家推广项目。

上述研究内容的成果,除在国内外杂志上已发表多篇论文外,在本分册论文集中亦得到部分反映。文集中刊登的19篇论文中有关高速、重载的3篇论文概略地介绍了材料及技术方面的考虑,不少观点已被采纳。关于桥梁用钢与焊接材料的强度匹配问题,文集内6篇文章

集中反映了课题成果，澄清了设计部门的某些疑惑，有利于今后的合理选材。其余论文反映了研究的各个侧面，内有3篇系青年教师在其硕士论文阶段工作的总结，表现出该专业广为吸收人才，也显示了这些青年教师的潜力。

一言

编者

1995年12月

目 录

合金元素对钢中贝氏体形态和转变动力学的影响·····刘世楷 朱德贵 杨 柳等	1
Al ₂ O ₃ 短纤维增强的 Al 基复合材料的强度特性 ·····刘世楷 杨 川 张吉喜等	8
全方位离子注入技术研究的进展 ·····陈元儒	12
DC—PCVD 装置沉积 Si ₃ N ₄ 薄膜的模型 ·····吴大兴 杨 川 高国庆	15
ZnO _w /高分子基复合材料抗静电性能研究 ·····周祚万 李树尘 卢昌颖	19
材料表面工程的新领域 ——离子束生物材料表面改性 ·····黄 楠 杨 萍 曾晓兰等	22
Ti6Al4V 合金等离子体源离子注入层的组织与性能 ·····王钧石 陈元儒 黄 楠等	26
双离子束溅射淀积 DLC 膜附着力研究·····刘贵昂	30
中碳钢中温转变组织和动力学 ·····朱德贵	33
磁化处理对钢的力学性能的影响 ·····刘志农 罗家明	36
纳米材料的结构、性能与研究动向 ·····杨 川 高国庆 吴大兴	40
生物材料体外动态凝血时间试验方法的统计学研究 ·····杨 萍 曾晓兰 黄 楠等	44
合成立方氮化硼所用新型触媒材料的研究 ·····熊玉涛	48
高速列车车体轻量化用铝合金选材及焊接材料匹配 ·····王元良 屈金山 晏传鹏等	52
高速重载运行下铁路焊接钢桥的材料选择 ·····王元良	56
高速动力车车体焊接技术 ·····王一戎 车小莉 骆德阳	60
京九线孙口黄河大桥整体节点焊接接头强韧匹配的研究 ·····王元良 李兴中 王一戎等	64
强度匹配对 14MnNbq 钢焊接接头拉伸性能的影响 ·····李兴中 王元良 陈明鸣等	68
不同强度匹配焊接接头的冲击韧性及组织分析 ·····车小莉 王一戎	72
用微型剪切研究铝合金焊接接头机械性能 ·····孙 鸿 孙继友	76
焊缝强度匹配对焊接接头疲劳性能的影响 ·····陈明鸣 李兴中 王元良等	80
高铬铁素体耐热钢焊缝金属的微观组织及力学性质 ·····蔡光军	83
强度不匹配异种金属焊接接头的蠕变有限元分析 ·····陈 辉 史春元 陈宇刚等	87
钢筋窄间隙焊在工程中的应用 ·····雷斌隆 马玉民	91
钢轨的窄间隙焊接方法 ·····谢 敏 戴 明	95

B655 低温无缝钢管的焊接工艺性研究 陈 鹏 王元良 99

LF6 铝合金超塑性成型/扩散连接组合工艺研究
..... 周友龙 张 杰 牛济泰 103

16Mn 钢中压力容器焊缝中裂纹性质的判断及成因分析
..... 王一戎 车小莉 罗显祥等 107

新的含 Ti—B 焊丝 (H08D) 的研制 胡久富 王元良 俞申伟等 111

MOSFET 逆变交流方波弧焊电源控制电路研究
..... 骆德阳 方培泉 张恒辉 114

电脑控制的全位置自动 TIG 焊系统的研制 吕其兵 117

MU—400D 型自动堆焊设备控制系统研制 方培泉 骆德阳 121

CONTENTS

The Influence of the Alloying Elements upon the Transformation Kinetics and Morphologies of Bainite	<i>Liu Shikai Zhu Degui Yang Liuet al</i>	1
The Tensile Strength of Short Alumina Fibre Reinforced Aluminium Alloy Matrix Composites	<i>Liu Shikai Yang Chuan Zhang Jixi et al</i>	8
Progress Research of Plasma Source Ion Implantation	<i>Chen Yuanru</i>	12
The Model of Depositing Si_3N_4 Film by DC—PCVD Device	<i>Wu Daxing Yang Chuan Gao Guoqing</i>	15
Studies on the Anti-static Properties of ZnO_w /Polymer Composites	<i>Zhou Zuowan Li Shuchen Lu Changying</i>	19
A New Area of Surface Engineering of Materials		
— Surface Modification of Biomaterials by Ion Beam	<i>Huang Nan Yang Ping Zeng Xiaolan et al</i>	22
Structures and Properties of the Surface Layers of Ti6Al4V Alloy Implanted by Plasma Source Ion Implantation	<i>Wang Junshi Chen Yuanru Huang Nan et al</i>	26
The Adhesion of DLC Films Prepared by Dual-ion Beam Sputtering Method	<i>Liu Guiang</i>	30
The Microstructure and Kenitics of Medium Temperature Range Transformation in Medium Carbon Steel	<i>Zhu Degui</i>	33
The Effect of Magnetic Treatment on the Mechanical Characteristics of Steel	<i>Liu Zhinong Luo Jiaming</i>	36
Structures, Properties of Nanometer Materials and Trends in Research	<i>Yang Chuan Gao Guoqing Wu Daxing</i>	40
The Statistic Study of Bio-material Clotting Time Measurements	<i>Yang Ping Zeng Xiaolan Huang Nan et al</i>	44
The Study of the Catalytic Materials Used in Synthesis of Cubicboron Nitride	<i>Xiong Yutao</i>	48
The Choice of Al-alloy for High Speed Passenger Vehicles and its Matching with Welded Materials	<i>Wang Yuanliang Qu Jinshan Yan Chuanpeng et al</i>	52
The Choice of Materials for welded Railway Bridge Working under the Situation of High Speed and Heavy Loading	<i>Wang Yuanliang</i>	56
Welding Technique for the Body of High Speed Locomotives	<i>Wang Yirong Che Xiaoli Luo Deyang</i>	60

The Matching of Strength and Toughness in Welded Joints of Whole Welding Nodal Point on Sunkou Yellow River Bridge	Wang Yuanliang Li Xingzhong Wang Yirong et al	64
Effect of Strength Matching on Tensile Properties for 14MnNbq Steel Welded Joints	Li Xingzhong Wang Yuanliang Chen Mingming et al	68
Impact Toughness of Welded Joints of Various Strength Matchings and Their Microstructure Analysis	Che Xiaoli Wang Yirong	72
The Study of Welded Joint of Aluminium Alloy Using Micro Shear Technique	Sun Hong Sun Jiyou	76
The Effect of Weld Metal Matching on Fatigue Strength of Welded Joints	Chen Mingming Li Xingzhong Wang Yuanliang et al	80
Microstructure and Mechanical Properties of High Cr Heat Resistant Steel Weld Metals	Cai Guangjun	83
Creep Analysis of Strength-mismatched Dissimilar Welded Joints Using FEM	Chen Hui Shi Chunyuan Chen Zigang et al	87
The Application of Narrow-gap Welding of Reinforced Bar	Lei Binlong Ma Yumin	91
Narrow Gap Enclosed Arc Welding for Rails	Xie Min Dai Ming	95
Research on the Weldability of B655 Seamless Steel Pipe Used at Low Temperature	Chen Peng Wang Yuanliang	99
A Study on Superplastic Forming and Diffusion Bonding of Al—6Mg Alloy	Zhou Youlong Zhang Jie Niu Jitai	103
The Determination of Cracking Types in the Welds of Medium Pressure Vessel Made of 16Mn Steel and Analysis of Their Causes	Wang Yirong Che Xiaoli Luo Xianxiang et al	107
A Study of A New Welding Wire Containing Ti—B (H08D)	Hu Jiufu Wang Yuanliang Yu Shenwei et al	111
Study on Control Circuit of MOSFET Inverter AC Square Wave Arc Welding Power	Luo Deyang Fang Peiquan Zhang Henghui	114
Research of A Single-chip Computer Controlled All-position Auto-TIG System	Lü Qibing	117
Research of A Control System of MU—400 Type Automatic Hardfacing Equipment	Fang Peiquan Luo Deyang	121

合金元素对钢中贝氏体形态 和转变动力学的影响*

刘世楷 朱德贵 杨 柳 张 筠 李树尘

【摘 要】 用相变测定仪、光学显微镜、透射电镜、俄歇谱仪和微型剪切测试技术系统地研究了含 Si、Mn、Ni、V 的三元和四元 Fe—C 合金钢中合金元素对铁素体板条形态与相变动力学的影响。对 TTT 曲线鼻部温度下奥氏体分解孕育时间 τ 、 α/γ 界面、 γ 一侧碳的浓度以及 α 生长速率作了估算。所有结果与溶质类拖曳说 (SDLE) 定性相一致。

【关键词】 贝氏体；相变动力学；合金钢

前 言

贝氏体相变机制是金属固态相变中争论最多而至今尚无定论的问题。为了揭示它的本质，扩散学派和切变学派，分别从相变热力学、动力学、形态学和晶体学来加以研究和论证。动力学的特征与相变模式密切相关，应最能反映它的本质，而贝氏体铁素体 (α_b) 形态又是动力学直接的反映，所以本工作侧重含 Si、Mn、V、Ni 的三元和四元合金钢中这些元素对贝氏体相变动力学与贝氏铁素体板条形态的影响。鉴于扩散学派用溶质类拖曳作用 (Solute drag like effect, SDLE) 说来解释 Fe—C—X 合金中 X 为 Mo、Cr 等时，铁素体长大与准平衡 (Paraequilibrium) 模型之间的差异，并用它来解释 TTT 曲线低于 B_s 点温度时， γ 分解的不完全性这一贝氏体相变动力学争论中的核心问题^[1]。因此有必要对 γ 晶界上合金元素的偏聚作出可能的分析并进行相关的计算，从试验上和理论上给 SDLE 以更多的支持。

由于 SDLE 认为，溶质元素是促进还是抑制铁素体长大动力学取决于偏聚的溶质是增加 α/γ 界面 γ 一侧中碳的活度还是降低碳的活度。因此本研究工作选取了四类合金。

(1) 含 Si 或 Ni 的 Fe—C 三元合金。二者都是增加 C 在 γ 中的活度的，但 Si 是 α 的稳定元素，Ni 则稳定 γ 。

(2) 含 V 或 Mn 的 Fe—C 三元合金。二者都是减低 C 在 γ 中的活度的，但 V 稳定 α 而 Mn 稳定 γ 。

(3) Fe—C—Mn—Si 及 Fe—C—Si—V 四元合金，二者分别含有一种增加和减少 C 在 γ 中活度的元素，从而可以研究元素相互作用对 α 长大的影响。

(4) 含 C 为 0.01wt% 的 Fe—Mn 合金。

* 本工作系国家自然科学基金重点项目 (5860248) 课题之一。

1 试验工作

试验材料用工业纯铁和高纯 Si、Ni、Mn (99.0%) 和钒铁经真空熔炼。热锻成 20×20mm 钢坯并除去黑皮后, 封装在石英管内, 在 1200℃ 均匀化退火 72 小时, 试样成分如表 1 所示, TTT 曲线用自动相变测定仪 (Formastor) 结合定量金相法测定。

TEM 样品用双喷电解法制作, 电解液为 10% 高氯酸酒精溶液, 温度约为 -30℃, 电压 50V、TEM 分析用 H-700H 电镜, 加速电压为 200kV、STEM+EDS 分析在 Philips420 电镜和 JEOL 2000FX 电镜上进行。

用于二次离子谱分析 (SIMS) 的试样浸入液氮内 120 秒, 然后, 打断试样并立即装入 MICROLABMK-II 型仪器内进行分析。SEM 观察确认试样为沿晶断裂, 采用 Ga 离子轰击样品, 束流密度为 20mA/cm², 剥蚀速率为 10~15nm/min。

表 1 试验合金的化学成分 (wt%)

合 金	C	Ni	Si	Mn	V	合 金	C	Ni	Si	Mn	V
Fe—C—Ni	0.46	2.32	—	—	—	Fe—C—Si—Mn	0.37	—	2.23	2.29	—
Fe—C—Si	0.38	—	1.73	—	—	Fe—C—Si—V	0.42	—	1.96	—	0.96
Fe—C—Mn	0.38	—	—	3.11	—	Fe—Mn	0.01	—	—	3.24	—
Fe—C—V	0.42	—	—	—	1.0						

用 PERKIN—ELMER 俄歇谱仪分析 Fe—C—Si—Mn 合金中 C 和 Si 在 γ/γ 晶界上的富集, 试样在真空度为 10⁻⁷Pa 的样品室内打断, 然后用 Ar⁺ 离子溅射断口表面。电压为 3kV, 束流为 0.07 μ A。

剪切弹性模量 E_s 用微型剪切试验技术^[2]来测量, 用来评估奥氏体分解时基体内体积应变能对相变孕育时间的影响, 对每一合金的相对 E_s 值均为 6 次测试结果的平均值。

2 试验结果及讨论

2.1 金相组织

Fe—C—Si 和 Fe—C—Ni 中的 α_6 具有典型魏氏组织的特征。图 1 为 Fe—C—Si 在 450℃ 等温 2 秒后的光镜 (a) 和 TEM 组织照片 (b)。可以看出, α_6 主要在原 γ 晶界形核并长大, 板条相互平行, 板条间为奥氏体。在冷却过程中奥氏体大部分转变为马氏体。板条内及板条间无 Fe₃C 析出。TEM 图上箭头所示处为 α_6 上的生长台阶。Fe—C—Ni 不同处在于 Ni 不抑制 C 化物的析出, 故 α_6 板条间有 C 化物析出。

Fe—C—Mn 和 Fe—C—V 中 α_6 的形态则与上述两种合金不同。图 2 为 Fe—C—Mn 在 495℃ 等温 120 秒的光镜组织。区别在于: 其一, α_6 不仅起源于原 γ 晶界, 而在晶界晶内同时形核长大; 其二, α_6 板条很少呈细长的平行板条状, 而是短的板条, 往往称之为退化板条; 其三, 等温较长时间之后, 在光镜下即可观察到 Fe₃(Mn₃)C 伴随 α_6 而析出。在 Fe—C—V 中除了这些特征之外, 还可见沿原 γ 晶界呈网状的 α 铁, 由于其形态细而长, 在 Aaronson 的研究工作中称之为“蛇”状 α_6 ^[3]。

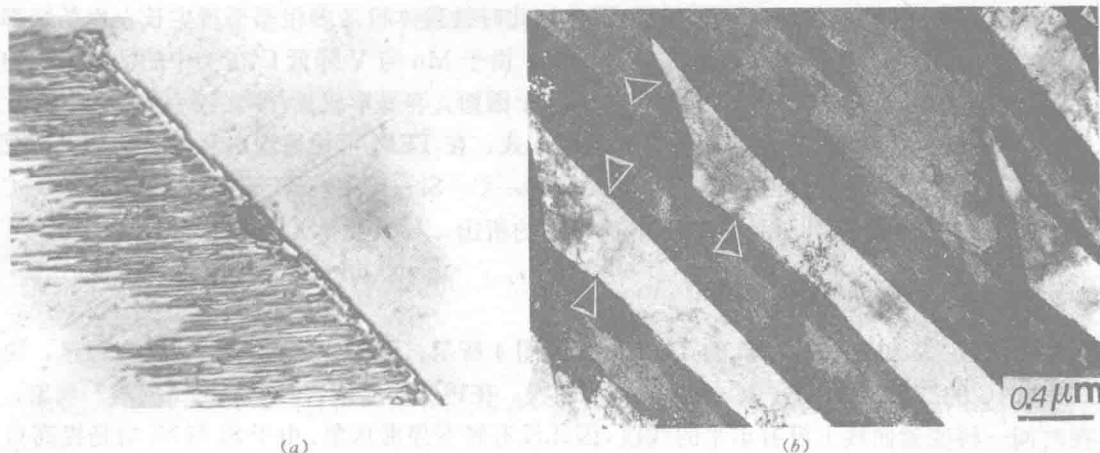


图 1 Fe—C—Si 在 450°C 等温 2 秒 (a) $\times 100$, (b) TEM 像

Fe—C—Si—Mn 和 Fe—C—Si—V 的显微组织形态上接近于 Fe—C—Mn (V) 合金。仔细分析, 仍然可以发现差异。图 3 (a) 为 Fe—C—Si—Mn 在 450°C 等温 2300 秒后的组织。可以看出, 除了退化板条之外, 还存在细长的板条。但又不同于 Fe—C—Si (Ni) 中的 α_b , 这些板条虽有一定取向, 但彼此不紧密相邻, 没有羽毛状魏氏组织的特征。由图 3 (b) 的 TEM 照片可看出, 这种细长板条由亚板条组成, 亚板条之间存在残余 γ 。如果等温时间足够长, 则残余 γ 分解为 α 和 C 化物。



图 2 Fe—C—Mn 495°C 等温 120 秒, $\times 400$

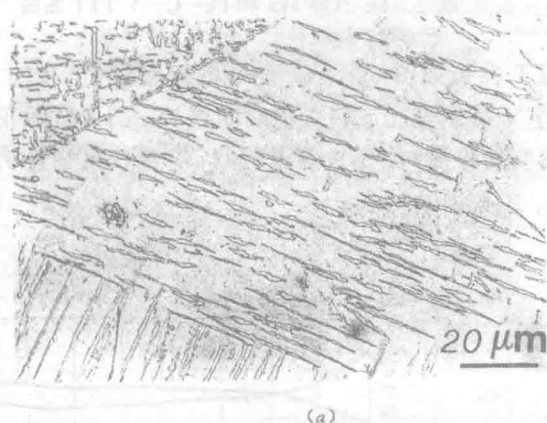


图 3 Fe—C—Si—Mn 在 450°C 等温 2300 秒, (a) 光镜, (b) TEM 像

由上述结果可知, α_b 的形态与合金成分密切相关。含有使 C 在 γ 中活度增加的元素 Si、Ni, α_b 便具有与普通 Fe—C 合金一样的魏氏组织形态。虽然感生形核可以使 α 分枝化, 但这

种铁素体长度主要靠连续长大来增加, 因此, 此时铁素体板条多相邻平行生长, 生长端部呈楔状。至于 Fe—C—Mn 和 Fe—C—V 合金中, 由于 Mn 与 V 降低 C 在 γ 中的活度, α_b 的生长受较强的 SDLE 作用, 长度方向的生长减慢。因而, 容易形成长/厚比较小的退化板条。边/边和面/面感生形核成为这类 α_b 的主要长大方式, 在 TEM 下便显现出亚板条的特点。亚板条之间则有 C 化物析出。Fe—C—Si—Mn 与 Fe—C—Si—V 中 α_b 与 Fe—C—Mn 和 Fe—C—V 的不同在于 Si 的作用。由于 Si 抑制 C 化物的析出, 导致亚单元之间残余 γ 的存在。

2.2 动力学

Fe—C—Si 和 Fe—C—Ni 的 TTT 曲线如图 4 所示。Fe—C—Si 的 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变迅速, 快过 Fe—0.4C 的二元合金。Fe—C—Ni 则转变稍慢, 在转变完成线上还有浅的“河湾”现象。但在时间—转变量曲线上没有水平的线段, 因此没有转变停滞现象。由于 Si 与 Ni 均是提高 C 在 γ 中活度的元素, 应该使 α_b 的长大速度增加, 即加速转变动力学。在 Fe—C—Ni 中动力学减慢, 出现“河湾”可能与 Ni 是稳定 γ 的元素有关。

Fe—C—Mn 和 Fe—C—V 的 TTT 曲线如图 5 所示。由于 Mn 与 V 均是抑制 C 在 γ 中活度的元素, 减缓 $\gamma \rightarrow \alpha$ 的转变, 所以 TTT 曲线较之以上两合金右移是很显然的。而且, 曲线上有较深的“河湾”, 即存在明显的 B_i 点。但是转变量—时间曲线上并无水平线段, 转变没有停滞现象。这事实表明, 贝氏体相变存在 B_i 点并不意味着有转变不完全现象。

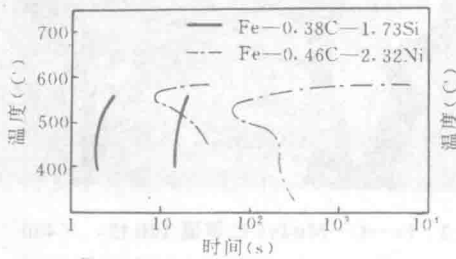


图 4 Fe—C—Si 和 Fe—C—Ni TTT 曲线

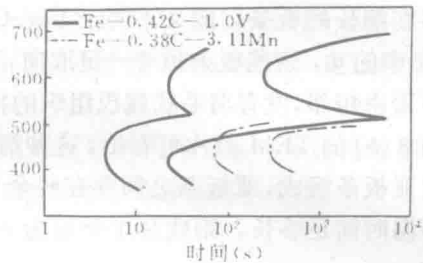


图 5 Fe—C—Mn 和 Fe—C—V TTT 曲线

Fe—C—Si—Mn 和 Fe—C—Si—V 的 TTT 曲线如图 6 所示。曲线的位置除了较之上述两类曲线大为右移之外, 其上有很深的“河湾”, 特别是完成转变需时间很长。图 7 所示在时间—转变量曲线上有水平线段存在, 意味着转变的停滞。如延长等温时间, 随着 C 化物自 γ 中析出, 转变继续进行。

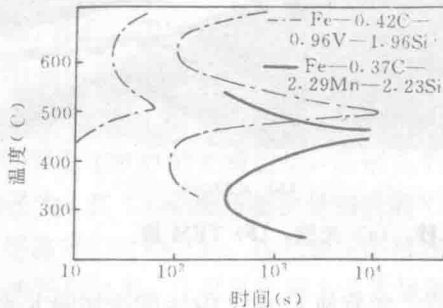


图 6 Fe—C—Si—Mn 和 Fe—C—Si—V TTT 曲线

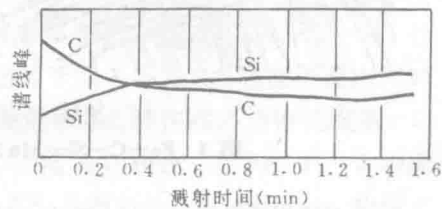


图 7 Fe—C—Si—Mn 475°C 等温 20 秒后 C 和 Si 的浓度分布

由此可见,三组合金之间 TTT 曲线有很大区别,成分不仅影响 α_b 的形态,与转变动力学关系也很密切。

按 Kirkaldy, 一种产物的等温长大速率为 v , 则对于对应任一期望转变量所需的等温时间^[4] τ_{TTT} 为:

$$\tau_{TTT} = \frac{\text{常数}}{v(T)}$$

及
$$v \propto (\Delta T)^2 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$$

式中: ΔT ——过冷度;

Q ——扩散激活能。

如过冷度不大时,体积自由能差 ΔG_v 与 ΔT 成正比即, $\Delta G_v \propto \Delta T$ 。于是 $\tau \propto 1/[\Delta G_v^2 \exp(-Q/RT)]$ 。

表 1 中合金的 ΔG_v 值用规则溶液模型及超组元模型计算,结果如表 2 所示。令 Fe—C—Si 合金的 $1/\Delta G_v^2$ 为 1,求得的其余 Fe—C—X 合金的 $1/\Delta G_v^2$ 对 Fe—C—Si 的 $1/\Delta G_v^2$ 之比,并称之为计算孕育时间 τ_{cal} (表 2)。由图 4、5 和 6 上曲线鼻部温度量得的试验孕育时间 τ_{exp} 也列在表 2 内。把 Fe—C—X 的 τ_{exp} 对 Fe—C—Si 的 τ_{exp} 的比称之为真实相对孕育时间 τ_{rel} 。根据上述公式可知, τ_{cal} 值包含指数因子 $\exp(-Q/RT_{n,n} + Q/RT_n)$, 其中 $T_{n,n}$ 为 Fe—C—Si 鼻部温度, T_n 为拟计算合金的鼻部温度。这样, τ_{cal} 的计算可简单地由 ΔG_v 之比得出,而可忽略合金元素对 C 扩散的影响。由于同一因子在各个合金的 τ_{rel} 中出现,因此通过计算 TTT 曲线鼻部的 τ_{rel}/τ_{cal} 来评估各合金中 SDLE 的相对大小时就可以略去这一因子。于是,只需用热力学驱动力大小来估算相对孕育时间,也就是近似估算铁素体长大速率。如此值比 1 大很多,则长大速率因 SDLE 而明显减慢。 τ_{rel}/τ_{cal} 比值如表 2 所示。由于 Fe—C—Mn、Fe—C—V、Fe—C—Si—Mn 和 Fe—C—Si—V 的 τ_{rel}/τ_{cal} 比值比 1 大很多,所以在 TTT 曲线鼻部温度及邻近温度等温时 SDLE 抑制了 α 长大速率。表 2 中还列出了用微型剪切法求出的剪切弹性模量,由它的大小可以估计应变能影响的大小。

表 2 ΔG_v 的计算值及合金的相对孕育时间

合 金	鼻部温度 (°C)	ΔG_v (H/mol)	τ_{cal}	τ_{exp} (s)	τ_{cal}^*	τ_{rel}/τ_{cal}	$\frac{E_s}{E_s(\text{Fe—C—Si—Mn})}$
Fe—C—Si	450	-1354.9	1	2	1	1	—
Fe—C—Ni	565	-653.0	4.3	8	4	0.93	0.91
Fe—C—Mn	450	-707.2	3.58	58	29	8.10	—
Fe—C—V	435	-1949.5	0.49	5	2.5	5.10	0.88
Fe—C—Si—Mn	350	-1463.7	0.84	300	150	178.0	1.0
Fe—C—Si—V	400	-1779.66	0.58	7	3.5	6.03	1.12
Fe—Mn	470	-1355.0	0.97	1	0.5	0.5	0.77

2.3 溶质在原 γ 晶界上的偏聚

Fe—C—Si—Mn 在 475°C 等温 20 秒沿晶断口溅射过程中的 Auger 谱分析表明,C 和 Si

在原 γ 晶界上偏聚,如图 7 所示。

STEM+EDS 及二次离子谱分析(SIMS)均表明 Mn 在原 γ 界面上偏聚如图 8 所示。由图可以看出,Mn 在原 γ 晶界的富集因子(晶界浓度 C_{gb} /试样平均浓度 C_0)可以达到 2 左右,用 Philips420 电镜作定点分析也表明,此合金经 475℃、2000 秒等温后 C_{gb}/C_0 约在 1.5~2.8 之间。

由偏聚机制模型可知,由 1200℃ 快冷至 475℃ 短时保温后在原 γ 晶界上的偏聚应归因于非平衡偏聚。非平衡偏聚是空位——溶质对以较快速度向作为空位阱的晶界扩散的结果。显然,延长等温时间,则平衡偏聚机制也将起作用。

Mn 的含量愈高,它 在原 γ 晶界上的偏聚便愈多,对 α_s 在原 γ 晶界形核的妨碍便愈大,表 3 系 Fe—C—Si—Mn 四元合金中 α_s 形核位置的分类统计结果。很明显,随 Mn 含量增加原 γ 晶内的 α_s 量增大。

在 Fe—C 合金中,铁素体优先在原 γ 晶界析出,Ballfl 指出^[53],在 γ 晶界上并非所有位置均宜于铁素体的形核,如果有利的形核位置的一半为溶质所占据,TTT 曲线的起始线将比不存在溶质偏聚时向右移一倍的距离。Enomoto 等^[6]则指出,溶质偏聚通过降低晶界能对形核产生显著影响。

上述结果表明,Mn 在原子晶界上确实存在偏聚,因而会对晶界处 α_s 的形核产生显著抑制作用,使更多 α_s 转向需要更大驱动力的晶内形核。既然 TTT 曲线的位置是由形核率和长大率两种因素共同决定,所以,能在晶界偏聚的溶质元素亦将对 TTT 曲线位置和贝氏体相变动力学产生影响,不能只考虑 SDLE 对 α_s 长大的影响。

表 3 α_s 在原奥氏体界和晶内的转变分量

Mn(%)	475℃	450℃	400℃	375℃	350℃	325℃	300℃
1.18	9.0/1.3	0.9/0.1	17.0/7.6	6.0/9.0	15.4/11.0	11.4/4.8	
1.71	29.7/2.5	17.5/7.5	61.5/15.1	7.8/4.1	21.4/5.8		
1.90	0.8/10.2	9.0/20.9	7.7/4.2				
2.29			5.0/17.7		11.0/35.0	9.7/7.3	
3.56						0/18.7	0.6/39.6

作者们为了评估合金元素对铁素体长大动力学的影响,曾经以准平衡模型和平面长大模型为基础,计算了 α/γ 界面一侧相邻 γ 中 C 的浓度 X_c^{γ}/α 以及 L^2/t (L 为 α/γ 界面相对于原 γ 晶界的位置, α 在该晶界处形核, t 为反应时间值与 α/γ 相界面内 Mn、V、Ni 和 Si 的浓度 X_i^{β} 以及反应温度的关系^[7]。图 9 给出了几个不同 C、Mn 含量的 Fe—C—Mn 合金中 L^2/t 和 X_c^{γ}/α 与 X_{Mn}^{β} 间的关系。可以看出,随 Mn 在 α/γ 相界偏聚的加大, α/γ 相界 γ 一侧 C 的浓度下降, α 的生长速度减慢。这种结果与 SDLE 的推断一致。

在作者们的文章中^[8],还讨论了元素交互作用对动力学的影响,阐述了 Fe—C—Si—Mn 这类四元合金中,Si 与 Mn 共存时,不但不能促使 α 的生长加快,反而因交互作用增强了 Mn 与 C 的偏聚,使 SDLE 显著增大并减缓生长动力学。