

周邦新文选

Selected Works
of Zhou Bangxin

上 卷

上海大学出版社

周邦新文选

Selected Works
of Zhou Bangxin

上 卷

上海大学出版社

· 上海 ·

图书在版编目(CIP)数据

周邦新文选/周邦新著. —上海: 上海大学出版社, 2014. 11

ISBN 978 - 7 - 5671 - 1473 - 9

I. ①周… II. ①周… III. ①材料科学-文集 IV.
①TB3 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 239022 号

策划/统筹 王玉富 黄晓彦 周海蓉
责任编辑 黄晓彦 方守狮 张济明
装帧设计 柯国富
技术编辑 金 鑫 章 斐

周邦新文选

周邦新 著

上海大学出版社出版发行

(上海市上大路 99 号 邮政编码 200444)

(<http://www.shangdapress.com> 发行热线 021-66135112)

出版人: 郭纯生

*

南京展望文化发展有限公司排版

上海华业装潢印刷厂印刷 各地新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 92.75 插页 12 字数 2 315 000

2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5671 - 1473 - 9/TB · 017 两册总定价: 390.00 元

院士周邦新*

周邦新 核材料及核燃料专家。1935年12月29日出生,祖籍江苏苏州。1956年毕业于北京钢铁学院,1965年至1967年赴英国纽卡斯尔及剑桥大学冶金系学习访问。现任上海大学材料研究所研究员,兼任上海市核学会特别顾问、中国核材料学会名誉理事长、中国核学会及中国材料研究学会荣誉理事等。1995年当选为中国工程院院士。长期从事核材料及核燃料研究,曾对金属材料的形变和再结晶,以及锆合金耐腐蚀性能等问题做过深入系统的研究,解决了核工程材料的一些难题和生产质量问题;开发并主持研究反应堆用低浓铀板型燃料元件的国内首批生产,以满足研究反应堆的核燃料由高富集度铀转化成低富集度铀的需求;组建了核燃料及材料国家重点实验室,以满足我国核工业发展的需要。曾获1978年全国科学大会颁发的先进科技工作者、1979年第二机械工业部颁发的劳动模范称号、1990年中国核工业总公司颁发的突出贡献专家称号。曾获四川省重大科技成果奖、部级科技进步一等、二等奖及国家科技进步一等、二等奖等。已发表论文近300篇。

周邦新生于1935年,祖籍苏州木渎。祖父是前清的秀才,后来一直在苏州女子师范学校教书。父亲在苏州工专学习土木建筑工程,毕业后一生从事道路、房屋建设工程工作。抗日战争爆发后,举家搬到了成都郊区的簇桥镇,1946年春天,全家又回到了故乡——苏州木渎。灵岩山、老祖屋、青砖小道、门前石桥,还有河中成群的小鱼和不时划过的小渔船……构成周邦新儿时生活的回忆。

当年秋季,周邦新考入了木渎镇上民办的初级中学,第二年转入苏州城里的吴县县立中学(现苏州市第一中学),开始住校生活,跨出了他人生独立生活的第一步。回到故乡后,父亲一时找不到工作,靠母亲在木渎附近的农村小学教书养家,经济的拮据和生活的艰苦可想而知。为了节省一点路费,节假日回家经常是沿着河岸步行两个多小时从学校走回木渎。生活的艰辛给他留下了深深的记忆,这也养成了周邦新一生注重节约的习惯。在苏州市第一中学建校95周年和100周年之际,周邦新曾两度回母校,他深感中学时代太值得珍惜了。

1950年国内掀起了抗美援朝和学生“参干”热潮,周邦新认识到个人前途和祖国的命运是紧密联系在一起。高中毕业时,考虑到国家建设需要钢铁,他报考了北京钢铁学院,那是国家成立钢铁学院后招收的第一届学生,校舍还刚开始建设,第一年只能在清华大学上课。

* 原标题《科研转战,不懈奋斗》,见纪顾俊主编:《苏州院士》,文汇出版社2013年版。

1956 年从北京钢铁学院毕业后,他被分配到中国科学院物理研究所(当时的名称是应用物理研究所)。

在物理所工作期间,周邦新从事铜板中织构问题和碘化法提纯钛的研究。他曾先后得到颜鸣皋、李恒德和陈能宽等几位从国外学成归来的科学家指导和关怀,他们后来都成为科学院和工程院的院士。周邦新院士说,从老师们那里学习到严格的科学态度和严谨的科研作风,使他受益匪浅,一生受用。

1958 年,周邦新和其他两位同志一起承担了研究硅钢片中如何获得立方织构(也称“双取向”)的课题,经过半年多日以继夜、以实验室为家的努力工作,最终取得了成功,这激发了他对科研工作的极大兴趣,也使他认识到实验工作要认真,观察分析要仔细,实验结果要能多次重复。1960 年周邦新从北京物理所调动到了沈阳金属研究所,进一步研究立方织构形成机理,选定钼、铌、钨和铁硅合金的单晶为研究对象。1965 年周邦新到英国纽卡斯尔大学冶金系访问,第一次与系主任见面时被问起做过什么研究工作,在听到回答说做过织构方面的研究工作时,系主任马上问道:你能在铁硅合金中生长立方织构吗?由此可见,那时在从事研究金属变形和再结晶问题的科学家心中,对体心立方结构金属中如何获得立方织构的重视程度。钼单晶的变形和织构方面的研究结果后来在全国学术会议上做了报告,钱临照先生将文章推荐到《物理学报》上发表。这是对周邦新独立进行科研工作后做出一点成绩的肯定,帮助他树立了能够做好科研工作的信心。每次回想起这段科研历程,周邦新就深深地感谢当时金属所张沛霖、郭可信等前辈的鼓励,也感谢所领导对他工作的支持和关怀。

1961 年金属所成立了铀的化学冶金和物理冶金两个研究室,从事核燃料的基础研究和应用研究工作,周邦新参加了由张沛霖先生领导的铀物理冶金室工作。从那时起,核燃料及核材料成为他一生中主要的研究方向。

1965 年到 1967 年,周邦新在英国纽卡斯尔大学和剑桥大学冶金系访问学习。从那时起,他接触到电子显微镜,并开始用它来研究材料中的一些问题。

1970 年,周邦新和沈阳金属所一批人又通过集体调动来到了四川“三线”——峨眉山下青衣江边的中国核动力研究设计院,在那里连续工作了 28 年。他和一大批科研工作者一起从零开始,在隐蔽的深山沟里一砖一瓦把实验室建设起来,把青春献给国家的军工事业。在中国核动力研究设计院工作期间,周邦新接触到了生产和工程应用中出现的各种材料问题,这不像在实验室中自己构思出来进行研究的那种问题。他抱着认真负责的态度,带领了组内同志深入现场了解情况,并进行实验室的模拟实验,通过观察和分析,解决了不少生产中出现的材料问题。例如解决了核燃料元件包壳锆合金管不均匀腐蚀的问题,为国家挽回了不少经济损失。从 20 世纪 70 年代开始,锆合金也成了周邦新后半生一个重要的研究方向。他及他的科研团队针对核反应堆结构材料的研究成果为我国核反应堆运行安全及核电事业的发展作出重要贡献。

1998 年周邦新调入上海大学,重心转向培养人才和建立科研团队。尽管在上海大学没

有条件进行带有放射性核燃料的科研工作,但是研究不带放射性的核反应堆结构材料还是有条件的,这也是核工业中的重要材料。为了满足国民经济的快速发展,需要大力发展清洁能源,迎来了我国核电事业的大发展,也为从事核材料研发的科研人员提供了机遇,高等院校理应在基础研究方面发挥自己的优势,作出贡献。来到上海大学后,从组建实验室到建立一支科研队伍,周邦新花费了几年的时间。目前,除了科研外,他还花费大量时间培养学生,用他严谨的科研作风、一丝不苟的工作态度影响着一批又一批的学生,他经常对学生说:“成功就需要在困难面前再坚持一下,找到了困难,也就可以发现问题,成功也就有了希望。”迄今为止,周邦新已培养硕士和博士研究生 30 余人。在青年教师的培养中,周邦新坚持“扶上马,送一程”,当好一名称职的伯乐。他把承担重大科研项目和汇报交流的机会留给年轻人,努力为他们提供展示才华的平台,从而进一步提高了年轻人的科研积极性和社会责任意识,促进他们更快成长,同时也把他真诚对待学生、认真培养学生的优秀师德一代代传承下去。

周邦新承担或参与了国家 973 项目、国家 863 计划,国家先进压水堆重大专项、国家自然科学基金、国防基础科研、上海市科委和核燃料及材料国家级重点实验室等二十多项科研项目,取得了丰硕的成果,曾 20 多次荣获国家、部、省等颁发的奖励和荣誉称号,其中于 2000 年和 2012 年分别获得国家科技进步一等奖和二等奖。



周邦新

目 录

冷轧铜板再结晶组织的形成	1
铁硅合金中立方组织的形成	12
纯铜薄带的厚度对冷轧及再结晶组织的影响	17
磷对冷轧纯铜再结晶的影响	27
钼单晶体的范性形变	39
钼单晶体的冷轧及再结晶组织	50
铁硅单晶体的冷轧及再结晶组织	58
金属的回复与再结晶	71
α 铀的冷轧及再结晶组织	103
热轧铁硅单晶体再结晶的研究	110
铁硅合金中(110)[001]和(100)[001]组织的形成	116
钨和铌单晶体的冷轧及再结晶组织	128
用普通光照明观察 α 铀晶粒组织的金相技术	133
铀板的再结晶	139
锆-2 合金管材焊接后在过热蒸汽中的不均匀腐蚀	145
制备透射电子显微镜金属薄膜样品的自动控制装置	156
α 铀假单晶体的制备	160
Al 和 Cu 单晶体拉伸变形后的再结晶	164
锆-2 合金在过热蒸汽中氧化转折机理	173
3%Si-Fe 合金屈服前的微应变研究	185
电子显微术在研究 UO_2 芯块中的应用	194
锆-2 合金和 18-8 奥氏体不锈钢冶金结合层的研究	199
U-7.5% Nb-2.5% Zr 合金的金相及成分均匀性研究	207
The Second Phase Particles in Zircaloy-2 and Their Effects on Corrosion Behavior in Superheated Steam	211
钢材闪光焊时灰斑缺陷的形成机理	218
钛和 18/8 不锈钢冶金结合层的研究	225
Zr-4 板材拉伸性能的研究	231
锆-4 合金渗氢方法的研究	235
真空电子束焊接对锆-2 合金熔区中成分、组织及腐蚀性能的影响	241
Electron Microscopy Study of Oxide Films Formed on Zircaloy-2 in Superheated Steam	248
Zr-2 合金中应力及应变诱发氢化锆析出过程的电子显微镜原位研究	262
锆-4 合金氧化膜的结构研究	268

水冷动力堆燃料元件包壳的水侧腐蚀	272
异种金属爆炸焊结合层的电子显微镜研究	278
(110)[1 $\bar{1}$ 0]Fe-Si 单晶体的冷轧和再结晶	284
Oxidation of Zircaloy-2 in Air from 500 °C to 800 °C	289
A Study of Microstructure of Oxide Film Formed on Zircaloy-4	294
锆-2 合金在过热蒸汽中形成氧化膜的电子显微镜研究	299
核工业中的锆合金及其发展	307
模拟裂变产物对 316 不锈钢晶界浸蚀的研究	318
Zr-4 管中氢化物分布的应力再取向研究	324
Zr-4 板中氢化物应力再取向的研究	328
LT24 铝合金腐蚀过程的原位观察	334
Zr(Fe,Cr) ₂ 金属间化合物的氧化	338
锆合金中的疖状腐蚀问题	343
模拟裂变产物对三种不锈钢晶界浸蚀的研究	351
模拟裂变产物沿 316(Ti) 不锈钢晶界浸蚀后对力学性能的影响	356
时效处理对锆-4 合金微观组织及腐蚀性能的影响	361
锆合金板织构的控制	365
Zr-4 合金中第二相 Zr(Fe,Cr) ₂ 的电化学分离	371
Cu-Al 爆炸焊结合层的透射电镜研究	377
热处理对 U ₃ Si ₂ -Al 燃料板包壳显微组织及其厚度测量的影响	382
A Study of Stress Reorientation of Hydrides in Zircaloy	387
Zr-4 合金氧化膜中 Zr(Fe,Cr) ₂ 第二相粒子的 HREM 观察	398
On the Mechanism of Textures Formation in Zircaloy-4 Plate Rolled at Elevated Temperature in $\alpha+\beta$ Dual-Phase Region	402
轧制温度对 Zr-4 合金板织构的影响	409
Corrosion Behavior of Zr(Fe,Cr) ₂ Metallic Compounds in Superheated Steam	416
The Effect of Heat Treatments on the Structure and Composition of Second Phase Particles in Zircaloy-4	426
The Effect of Heat Treatments on the Corrosion Behavior of Zircaloy-4	433
Zr-Sn-Nb 系合金的显微组织研究	443
改善锆合金耐腐蚀性能的概述	447
核工业中的有色金属	455
新锆合金的研究	467
Zr-4/1Cr18Ni9Ti 爆炸焊结合层的显微组织研究	470
Fe-Cr-Al-Si 合金阻尼性能研究	474
高温轧制 Zr-4 合金板织构的形成机制	478
表面处理对 Zr-4 合金抗疖状腐蚀性能的影响	484
加工工艺对 Zr-4 管抗疖状腐蚀的影响	487
Zr-4 中合金元素的表面偏聚	492
水化学对燃料元件包壳腐蚀行为的影响	495

快淬 Nd - Fe - B 粉末的 TEM 样品制备	502
β 相水淬对锆 - 4 合金耐腐蚀性能的影响	505
铁硅合金中形成立方织构的有关问题	511
水化学对锆合金耐腐蚀性能影响的研究	519
690 合金的显微组织研究	529
镁合金耐蚀表面处理的研究进展	535
Determination of Fe and Cr Content in α - Zr Solid Solution of Zircaloy - 4 with Different Heat-Treated States	541
变形及热处理对 Zr - Sn - Nb 合金中 β - Zr 分解的影响	548
Zr - Nb 合金在 LiOH 水溶液中耐腐蚀性的研究	553
高温退火 Fe - Cr 基减振合金的阻尼性能与晶界析出相	556
The Cracking Induced by Oxidation-Hydriding in Welding Joints of Zircaloy - 4 Plates	562
ZIRLO 合金和 Zr - 4 合金在 LiOH 水溶液中耐腐蚀性能的研究	565
显微组织对 ZIRLO 锆合金耐腐蚀性的影响	570
锆 - 4 合金氧化膜中的晶粒形貌观察	575
真空电子束焊接对锆合金耐腐蚀性能的影响	579
水化学对 Zr - 4 合金氧化膜/基体界面处压应力的影响	585
合金成分对锆合金焊接区腐蚀时吸氢性能的影响	590
热处理对含 Nb 锆合金焊接试样显微组织和耐腐蚀性能的影响	597
Detrimental Role of LiOH on the Oxide Film Formed on Zircaloy - 4	603
Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Corrosion Resistance of a Zr - Sn - Nb - Fe - Cr Alloy	609
热处理制度对 N18 新锆合金耐腐蚀性能的影响	617
AlN + MnS Inclusions in Oriented Electrical Steels	624
快淬双相纳米复合稀土永磁材料的晶化研究	629
电压对镁合金微弧氧化膜组织及耐蚀性的影响	636
锆 - 4 合金在高压釜中腐蚀时氧化膜显微组织的演化	643
三维原子探针——从探测逐个原子来研究材料的分析仪器	652
Effects of Strain and Annealing Processes on the Distribution of $\Sigma 3$ Boundaries in a Ni-Based Superalloy	659
The Effect of Alloying Modifications on Hydrogen Uptake of Zirconium-alloy Welding Specimens During Corrosion Tests	665
冷轧变形 Pb - Ca - Sn - Al 合金在回复和再结晶过程中的晶界特征分布	675
三维原子探针技术在纳米复合永磁材料中的应用	685
高温退火过程中铅合金晶界特征分布的演化	688
研究合金元素对锆合金耐腐蚀性能影响的单片试样法	694
水化学及合金成分对锆合金腐蚀时氧化膜显微组织演化的影响	701
304 不锈钢冷轧退火 $\Sigma 3$ 特殊晶界分布研究	712
金属材料晶界特征分布 (GBCD) 优化研究进展	720

锆合金在 550 °C/25 MPa 超临界水中的腐蚀行为	727
温度和脉冲频率对三维原子探针测试结果的影响	732
第二相 Zr-4 合金在 400 °C 过热蒸汽中腐蚀吸氢行为的影响	737
热处理对 Zr-4 合金在 360 °C LiOH 水溶液中腐蚀行为的影响	744
Zr-Sn-Nb 合金耐疔状腐蚀性能的研究	750
热处理影响 Zr-4 合金耐疔状腐蚀性能的机制	757
三维原子探针及其在材料科学研究中的应用	765
A Superior Corrosion Behavior of Zircaloy-4 in Lithiated Water at 360 °C/18.6 MPa by β -Quenching	771
Effect of Single-Step Strain and Annealing on Grain Boundary Character Distribution and Intergranular Corrosion in Alloy 690	782
Effect of Water Chemistry and Composition on Microstructural Evolution of Oxide on Zr Alloys	799
添加合金元素 Cu 和 Mn 对锆合金中第二相的影响	827
Zr-2.5Nb 合金在 550 °C/25 MPa 超临界水中腐蚀时的氢致 α/β 相变	834
热处理对 N36 锆合金腐蚀与吸氢性能的影响	840
小形变量轧制下电工钢中立方织构的形成	847
690 合金的晶界特征分布及其对晶间腐蚀的影响	854
形变及热处理对 690 合金晶界特征分布的影响	864
微量 Nb 的添加对 Zr-4 合金耐疔状腐蚀性能的影响	871
Zr-4 合金薄板的织构与耐疔状腐蚀性能的关系	875
用三维原子探针研究压力容器模拟钢中富铜原子团簇的析出	881
Grain Cluster Microstructure and Grain Boundary Character Distribution in Alloy 690	887
快淬 NdFeB 磁粉磁性能不均匀性问题的研究	909
镍基 690 合金时效过程中晶界碳化物的形貌演化	914
高温退火过程中 316 不锈钢晶界特征分布的演化	919
Zr-4 合金氧化膜的显微组织研究	926
晶界类型及时效处理对 690 合金耐晶间腐蚀性能的影响	936
Features of Highly Twinned Microstructures Produced by GBE in FCC Materials	942
利用 EBSD 技术对 690 合金不同类型晶界处碳化物形貌的研究	949
变形及热处理影响 Zr-4 合金显微组织的研究	955
核反应堆压力容器模拟钢中富 Cu 原子团簇的析出与嵌入原子势计算	960
晶界特征分布对 304 不锈钢应力腐蚀开裂的影响	967
低温退火对铁硅合金中立方织构形成的影响	974
核反应堆压力容器模拟钢中富 Cu 纳米团簇析出早期阶段的研究	982
304 不锈钢中“晶粒团簇”显微组织的特征与晶界特征分布的关系	989
金属材料中退火孪晶的控制及利用——晶界工程研究	996
高温高压水环境中锆合金腐蚀的原位阻抗谱特征	1008
Zr-4 合金表面氧化膜的电化学阻抗谱特征	1014

加工工艺对 N18 锆合金在 360 °C/18.6 MPa LiOH 水溶液中腐蚀行为的影响	1019
Study of the Initial Stage and Anisotropic Growth of Oxide Layers Formed on Zircaloy - 4	1026
Study on the Role of Second Phase Particles in Hydrogen Uptake Behavior of Zirconium Alloys	1048
Zr(Fe _x , Cr _{1-x}) ₂ 合金在 400 °C 过热蒸汽中的腐蚀行为	1070
APT 和萃取复型研究压力容器模拟钢中富 Cu 团簇的析出	1077
Zr-4 合金腐蚀初期氧化膜的显微组织研究	1084
水化学和腐蚀温度对锆合金氧化膜中压应力的影响	1092
晶界网络特征对 304 不锈钢晶间应力腐蚀开裂的影响	1097
690 合金中晶界网络分布的控制及其对晶间腐蚀性能的影响	1106
镍基 690 合金中晶界碳化物析出的研究	1112
原子探针层析方法研究 690 合金晶界偏聚的初步结果	1120
Cu 对 Zr-2.5Nb 合金在 500 °C/10.3 MPa 过热蒸汽中腐蚀行为的影响	1125
Zr-2.5Nb 合金中 β -Nb 相的氧化过程	1131
添加 Cu 对 M5 合金在 500 °C 过热蒸汽中耐腐蚀性能的影响	1138
690 合金原始晶粒尺寸对晶界工程处理后晶界网络的影响	1145
Zr-4 合金中氢化物析出长大的透射电镜原位研究	1153
β 相水淬对 Zr-4 合金在 LiOH 水溶液中耐腐蚀性能的影响	1160
Fe/Cr 比对 Zr(Fe, Cr) ₂ 吸氢性能的影响	1168
Zr-Sn 系合金在过热蒸汽中的腐蚀吸氢行为	1174
核电站关键材料中的晶界工程问题	1182
RPV 模拟钢中纳米富 Cu 相的析出和结构演化研究	1190
Cu 含量对 Zr-0.80Sn-0.34Nb-0.39Fe-0.10Cr-xCu 合金在 500 °C 过热蒸汽中 耐腐蚀性能的影响	1198
添加 Nb 对 Zr-4 合金在 500 °C 过热蒸汽中耐腐蚀性能的影响	1204
Ni 对 RPV 模拟钢中富 Cu 原子团簇析出的影响	1212
Optimization of N18 Zirconium Alloy for Fuel Cladding of Water Reactors	1220
C-Cr Segregation at Grain Boundary before the Carbide Nucleation in Alloy 690	1231
核反应堆压力容器模拟钢中纳米富 Cu 相的变形特征	1241
Cu 在 Zr-2.5Nb-0.5Cu 合金及其腐蚀生成氧化膜中的存在形式	1248
镍基 690 合金晶界成分演化规律的研究	1254
添加 2 wt% Cu 对 Zr-4 合金显微结构和耐腐蚀性能的影响	1260
N18 锆合金点蚀腐蚀问题研究	1268
锆合金在 LiOH 水溶液中腐蚀的各向异性研究	1276
Zr-0.7Sn-0.35Nb-0.3Fe-xGe 合金在高温高压 LiOH 水溶液中耐腐蚀性能的 研究	1284
富 Cu 团簇的析出对 RPV 模拟钢韧-脆转变温度的影响	1294
利用 APT 对 RPV 模拟钢中富 Cu 原子团簇析出的研究	1301
利用 APT 对 RPV 模拟钢中界面上原子偏聚特征的研究	1310

添加 Bi 对 Zr-4 合金在 400 °C/10.3 MPa 过热蒸汽中耐腐蚀性能的影响	1320
退火温度对 Zr-0.85Sn-0.16Nb-0.38Fe-0.18Cr 合金耐腐蚀性能的影响	1327
The Effect of Final Annealing after β -Quenching on the Corrosion Resistance of Zircaloy-4 in Lithiated Water with 0.04 M LiOH	1334
添加 Bi 对 Zr-1Nb 合金在 360 °C 和 18.6 MPa 去离子水中耐腐蚀性能的影响	1348
Crystal Structure Evolution of the Cu-Rich Nano Precipitates from bcc to 9R in Reactor Pressure Vessel Model Steel	1357
The Growth Mechanism of Grain Boundary Carbide in Alloy 690	1366
Atomic Scale Study of Grain Boundary Segregation before Carbide Nucleation in Ni-Cr-Fe Alloys	1375
Effect of Initial Grain Sizes on the Grain Boundary Network during Grain Boundary Engineering in Alloy 690	1387
形变及热处理对白铜 B10 合金晶界特征分布的影响	1405
利用晶界工程技术优化 H68 黄铜中的晶界网络	1413
Zr-1Nb-0.7Sn-0.03Fe- x Ge 合金在 360 °C LiOH 水溶液中耐腐蚀性能的 研究	1420
Ge 含量对 Zr-4 合金在 LiOH 水溶液中耐腐蚀性能的影响	1430
Zr-0.8Sn-0.35Nb-0.4Fe-0.1Cr- x Bi 合金在 400 °C 过热蒸汽中的腐蚀行为	1438
Zr-0.80Sn-0.4Nb-0.4Fe-0.10Cr- x Cu 合金在 400 °C 过热蒸气中的耐腐蚀 性能	1445
附：周邦新及其科研团队发表论文清单	1452
后 记	1466

冷轧铜板再结晶组织的形成*

摘 要: 电解纯铜经 88.7% 冷轧后, 所形成的轧制组织除稳定的 $(110)[\bar{1}\bar{1}2]$ 与 $(112)[11\bar{1}]$ 外, 还存在着一种 $(3, 6, 11)[53\bar{3}]$ 组织. 在较低温度下退火时, 再结晶组织主要为 $(100)[001]$ 、 $(358)[3\bar{5}2]$ 和与 $(100)[001]$ 成孪生取向的 $(122)[21\bar{2}]$ 组织. 随着退火温度的增加, $(358)[3\bar{5}2]$ 组织逐渐减弱, 立方组织 $(100)[001]$ 则逐渐加强; 当退火温度达到 900°C 时, 形成了集中的 $(100)[001]$ 组织. 冷轧铜板在退火的过程中, 具有 $(100)[001]$ 再结晶晶粒首先形成, 然后普遍地发生同位再结晶. 其中具有 $(100)[001]$ 取向的晶粒, 继续发生选择性的生长, 最后形成了集中的立方组织.

本文中对轧制组织与其再结晶组织取向间的关系也进行了分析, 再结晶组织一般可认为是原有组织沿某一个 $[111]$ 轴旋转 45° , 22° 或 38° 的结果. 同时, 根据上述几何关系所绘出的理想极图与实际测定的结果也是符合的. 试验结果指出, 不同加热速度和不同加热程序对形成最终的再结晶组织不发生显著的影响, 而退火温度对再结晶组织的形成起着主要的作用.

1 引言

金属在承受较大的形变后, 产生了加工组织. 当具有加工组织的金属再经过退火处理时, 可形成与原有组织相同的或完全不同的组织, 一般称为再结晶组织.

对于面心立方点阵的金属, 如 Cu, Al, Ni 及其某些合金等, 经较大形变的轧制后, 具有集中的 $(110)[\bar{1}\bar{1}2]$ 和 $(112)[11\bar{1}]$ 组织. 这些金属再经退火处理可形成具有 $(100)[001]$ 取向的再结晶组织, 通称为立方组织^[1-6]. 一般来说, 大的冷轧加工量 ($>80\%$), 高的退火温度, 小的原始晶粒度, 和合金元素的含量在一定限度以下等因素, 是形成立方组织的几个重要的条件^[1].

过去所发表的一些工作中, 一般是将样品在某一温度下退火并保持一定时间后, 观察其再结晶组织的形成情况. 但是对于再结晶组织的形成过程和加热速度、加热程序对组织的影响等, 这些方面的资料仍然很缺乏. 本试验即着重研究上述各点对冷轧铜板再结晶组织的影响, 通过这些试验工作, 可提供更多的实验数据, 将有助于进一步了解金属再结晶组织形成的机理, 作为今后改进工艺过程方面的理论依据.

2 试验步骤

本试验所采用的电解纯铜的化学成分见表 1. 原材料经热轧到 7.4 mm 后, 再冷轧到 0.84 mm, 总冷加工量为 88.7%. 冷轧前的晶粒大小为 0.03—0.045 mm.

样品的尺寸为 $20 \times 10 \text{ mm}^2$, 退火在自制的管式炉中进行. 除 900°C 长时间加热采用真空

* 本文合作者: 颜鸣皋, 原发表于《物理学报》, 1958, 14(2): 121—135.

表 1 电解铜的化学分析结果

合金元素	Cu	Pb	Fe	Ni	Sn	Si	Zn	P	O ₂
含量%	99.95	0.0007	0.0015	0.001	0.0002	<0.001	<0.005	<0.0001	0.013

装置外,一般均在空气中加热.为了测定样品的真实温度,采用了将热电偶的热端直接绑在样品上的方法.在观察不同的加热条件下再结晶组织的变化,曾采用了一些不同的加热方式,如图 1 中的加热曲线所示:其中曲线 1,2 是以不同的加热速度进行加热,其平均加热速度分别为 450 °C/分和 2 °C/分.曲线 3,4 是先将样品加热到 600 °C 保温 30 分钟,然后将样品直接加热到 900 °C 或冷至室温后再加热到 900 °C.曲线 5 是将样品加热到 900 °C 后,立即移至 600 °C 保温.为了研究样品在加热过程中的组织和性能的变化,在加热途中(如曲线 1,2 上的圆圈所示)将样品取出淬.经不同处理后的样品,以威氏硬度计测定其硬度值,采用的荷重为 10 千克.

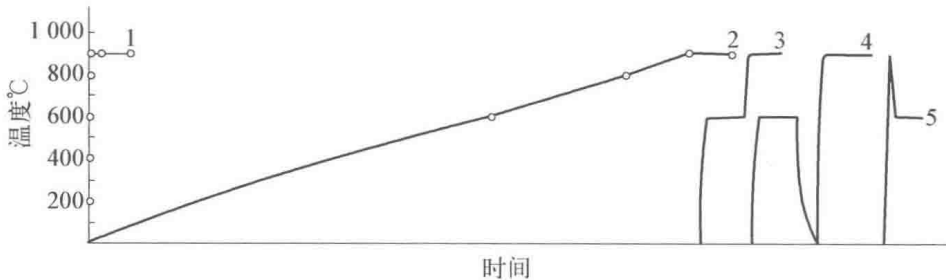


图 1 样品退火时的加热曲线

上述样品经处理后,以硝酸腐蚀至 0.7 mm 以下,并用 CuK α 辐射摄取一系列的照片以绘出其(111)与(100)面的极图.为了迅速地观察到立方组织的形成,采用了 X 光掠射法^[3],就是将试样面与 X 光成一 $\theta_{(200)}$ 角(200 的布来格角).当采用 CuK α 辐射时, $\theta_{(200)} \simeq 25^{\circ}10'$.这样当有(100)[001]取向的再结晶晶粒形成时,很容易从摄取的照片中 200 衍射环上观察到.

3 试验结果

图 2(a)是测得冷轧的(111)与(100)极图,其组织理想取向主要为(110)[1 $\bar{1}$ 2]+(112)[11 $\bar{1}$]和弱的(100)[001]、(110)[001],此外在(110)[1 $\bar{1}$ 2]和(112)[11 $\bar{1}$]两主要组织间,还存在着一个过渡性的或与上述两组织“共生”的(3, 6, 11)[533]组织.

样品在不同温度加热 30 分钟后测得的硬度值变化曲线见图 3.与之相对应的 X 光掠射相列于图 4.由图 4 中可以明显地看到,当样品在 160 °C 退火 30 分钟后[见图 4(b)],具有(100)[001]取向的再结晶晶粒已首先形成,而其他部分仍然保持着冷加工状态,此时硬度值仅有微小的变化,可以认为样品还是处于恢复阶段.随着退火温度的增加,(100)[001]取向的晶粒发生长大,同时也产生了其他取向的再结晶晶粒.退火温度的继续增加,晶粒的取向就逐渐集中到(100)[001][见图 4(f),(g),(h)].图 2(b),(c),(d),(e)是样品在 400 °C, 600 °C, 800 °C, 900 °C 加热 30 分钟后所测出的(111)与(100)极图.根据这些极图可看出在上述温度范围内,铜板的再结晶组织主要是(100)[001],其次是(358)[352]和(122)[212],

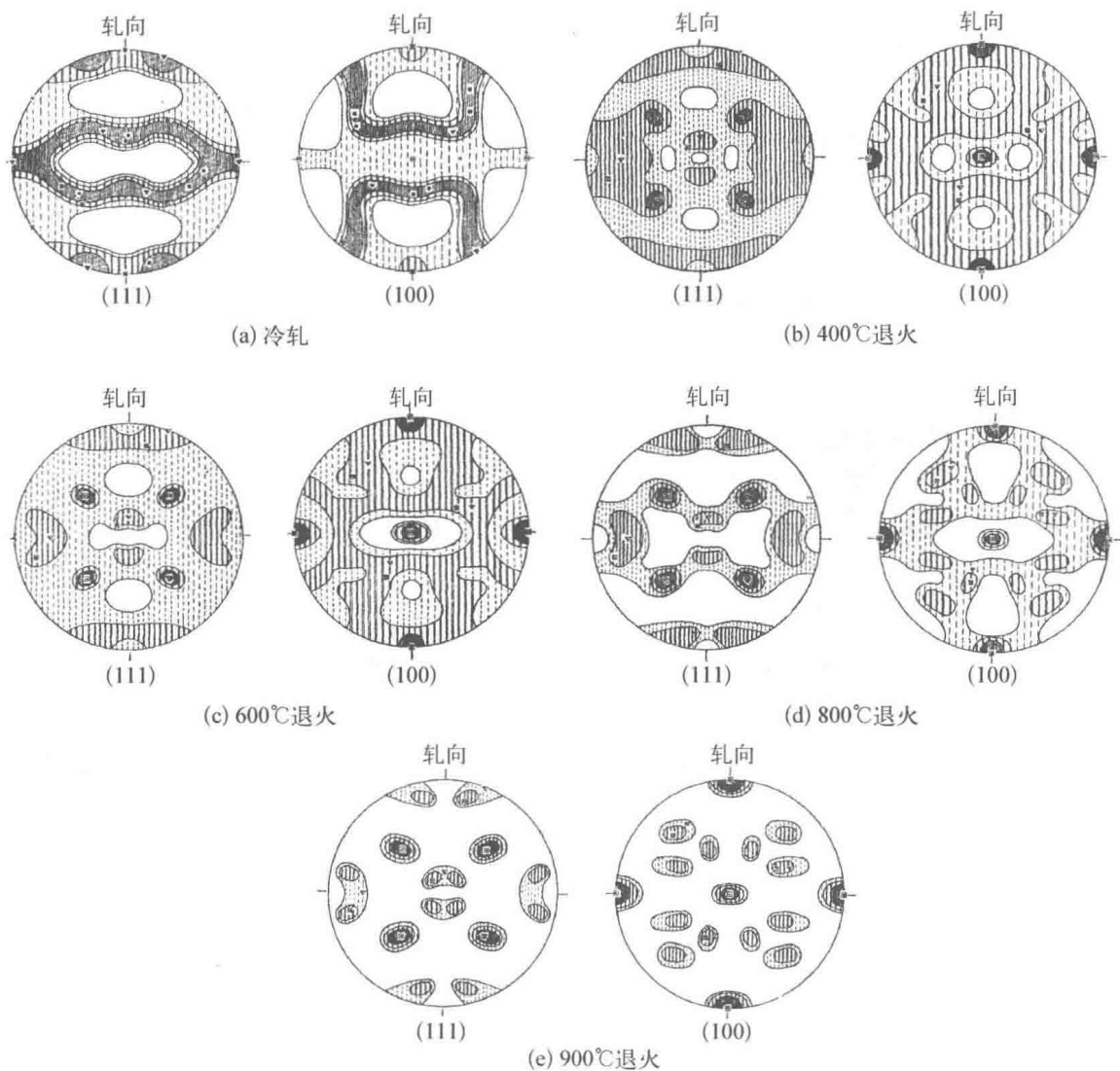


图2 纯铜经88.7%冷轧和不同温度下30分钟退火后的(111)和(100)极图

在较低的温度(400 °C, 600 °C)时,还有一些混乱取向的晶粒.

样品在加热到400 °C, 600 °C, 800 °C, 900 °C的过程中,以不同的加热时间(即样品被加热到不同温度时),将样品取出水淬,测得的硬度变化曲线与相应的加热曲线示于图5. 由硬度变化曲线中可看到样品在加热过程中,硬度值下降是非常迅速的. 一旦样品被加热到指定的温度时,硬度值已趋于稳定,织构也基本上形成. 继续加热时,硬度不再发生显著的变化,仅织构稍有所集中. 这一结果也指出了在板料的实际生产中,缩短退火时间来

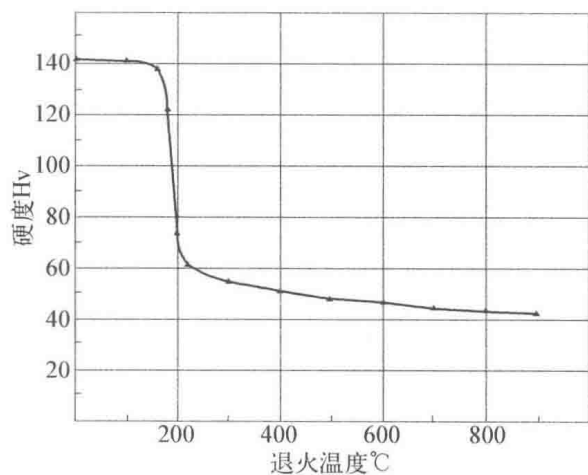


图3 冷轧铜板在不同温度退火后硬度的变化

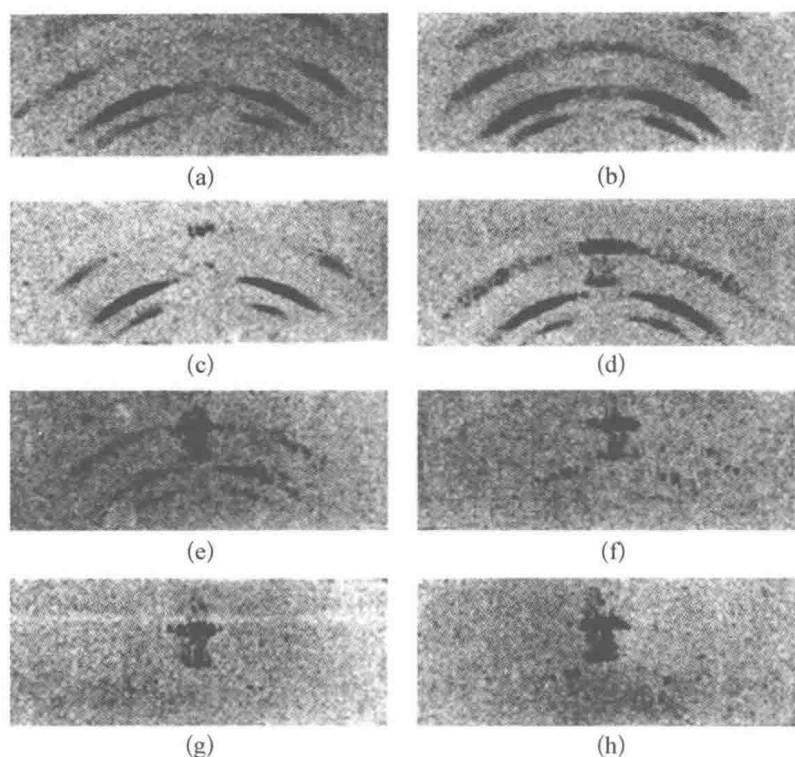


图4 冷轧铜板在不同温度退火 30 分钟后的 X 光掠射相
(a) 冷轧, (b) 160 °C 退火, (c) 180 °C 退火, (d) 200 °C 退火, (e) 400 °C 退火, (f) 600 °C 退火, (g) 800 °C 退火, (h) 900 °C 退火

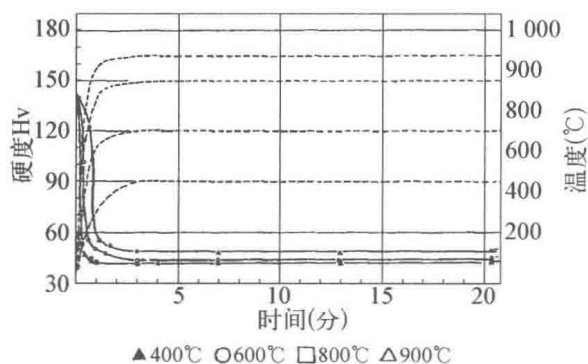


图5 铜板在不同温度下退火过程中硬度的变化和相应的加热曲线

提高生产率是有可能的,因此,这也是今后值得进一步研究的问题。

图6是样品在加热至 900 °C 的过程中,以不同的加热时间(即样品温度达到 400 °C, 600 °C, 800 °C, 900 °C 时)取出水淬后所测绘出的(111)与(100)极图。图6(a)是样品加热到 400 °C (加热 10 秒后)取出水淬后测得的极图。这时立方织构已经出现,并具有相当的强度,同时产生了一些混乱取向的再结晶晶粒,但样品大部分还保持着冷加工状态。图6(b)是样品加热到 600 °C (加热 17 秒后)取出水淬后测得的极图。这时样品已完全再结晶,晶粒取向主要是(100)[001]和(358)[352]以及一些与冷轧织构相近的取向,后者可认为是通过同位再结晶而获得的。图6(c)是样品加热到 900 °C (加热 42 秒后)取出水淬后测得的极图。这时(100)[001]织构已显著地加强,与(100)[001]成孪生关系的(122)[212]织构的强度亦有增加。而(358)[352]织构则相应地减弱。图6(d), (e), (f)分别为样品加热到 900 °C 时和在 900 °C 保温 10 分及 30 分后水淬测得的极图。由上列图中可见,在 900 °C 继续保温时,逐渐形成了集中的立方织构和一些较弱的、与(100)[001]成孪生关系的(122)[212]取向。图7为样品在 900 °C 退火过程中的 X 光掠射相,当加热到 10 秒时已开始再结晶,其中立方织构已具有相当的强度,但是冷加工织构却仍然保留着。