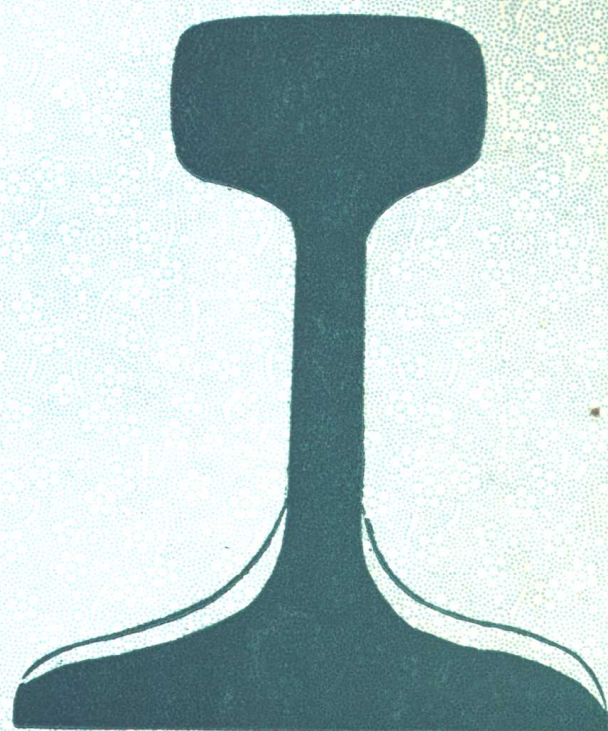


鋼軌鋼論文集

GANG GUI GANG
LUN WEN JI



钢铁研究总院金属物理室

1986

北京

91-53

前 言

铁路交通运输在我国国民经济和国防建设事业中所起的作用是众所周知的，是国家的大动脉。钢轨是铁路的主要组成部件，钢轨质量的好坏直接影响到铁路运输的安全和效率。

我国钢轨生产是建国后才发展起来的，三十多年来基本上满足了我国铁路建设的需要，而且还有过少量出口。然而，随着铁路运输强度的不断提高（高轴重，高速度，高密度），对钢轨性能和质量不断提出新的更高的要求。因此，摆在我们面前的一个重要任务是根据国家建设的需要，将现有钢轨生产和研制水平大大提高一步，争取早日达到国际先进水平。

世界各铁路发达国家都很重视钢轨的开发研究，每年都有大量的文献发表，但中文资料很少。为交流在轨钢研究方面的成果，推动我国轨钢研究工作不断向前发展，特编辑本《钢轨论文集》。

论文集分两部分，其中第一部分为国内研究论文，第二部分为国外文献选译，全书共收入论文25篇。在论文之前，还收入一篇“全国重轨、轮、轴质量工作会议简况”，报道了1986年3月在京召开的这次会议的概况，从中可以了解我国当前钢轨、车轮等铁路用钢材的生产和使用情况以及我们面临的任务。

国内部分共10篇论文，除“一次带状组织的成因及对重轨性能的影响”为包钢梅美武高级工程师所写而外，其余均为钢铁研究总院重轨课题组近几年的研究成果，较集中地报道了他们关于普碳轨的研究情况，其中包括组织和性能的关系，断裂特征，以及微量元素对组织和性能的影响等方面的论文，最后一篇为综述性文章。

国外译文部分共15篇，其中综述性论文5篇，组织和性能的关系共6篇，微量元素铌的作用2篇，关于热处理轨1篇，失效分析1篇。这些论文选译自美、德、苏、日、澳等各国杂志和文集，有一定的代表性，基本上反映了当今的世界研究水平。除“现代钢轨生产”为邵素芸高级工程师翻译和“共析钢轨钢中的微合金化元素铌”为赵淑萍翻译之外，其余均为我课题组成员所译。全部论文经《钢铁》编辑部岳满堂工程师和张之香工程师编辑加工定稿，文中图由杨文曦同志描制。

由于时间仓促和水平所限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

钢铁研究总院金属物理室

1986年10月3日

1986年全国重轨、轮、轴质量工作会议简况

为贯彻冶金工作会议关于“提高产品质量，增加品种，决心打一场产品质量升级仗”的指导方针，1986年3月13~16日在北京召开了铁路重轨、车轮、轴质量工作会议。会议研究了如何提高钢轨、车轮、车轴坯等的质量，以满足铁路运输发展的需要。冶金部陆达总工程师和有关司局、鞍钢、包钢、攀钢、马钢、武钢、重钢及有关研究院所、高等院校的领导、专业技术人员代表参加了会议。铁道部屠由瑞总工程师和有关司局代表16名同志也出席了会议。

会上听取了铁道部对重轨、车轮、车轴坯等铁道用钢质量的意见和“七五”期间铁路用钢的数量需求和质量要求，并认真地逐一进行了讨论。会议总结了“六五”期间，特别是1985年重轨、车轮、车轴坯等铁路用钢的质量情况，交流了提高产品质量的经验，找出了各企业产品和国外先进标准、实物水平及铁道部要求的差距，深刻地认识到搞好铁路用钢质量工作的重要意义，讨论了“七五”期间重轨、车轮、车轴坯等应达到的质量水平，提出了“七五”期间企业的技术改造和科技攻关项目的安排意见。

1. 能源、交通、材料是国民经济发展的战略重点。发展能源、交通，也必须要解决材料问题。铁路是国民经济的大动脉，钢轨是铁路用材料中最重要的材料。初步预计“七五”期间铁路用钢每年将以平均10.9%的速度递增。铁路用钢的质量直接影响铁路运输效率和行车安全。铁道部门为挖掘运输潜力，以加大轴重，扩大列车编组和提高行车密度为发展方向，更加重了钢轨与车轮的负荷，对钢轨与车轮质量提出了更高更严格的要求。在新的历史时期，冶金部门应该急国家之所急，急铁路之所急，下决心花大力气，从现在起用上五年、十年或更长一些的时间，一定要把重轨、车轮、车轴坯等铁路用钢的质量搞上去，以保证铁路运输事业的发展。

2. “六五”期间，重轨、车轮、车轴坯等铁路用钢的生产有了很大发展。“六五”期间累计生产重轨比上一个五年计划期间增长7.9%，车轮、轮箍增长16.74%，车轴坯增长50%。重轨和车轮还出口到东南亚各国和美国。38、43、50、60kg/m的重轨已成系列，还试制了75kg/m的重轨。钢轨定尺长度已由12.5m过渡到25m，重轨力学性能已从 $\sigma_b=80\text{kgf/mm}^2$ 提高到 $\geq 90\text{kgf/mm}^2$ ，还生产了一部分高强度合金轨和全长淬火钢轨。钢轨正向重型化、高强度、高耐磨性、长轨化方向发展。铁路车轮已有 $\phi 840$ 、 $\phi 915$ 和 $\phi 950\text{mm}$ 三个品种和 $\phi 1056\text{mm}$ 内燃机车车轮轮箍，实现了铁路车轮国产化。几年来，随着对重轨、车轮、车轴坯质量要求的不断提高，各厂采取了一系列技术、组织措施，产品质量逐年有所提高。鞍钢、包钢、攀钢、武钢分别获得国家颁发的50kg/m、43kg/m和38kg/m重轨产品生产许可证。包钢生产的60kg/m重轨已通过技术鉴定，攀钢生产的60kg/m重轨正在准备鉴定。有六个重轨、车轮、垫板等铁路用钢产品获冶金部优质产品称号，鞍钢生产的50kg/m中锰钢轨和马钢生产的 $\phi 915\text{mm}$ 客车车轮质量，受到铁道部的好评，获国家质量奖。

在“六五”期间各钢铁企业，为提高铁路用钢的质量，付出了辛勤的劳动，取得了明显的进步，成绩是肯定的。但与铁路运输发展的要求和国际先进水平相比，还有相当大的差距。重轨、车轮质量问题，突出的有以下几个方面：

1) 钢中非金属夹杂普遍较高。

2) 钢轨、车轮表面裂纹和结疤。

3) 钢轨尺寸精度差，特别是长度达不到定尺要求，有的企业短尺率高达30%以上。这有管理问题，但更多的是由于产品质量问题造成的。

4) 钢轨和车轮在线路上使用后表现出耐磨性差，出现早期剥离和掉块等。

3. 会议就“七五”目标和应采取的主要技术措施，进行了认真地讨论。各有关钢铁企业“七五”期间要努力做到：

1) 多生产60kg/m、75kg/m优质重轨，增加全长淬火钢轨。包钢、攀钢要形成全长淬火轨生产能力。重轨力学性能水平达到 $\sigma_b=110\text{kgf/mm}^2$ ， $\sigma_{0.2}\geq 80\text{kgf/mm}^2$ ， $\delta_5\geq 10\%$ 。

2) 提高钢的纯净度，采用钢包吹氩，推广浓差电池定氧，试验硅钙钒复合脱氧剂，攀钢用转炉冶炼，采用炉后真空处理等措施，以降低钢中非金属夹杂物含量。

3) 减少重轨短尺率，采取各种措施综合治理，使短尺率由现在的30%左右，降低到15%以下。

4) 提高重轨尺寸精度和平直度。

5) 研究改进轧钢热处理工艺，合理控制重轨的组织状态，以提高钢轨的耐磨性。

为了实现上述目标，“七五”期间初步安排了一批技术改造项目：

1) 攀钢75kg/m重轨生产线技术改造。主要包括炼钢厂增加钢水真空处理设备、轨梁厂改造钢轨矫直机，引进压弯头机、锯钻联合机床、探伤设备，改造钢轨全长淬火线等。

2) 包钢轨梁厂重轨生产线技术改造。改造方案已基本确定，主要包括：改造矫直机，引进锯钻联合机床、压弯头机、探伤设备等，新建第三条重轨加工线，全长淬火车间（先建一条热处理线）等。

包钢重轨钢用大平炉冶炼，钢水净化方案尚待研究确定。

3) 马钢车轮轮箍生产线改造。内容包括炼钢厂平炉后增加两台喷粉设备（已引进一台），车轮轮箍厂增建一座环形加热炉、立式车轮轧机、新式加工机床、喷丸、探伤设备以及调整热处理、成品加工作业线等。完成后质量可基本上达到国际标准。

4. 完成“七五”技术改造和技术攻关，实现“七五”奋斗目标后，我国重轨、车轮等铁道用钢的质量水平将有很大的提高。但是由于条件（资金、设备、技术水平等）的限制，届时仍可能与铁道部的要求和世界先进水平相比存在差距。为认真地把重轨、车轮等铁路用钢质量搞上去，要坚持不懈地抓上五年、十年、甚至更长时间，一方面紧紧抓住现在已安排的措施项目的落实，同时对那些一时做不到，而又是提高产品质量，满足用户要求所必要的技术，要及早开展研究工作，为下个五年计划的技术改造做好技术准备。如：重轨钢的连铸技术，钢水真空处理技术，可用于重轨和H型钢的万能轧机，高强度、高耐磨钢轨与车轮生产技术，钢轨取消缓冷工艺，应用控制轧制、控制冷却技术以及超长（60、120m）轨生产的可能性等都要及早安排。

重轨和车轮的工作条件复杂，解决质量问题的技术难度高，因此更要注意应用现代化新技术，要有坚实的科学研究工作为后盾。要进一步组织好包括工厂、企业的研究所、大专院

校和部属研究院的技术队伍，加强科学研究工作，把重轨、车轮等铁道用钢的质量和生产技术水平搞上去。

为了提高我国钢轨、车轮质量，必须经常了解外国生产的重轨、车轮实际质量水平，找出我们的差距和问题。今年拟由钢铁研究总院和有关企业对进口钢轨、车轮进行全面质量分析，以做到“知己知彼”，赶超有目标。必要时，还要对国外重轨，车轮生产技术，检验技术，研究工作等作进一步的考察和了解。

（冶金部钢铁司轧钢处供稿）

封面设计：姚 衡 孙才荣

题 字：黄孝璜

目 录

前 言	(I)
1986年全国重轨、轮、轴质量工作会议简况	(II)

第一部分 研究论文

60P74和AP1 重轨钢的组织 and 性能	赵 坚等 (3)
P74重轨钢的断裂特征分析	赵 坚 朱桂兰 (16)
P74重轨钢断裂韧性 K_{Ic} 值的统计分析	姚 蓓 程育仁 (21)
普碳轨钢的力学行为和断裂特征	姚 蓓等 (26)
珠光体钢微观结构和断裂过程的TEM研究	黄孝瑛等 (35)
铌对碳素轨钢组织和性能的影响	赵 坚等 (41)
磷对碳素重轨钢组织和性能的影响	赵 坚 李敏之 (48)
试样几何因素对普碳轨钢断裂韧性的影响	姚 蓓 (55)
一次带状组织的成因及对重轨性能的影响	梅美武 (62)
论我国重轨生产的发展方向	赵 坚 (69)

第二部分 文 献 评 论

现代钢轨生产	K. F. Becker等 (77)
提高铁路钢轨质量的基本方向	И. С. Тришевский (81)
热轧珠光体钢轨钢的发展路线	J. Flügge等 (84)
轨钢的评价	K. Morton等 (91)
钢轨的硬度、显微组织和磨损行为	W. Heller等 (99)
碳钢钢轨的疲劳和断裂行为	J. M. Barsom等 (104)
标准碳素轨钢和高强度轨钢的疲劳性能和断裂韧性	Y. J. Park等 (114)
合金化和显微组织对实验轨钢强度和韧性的影响	G. K. Rouse等 (121)
微观结构在全珠光体钢强度和韧性中所起的作用	J. M. Hyzak等 (133)
1080全珠光体轨钢的解理断裂机制	Y. J. Park等 (138)
共析钢轨钢中的微合金化元素铌	K. Hulka等 (143)
铌对微合金化共析钢奥氏体再结晶及珠光体团尺寸的影响	H. J. Kestenback等 (152)
带有服役缺陷的控冷碳素钢轨的冶金检查	D. E. Sonon等 (155)
两阶段火焰加热和欠速淬火法生产高强轨	H. Ichinose等 (164)
钢轨和车轮材料的开发	S. Marich (174)

第 一 部 分

研 究 论 文

60P74和AP1重轨钢的组织 and 性能

赵 坚 姚 衡 刘末生 李永柏

(钢铁研究总院)

据铁路部门反映,包钢生产的60kg/m P74重轨发脆,质量不稳定,表现在落锤试验时,有的三锤不断,有的一锤就断,甚至有的在卸车时竟被摔断,等等。韧性不如鞍钢生产的API轨。

为查明60P74轨发脆的原因,选性能不同的钢轨在相同条件下进行对比试验。试图从中找出规律性,以改进和提高钢轨质量。

应该指出,60P74轨为普通碳素钢轨。而API为50kg/m中锰低合金钢轨,即钢种不同,轨型也不同,因此,这种对比只是相对性的。但对了解这两种钢轨的情况,对改进和提高钢轨质量仍具有一定的实际意义。

1. 试验用料

对比试料均取自北京铁路局北京焊轨队,其中包括包钢生产的60P74重轨两段,其炉罐号为:

8031051,落锤试验一锤脆断(以下简称51号);

8031592,落锤试验三锤未断(以下简称92号),鞍钢生产的API轨一段,炉号不详,三锤未断。

落锤试验条件是:锤重970kg,高4.6m,跨距1.1m。试验是在北京焊轨队于1980年12月和1981年1月露天下完成的。

2. 试验方法和结果

对比内容包括化学成分,金相组织,力学性能(拉伸,冲击,硬度)和断口等。

2.1 化学成分分析

为保证分析结果的可靠性,利用了发射光谱,直读光谱,红外光谱,常规化学分析及真空熔融气相色谱分析等交叉进行,分析了钢中五大元素和可能存在的微量元素,分析结果纳入表1。

由表1可见,比较突出的是51号样碳含量接近上限,是对比炉号中含碳量最高者,而API轨不仅含锰高,而硫磷也低,其它微量元素均很低。未发现异常。

2.2 金相组织

图1a为51号轨的显微组织照片。可见,除少量铁素体外,均为珠光体。但珠光体片层粗细不均,还有一些难以分辨的颗粒状发暗部分,估计为细珠光体。

图1b为92号轨的金相显微照片。基体亦为珠光体,也有一些难以分辨的细珠光体,另有较多的铁素体,后者一般沿晶界分布。此外还发现有较多的硫化物夹杂。

图1c为API轨的金相组织。虽然放大倍数与前两60P74轨是相同的,但组织细节几乎看不清楚,说明它很细,且很均匀,也有少量沿晶界分布的铁素体存在。

比较上述三种试样的金相显微照片，虽能看出一些问题，但由于金相显微镜的分辨本领有限，很多细节看不清楚。为弄清这些金相显微镜分辨不清的组织 and 进一步判断它们之间的差异，利用扫描电镜和透射电镜进行更高放大倍数的观察，并根据需要做必要的X射线能谱分析和电子衍射分析。

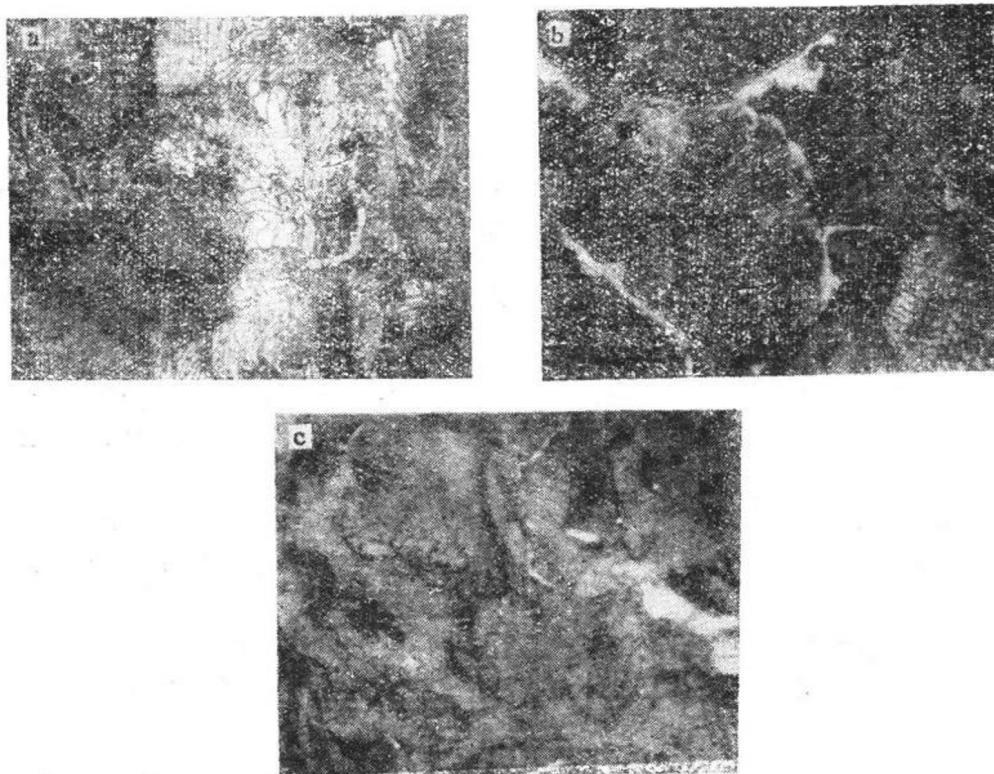


图1 51号(a)92号(b)和API1(c)轨的金相显微组织 $\times 527$

观察结果表明，51号轨，除在晶界上偶尔有极少一点铁素体外，基体上全是珠光体。而且，珠光体的形态是多种多样的。图2a为细片状珠光体，其中渗碳体片相当平直，片层间距很小，约为 $0.25\mu\text{m}$ ，而在图2b中则较为短小，片层间距较大，约为 $1\mu\text{m}$ 。其中还有一些粒状珠光体，但仔细观察，粒与粒之间似乎也有方向性，这一形态在图2c中尤为明显。

92号轨的珠光体组织虽然也有粗有细，但总的说来，粗的较多，细的较少（图3）。珠光体片层间距约为 $0.4\mu\text{m}$ ，沿晶界分布的铁素体较多。其它特征与图2中所示的51号轨的差不多，各种形态的珠光体也几乎全有。

API1轨金相组织的突出特点是细而均匀（图4），珠光体片层间距约为 $0.1\mu\text{m}$ ，虽然也有粗的，但不多，也有粒状的（图4b）。在晶界上亦有少量铁素体存在（图4a）。

总之，通过扫描电镜观察，可归纳出以下两点：

（1）三种试样的基体全为珠光体组织，只有粗和细，均匀和不均匀之分。API1轨组织最细，且均匀，92号轨组织较粗，也较均匀，而51号轨则粗细不均，变化多样。

（2）在晶界上除铁素体外，未发现有其它析出物或夹杂。92号轨的晶界铁素体较多，而51号轨和API1轨均较少。

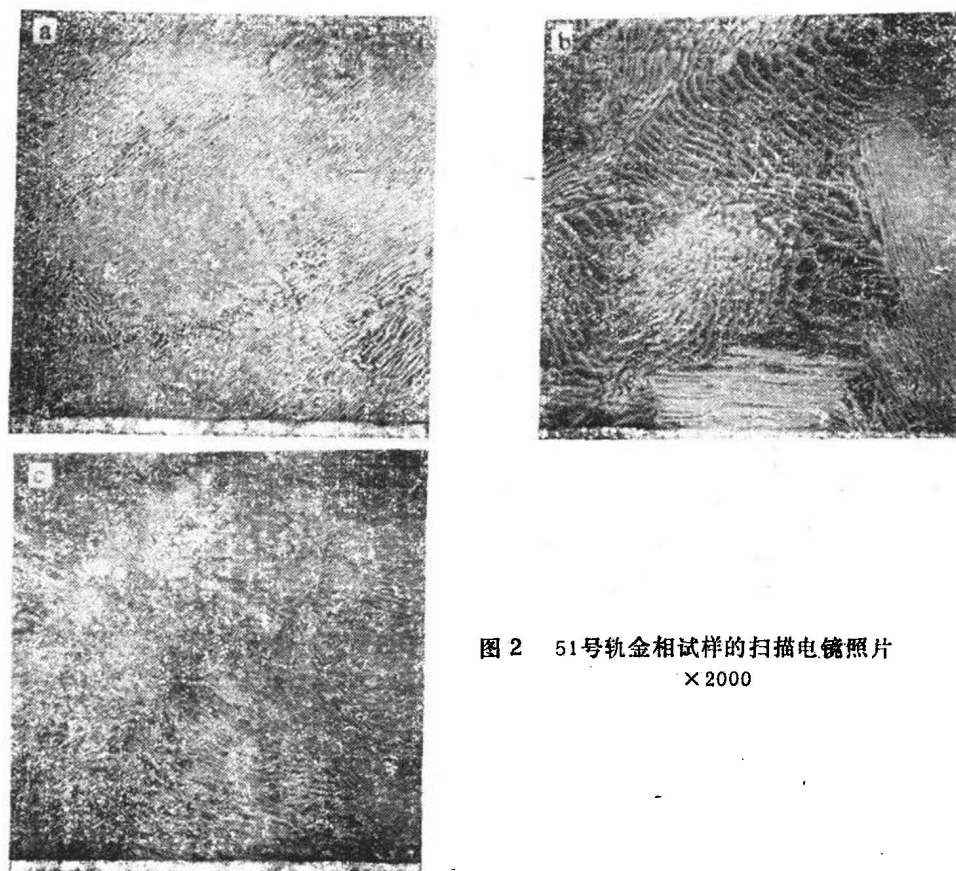


图2 51号轨金相试样的扫描电镜照片
×2000

表1 钢的化学成分, wt%

No.	钢 轨	C	Si	Mn	P	S	Al	Ni	Cu
1	P74标准要求 (GB2585—81)	0.67~0.80	0.13~0.28	0.70~1.00	≤0.040	≥0.050	—	—	—
2	51	0.79	0.22	0.89	0.027	0.019	0.035	<0.01	<0.01
3	92	0.73	0.22	0.84	0.020	0.025	0.020	<0.01	<0.01
4	API标准要求	0.65~0.77	0.15~0.30	1.10~1.50	0.040	0.040	—	—	—
5	API试样	0.72	0.25	1.28	0.021	0.020	0.014	0.012	0.03

Nb	V	Ti	In	Mg	Zn	Cl	H(ml/100g)
—	—	—	—	—	—	—	—
<0.01	<0.01	<0.01	<0.001	<0.0005	<0.001	<0.001	1.11
<0.01	<0.01	<0.01	<0.001	<0.0005	<0.001	<0.001	1.19
—	—	—	—	—	—	—	—
<0.005	<0.01	<0.0015	<0.001	<0.0005	<0.001	<0.001	1.10

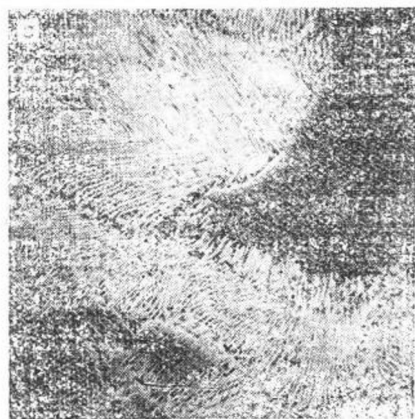
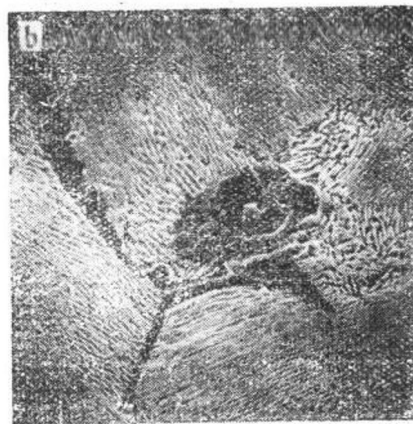
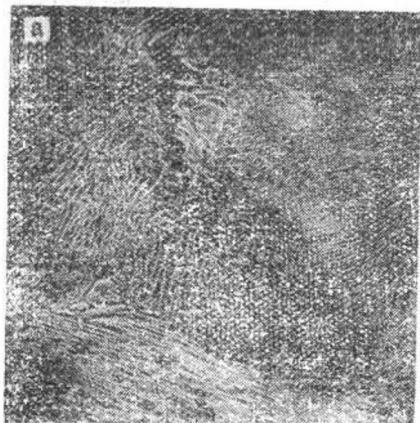


图3 92号轨金相试样的扫描电镜照片 ×2000

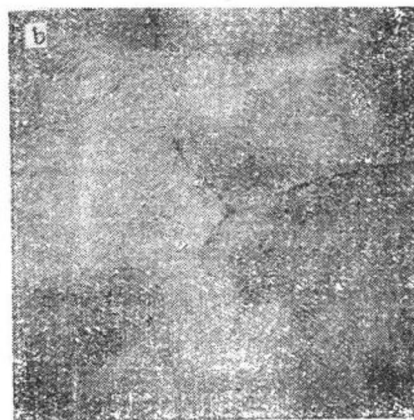
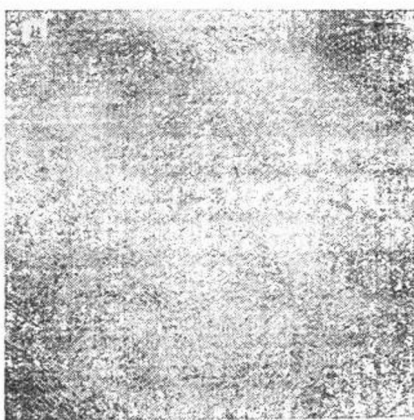
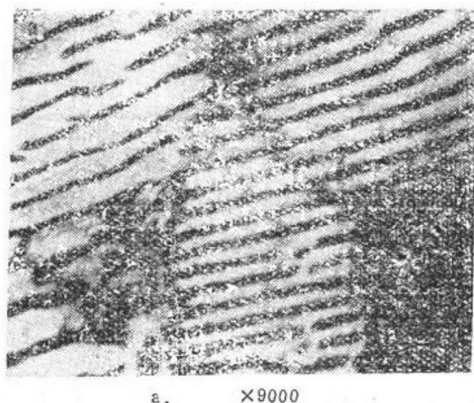


图4 API轨金相试样的扫描电镜照片 ×2000

为验证上述观察结果，并进一步考察金属的精细结构特征，特别是晶界情况。我们还用JSEM-200B (200kV) 和EM-400 (120kV)透射电镜做了一些金属薄膜的观察(试样的制备过程是：首先用线切割机切取0.15mm厚的金属薄片，经研磨减薄后，利用双喷法制取金属薄膜)。

图5为51号轨的金属薄膜透射电镜照片。可见，该轨的珠光体片确实是极不均匀(图5

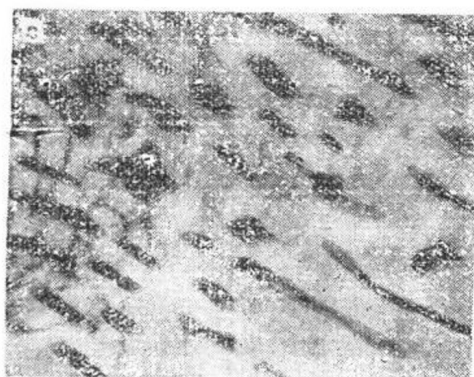
a、b)，渗碳体片形态不同，有片状的，粒状的（图5c）。图5c、5d为同一视场的明场象和暗场象。在图5a中明显可见有一团界，两边珠光体片层间距不同，团界上没有析出物，很干净。在图5b的渗碳体中可见有位错的精细结构存在。图5e为薄膜的电子衍射谱，经过标定为 α -Fe和 Fe_3C 。



a. $\times 9000$



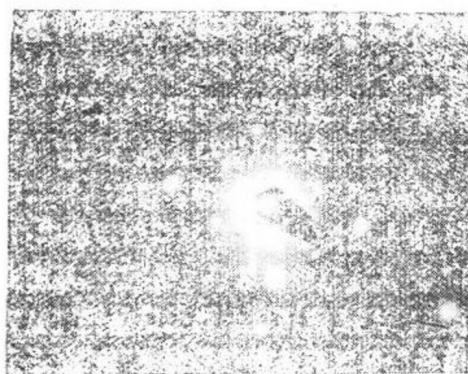
b. $\times 25000$



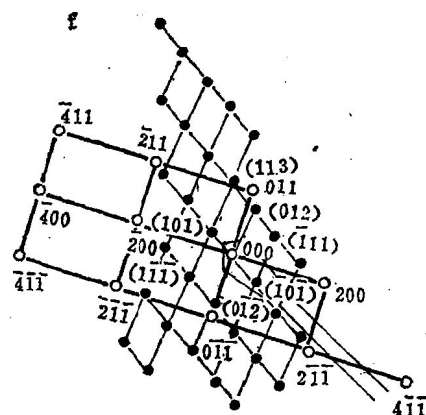
c. 明场 $\times 36000$



d. $\times 36000$



e. 电子衍射谱



- α -Fe $[01\bar{1}]$ (hkl)
- Fe_3C $[12\bar{1}]$ (hkl)

f. 电子衍射谱的标定

图5 51号轨金属薄膜的透射电镜照片

图6为92号轨金属薄膜的透射电镜照片。该轨组织较为均匀, 虽然也有各种形状的渗碳体存在, 但差异不象51号轨那么大。图6b为晶界铁素体的薄膜照片, 其中有大量的位错网络存在, 未发现有其他析出物。

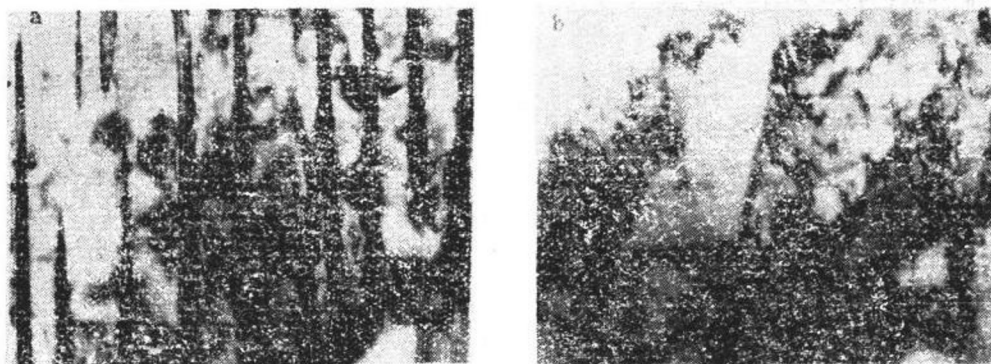


图6 92号轨金属薄膜透射电镜照片 $\times 36000$

图7为API轨金属薄膜的透射电镜照片。可见, 珠光体组织细而均匀, 除片层状珠光体外, 亦有粒状的。

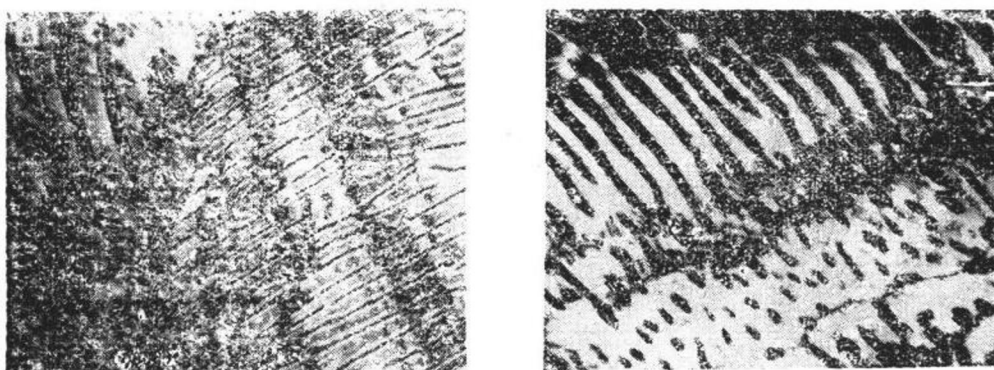


图7 API轨金属薄膜的透射电镜照片 $\times 10500$

总之, 透射电镜观察结果与扫描电镜的结果是一致的。

2.3 力学性能

力学检验包括常温 and 低温拉伸, 冲击韧性, 硬度, 并测定了钢的脆性转变温度。

2.3.1 拉力试验

光滑试样工作部分直径6mm, 标距33mm, 拉伸速度2mm/min, 试验结果示于图8。从中可以得出如下初步结论:

1) 51号轨的室温和 -20°C 时的强度指标 $\sigma_{0.2}$, σ_b 和 σ_t 均比API轨和92号轨的高, 而92号轨的强度指标(-20°C σ_b 和 $\sigma_{0.2}$ 除外)均略低于API轨。

2) API轨的塑性指标 δ 和 ψ 均比92号轨和51号轨的高, 后两者的 δ 和 ψ 相近。

值得注意的是 -20°C 时, 断面收缩率 ψ 略低于室温的, 但延伸率 δ 却和室温的完全一样, 这可能是由于 -20°C 时均匀延伸率 δ 均比室温的高造成的。

2.3.2 冲击韧性

冲击试样为标准梅氏 $10 \times 10 \times 55\text{mm}$, 分为开缺口和未开缺口两种, 试验结果分别列入

表2和表3。

从上述试验结果来看，冲击韧性值波动比较大，规律性不强。而且，冲击韧性和温度的关系也不存在明确的脆性转变点。

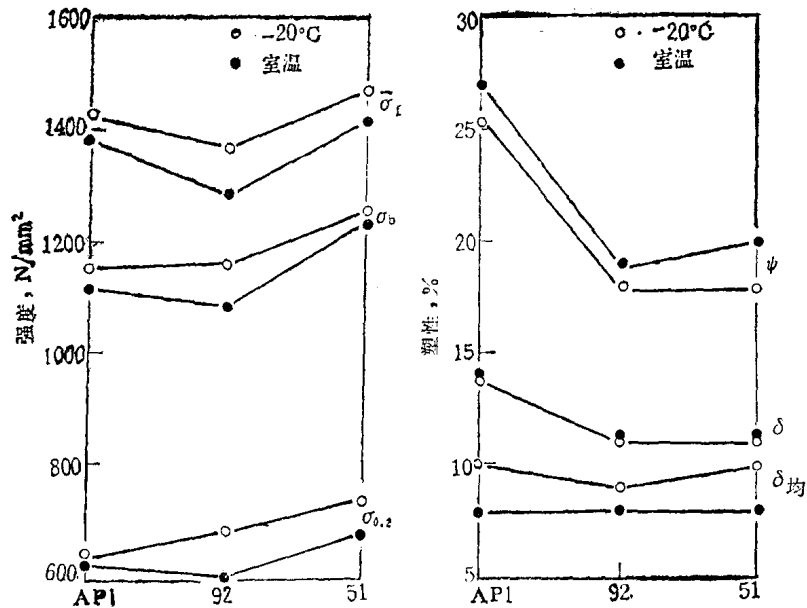


图8 力学性能对比

表2 标准梅氏冲击试样的冲击值, J/cm²

℃	51号			92号			API		
	轨 头	轨 腰	轨 底	轨 头	轨 腰	轨 底	轨 头	轨 腰	轨 底
15	17.9	13.7	23.8	17.4	20.6	23.2	19.1	9.8	16.6
0	13.7	9.8	19.6	22.1	18.1	20.6	27.2	24.5	44.1
-20	11.5	8.5	15.4	14.7	12.1	20.1	17.0	17.9	20.3
-30	20.6	12.3	7.4	17.2	8.3	14.7	9.0	10.5	17.6

表中数值均为三个试样的平均值。

表3 未开缺口的冲击韧性值, J/cm²

℃	51号			92号		
	轨 头	轨 腰	轨 底	轨 头	轨 腰	轨 底
15	136.2	155.4	198.9	152.6	152.6	225.1
0	117.1	148.5	185.2	120.5	140.8	239.1
-10	159.7	129.7	231.9	124.2	138.5	181.6
-30	119.1	210.7	210.7	119.1	133.3	174.0

图9是用本次试验所得全部结果及搜集到的数据绘制成的重轨钢脆性转变温度曲线。看来，60P74和API重轨钢的脆性转变温度范围大致在-40~+20℃之间。

2.3.3 硬度检验

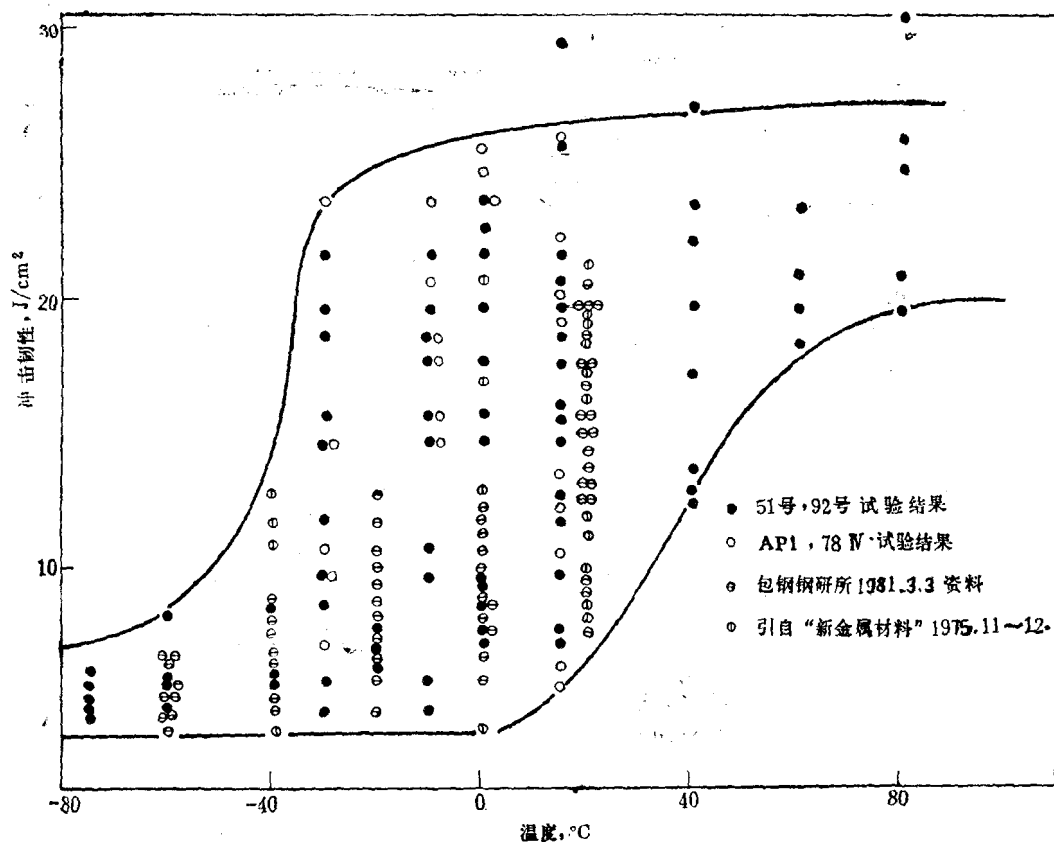


图9 P74钢和API钢的脆性转变温度曲线

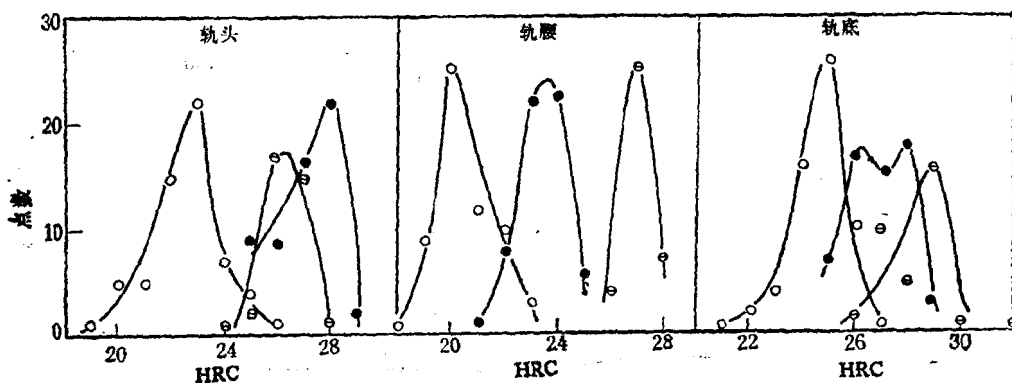


图10 包钢重轨与鞍钢重轨的洛氏硬度

○—92号； ●—51号； ⊕—API

硬度检验是在冲击试样上做的，每个试样上测三点洛氏硬度，试验结果示于图10。横坐标为 HRC 值，纵坐标为频率（点数）。看来，硬度试验结果和前面金相观察结果有较好的对应关系，即51号轨组织不均匀，因而其硬度值波动亦大，线型分布也不规则，而API轨组织细而均匀，因此，硬度高，线型也较规则，92号轨组织虽然较粗，但较均匀，所以硬度较低。