低合金钢及钒钛钢的科研生产应用情况及今后工作的几点意见*

刘兴乾

（冶金工业部钒钛钢领导小组）

一、研究与进展

经过“六五”攻关，我国低合金钢和钒钛钢的科研和生产有了很大的进展。1980年低合金钢的产量为302.5万吨，1985年增至618.66万吨，翻了一番。占钢总产量的比重，相应地由8.1%上升到13.2%；其中低合金钢筋增长了115%；低合金高强度结构钢增长了65%，低合金耐大气腐蚀钢增长了300%，矿用低合金钢增长130%，低合金耐磨重轨增长70%，低合金耐磨轻轨增长了600%。在品种方面，虽然新钢种的研究较过去有所减少，但过去不能生产而国内又急需的钢种和品种却有了很大的改观。如耐大气腐蚀钢，煤碳强化开采用钢，新三级钢筋用钢，船用低合金钢，X60，X65级石油与天然气管线用钢，工程机械用高强度钢以及含钛微合金钢等，有的已经达到国际先进水平或实物水平。在生产技术方面，氧气转炉炼低合金钢，钢包喷粉技术，微钛和稀土处理技术，控轧控冷技术等都有了较大的发展。在应用理论研究方面，出现了解释喷吹钢包内熔池流动现象的全浮力模型，控轧过程中应变积累效应的温度区间及变形抗力增加幅度的研究，为定量估算钢中微量相的强化效应所建立的非水电解液，恒电流浸蚀—萃取新方法以及双相钢中的硬相软化和软相硬化等成果和见解都有力地推动了我国低合金钢和钒钛钢的发展。

经过“六五”攻关，我国钒钛钢的科研和生产不仅在品种上形成了系列，而且在产量上也有了很大的提高，1981年我国钒钛低合金钢的产量为27万吨，1985年的产量则为69万吨，增加了2.5倍，产量在千吨以上的钒钢钢种16个，钛钢钢种11个。产量在万吨以上的钒钛钢钢种3个。09V，09SiV，09CuPVXt，15MnMoVNXt，25SiMnV以及06Ti，10Ti，15Ti，T52等钢种从产量、质量到经济效益，都取得了较大的进展。钒渣直接合金化，控轧控冷等冶炼和轧制工艺以及应用基础理论的研究，都取得了较好的进展。

应该看到，近些年来以16Mn，20MnSi和UHMn三个钢种为代表的Si-Mn系低合金钢为发展我国国民经济作出了巨大的贡献，据统计其效益可达60亿元以上。但是，我国是一个锰资源较贫乏的国家，储量仅占世界的0.8%。而V，Ti，Nb，Xt资源却极其丰富，其中Ti的储量占世界首位，Xt占世界总储量的80%；V占第四位；Nb的储量也较丰富。因此，根据我国的资源特点和工艺设备的实际情况，今后在发

*本文系低合金钢第一届，钒钛钢第三届全国学术会议总结

展Si-Mn钢的同时，应大力发展V，Ti，Nb微合金钢和Xt处理钢。特别是含钛钢，Ti加入Nb钢和V-N钢中都会取得很好的效果，Ti钢的生产成本也是很有吸引力的。因此，含钛低合金钢的进一步发展也应给予极大的关注。

会议还分别就微合金化问题，组织相变问题，冶炼、加工、焊接工艺问题以及钢种应用等问题进行了学术交流。特别是钒、钛、铌等元素对钢性能影响的机理及其分析方法以及焊接工艺和焊接组织等问题，在研究的深度和广度上较前两次会议都有了很大的提高，下面将分述几个问题。

（一）钢种的研究

1. 微钛处理钢和含钛微合金钢

微钛处理钢是我国“六五”期间低合金钢与钒钛钢研究的一个突出进展。16MnR钢经微钛处理后显著地提高了钢的强度、韧性，降低了钢的脆性转变温度。制造的低温压力容器达到了美国SATMA 662－C级中低温压力容器用钢的技术条件。不仅满足了国内需要而且还用于出口。低碳钒钢进行微钛处理后，在现行条件下，采用高温快轧工艺生产出相当于调质性能的Mn-V钢。采用热心回火工艺通过添加微量钛研究的MnTi钢筋，具有较高的强韧性、良好的冷弯性及焊接性能，并且生产成本较低。对于TC_1日用搪瓷钢，10Ti钢水幕控制冷却卷板的效果和动态再结晶与动态析出的研究情况以及焊接钢筋在地震载荷下的高应变疲劳性能也分别作了介绍。

对微钛处理技术在国内外的应用情况，报告中指出：化学成分和工艺条件对TiN粒子的大小、数量及高温稳定性影响很大，一般Ti含量应≤0.02%，Ti/N比要严格控制在≤3.4的范围内（C－Mn钢），当钢中加入V，Nb时，要相应提高N含量，另外Al含量应＜0.03%，S含量应＜0.01%。同时，最好采用喷粉工艺进行微钛合金化，采用连铸或小扁锭模铸。如果采用大钢锭模铸，除保证Ti，N含量最佳化外，还必须控制钢锭浇铸后的冷却速度。此项研究对今后我国微钛处理钢的生产将具有一定的指导意义。

2. 中碳钢的研究

含钒钛中碳非调质钢的研制是我国“六五”期间低合金钢研究的另一个突出的进展。研究者对40MnV(Ti)，42MnNbV，42MnMoV，45V，45MnV等非调质钢的性能和生产工艺的研究结果指出，中碳非调质钢在控制锻造的条件下，可以简化生产工艺，省去调质处理，节约能源，降低成本，具有很大的经济效益和社会效益，可以说从钢种研究的起步和目前的进展来看，我国与世界各国的步伐是较为接近的。

随着钢种研究的深入，还开展了中碳非调质钢的动态再结晶、高温变形再结晶、沉淀相的相分析、化学成分对性能的影响以及热锻工艺对变形抗力与组织的影响的研究。研究结果指出：两级冷速是非调质钢获得高强度的有效途径。在压缩变形时，控制形变温度、形变量及形变速率可以控制室温金相组织，从而控制钢的综合力学性能。钢中微量钛的加入不仅能起强化作用，而且还能诱发析出，提高沉淀相的稳定性。

在中碳钢的研究方面，还进行了三级锚链及其附件用钢、高强度精密冷拔管和高强度精轧螺纹钢筋等的研究。

3. 高强度可焊接工程结构钢的研究

15MnMoVNXt和15MnMoVN钢是新型的高强度可焊接工程结构用钢。同一

种成分在不同热处理条件下，可分别达到500，600和700MPa，并实现了强韧性的良好匹配。有的研究者指出，15MnMoVN钢中二次硬化主要是Mo_2C和V(CN)在500～600℃回火析出的结果，并提出了碳化物析出的模式。对15MnMoNXt钢的强韧性，微观组织和低温力学行为，钒钛化合物的溶解、析出以及复相处理对此钢强韧化影响的研究结果指出：15MnMoVNXt钢中钒在热轧状态时，有70%处于固溶状态，经两相区淬火并回火，则有60%的钒以细小的质点析出，并赋予钢以良好的性能。作者还给出了该钢种在解理断裂条件下，解理断裂应力与常规力学性能参量之间的回归关系：即$\sigma_f = 3.16(\sigma_{0.2} - 298)$，$\sigma_f = 26.75(KIC + 36.5)$ MPa。可见，解理断裂应力σ_f不仅取决于钢的韧化因素，还取决于钢的强化因素。不同的研究者还论述了15MnVR，15SiMnVTi钢的强韧性以及V，Ti，Nb等合金元素对低碳钢的组织和性能的影响。

（二）组织和性能的研究

1. 粒状贝氏体的研究

研究者对低碳合金钢中粒状贝氏体的转变机理和解理断裂特性研究的结果指出，粒状贝氏体是一种复相组织，其强度表达式为$\sigma = \sigma_1 f_1 + K\sigma_2 f_2$。式中$\sigma_1$为基体强度；$\sigma_2$为MA强度；$f_1$为基体体积分数；$f_2$为MA体积分数；K为系数。其精细结构对成分、等温温度、冷却速度等因素甚为敏感，全部形成粒状贝氏体的临界冷却速度为9～39℃/s。不同形态特征的粒状贝氏体组织中，控制解理断裂单元大小的组织结构参量是不同的，在块型粒状贝氏体中，解理断裂单元主要由铁素体晶粒直径控制，在条型粒状贝氏体中，解理断裂单元则主要取决于同位向束状组织单元的平均宽度。因此，从微观组织结构角度，提高材料的解理断裂抗力可以通过细化晶粒与组织和提高断裂比功以及控制夹杂物的数量等途径来达到。

2. 双相组织的研究

研究者采用“逐步淬火”工艺使S08VTiXt钢获得了良好的双相组织，扩大了该钢种的应用领域。同时还指出，钢中存在的V，Ti碳化物，提高了钢的抗奥氏体晶粒长大能力，有利于获得均匀、细小的铁素体组织及均匀的两相分布。稀土元素也有利于提高钢的抗奥氏体长大能力。

研究者以Cr-Mn-Si系为基本合金研究了热轧双相钢的组织和性能。通过微量硼和镓的加入，有利地改善了钢的性能。微量硼在钢中推迟了珠光体开始析出时间，微量镓则加快了先析铁素体的析出作用，二者对稳定卷取窗口温度区间的作用是相同的。微量硼镓的联合效应使卷取窗口温度区间由50℃扩大到100℃，相当于0.6%Mo的效应。我国攀枝花钒钛磁铁矿中除含有一定量的V，Ti外，还含有微量的镓，结合矿产资源的特点，从本研究出发，尽量发挥镓等残存元素的作用，将研制出我国独具特色的热轧双相钢。

3. V，Ti，Nb等微量元素对钢性能的影响及其分析方法的研究

关于分析方法问题，特邀报告中全面地介绍了“恒电流电解萃取法”，“定量相分析法”，能谱、能量损失谱以及原子探针等分析方法，还介绍了在Nb钢，V钢，Nb-V钢和Ti-V钢方面的试验结果。他们所研究的“非水电解液，恒电流浸蚀－萃取”新方法，使用的设备简单，分析精度较高，特别是对于小于100Å的微小颗粒，能保住析出物的原形，为定量的估算强化效应创造了条

件。

关于V，Ti，Nb等元素在钢中的作用问题，研究了微合金钢中第二相粒子的特征、析出行为和作用规律。结果指出，溶质在固溶体中的脱溶过程异常复杂，对于(NbV)NC的试验得出了四条动力学曲线：第一种为无变形条件下（温度高于850℃）析出量与颗粒尺寸的变化均处于缓慢过程，析出主要决定于基体中的过饱和度；第二种至第四种类型动力学曲线形式决定了颗粒的形核率和颗粒的粗化率，而它们又受变形温度和变形量的控制。对于V(NC)，变形使其粒子的尺寸分布发生变化，由不变形的正态分布变为对数正态分布；Nb(NC)在变形后的等温过程中，其析出尺寸则符合对数正态分布规律。有的作者指出，16Mn钢奥氏体变形过程中诱导析出的Ti(NC)和应变诱导相变时析出的Ti(NC)，通过对基体组织结构的影响，来改善钢的强韧性。有的研究者将V-Ti-N钢中含钛粒子分为三种类型。三种类型的粒子均含有一定数量的钒，钒钛复合是在冷却过程中进入V的析出温度后以VN沿TiN外延生长方式形成的。对Nb-V钢中相间沉淀引起的屈服强度增量与排间距、质点平均直径之间的关系，09MnTi钢中奥氏体晶粒的粗化行为，低碳Mn-Ti-Nb微合金钢中显微组织与力学性能之间的关系以及钒和钛的基本性质和作用机理也进行了研究。

（三）冶炼和加工工艺的研究

关于C-Mn钢，Mn-V钢和Nb钢的控制轧制问题，研究结果指出：C-Mn钢在喷钙脱硫净化钢质的基础上，把控轧和控冷恰当地结合起来可有效地提高钢的强韧性；Mn-V钢在总变形量一定的情况下，完成再结晶区适当形变量的轧制后，继续变形的温度越低，屈服强度则越高，低温韧性则越好；Nb钢的混晶问题，当铁素体不变形度≤2.0时，铁素体混晶对钢的屈服强度没有影响。

（四）焊接工艺的研究

低合金钢焊接工艺和焊后性能的研究与1983年首届钒钛钢学术会议相比有极其显著的提高，这次会议提出了十一篇论文，从研究内容、试验技术、工艺方法上都有了很大的进展，特别是碳、硫、氮、钒以及M－A组元对钢性能的影响，进行了较深入的研究。

研究报告中论述了15MnVN钢中碳、硫含量对熔合线韧性和氢致裂纹倾向的影响；钒氮比对焊接接头韧性的影响；15MnV钢焊接接头性能及用插销法评定碳量和钒氮比对冷裂纹敏感性的影响；15MnMoVNXt钢母材及焊接热影响区的组织性能，焊接接头的韧性和强度，以及焊接因素对粗晶区韧性的影响；M-A组元对焊接热影响区韧性及钒对高强度钢埋弧焊焊缝韧性的影响。还提出了《论焊接结构钢》的综合报告。

二、今后工作的几点意见

（一）关于“七五”期间低合金钢及钒钛钢的研究任务

根据国家计划，“七五”期间我国低合金钢的产量将增长到900～1000万吨，比1985年增加50%。在品种质量上，建筑用钢筋和高强钢丝仍将是低合金钢的使用领域，重点将研制φ7.0，1500～1600MPa的高强钢丝和800～1200MPa的中强钢丝。工程机械用钢、压力容器用钢、桥梁船舶用钢、输油管线用钢以及海洋结构用钢等

主要是提高质量，填平补齐，形成系列。微合金耐磨重轨，仓库、汽车用耐大气腐蚀钢也应予以重视。非调质钢和非轧冲压用双相钢应大力开展。对于低合金钢应围绕着上面几个问题，继续组织力量，集中搞几个不同强度级别的、成熟的、有生命力的钢种。特别是应该注意成分的合理性，工艺的可行性，用途的多样性和经济效益，社会效益的显著性。

在工艺研究方面，对于低合金钢的铁水预处理，转炉顶底复合吹炼，喷吹合金化，连续浇铸，半成品合金化等工艺技术亦应有所发展。

在钒钛钢研究方面，重点是开展钒钛铌等微合金元素在低合金钢中应用基础的研究。如通过钒钛微合金化降低低合金锰钢中锰含量的可行性研究；通过对现有钒钛单独合金化钢的研究，探讨降低一些钢中钒钛含量的可能性，确定最佳含量及相应的工艺；微钛在钢中的作用及最佳含钛量的研究；钒钛铌稀土在复合微合金钢中的相互作用及钒钛铌与氧、硫、磷、氮、氢的交互作用；稳定钒钛铌钢性能的生产工艺、焊接性能及新的加入铌的方法研究。在上述课题中研究的核心是，结合现行钒钛铌低合金钢的某些钢种，进行应用基础研究，弄清钒钛铌在钢中的作用规律，确定最佳含量及相应工艺，以求降低钒钛和锰的含量，节约金属，降低成本，并为今后微合金钢的发展提供理论依据。

（二）今后两年的学术活动

为了推动低合金钢和钒钛钢的发展，经低合金钢学术委员会和钒钛钢领导小组研究决定，将于一九八八年四季度召开低合金钢第二届和钒钛钢第四届学术会议。对于下次年会的论文我们要求代表们不仅提供一般性的技术研究报告，而且希望搞点综合性的经济分析文章。同时还准备召开非调质钢学术讨论会，微钛处理钢和含钛微合金钢的学术讨论，V，Ti，Nb微量元素在钢中的行为及其分析方法的专业学术讨论会。

在这两年期间还准备邀请美国联合碳化物公司的柯钦斯基，西德梯森公司的迈耶等专家来华进行钒钢和钛钢的讲学和学术交流。