·技术探讨·

关于攀钢发展合金钢轨几个问题的探讨

籍可镔

（攀钢科技处）

面临60kg/m和75kg/m钢轨大量投产，有必要同步考虑钢轨的合适钢种。过去曾用攀枝花矿研制过含有残余钒钛的碳素钢轨，但因强度和耐磨寿命的关系，致使攀钢移用中锰钢轨U71Mn，而这仍不是最佳方案。攀钢有条件挖掘自身生产合金钢轨的优势，采用新工艺研制具有资源特色的新钢种，应尽快安排新的含钒耐磨钢轨的研制，强度110kg/mm² 特级耐磨钢轨作为技术储备也可开展工作。

（一）问题的引出

在规划和设计攀枝花钢铁基地时，就规定攀钢以重轨为主要产品。为寻求具有攀枝花资源特色的合金钢轨，攀钢重轨的科研工作早在攀钢投产前就已开始。

第一阶段是为攀钢投产后生产重轨提供钢种及相应工艺[1]。这一阶段包括1965年至1973年在首钢、上钢和鞍钢，模拟攀枝花资源和采用攀枝花原矿所冶炼的生铁进行过七次试验；1973年在攀钢120t纯氧顶吹转炉上进行过第八次试验。八次重轨钢种试验概况如表1所列。其中第一次和第二次试验加入微量钒，仿P71普碳轨成分，结果强度尚可，而钢轨韧性不好，冲击值低。第三、四和五次试验，工艺条件掌握不当，出现钢轨断裂或表面质量不好现象；由于适当降碳增矽，钒、钛含量控制得当，使钢轨综合机械性能接近鞍钢AP_1（即现U71Mn）中锰轨水平。第六次试验再现了第五次试验结果。第七次试验是用攀钢生铁在上钢一厂经化铁炉配加矽铁熔化，在其30t氧气顶吹转炉上进行吹炼。所得钢轨性能与五、六次相仿，其中冲击韧性比历次试验都好，但疲劳极限低于AP_1钢轨。

第八次试验是用攀枝花资源的原料，在攀钢冶炼、开坯设备上进行的。化学成份沿用上次试验。需强调指出，六炉试验钢的实际化学成分中，矽、锰和钒的含量都和后来大批试生产的PD_1钢轨化学成份有所不同，矽是0.41～0.48%，锰是0.73～0.97%，钒是0.023～0.059%。碳含量皆控制在中上限，为0.65～0.72%。

当时认为残余钒钛轨以其与普碳轨P71相近的化学成份，达到了中锰轨AP_1的综合性能指标，是攀枝花资源的优越性所致。提出了PD_1钢轨化学成份，见表2。

第二阶段，从1975年攀钢试轧50kg/m钢轨成功到1982年按PD_1成份生产残余钒钛钢轨80余万吨。从1975年开始，到1978年10月，先后四次[2]进行生产试验

试生产前钢轨八次试验钢种主要化学成份及性能　　表 1

试验批次	主要几个化学元素，%					机械性能		
	C	Si	Mn	V	Ti	σ_b, kg/mm²	δ_5, %	室温冲击 ak kg-m/cm²
第一次	0.67～0.77 0.72	0.19—0.25 0.23	0.74—0.86 0.80	0.011—0.046 0.029	≤0.02	91.5—102.0 95.7	9.0—11.5 10.3	0.4—1.0 0.6
	0.67—0.76 0.72	0.18—0.26 0.22	0.80—0.89 0.83	0.059—0.159 0.102	〃	92.0—103.0 100.0	9.0—12.0 9.5	0.5—1.1 0.7
第二次	0.65—0.70 0.67	0.50—0.62 0.55	0.93—1.06 1.01	0.102—0.110 0.109	0.021—0.091 0.049	106.0—115.0 107.3	9.5—14.0 12.2	0.4—1.2 0.5
	0.61—0.70 0.66	0.78—0.90 0.83	0.90—1.06 0.88	0.132—0.195 0.168	0.047—0.057 0.052	107.0—117.0 111.8	5.0—14.5 9.8	0.4—0.7 0.5
第三次	0.67—0.70 0.68	0.24—0.25 0.24	0.78—0.90 0.86	0.013—0.35 0.024	<0.02	93.0—95.5 94.8	12.0—16.0 14.3	0.8—2.5 1.4
	0.59—0.77 0.68	0.21—0.26 0.25	0.71—0.90 0.84	0.056—0.072 0.062	〃	87.0—104.0 99.0	8.0—16.0 12.5	0.6—3.0 1.7
	0.65—0.70 0.68	0.80—1.00 0.84	0.76—0.86 0.82	0.063—0.093 0.077	〃	96.5—109.0 103.2	11.0—13.5 12.1	1.2—3.0 2.0
	0.65—0.72 0.69	0.80—0.99 0.91	0.78—0.92 0.84	0.020—0.033 0.023	〃	96.5～106.0 102.5	11.5—14.0 12.9	0.60—3.0 1.9
第四次	0.70—0.72 0.71	0.21—0.24 0.22	0.92—0.95 0.93	0.034—0.037 0.035	〃	98.0—101.0 99.3	11.5—13.0 12.0	0.8—1.5 1.0
	0.68—0.78 0.73	0.21—0.23 0.22	0.91—0.95 0.92	0.07—0.09 0.079	〃	100.5—111.5 104.8	8.0—11.5 10.6	0.5—1.5 0.9
	0.64—0.65 0.64	0.82—1.05 0.93	0.94—1.15 1.08	0.086—0.113 0.099	〃	110.5—114.0 112.5	10.0—10.5 10.3	0.8—1.1 0.9
第五次	0.60—0.70 0.64	0.37—0.55 0.45	0.78—0.94 0.89	0.039—0.050 0.044	〃	85.5—105.0 96.8	8.0—14.0 10.9	0.7—2.5 1.7
	0.67—0.74 0.71	0.23—0.28 0.24	0.88—0.98 0.93	0.030—0.050 0.041	〃	83.0—100.0 94.4	7.5—11.0 9.1	0.6—2.2 1.5
第六次	0.61—0.74 0.64	0.34—0.48 0.42	0.71—0.91 0.86	0.03—0.041 0.036	〃	89.5—104 96.7	8.5—13.0 10.5	0.6—3.3 1.25
第七次	0.60—0.72 0.64	0.36—0.47 0.41	0.75—0.94 0.84	≤0.01—0.03 0.02	〃	86.0—111.0 93.2	9.3—12.5 11.2	1.8—3.4 2.4
	0.59—0.67 0.63	0.91—1.06 0.99	0.77—0.88 0.82	0.015—0.03 0.025	〃	99.5—103.0 101.2	10.5—12.5 11.7	1.0—2.7 2.05
第八次	0.65—0.72 0.68	0.41—0.48 0.45	0.73—0.97 0.855	0.023—0.059 0.041	〃	94.5—103.5 98.6	8.5—11.0 9.8	0.5—1.9 1.0

PD_1钢化学成份 表2

元素	C	Si	Mn	P	S	V	Ti
%	0.62/0.77	0.15/0.37	0.70/1.10	≤0.040	≤0.050	0.10/0.06	≤0.02

机械性能数据统计，发现有13～14%的炉号抗拉强度σ_b达不到90kg/mm²的原设计指标。1979年5月开始，攀钢组织重轨质量攻关组，同年11月开始逐炉进行机械性能检验。1980年全年逐月钢轨的机械性能和化学成份对照关系表明，σ_b<90kg/mm²的炉数远远超过13～14%的比例。2月至4月σ_b不合格率达22～24%，5月达到33.33%，7月也是27.03%。从1980年8月1日起对PD_1重轨化学成份实行“内控,”并载入《攀钢重轨专用技术操作规程》，规定C≥0.68%，Mn≥0.80%。这样一来，8月开始，σ_b<90kg/mm²的比例大幅度下降，但仍然有5～10%的不合格。这一方面是因为攀钢用提钒后的半钢炼钢的比例越来越大，致使钢中残余钒含量越来越低；同时高炉冶炼钒钛磁铁矿操作也有变动。另一重要原因是，试生产的PD_1钢轨的化学成份中钒和矽含量都低于历次试验轨（σ_b≥90kg/mm²）时的实际含量。

鉴于上述情况以及氧气顶吹转炉冶炼高碳钢缩小化学成份实行“内控成份”的困难，加之，又要满足铁路上对耐磨性的要求，攀钢从1982年下半年起，移用AP_1（现称U71Mn，以下同）中锰轨进行生产至今。

钢轨生产在国际范围内已有100多年历史，而攀钢仅十年模拟试验，十年生产的历史。然而，国家运输事业发展急需更大型号（如60kg/m和75kg/m）钢轨，同时要求钢轨有良好的强韧性、耐剥离并且焊接性能优良。否则，就不能满足铁路运输大密度、大轴重、高速行驶的苛刻条件。U71Mn是含锰1.1～1.5%的中锰钢轨，紧急条件下移用，从国家全局和攀钢长远发展看，都不一定是适宜的钢轨钢种。

（二）关于攀钢生产合金钢轨的优势及其广阔前景

在攀钢生产重轨的条件与鞍钢、武钢、包钢的相应条件相比，具有两个突出的优势：一是资源条件，二是冶炼工艺条件。同时，笔者认为还将有更大的潜在优势，寓于攀钢采用连续铸锭、顶底复合吹炼、炉后精炼等新技术以及可能的工艺变革之中。

1.攀枝花资源优势

攀枝花钒钛磁铁矿除钒钛之外，还含有镍、钴、铜、铬、镓、钼、钨、硒、碲、铌、钽、硼等多种微量元素[3]。按攀钢现行工艺规程，铁水中含钒0.34%左右，钛在0.150%左右[4]。经氧气顶吹转炉吹炼之后，仍有许多有益元素赋存于钢轨钢中。1980年，重轨质量攻关组系统地分析了钢轨中包括微量元素在内的化学成份，列入表3。

如表3所示，钢中17种微量元素含量总和为0.1414～0.1616%，随着铁水和半钢的比例而波动。同时，攀钢炼钢中不采用外来废钢，钢中有害杂质元素甚少。

攀枝花资源中多种微量元素的固溶强化、弥散强化和细化强化作用相当明显[5]；就是对重轨而言，“当时攀钢生

表3　钢轨中化学成份及微量元素含量

炉号	炉号	铁水：半钢，%	钢轨中化学成份及微量元素含量，%																		微量元素合计%
			C	Si	Mn	P	S	As	Ti	V	Ni	Cr	Co	Cu	Pb	Zn	Br	Als	Ga	W	Mo	
1	8031826	78.26：21.74	0.75	0.24	0.93	0.020	0.034	0.0046	≤0.010	0.012	0.028	0.022	0.036	0.033	≤0.005	0.00025	≤0.0005	0.023	0.0053	≤0.0002	0.00055	0.1574
2	8012525	100：0	0.72	0.29	0.96	0.010	0.030	0.0028	〃	0.014	0.026	0.027	0.034	0.036	〃	0.00025	〃	〃	0.0054	〃	0.00043	0.1616
3	8012573	0：100	0.73	0.29	0.92	0.018	0.034	0.0028	〃	≤0.010	0.026	0.012	0.034	0.036	〃	0.00024	〃	〃	0.0041	〃	0.00062	0.1414
4	8022506	100：0	0.72	0.29	0.97	0.010	0.020	0.0034	〃	0.010	0.026	0.025	0.034	0.036	〃	0.00024	〃	〃	0.0041	〃	0.00065	0.1550
5	8032672	0：100	0.76	0.29	0.87	0.015	0.033	0.0027	〃	≤0.010	0.026	0.012	0.034	0.038	〃	0.00022	〃	〃	0.0049	〃	0.00068	0.1442
6	8022550	100：0	0.78	0.34	1.04	0.030	0.035	0.0020	〃	0.012	0.028	0.026	0.035	0.034	〃	0.00022	〃	0.026	0.0048	〃	0.00052	0.1582
7	8022547	15.38：84.62	0.69	0.27	0.87	0.014	0.032	0.0037	〃	≤0.010	0.027	0.016	0.034	0.035	〃	0.00023	〃	0.022	0.0040	〃	0.00068	0.1463

产的PD_1重轨就其化学成份而言接近鞍钢生产的普碳轨P71，抗张强度却超过了P71，与鞍钢的中锰轨AP_1处于同一水平，而屈服强度$\sigma_{0.2}$则比AP_1高11.8 kg/mm²。试验轨线路考察结果认为，钒钛重轨耐磨性与AP_1相近，但无明显的低节头和"鞍形磨耗"〔1、5〕。近年来，虽然由于攀钢冶炼重轨用原料条件及工艺操作制度有所变化，钢中残余的钒数量已不足以发生明显的强化效应，但资源优势依然存在。为了系统研究包括钒钛在内的微量元素在钢中作用与机制，以及氢在钢轨中的行为，攀钢已同北京钢铁学院、科学院金属研究所签订相应科研协议，工作已有不同程度进展。已经查明，攀钢钢轨珠光体组织的片层间距及珠光体团面积较兄弟公司钢轨的细，而这是决定钢轨性能的关键所在。详细结果有待科研成果的正式发表。

2.攀钢氧气顶吹转炉冶炼重轨钢质量优良

攀钢120t大型氧气顶吹转炉钢的大量试验研究和生产实践证明，转炉重轨钢质量是好的，它比平炉重轨钢更有突出的特色。在攀钢的工艺条件下，脱碳速度一般为每分钟0.2～0.4%，最大可达0.5%/min左右。这样高的脱碳速度能在熔池中迅速生成大量的CO气体，使熔池既有强烈的搅拌，又处于正压的状态，从而阻止了熔池吸收氢、氮等气体，同时也有利于排出钢液中的气体和夹杂物。

攀钢自1975年试生产钢轨以来，大约有一万炉重轨钢，无论初轧坯切取热酸浸蚀样，还是轨梁厂热锯取样，从未发现过白点。攀钢钢研所和金属所一起，测定钢中氢含量表明，钢液炉前终点样氢含量最高3.92，最低1.57，平均2.60cm³/100g；锭模最高氢含量3.88，最低1.89，平均2.74

$cm^3/100g$。经二次加热工艺轧后的钢轨，氢含量累计频率分布在1.0～2.7，平均1.45$cm^3/100g$。

吹炼终点氢含量为0.0008～0.0013%，氧含量为0.0013～0.0086%，夹杂总量为0.005～0.051%。

据查，鞍钢生产的普碳轨热锯白点率为15%左右，AP_1重轨的热锯白点率为45%左右[6]，武钢白点率占29.0%[7]。攀钢钢轨的这一特点，对于发展合金钢轨是十分有利的。

攀钢钢轨内部夹杂含量曾一度较高。一年来由于采取挡渣出钢等措施，钢轨在线超声波探伤报警率已由1.5～2.0%下降到0.7%以下。预计，经过积极改进炉后浇铸工作及所用耐火材料质量，转炉重轨钢质量将更加优良。

3.攀钢有可能取消钢轨缓冷坑缓冷，从而实现钢轨轧后余热淬火

攀钢不仅由于工艺特点，使钢中氢含量低于国际公认的使钢轨产生白点的3 ppm以下，而且，从1980年起已全面采用钢轨在线超声波探伤新技术，保证将标准规定的缺陷钢轨排出，确保产品内部质量。铁道部同意之下进行的1200 t不缓冷钢轨经超声波探伤出厂，已在线路铺设4年以上，情况令人放心。有待对钢轨不经缓冷的残余应力值、断裂韧性值及其它有关力学性能做出肯定结论，查清氢在钢—钢坯—钢轨的赋存状态，测出攀钢钢轨临界氢含量值及孕育期后，则可做出取消缓冷工艺的变革，并进而开展钢轨轧后余热淬火试验。

4.攀枝花矿藏钒资源开发技术日臻成熟并向纵深阶段发展

攀钢独创并试验成功的雾化法提钒工艺已保证每年能产钒渣6～8万吨，“七五”计划期间每年生产数量更为可观。目前正积极进行钒渣直接合金化新工艺。不再需要生产铁合金这一工序。现在生产铁合金—钒铁，是将钒渣运往铁合金厂，经化学处理得到V_2O_5，再炼成价值昂贵的钒铁，确是长途往返，工艺繁复，能耗增加，成本高昂。这就谈不到发挥攀枝花钒资源优势。

采用直接合金化新工艺，含钒钢轨的生产面貌必将为之一新。

1982年起，和北京钢铁学院合作开展了本课题研究。1983年4月起在攀钢120t氧气转炉上进行了工业试验，共炼钢600多吨。低碳钢种，钒的平均回收率尚能达到70%以上。经测定，合金化时对钢水温度影响不大。从几批试验看[8]，化学成份控制不甚困难；轧出的钢材中夹杂物状况和机械性能均符合标准。当然要注意，钒渣直接用于合金化工艺所涉及的理论问题和实际操作工艺较为复杂，例如钒回收率是否稳定，大量加入钒渣混合物会不会污染钢质，该工艺对生产重轨钢的适应性等等，都需要进一步深入研究。

5.攀钢成功地从西德引进的锯钻联合机床及采用轨端矫直机，能保证钢轨获得较高的尺寸精度。

6.炼钢厂将引进一系列先进技术或先进设备，如LBE顶底复合吹炼、连续铸锭，使接近平衡状态下的钢质更纯，钢的偏析更小，成分更均匀，消除钢中大型夹杂物；如实行铁水预处理脱硫，炉后精炼（包括真空处理），必将使钢轨钢质纯度发生数量级上的变化，得到高纯度的钢轨。

（三）动态和建议

自1875年世界上第一条钢轨在英国铺设算起，钢轨化学成份除碳含量一再有所提高外（也非所有国家），基本上没有很大变化。只是各国对提高强度采用不同措

施，美、苏、日、加拿大等国采用高含碳量的办法，西欧，尤其是西德，却采用提高锰的办法。随着工业发展，铁路运输的频繁，客货运量俱增，弯道增多，对焊接长轨要求日益迫切，老的碳锰轨寿命愈来愈短，已不能适应新的要求。因此，苏、美、日、西欧、澳大利亚等工业发达国家，分别根据自己的国情、资源以及对国际市场（包括能源）的预测，制定了相应的钢轨材质科研和生产的技术路线。他们分别在研制新材质的热处理轨和合金钢轨。同时，都在充分地采用先进的冶炼和压力加工工艺技术。轨型也从三十年代的 35～38kg/m 逐步加大到60kg/m和75kg/m，目前世界最重的钢轨是美国生产的 77kg/m 钢轨。

当前世界铁路总长已有140多万公里，可绕地球35圈以上。我国于1876年开始兴建铁路，但至今只有 56000 公里，年货运量已超过10.5亿吨[9]。

美国近年来除在原有碳锰钢基础上，通过热处理以挖掘材料潜力外，还大力发展了高矽、铬—矽、铬—钒和铬—钼型合金轨，力图建立全珠光体组织；加入合金元素降低珠光体转变温度，使其片层间距减小；再辅以析出强化，如V_4C_3或VC析出，得到高强度和耐磨性。一般碳轨钢珠光体转变温度约 750℃ 左右，而合金钢轨约600～650℃左右；美国目前大量使用的 65kg/m Cr—Mo轨的珠光体片层间距约为1000 Å，原来碳轨是3000 Å。铺在澳大利亚矿石运输线上，寿命提高1.5～2倍。

苏联研究了含砷钢轨和含铬钢轨。铬—砷(0.67～0.82% Cr,0.07～0.13% As)轨已大量铺设。

西欧更是大力发展以铬—钒为成熟牌号的合金轨。

日本和美、苏一样，其主要工作都是以在原有碳锰轨基础上，生产热处理钢轨为主，也仿制些合金钢轨。美、苏、日等国近年来发展低合金钢轨的事实，正表明采用合金化路线有一定的优越性。两种方法的取舍，还应进行技术经济全面衡量，通过实践而定[10]。

为此，提出下述建议供探讨。

1.稳定并提高现生产的 U71Mn 中锰轨质量。当前十分重要的是在钢质高纯度、钢轨断面尺寸高精度和最终成品高性能上下功夫。目前在炼钢上采用了挡渣工艺；吹氩应进一步完善操作，下吹可能比现行上吹为佳；研究合适的脱氧制度，降低或取消铝脱氧；改进钢锭模设计，采用新型发热剂和保护渣，等等。总之，在工艺上狠下力量是必须的。

2.为满足铁道部对大弯道线路用钢轨的急需，除进行双频全长淬火钢轨攻关外，应大批量试生产U70MnSi高矽钢轨。同时考虑加入微量钒，以进一步提高高矽轨综合性能。

3.做为重点，研制并生产含钒的耐磨合金钢轨代替中锰轨生产。这种钢轨不仅 $\sigma_b \geqslant 90kg/mm^2$，$\delta_5 \geqslant 10\%$，而且其综合力学性能和使用性能将优于现有同级强度的钢轨。

（1）提高碳的含量。美国标准和国际标准化组织（ISO）规定的碳含量都比较高，含碳0.80～0.82%已非个别，有的甚至高达0.95%[9]。欧洲大陆也有提碳降锰趋势，碳从0.75%提高到0.80%。由于含钒，钢轨韧性仍然会得到保证。锰量高对钢轨淬火有不利影响，火车进站刹车区段已产生大量淬火裂纹和擦伤缺陷。相反，含碳达0.80%钢轨，双频全长淬火后组织好，在线路铺设后得到广州局和考察人员一致肯定，其耐剥离掉块性能是最理想的。有人担心这样钢轨δ_5下降，其实攀钢钢轨δ_5值有富裕。苏联标准规定

$\delta_5 \geqslant 4\%$。

（2）采用钒渣直接合金化工艺，钢轨成本不致大幅度提高，综合经济效益好[11]。

（3）可试用钒渣、矽钙粉或少量铝粉，混合后压块成型进行复合脱氧。这种办法可代替苏联钢轨钢生产普遍采用的矽钙钒复合脱氧剂[12]，而降低了钢轨中大型夹杂物危害，使高质量钢轨Ⅰ组氧化物夹杂在长度方向上延伸不大于2mm，一般质量钢轨Ⅱ组氧化物夹杂在长度方向上延伸不大于8mm，提高钢轨抗接触疲劳性能，钢轨寿命可提高30～35%。钢中增加微量钒之后，目前线路上严重的钢轨剥离缺陷将会明显有所减轻。

（4）含钒耐磨钢轨将有较好的焊接性能[13]。

（5）含钒耐磨钢轨的屈强比将有所提高。

（6）全长淬火钢轨生产以中锰轨为原料轨进行双频淬火，成本较高，工艺控制难度很大，而含钒耐磨钢轨较为适宜。

（7）大量生产中锰轨需要大量锰铁，既消耗电能又要长途运输，何况国家目前锰矿尚需进口。

4.做为技术储备，试制特级耐磨钢轨，即 $\sigma_b \geqslant 110kg/mm^2$、$\delta_5 \geqslant 10\%$、$a_{K-40} \geqslant 1kg-m/cm^2$，断裂韧性值适宜，焊接性能好。1979年在攀钢钢研所的容量150kg中频炉上，进行了三轮计27炉筛选成份的试验，有可喜苗头。

参考文献

〔1〕攀枝花钢铁公司、东北工学院、攀枝花钢铁研究院，镇静钢试验总结，1973.

〔2〕攀钢钢研所，攀钢重轨研制状况（内部资料），1979，5.

〔3〕峨眉矿产综合利用研究所、攀枝花钢铁公司、攀枝花矿山公司，攀枝花铁矿中有益元素及其在生产过程中的分布和赋存状态的研究（内部资料），1974，12.

〔4〕攀钢炼铁厂1982年生产统计资料.

〔5〕攀钢钢研所，关于攀钢钢种的特点和今后发展钢种系列的初步意见（内部资料），1977，12.

〔6〕鞍钢钢研所，AP_1钢轨试验研究总结（内部资料），1977.

〔7〕武汉钢铁公司，普通碳素含铜钢轨钢（WP_1）的试制和生产（内部资料），1976.

〔8〕攀枝花钢铁公司、北京钢铁学院联合试验组，钒渣直接合金化第一阶段试验总结（内部资料），1983，8.

〔9〕冶金标准化，1981年第二期.

〔10〕刘嘉禾，国外重轨钢的发展（内部资料），1983，10.

〔11〕О Возможность рафинирования и легирозания стали ванадийсодержащими шлаковыми писмесям ицзв.выс.уче.заве.чёрная металлургия，10（1976），46—49.

〔12〕ГОСТ 24182—80《P75和P50型平炉钢宽轨铁路钢轨技术条件》，1980.

〔13〕沈阳铁路局工务处、沈阳线路大修段，攀钢$PD_1$60kg/m钢轨焊接试验报告（内部资料），1982，12.