# 我国钢轨强化的技术途径

张祖光　王　封

（攀枝花钢铁研究院）

## （一）国内外有关钢轨强化的情况

目前世界各国强化钢轨的途径有三种，即重型化、合金化和热处理强化。应当指出，无论通过哪种途径，提高钢的纯净度，改善和控制轧制工艺，完善矫直方法以及改进轨型等对提高钢轨性能都是极为重要的。

1.钢轨重型化

随着铁路运输量的增加，轴重加大，速度加快，国外有明显加大钢轨断面、增加钢轨每米单重的趋势。

目前苏联每年平均货运密度已达到3600万吨公里/公里，1亿吨公里/公里的有5000公里，个别线路甚至达到1.5～1.7亿吨公里／公里。机车轴重由23吨增至25—27吨。澳大利亚运矿专线的货运密度为5500万吨公里／公里。美国铁路的平均货运密度比苏联低75—80%，但机车轴重已达27—28吨，有些地方高达30～35吨。苏联客运速度为120—160公里／小时，并以200公里/小时作运营试验，日本某些干线货运速度已达250—300公里／小时。

美国在1947年生产了76.9kg/m钢轨，这是世界上最大型的钢轨。到1974年铺设的钢轨已有66.13%采用大于65kg/m轨（见表1）。苏联1970年制定了P75型钢轨标准，1972年开始生产使用，至1975年P65、P75的使用比重已增至37.2%。

美国近几年全国铺轨重量比例变化　表1

| 钢轨重 kg/m | 1970年 | 1973年 | 1974年 |
|---|---|---|---|
| >65 | 21% | 25.7% | 66.13% |
| 50—65 | 44% | 41.3% | 31.57% |
| <50 | 35% | 33.0% | 2.3 % |

使用大断面钢轨可以收到明显经济效益。苏联铁道部门认为，65kg/m较50kg/m重量增加30%，但使用期限内通过吨位却增加80%，以P75代替P50钢轨，钢轨单根更换率可降低50～66%。P65、P75钢轨消耗量可比P50分别减少13%和19%。法国认为60kg/m轨，由于疲劳破坏造成钢轨更换率只有50kg/m钢轨的六分之一。美国铁路工程协会指出，用56kg/m钢轨更换56kg/m轨时，养护维修一英里线路可节约资金16.8%[1]。

我国60kg/m钢轨已生产了6万吨并投入使用，货运量可提高70%。尚未见到详细经济指标。目前，正在试制75kg/m钢轨。

采用重型钢轨可以收到好的经济效果，其根本原因是提高了钢轨的刚度。60kg/m轨与50kg/m轨比较，水平刚度和垂直刚度分别提高57.9%和39%左右，从而提高了线路的稳定性，减轻了道床的应力，并减少了钢轨残余变形的积累。

综上所述，尽管钢轨重型化有许多优

点，但也并非十全十美。例如钢轨的损伤从轨底和轨腰移向头部，P50、P65和P75轨头损伤相应占各种损伤而更换钢轨总数的75%、80%和94%〔1〕。这主要是由于高接触应力和低的屈服极限造成的。为此必须相应考虑钢轨合金化和热处理强化的技术措施。

2.钢轨的合金化

钢轨合金化是钢轨强化的另一条重要途径。当前，碳素钢轨已经远不能满足铁路运输的要求。例如轨头严重塑性变形和磨损，钢轨踏面下剪切应力疲劳所造成的剥离和纵横裂纹以及波浪磨耗等。国内外研究结果表明，钢轨的上述各种破损，均与钢轨本身的强度密切相关。提高强度，既提高了钢轨的耐磨能力，又提高了轨头受力侧面的抗裂强度及抗塑性压馈的能力。对钢轨的金相组织与耐磨、抗剥离等性能关系的研究表明，以全部细片状珠光体组织为最佳。因此，为适应铁路运输的发展，研究和生产全细珠光体组织的抗张强度大于90kg/mm² 的耐磨钢轨和抗张强度大于110kg/mm²的特级耐磨钢轨就势在必行了。

近30年来，国外合金化钢轨发展很快，其中以西德为代表的西欧各国最为突出。西德从1950年开始试制耐磨合金钢轨，到1970年合金钢轨在线路铺设量已超过50%。

在研究钢轨合金化中，首先考虑的是充分发挥碳的强化作用。国外总的趋势是不断提高钢轨中的C含量。日本五十年代以后已将钢轨中C含量提高到0.60～0.75%，美国、加拿大和苏联已将含C量上限提高到0.80～0.82%。在提高C量的同时，又考虑添加廉价的合金元素Si、Mn等，通过固溶强化来提高钢轨的强度。通过上述措施，钢轨的$\sigma_b$可大于90kg/mm²。但即使这种强度级别的钢轨，在重载线路和弯道上也容易出现严重的磨损和轨头压馈。为进一步提高钢轨强度，仅仅依靠Si、Mn就难以实现了，必须加入另外一些合金元素，如Cr、Mo、V、Ti、Nb、Al等，通过固溶强化、沉淀强化和细晶强化使钢轨的强度得到进一步提高。近年来，国外已研制出一系列强度大于110kg/mm²，韧塑性更好的特别耐磨钢轨（见表2）〔5〕〔6〕。

由表2可见，根据资源和来源的不同，各国在发展合金钢轨中所选用的合金元素不尽一致。西德克虏伯钢铁公司生产含Cr0.7～1.2%的合金钢轨，抗张强度110kg/mm²，线路使用表明，耐磨性能比UIC的A类耐磨钢轨提高一倍。英国钢铁公司生产的Cr V钢轨，屈服强度65kg/mm²，抗张强度117kg/mm²。钢轨在弯曲度为10度，最大负荷为30吨的“桑塔奇”线路（这条线路年运输量超过4千万吨）上使用，其寿命超过C—Mn轨数倍〔2〕。西德奥格斯特蒂森公司生产的Cr—V钢轨，在一些国家铺轨试验，直道上比UIC标准碳轨提高寿命一倍，在小弯道上则可提高2.75倍〔2〕〔3〕。

西德克勒克纳公司和澳大利亚布罗希尔公司以及日本等发展了Cr—Mo—V钢轨，它是在Cr—V轨成分基础上添加0.1—0.2%Mo，抗张强度达120kg/mm²以上。但Mo提高钢的淬透性，因此要控制轧后的冷却，以避免在冷却速度较大的轨腰或轨底边部产生贝氏体或马氏体〔7〕。美国对Cr—Mo—V合金钢轨进行了快速焊接试验，指出，焊接时无需采取特殊的措施，可生成100%细珠光体〔2〕。

西德蒂森公司生产的Cr—Si—V合金轨（抗张强度115kg/mm²）在最大负荷条

## 各国合金钢轧发展情况

表 2

| 制造厂 | 钢系 | 化学成份，% | | | | | | | 机械性能 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | C | Si | Mn | Cr | Mo | V | 其他 | $\sigma_b$, kg/mm² | $\sigma$, % | HB |
| 日本 | 低C Cr—V | 0.33 | 0.33 | 1.20 | 1.17 | 0.02 | 0.07(加入) | Al 0.02 | 110 | 17 | 320 |
| 日本 | 中C Cr—V | 0.54 | 0.37 | 1.43 | 1.01 | | 0.05(加入) | Al 0.021 | 103 | 18 | 290 |
| 日本 | 中C Cr-Mo-V | 0.69/0.77 | 0.14/0.87 | 0.87/1.32 | 0.82/0.85 | ≤0.18 | 0.07/0.12 | Al 0.018—0.037 | 108—124 | 12.2—17.5 | 295—351 |
| 英国钢铁公司 | Cr—V | 0.72 | 0.22 | 1.27 | 1.04 | | 0.087 | | 118 | 9 | 340—360 |
| 西德克虏伯钢厂 | Cr—Si | 0.70 | 0.75 | 1.05 | 1.00 | | | | 115 | 12 | 315 |
| 西德克勒克纳公司 | Cr—Mo—V | 0.65 | 0.30 | 0.80 | 1.00 | 0.10 | 0.10 | | 115 | 12 | 325 |
| 西德奥格斯特蒂森 | Cr—Si—V | 0.65 | 0.60 | 1.05 | 1.15 | | 0.20 | | 115 | 12 | 320 |
| 卢森堡 | Cr—Cu—V | 0.42 | 0.54 | 1.49 | 0.75 | | 0.18 | Ni 0.20 Cu 0.37 | 109 | 13.1 | 345 |
| 加拿大悉尼钢公司 | Mn—Cr—V | 0.70 | 0.20 | 1.65 | 0.60 | | 0.10 | | 115 | 10 | 315 |
| 澳大利亚布罗希尔公司 | Cr—Mo—V | 0.70 | 0.20 | 0.95 | 0.80 | 0.20 | 0.05 | | 130 | 13 | 410 |
| 美国克利马克斯钢厂 | Cr—Mo | 0.75 | 0.20 | 0.90 | 0.80 | 0.20 | | | 120 | 13 | 350 |
| 法国萨西洛尔钢厂 | Cr—Si | 0.70 | 0.90 | 0.75 | 0.80 | | | | 110 | 9 | |

件下，使用寿命是UIC A类耐磨钢轨的2.5倍。卢森堡生产的Cr—Cu—V钢轨在比利时铁路系统上使用两年后效果明显。在联接点处高碳钢轨因金属疲劳而断裂，一般碳钢轨使用12个月后就需更换，而Cr—Cu—V合金轨使用两年后情况仍然良好〔2〕。

综上所述，国外发展特级耐磨钢轨，Cr是不可缺少的合金元素，并且大多数钢号含有V。Cr是固溶强化元素，它的加入降低了珠光体转变温度，从而减少了珠光体片层间距，形成微细珠光体组织，提高了强度（每加入1%Cr，能提高屈服强度11kg/mm²，抗张强度12.5kg/mm²）。V的加入则进一步降低转变温度，加之钒碳化物的析出强化，钢的强度进一步提高。此外，Cr还显著改善钢轨的耐大气腐蚀能力，V能有效地提高屈强比，还能改变硅酸盐非金属夹杂物的性质和成分，减少硅酸盐夹杂的数量。在钒铁消耗为1kg/t钢的情况下，非金属夹杂物减少1/4～1/3，从而改善了钢的质量和性能〔2〕。

我国鞍钢从1966年以来全部生产强度大于90kg/mm²的中锰耐磨钢轨（U71Mn）。在大弯道上使用寿命提高一倍。中锰轨具有良好的韧性和焊接性能且价格低廉。鞍钢还曾生产少量高硅钢轨（Si0.85—1.15%，Mn0.85—1.15%），在小弯道上试用，耐磨性比中锰轨还好，比碳素钢轨提高两倍以上。武钢曾试制含硅含铜低合金钢轨（Si0.7—1.10%，Mn0.8—1.20%，Cu0.1—0.4%），其抗张强度较碳素钢轨高5kg/mm²，耐大气腐蚀性能提高50%左右〔3〕。

3.热处理强化

钢轨的热处理强化，是使普碳钢轨获得优良综合性能最经济、最方便、最有效的方法之一。

苏联是世界上首先大量进行钢轨热处理的国家。下塔吉尔钢厂拥有每年75万吨钢轨油中整体淬火的能力，亚速钢厂也拥有每年处理75万吨钢轨高频加热全长淬火的能力。日本八幡钢铁厂，美国伯利恒钢厂都拥有很大的钢轨热处理生产能力。苏联现在约有80%的P75和P65钢轨都进行全长淬火热处理〔5〕。

全长淬火轨不论采取何种淬火方式，国内外得到的性能是相近的，其抗张强度大于110kg/mm²，屈服强度在80kg/mm²以上。全长淬火钢轨不仅提高了耐磨性，而且显著提高了耐剥离性能。

美国全长热处理钢轨（64.5kg/m），使用半径291m，通过总重量3.256亿吨，仅发现3.6%有剥离，总寿命为普碳轨的五倍。在半径为563m的弯道上使用5年，通过量1.25亿吨，仅发现一根有剥离。据苏联报导，整体油淬火钢轨的接触疲劳强度为不淬火钢轨的1.5—2倍，耐磨性能提高2倍，使用寿命则提高1.5倍以上。线路使用表明，每年每公里可节约资金800—1000卢布。日本的试验也表明，中频加热全长淬火的耐磨性是碳素钢轨的三倍多。

如前所述，钢轨轨头的金相组织对其使用性能有决定性的影响，具有微细珠光体组织的钢轨有着最佳的耐磨性和抗疲劳剥离性能。因此，目前苏联、日本和美国都趋向于采用软介质的欠速淬火热处理工艺。日本资料指出，为在轨头踏面下一定深度获得高硬度的微细珠光体组织，必须确保该处有900℃以上的加热温度和3°—10°C/s的冷却速度〔4〕。

我国包钢和攀钢先后建立了全长淬火生产线，攀钢并生产了数以万吨计的淬火钢轨提供铁道部使用。事实证明这类钢轨

耐磨性能良好。但使用中出现明显的不耐剥离，这可能与钢质不纯、组织不均等有关，有待进一步研究提高。

**二、我们的意见**

在评价或选用强化途径时所遵循的原则必须符合我国国情。应根据我国钢轨主要损伤形式，归纳出线路使用方面和金属学方面的原因，从而判断采取强化的原则。

1.使用70kg/m以上重型钢轨，钢消耗量将增加50%以上。为了节约用钢，建议大于70kg/m的重型钢轨只用于货运密度大于5000万吨公里／公里的特别繁忙线路上；60kg/m钢轨用于2500～5000万吨公里/公里的干线上；50kg/m钢轨则用于1000～2500万吨公里／公里的次要线路。

2.发展低合金钢轨或微合金化钢轨是我国钢轨发展的重要技术途径。这不仅能解决目前钢轨出现严重损伤的问题，也能解决我国钢产量少与铁路运输高速发展之间的矛盾。基于我国有着丰富的合金资源，如V、Ti、稀土等，并且已积累了一定研究和生产低合金钢轨的经验，这为进一步研制具有高强度、高屈强比、耐磨耐腐蚀和好的可焊性钢轨钢创造了有利的条件。

在添加合金元素时，除V、Ti、稀土外，Cr是必须添加元素。因此建议应以Cr—V，Si—Cr—V或Cr—Mo—V系为基础考虑我国钢轨合金化的方向。

3.合金钢轨强化的核心应该是在提高综合性能的同时，特别强调提高屈强比。随着钢轨断面尺寸加大，钢轨腰部与底部的应力大为降低，钢轨缺陷移向头部。国内外实践已经证明，钢轨过低的屈服强度是造成一系列损伤的关键。目前国内钢轨钢的屈强比为0.6左右，经过立矫还将降低5～10%。如果能把屈强比提高到国外0.7～0.8的水平，将大大改善钢轨质量。

4.钢轨波浪磨耗与钢轨强化的关系

钢轨波浪形磨耗（corrugation）是国内外钢轨出现的一种使人忧虑的严重病害。石太、京广、陇海、沪杭、广深、丰沙等线均有发现并以惊人速度发展。

波磨产生的机理，至今尚无定论。研究工作在我国还是空白。我国波磨轨出现的波长为300～500mm，国外出现的则是以25～50mm为主的所谓波纹钢轨。国外流行的轮轨振动学说和超声效应学说均无法解释波长为300～2000mm的波浪轨的形成。因此，许多研究者又把着眼点移向改善钢轨的材质和减少残余应力。美国在环形线上进行了FAST试验。在不同线路参数下，比较了普通轨、轨头淬火轨、整体淬火轨和五种合金钢轨，在通过1.87亿吨运量后钢轨上出现波磨的生长速率和机率（表3）〔8〕。试验结果表明：

（1）在所有情况下，Si—Cr钢轨具有最低的波磨生长速率，而普碳钢轨抗波磨能力最低；

（2）在一般轴重下，钢轨很少或不产生波磨的最低屈服强度为68.3kg/mm$^2$，对于100吨货车则为80.5kg/mm$^2$。

根另文报导，在66kg/m钢轨上同样发现波磨。因此，从防止波磨角度出发，必须采用合金钢轨或热处理钢轨。

5.普碳钢轨的热处理强化应加强研究，并应着手研究低合金钢轨的热处理强化问题。在强化手段上，不应局限于全长表面淬火，而应考虑多种方法，以便尽快提高我国热处理钢轨水平。

不同钢轨出现波磨的几率和生长速率*　　表 3

| 钢轨类别 | 润滑状态 | 波磨生长速率与出现的百分数 | | | | 硬度 | 化学成份，% | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 坡度0.1～0.9%木枕 | | 坡度2%　水泥枕 | | | | | | | | |
| | | 生长速率 $10^{-3}$ in/MGT | 出现百分数 %/MGT | 生长速率 $10^{-3}$ in/MGT | 出现百分数 %/MGT | HB | C | Si | Mn | Cr | Mo | V |
| 标准碳钢 | 润　滑 | 0.1536 | 0.0812 | | | 324 | 0.76 | 0.18 | 0.86 | | | |
| | 不润滑 | 0.3482 | 0.7492 | | | | | | | | | |
| Cr—Mo (C级) | 润　滑 | 0.0320 | 0.1501 | | | 344 | 0.79 | 0.26 | 0.60 | 0.61 | 0.17 | |
| | 不润滑 | 0.3095 | 0.3253 | | | | | | | | | |
| 表面淬火 | 润　滑 | 0.0672 | 0.0929 | −0.0037 | 0.0929 | 355 | 0.77 | 0.17 | 0.83 | | | |
| | 不润滑 | 0.2998 | 0.2079 | 0.2998 | 0.2079 | | | | | | | |
| Cr—Mo (A级) | 润　滑 | 0.0800 | 0.0947 | | | 383 | 0.72 | 0.25 | 0.79 | 0.78 | 0.21 | |
| | 不润滑 | 0.2584 | 0.2626 | | | | | | | | | |
| 整体淬火 | 润　滑 | −0.0104 | 0.1272 | | | 366 | 0.81 | 0.17 | 0.93 | | | |
| | 不润滑 | 0.4015 | 0.2153 | | | | | | | | | |
| Si—Cr | 润　滑 | 0.0489 | 0.0970 | 0.0489 | 0.0358 | 391 | 0.76 | 0.82 | 0.82 | 0.50 | | |
| | 不润滑 | 0.1987 | 0.0950 | 0.1987 | 0.2644 | | | | | | | |
| 1% Cr | 润　滑 | 0.0817 | 0.0987 | 0.0817 | 0.0987 | 348 | 0.73 | 0.27 | 0.97 | 1.12 | | |
| | 不润滑 | 0.2309 | 0.3079 | 0.2309 | 0.3079 | | | | | | | |
| Cr—V | 润　滑 | | | 0.1284 | 0.1825 | 372 | 0.69 | 0.28 | 1.21 | | | |
| | 不润滑 | | | 0.1808 | 0.4486 | | | | | | | |

* 通过运量1.87亿吨后。

## 参 考 文 献


〔1〕B.Г.阿尔勃列赫特等，铁路轨道现代化结构，人民铁道出版社，1978，10.

〔2〕Vanadium in Rail Steels Proceeding of Seminar Held in Chicago, Nov.1979.

〔3〕刘嘉禾，国内外低合金钢情况及对今后发展的意见，1983.

〔4〕田村庸一，钢轨热处理方法的研制，日本钢管技报，80（1979）.

〔5〕陈桂芝，钢轨技术最近动态，国外钢铁，12（1979）.

〔6〕攀研院，钒钛钢的科研、生产与应用，1982，8.

〔7〕澳大利亚宝勒山有限公司（BHP）工业技术代表团来华座谈交流资料，重载线路高强度合金钢轨的发展，1979.

〔8〕Daniels, L.E., Blume, N., Rail Corrugation Growth Performance, the Second International Heavy Haul Railway Conference, Colorado, U.S.A., 1982, 9.