重轨钢大方坯连铸动态轻压下技术研究

陈 永[1,2], 袁宏伟[3], 杨素波[3], 陈绿英[3]

(1.东北大学材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110004; 2.攀枝花钢铁研究院, 四川 攀枝花 617000; 3.攀钢提钒炼钢厂, 四川 攀枝花 617062)

摘 要: 针对攀钢大方坯连铸机投产初期引进的轻压下装备技术冶金效果不明显、重轨钢铸坯中心疏松、中心偏析等内部缺陷较严重的问题, 开展了优化重轨钢连铸轻压下工艺的现场试验, 对比研究了轻压下工艺对重轨钢铸坯中心疏松、中心偏析等内部质量的影响, 建立了适应重轨钢要求的动态轻压下工艺技术。生产实践表明, 重轨钢铸坯内部质量明显提高, 铸坯中心疏松评级≤1.0 级的比例由 28.41% 增至 99.91%, 中心偏析评级≤1.0 级的比例由 40.91% 增至 100%, 中心缩孔≤1.0 级的比例由 92.05% 增至 100%, 铸坯中心碳偏析指数由 1.17 降至 1.05, 连铸坯轧制的重轨的内部质量和力学性能完全满足 350 km/h 高速轨要求。

关键词: 大方坯连铸; 动态轻压下; 重轨钢; 内部质量

中图分类号: TF777.2 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-7638(2007)01-0035-07

Research on Dynamic Soft Reduction Technologies for Bloom Continuous Casting of Heavy Rail

Chen Yong[1,2], Yuan Hongwei[3], Yang Subo[3], Chen Lüying[3]

(1. School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, Liaoning, China; 2. Panzhihua Iron and Steel Research Institute, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 3. Vanadium Recovery & Steelmaking Plant of PZH Steel, Panzhihua 617062, Sichuan, China)

Abstract: With the aim of reducing the center looseness and central segregation of heavy rail steel bloom by enhancing the metallurgical results of soft reduction (SR) employed in continuous bloom caster, a series of experiments for optimizing the process parameters of soft reduction is carried out. The influence of the soft reduction parameters on the internal quality of heavy rail steel bloom is analyzed, which include center looseness and central segregation etc. On the basis, the dynamic soft reduction scheme most suitable for heavy rail steel is developed, which improves the internal quality of heavy rail steel bloom obviously. The practical operation shows that the ratio of center looseness ≤1.0 is increased from 28% to 99.91%, central segregation and central shrinkage cavity are all ≤1.0 whose ratio are 40.91% and 92.05% respectively before optimization, and central segregation index of carbon is decreased from 1.17 to 1.05. Internal quality and mechanical performance of the rails produced from continuously cast blooms have met the requirement of 350 km/h high-speed tracks.

Key words: continuous casting of bloom; dynamic soft reduction; rail steel; internal quality

0 引言

凝固末端轻压下技术始于 20 世纪 70 年代末、80 年代初, 是在辊缝收缩技术的基础上发展起来的, 其基本原理是在连铸坯液相穴末端对铸坯实施一定的压下量(4~14mm), 以补偿或抵消铸坯凝固收缩量, 抑止凝固收缩引起的富含偏析元素的残余钢液向铸坯中心流动, 从而达到改善铸坯中心偏析和中心疏松的目的[1]。这项技术首先在日本新日铁公司得到成功应用, 目前, 凝固末端轻压下技术在板坯连铸、大方坯连铸中得到了较为广泛的应用[2,3], 并被认为是迄今为止进一步消除连铸大方坯宏观偏析的最佳方法, 是提高产品质量和开发高附加值产品的重要手段, 已成为连铸关键技术的重要组成部分[4,5]。

收稿日期: 2006-09-28

攀钢"全连铸工程"建设的 6 机 6 流大方坯连铸机是国内第一台采用凝固末端动态轻压下的大方坯连铸机,铸机投产初期奥钢联(VAI)仍在探索重轨钢连铸动态轻压下工艺,铸坯中心偏析、中心疏松、中心缩孔较严重。为充分发挥铸机先进装备功能,笔者系统研究了与之相匹配的工艺技术。通过两年多的科研攻关,掌握了制定大方坯连铸轻压下工艺的技术思路和轻压下相关工艺参数的确定方法,通过改进引进的相关工艺制度,在国内率先成功应用了大方坯连铸动态轻压下技术。且在应用过程中对比研究了连铸轻压下工艺对重轨钢铸坯质量及重轨质量的影响,建立了适应攀钢重轨钢连铸工艺要求的动态轻压下工艺制度。两年多的生产实践表明,重轨钢铸坯内部质量明显提高,铸坯中心偏析、中心疏松、中心缩孔、中心裂纹等内部缺陷的评判级别≤1.0级的比例在 99.74%以上,铸坯中心碳偏析指数≤1.05,重轨低倍组织和成分均匀性满足 350 km/h 高速轨技术要求。研究成果为确保重轨的质量稳定、满足攀钢重轨生产工艺由模铸向连铸顺利转变以及成功开发 350 km/h 高速轨提供了强有力的技术支撑。

1 攀钢大方坯连铸轻压下装备技术

1.1 轻压下装备的安装位置

攀钢 6 机 6 流大方坯连铸机每流有 7 个轻压下机架,每个机架距结晶器弯月面的距离见表 1。

表 1 轻压下机架的安装位置

Table 1 Distance from each frame to mould meniscus

轻压下机架编号	距结晶器弯月面的距离/m
1#	16
2#	17
3#	19
4#	20
5#	21
6#	23
7#	24

注:1# 机架仅实施热铸坯压下(即常规压下,不实施轻压下)

由表 1 可见,攀钢大方坯连铸机轻压下功能可在 8 m 的总长度范围内进行。而国外大方坯连铸机,考虑到浇注不同钢种、断面、拉速、过热度、冷却强度等因素对凝固末端位置变化的影响,轻压下区长度一般为 4.0~5.0 m 即能满足改善铸坯中心偏析、中心疏松和减轻内部裂纹的要求[6~9]。因此,攀钢大方坯连铸机轻压下区位置可在更大的范围内灵活调节,为攀钢扩大连铸钢种及铸机适应连铸工艺(拉速、过热度、冷却强度等)的变化创造了良好的条件。

1.2 SMART/ASTC 轻压下系统的组成

攀钢采用的奥钢联 SMART/ASTC 动态轻压下系统主要由三个核心部分组成:即 SMART 扇形段、ASTC 系统和 DYNACS 系统。

1.2.1 SMART 扇形段

SMART 扇形段是 VAI 开发的具有独特结构的扇形段,扇形段在支撑框架上自动定位,驱动辊的升降由一个传动液压缸实现,夹紧由配有内装式位置编码器的四个位置的液压缸完成。SMART 扇形段带有远程控制装置—ASTC 在线控制系统,对扇形段的开口度和辊缝进行远程设定,可以按照希望的辊缝形状(平行的、锥形的或局部锥形的)浇铸铸坯。

1.2.2 ASTC 系统

ASTC 系统是奥钢联开发的对 SMART 扇形段进行计算机远程控制的锥度自动调整系统。ASTC 系统具有灵活的可调功能,可以使辊缝实现动态控制。ASTC 的自动控制系统可根据不同钢种自动选择目标辊缝,确定 SMART 扇形段的辊缝设定值。

1.2.3 DYNACS 系统

DYNACS(Dynamic Control System)系统是奥钢联最先进的动态计算模型,它能够根据实际水流量、拉速、过热度、钢种和断面等,在线计算铸坯温度分布和铸坯凝固终点,并通过铸坯热跟踪计算和对二冷喷水量的调节,控制铸坯的凝固终点,为轻压下的实施提供准确的凝固终点位置。

2 攀钢引进重轨钢大方坯连铸轻压下工艺存在的问题

2003 年铸机投产初期,VAI 仍在探索适合攀钢连铸钢种的轻压下工艺技术,没有给攀钢提供重轨钢大方坯连铸轻压下工艺制度,U71Mn、U75V 等重轨钢铸坯中心偏析、中心疏松、中心缩孔较严重,见表 2。

因此,只有尽快制定出适合攀钢重轨钢大方坯连铸的轻压下工艺制度,才能发挥出轻压下装备技术的冶金功能,满足进一步提高重轨质量的需要。

3 重轨钢大方坯连铸轻压下工艺对比研究

研究过程中,将攀钢 6 机 6 流大方坯连铸典型轻压下工艺设定为 5 种,即 ASTC - VERY - SOFT(简称 A - V - S),ASTC - SOFT(A - S),ASTC - MEDIUM(A - M),ASTC - HARD(A - H),ASTC - VERY - HARD

表 2　铸机投产初期重轨钢铸坯硫印、低倍检验结果

Table 2　The results of sulphur print and macrographic examination for bloom of heavy rail steel

中心偏析	中心疏松	中心缩孔	中心裂纹	中间裂纹	角部内裂
0.5~2.0 / ≤1.0(40.91%)	0.5~2.0 / ≤1.0(28.41%)	0~1.5 / ≤1.0(92.05%)	0~1.5 / ≤1.0(88.64%)	0~2.0 / ≤1.0(88.64%)	0~2.0 / ≤1.0(93.18%)

注:①分子表示评级范围,分母表示评级≤1.0 的比例;②检验 U71Mn、U75V 重轨钢铸坯 88 块

(A-V-H)[10]。采用对比试验的方法,研究不同连铸工艺条件下,轻压下位置、压下量及各轻压下机架间的压下量分配对重轨钢大方坯质量和重轨质量的影响。

3.1　轻压下工艺对铸坯中心疏松的影响

轻压下工艺对重轨钢铸坯中心疏松评级的影响见图 1。由图 1 可以看出,采用适当的轻压下工艺,铸坯中心疏松减轻,中心疏松评级≥1.5 级的比例由 73.69%减至 4.17%,1.0 级的比例由 10.53%增至 25%,0.5 级的比例由 15.79%增至 66.67%。

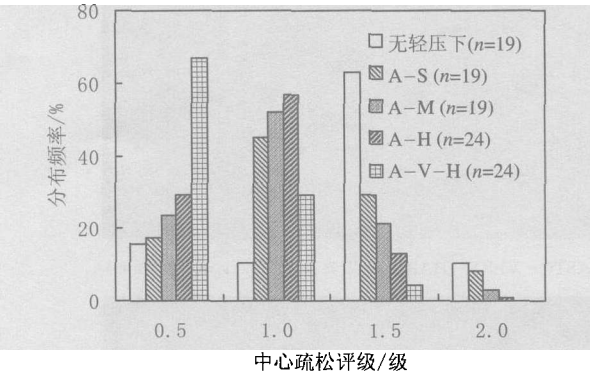


图 1　轻压下工艺对重轨钢铸坯中心疏松的影响

Fig.1　Influence of SR on center looseness of bloom

3.2　轻压下工艺对铸坯中心偏析的影响

轻压下工艺对重轨钢铸坯中心偏析评级及碳偏析指数的影响分别见图 2 和图 3。由此可见,采用适当的轻压下工艺,铸坯中心偏析减轻,中心偏析评级全部控制在 1.0 级以下,且偏析评级 0.5 级的比例由 15.78%增至 62.5%,中心碳偏析指数由 1.17 降至1.05。

3.3　轻压下工艺对铸坯成分均匀性的影响

轻压下工艺对重轨钢铸坯厚度方向碳成分均匀性的影响结果见图 4。由图 4 可见,应用轻压下技术,且采用适当的轻压下工艺,铸坯横断面碳成分分布均匀,尤其是采用 ASTC-VERY-HARD 工艺浇注的铸坯横断面上的碳偏析指数为 0.946~1.035。

3.4　轻压下工艺对铸坯凝固组织的影响

在连铸工艺基本相同的情况下,采用不同轻压下工艺所浇重轨钢铸坯典型低倍组织照片见图5。

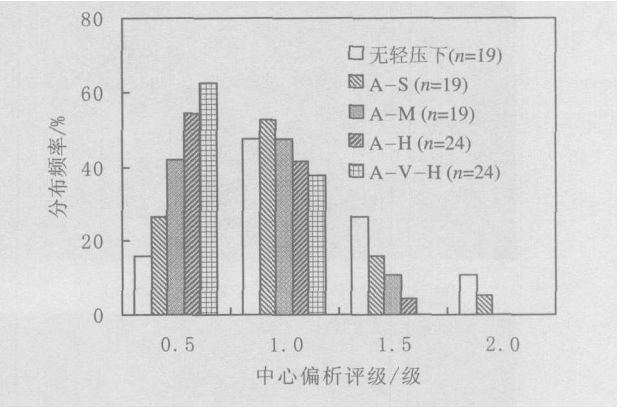


图 2　轻压下工艺对铸坯中心偏析的影响

Fig.2　Influence of SR on central segregation of bloom

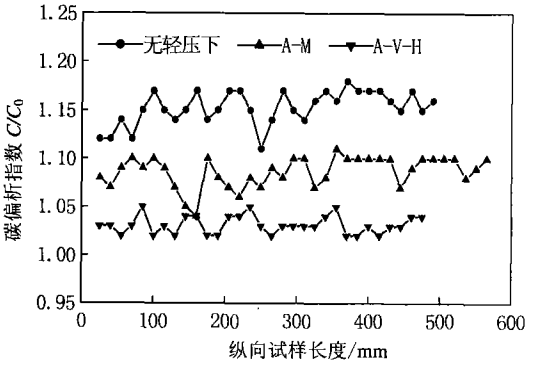


图 3　轻压下工艺对铸坯中心碳偏析指数的影响

Fig.3　Influence of SR on central carbon segregation index of bloom

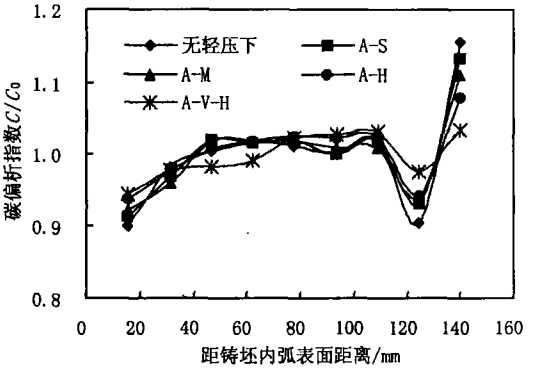


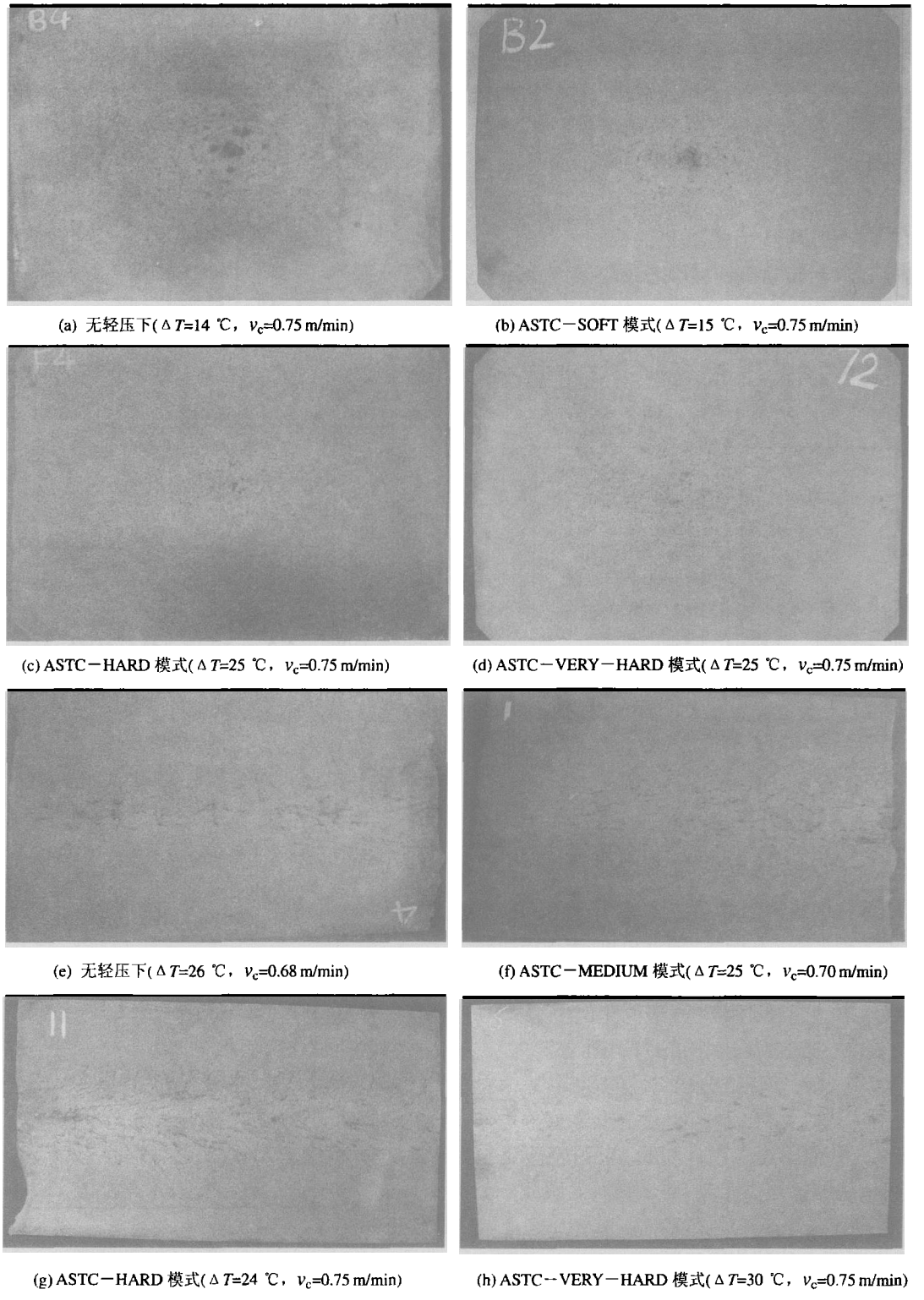
图 4　轻压下工艺对铸坯厚度方向碳分布均匀性的影响

Fig.4　Influence of SR on central carbon segregation index along the thickness of bloom

由图 5 可见，在连铸拉速、过热度基本相当的条件下，采用合理的轻压下工艺可显著改善重轨钢铸坯凝固组织的致密性和均匀性。

3.5 轻压下工艺对重轨轨腰中心偏析的影响

轻压下工艺对重轨轨腰分散分布的条纹长度的影响见图 6，典型低倍组织见图 7。



(a) 无轻压下(ΔT=14 ℃，v_c=0.75 m/min)　(b) ASTC－SOFT 模式(ΔT=15 ℃，v_c=0.75 m/min)

(c) ASTC－HARD 模式(ΔT=25 ℃，v_c=0.75 m/min)　(d) ASTC－VERY－HARD 模式(ΔT=25 ℃，v_c=0.75 m/min)

(e) 无轻压下(ΔT=26 ℃，v_c=0.68 m/min)　(f) ASTC－MEDIUM 模式(ΔT=25 ℃，v_c=0.70 m/min)

(g) ASTC－HARD 模式(ΔT=24 ℃，v_c=0.75 m/min)　(h) ASTC－VERY－HARD 模式(ΔT=30 ℃，v_c=0.75 m/min)

图 5　轻压下工艺对 U75V 重轨钢铸坯低倍组织的影响

Fig.5　Influence of SR on macrostructure of bloom

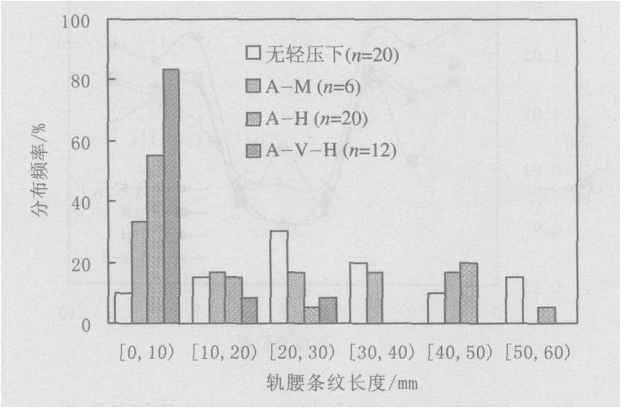


图 6　轻压下工艺对重轨轨腰条纹长度的影响

Fig.6　Influence of SR on the length of segregation striation in the middle of rail

由此可见,应用轻压下技术,且采用适当的轻压下工艺,可明显减轻因铸坯中心疏松、中心偏析等中心缺陷引起的重轨轨腰条纹(疏松带或偏析带),尤其是采用 ASTC-VERY-HARD 工艺,重轨轨腰分散分布的条纹长度全部控制在 30 mm 以内,且条纹长度 ≤10 mm 的比例达到 83.33%。

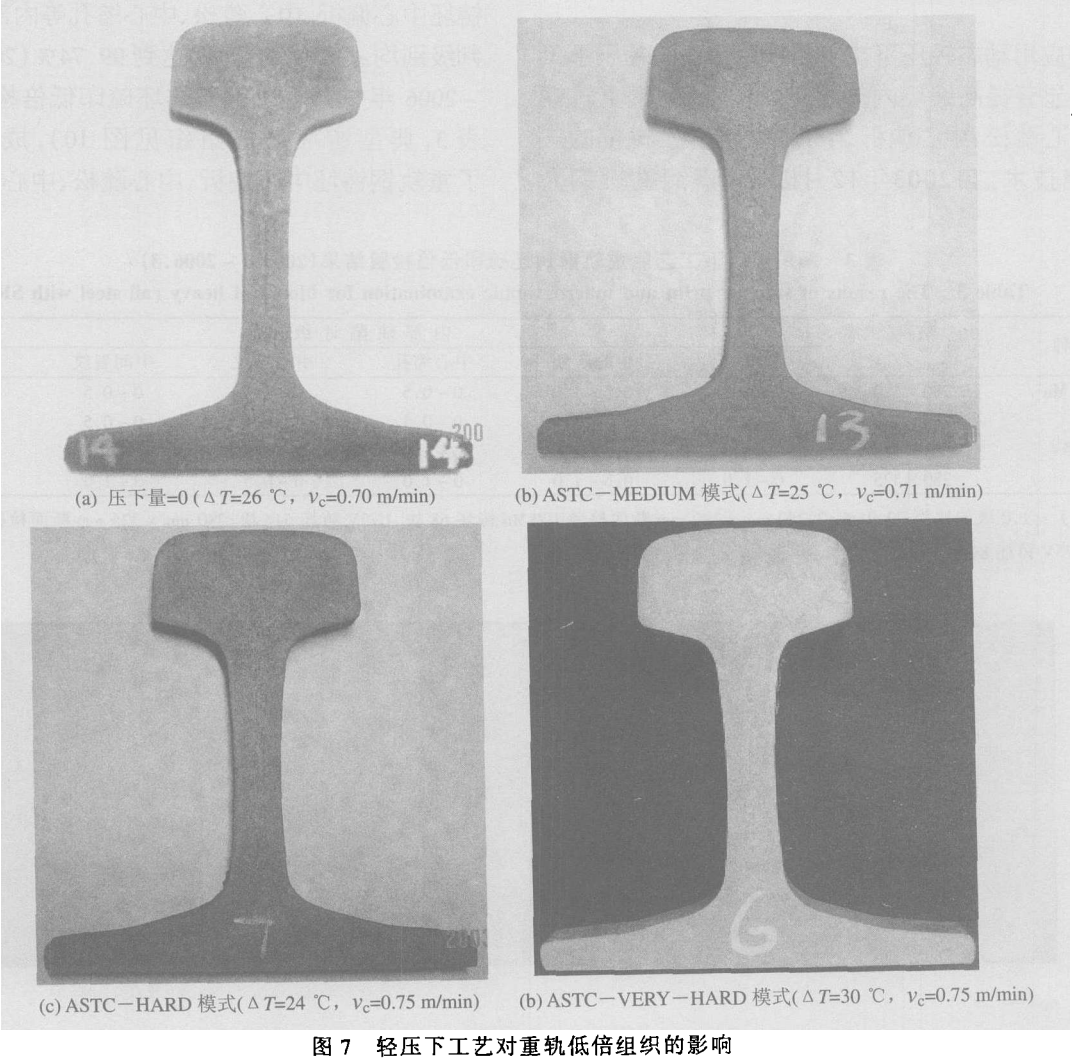
3.6　轻压下工艺对重轨成分均匀性的影响

按图 8 所示的取样方法,对比分析轻压下工艺对钢轨横断面上碳成分均匀性的影响,典型测试结果见图 9。

由图 9 可见,采用适当的轻压下工艺,钢轨横断面碳成分分布较均匀,采用 ASTC - VERY - HARD 工艺,钢轨横断面碳偏析指数为 0.987 ~ 1.019。

4　重轨钢大方坯连铸轻压下工艺制度的应用效果

从大方坯连铸轻压下工艺对重轨钢铸坯质量及重轨质量影响的对比试验研究结果可以看出,重轨



(a) 压下量=0 (ΔT=26 ℃, v_c=0.70 m/min)　(b) ASTC－MEDIUM 模式(ΔT=25 ℃, v_c=0.71 m/min)

(c) ASTC－HARD 模式(ΔT=24 ℃, v_c=0.75 m/min)　(b) ASTC－VERY－HARD 模式(ΔT=30 ℃, v_c=0.75 m/min)

图 7　轻压下工艺对重轨低倍组织的影响

Fig.7　Influence of SR on macrostructure of rail

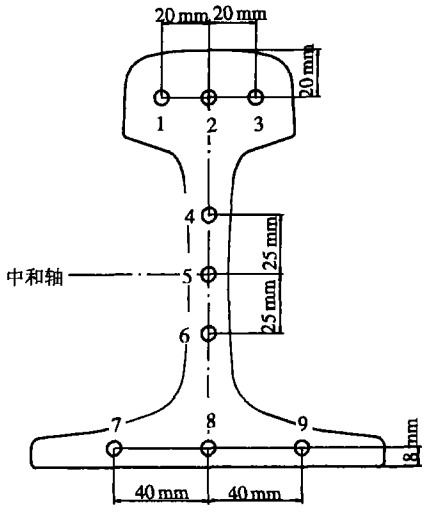


图 8 钢轨化学成分分析取样部位图

Fig.8 Schematic diagram of sampling positions for chemical compositions of rail

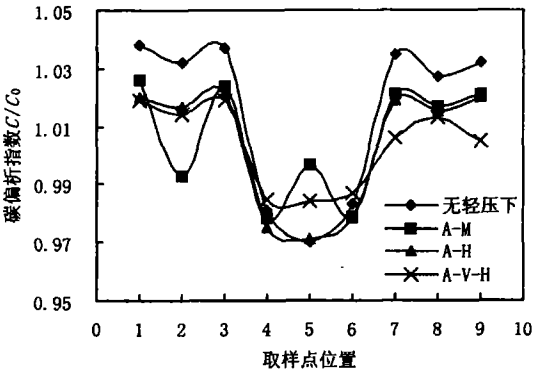


图 9 轻压下工艺对钢轨横断面碳成分偏析的影响

Fig.9 Influence of SR on central carbon segregation index of rail cross section

钢连铸应用动态轻压下技术且采用合理的轻压下工艺可以显著提高铸坯内部质量，是控制攀钢重轨钢铸坯中心疏松、中心偏析、中心缩孔等中心缺陷的一项关键技术。自2003年12月以来，攀钢重轨钢大方坯连铸采用了 ASTC - VERY - HARD 的轻压下模式，确保了重轨钢铸坯内部质量稳定，2005 年重轨产能达到 6.38×10^5t，铸坯综合合格率达到99.97%，铸坯中心偏析、中心疏松、中心缩孔等内部缺陷的评判级别均≤1.0 级的比例达到 99.74%（2005 年 1 月 ~2006 年 3 月重轨钢连铸坯硫印低倍检验结果见表 3，典型铸坯低倍组织见图 10），成功地解决了重轨钢铸坯中心偏析、中心疏松、中心缩孔、中心

表 3 采用轻压下工艺后重轨钢铸坯硫印低倍检验结果(2005.1 ~ 2006.3)

Table 3 The results of sulphur print and macrographic examination for bloom of heavy rail steel with SR

钢种	断面/mm × mm	内部缺陷评级/级					
		中心偏析	中心疏松	中心缩孔	中心裂纹	中间裂纹	角部内裂
U71Mn	280 × 380	0 ~ 0.5	0.5 ~ 1.0	0 ~ 0.5	0 ~ 0.5	0 ~ 0.5	0 ~ 0.5
	280 × 325	0 ~ 0.5	0.5 ~ 1.0	0 ~ 0.5	0 ~ 0.5	0 ~ 0.5	0 ~ 0.5
U75V	280 × 380	0 ~ 1.0	0.5 ~ 1.5[1)]	0 ~ 1.0	0 ~ 0.5	0 ~ 1.0	0 ~ 1.5[1)]
	280 × 325	0 ~ 1.0	0.5 ~ 1.0	0 ~ 1.0	0 ~ 0.5	0 ~ 1.0	0 ~ 0.5

注：1) ≤1.0 级的比例 99.91%；2)280 mm × 380 mm 断面检验 U71Mn 铸坯 68 块、U75V 铸坯 514 块；280 mm × 325 mm 断面检验 U71Mn 铸坯 114 块、U75V 铸坯 84 块

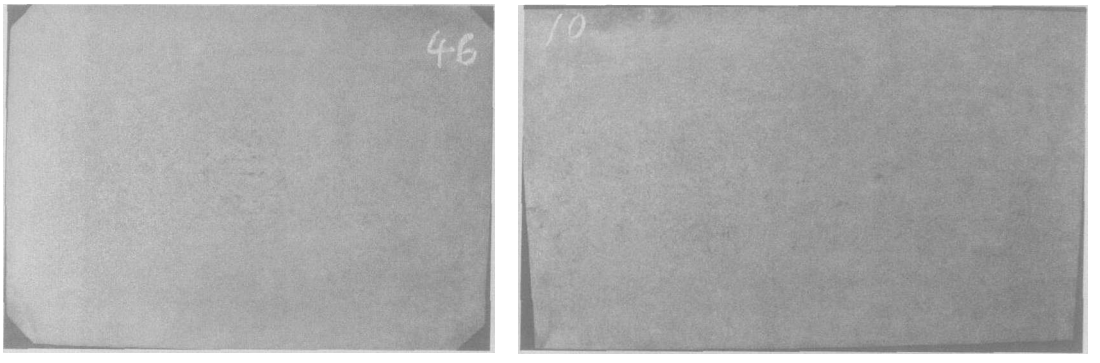


图 10 重轨钢铸坯典型的低倍组织照片

Fig.10 Typical macrostructures of heavy rail steel bloom

裂纹等中心缺陷较严重的技术难题。同时,近两年的钢轨生产统计结果表明,钢轨内部质量优异,成分均匀(钢轨横断面上任意点成分与熔炼成分的偏差:C≤±0.02%,Si≤±0.02%,Mn≤±0.05%,P≤±0.005%,S≤±0.005%),力学性能稳定,强韧性好,U75V 钢轨 R_m = 1 030 ~ 1 060 MPa(平均 1 045 MPa),A = 10.5% ~ 12.0%(平均 11.4%),挠度 37 ~ 44 mm(平均 39 mm);U71Mn 钢轨 R_m = 965 ~ 1010 MPa(平均 988 MPa),A = 8% ~ 14%(平均 11%),挠度 39 ~ 45 mm(平均 42 mm),达到了时速 350 km 高速轨的技术要求。

5 结语

通过对比研究轻压下工艺对重轨钢铸坯中心疏松、中心偏析和重轨低倍组织、成分均匀性的影响,弄清了重轨钢连铸轻压下工艺与大方坯质量、钢轨质量间的相互关系,建立了适应重轨钢连铸要求的大方坯连铸动态轻压下工艺制度,明显提高了重轨钢大方坯内部质量,使铸坯中心疏松评级≤1.0 级的比例由 28.41% 增至 99.91%,中心偏析评级≤1.0级的比例由 40.91% 增至 100%,中心缩孔≤1.0 级的比例由 92.05% 增至 100%,且铸坯中心偏析、中心疏松、中心缩孔、中心裂纹、中间裂纹、角部内裂等的评判级别均≤1.0 级的比例达到 99.74%。研究确定的重轨钢连铸轻压下工艺 ASTC - VERY - HARD 是改善重轨钢连铸坯内部质量的一项关键技术,为实现攀钢重轨生产工艺由模铸向连铸的顺利转变和攀钢在国内率先成功开发且批量生产 350 km/h 高速轨提供了重要的技术支撑。

参考文献:

[1] Cai Kaike, Cheng Shifu. Continuous Casting Principle and Process [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994.337 - 340.
(蔡开科, 程士富. 连续铸钢原理与工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.337 - 340.)

[2] Lu Shengyi. The Bloom Quality [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000.133 - 137.
(卢盛意. 连铸坯质量 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.133 - 137.)

[3] Yang Ladao, Xie Donggang. General Slab Casting Technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002.96 - 102.
(杨拉道, 谢东钢. 常规板坯连铸技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.96 - 102.)

[4] Hattori M, Nagata S, Inaba A, *et al*. Development of Technology for Elimination of Segregation in Continuously Cast Slabs[A]. Steelmaking Conference Proceeding[C]. 1991,74: 91 - 96.

[5] Masaoka T, Mizuoka S, Kobayashi H, *et al*. Improvement of Centerline Segregation in Continuously Cast Slab with Soft Reduction Technique[A]. Steelmaking Conference Proceeding[C]. 1989,72: 63 - 69.

[6] Sakaki G S, Kwing A T, Petozzi J J. Soft Reduction of Continuously Cast Blooms at Stelcos Hilton Works[A]. Steelmaking Conference Proceedings[C]. 1995,78: 295 - 300.

[7] Oh K S. Development of Soft Reduction Technology for the Bloom Caster at Pohang Works of POSCO[A]. Steelmaking Conference Proceedings[C]. 1995,78: 301 - 308.

[8] Oh K S. Quality Improvement of Continuously Cast Blooms for High Grade Tire Cord Steel[J]. Iron Steelmaker, 1996, (3): 65 - 68.

[9] Chen Y K. Improvement of Center Segregation for High Carbon Steel Bloom[A]. Steelmaking Conference Proceedings[C]. 1996,79: 505 - 512.

[10] Yang Subo, Chen Yong, Li Guijun. Dynamic Soft Reduction Technology and Its Operational Results Bloom Continuous Casting [J]. Iron and Steel, 2005,40(6): 24 - 26.
(杨素波, 陈　永, 李桂军. 大方坯连铸动态轻压下技术应用研究[J]. 钢铁, 2005,40(6): 24 - 26.)

编辑　苟淑云

©