

Nb、V 对热冲压成型钢组织和性能的影响

陈俊东¹ 郝 瑛¹ 陶维纯¹ 李永亮²

(1.唐山科技职业技术学院 河北 唐山 063001; 2.河钢唐钢股份有限公司技术中心 河北 唐山 063016)

摘 要: 利用光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)等研究了Nb、V等微合金元素对1 500 MPa级热冲压成型钢显微组织和力学性能的影响。结果表明:Nb、V微合金可以有效提高连退钢带中的马氏体、贝氏体体积分数,增加重新加热时界面形核位置,提高界面形核率,进而对试验钢的淬火一回火显微组织起到细化作用。Nb或V微合金处理后,钢中马氏体板条束尺寸和板条片间距显著降低。虽然Nb、V的添加均能提高钢的力学性能,但是与含V钢相比,含Nb钢的回火稳定性较差。

关键词: 热冲压成型钢;微合金化;V;Nb;显微组织;力学性能

中图分类号:TF76 TG142.1 文献标志码:A 文章编号:1004-7638(2019)01-0136-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2019.01.024

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Effect of Nb and V on Microstructure and Mechanical Properties in Hot-stamping Steel

Chen Jundong¹, Hao Ying¹, Tao Weichun¹, Li Yongliang²

(1.Tangshan Vocational College of Science and Technology, Tangshan 063001, Hebei, China; 2.Hebei Iron and Steel Group Tangsteel Company, Tangshan 063016, Hebei, China)

Abstract: The influence of micro alloy niobium (Nb) and vanadium (V) on microstructure and mechanical properties in hot-forming steel was investigated by optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM) and transmission electron microscope (TEM). The results show that the volume fraction of martensite or bainite in continuous annealing strip increased with the microalloying addition, which would promote the recrystallization nucleation ratio during the re-austenitizing process. Therefore, the microstructure would be refined effectively during the subsequent heat treatment process. The sizes of martensitic packets and lath lamellar spacing reduce simultaneously with micro-alloying addition for the tested steel. Though both Nb and V addition improve the mechanical properties, the Nb-bearing steel shows poor tempering stability compared with the V-bearing steel.

Key words: hot-stamping steel, micro alloy, V, Nb, microstructure, mechanical properties

0 引言

热冲压成型钢是汽车轻量化和高强化最具潜力的钢铁材料之一。目前,通用、沃尔沃、大众等企业已开始将其大量应用于车身防撞梁、顶梁、车门立

柱、门槛及车门内加强筋等结构件生产当中^[1]。热冲压成型钢通过将钢板加热至850~950℃并保温一定时间进行奥氏体化,然后用带有自动冷却系统的模具进行冲压成型,以实现变形后及时淬火^[2-3]。钢板成型后可获得完全马氏体组织,抗拉强度可达

收稿日期:2018-07-08

基金项目:国家自然科学基金(51674020)资助。

作者简介:陈俊东(1972—),男,河北唐山人,高级工程师,主要从事纯净钢生产和质量改进, E-mail: cjd309@sohu.com。

1 500 MPa 以上^[4]。但在车身结构件的热成型过程中,经常出现强度偏低、冲裁精度偏低、延迟开裂现象,经分析主要与 B 向晶界偏聚导致淬透性降低或马氏体组织粗大等因素有关^[5-7]。

连退带钢经过二次退火获得全马氏体组织,有利于重新加热时显微组织细化和均匀性的提高^[8-9]。但是二次退火成本较高,吨钢成本增加 300 元以上,而且严重影响订单交货期和表面质量。如果能够通过微合金处理方式来优化连退带钢初始显微组织,则可以有效改善最终淬火显微组织均匀性和力学性能稳定性。适当提高连退钢带中马氏体、贝氏体体积分数,有利于相界面密度的增加,重新加热时可以增加界面形核位置,从而起到细化显微组织的效果^[10]。添加一定量的 Nb,可以抑制 B 在晶界上的偏聚,提高奥氏体中有效 B 含量,增加钢的淬透性,不仅抑制再结晶细化组织还可以获得更多

马氏体^[11]。添加 V 元素,可以起到稳定过冷奥氏体,提高淬透性的效果,对淬火组织改善也具有一定效果^[12]。

但是,目前关于 Nb、V 微合金对热冲压成型钢的影响还无系统研究报道,关于 Nb、V 对显微组织和力学性能的影响还需进一步探讨。笔者通过微合金化手段,研究了 Nb、V 等微合金元素对传统热冲压成型钢显微组织均匀性、力学性能稳定性的影响,以期对热冲压成型钢成分、热加工工艺的优化提供理论指导。

1 试验材料及方法

国内某钢厂热冲压成型钢生产工艺为:铁水预处理→转炉→LF 精炼→连铸→热轧至 4.0 mm→酸轧至 2.0 mm→连续退火,制成连续退火钢带,化学成分如表 1 所示。

表 1 试验钢的化学成分(质量分数)
Table 1 Composition analysis results of experimental steels (mass fraction)

编号	C	Mn	Si	Cr	Als	Ti	Nb	V	N	B
1 [#]	0.25	1.38	0.28	0.192	0.039	0.040			0.003 4	0.003 8
2 [#]	0.25	1.40	0.30	0.193	0.037	0.040	0.02		0.003 4	0.004 1
3 [#]	0.23	1.35	0.28	0.190	0.038	0.040		0.10	0.003 5	0.003 8

将退火带钢沿轧向切成 300 mm × 40 mm 钢板,在马弗炉中加热至 900 ℃,保温 5 min 后用水淬火至室温状态(约 23 ℃),然后在 170 ℃ 下回火 20 min。用线切割将热处理后钢板切成标准拉伸试样, A80 mm 标距,用万能试验机进行力学性能测试;沿轧向切取 10 mm × 8 mm 试样,经研磨、抛光后用 4% 硝酸酒精腐蚀,制备金相试样,用光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM: JSM-6701F)观察淬一回火前后显微组织构成;用于透射电镜观察的薄膜样品先经机械减薄至 50 μm,冲成 Ø3 mm 圆片,用 10% 的高氯酸酒精溶液在 -10 ℃ 下进行双喷减薄,然后利用 FEI Teenai G2 F20 透射电镜对钢中马氏体进行观察。

2 显微组织及力学性能

2.1 显微组织观察

如图 1 所示,连退带钢组织均由铁素体+马氏体+贝氏体(少量)组成,但是显微组织构成却有显著差异。图 1(a) 为传统 22MnB5 钢,尽管 Ti/N 大于 10,但是由于 B 在晶界的偏聚,奥氏体中有效 B

减少,淬透性受到影响,钢中马氏体、贝氏体相对较少。添加 Nb 以后,马氏体、贝氏体有所增加。分析认为这主要是 Nb 在晶界偏聚抑制了 B 在晶界偏聚,从而使奥氏体中有效 B 含量增加,淬透性提高。同时,当 Nb 含量低于 0.02% 时, Nb 还能有效抑制铁素体形核率,降低其体积分数^[13]。此外, Nb 的添加导致钢的再结晶程度降低,连退带钢的冷轧纤维状组织未完全消除,图 1(b) 中仍可以看到未发生再结晶的纤维状组织。添加 V 以后,钢中马氏体含量显著增加,如图 1(c) 所示,这主要与 V 提高过冷奥氏体稳定性和提高钢的淬透性影响有关。

利用图像处理软件进行处理后测量 1[#]~3[#] 钢中马氏体+贝氏体的体积分数分别为 37.8%、43.7%、43.9%。Nb、V 的添加对显微组织体积分数的影响显著,虽然 3[#] 钢 C 含量比 1[#]、2[#] 钢低 0.02%,但马氏体+贝氏体分数最高,且显微组织的分布更加均匀,这说明 V 不仅提高连退带钢中的上述显微组织的体积分数,而且能够提高其均匀弥散程度。

经 900 ℃ 淬火+170 ℃ 回火后试样扫描电镜图片如图 2 所示,三种钢均能获得单相板条马氏体。

加入 Nb、V 后马氏体板条束变小,微合金元素对淬火+回火组织的细化效果显著。分析认为,马氏体板条束尺寸的降低,主要跟奥氏体晶粒的细化有关,奥氏体晶粒越细小,淬火后显微组织越细小均匀,这种现象称为“组织遗传”效应。一般认为 Nb 及其碳氮化物对变形奥氏体再结晶行为的抑制作用明显,对显微组织细化作用显著。结合图 1 可知,含 V 钢

马氏体板条束尺寸降低的主要原因则主要是 V 对连退带钢马氏体体积分数和弥散程度的影响。V 不仅提高连退带钢中马氏体体积分数,而且提高其弥散程度。根据“界面形核—长大”理论^[14],弥散分布的马氏体组织在加热时增加了奥氏体形核位置,提高了形核率,从而起到细化奥氏体晶粒的作用,最终使淬火组织得到有效细化。

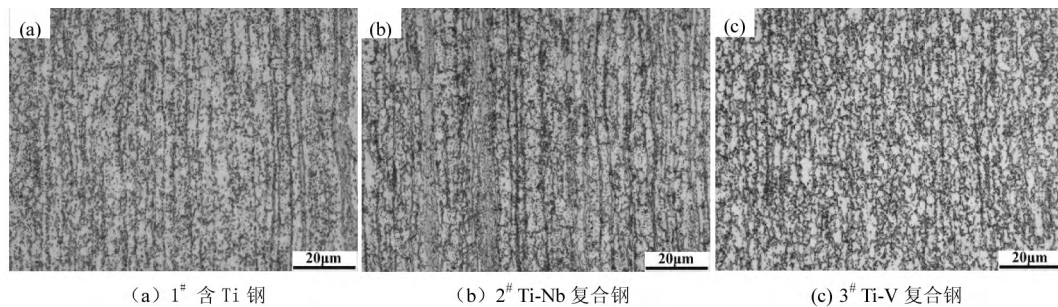


图 1 连退钢带显微组织(纵向)

Fig.1 Microstructures of continuous annealed samples (Rolling direct)

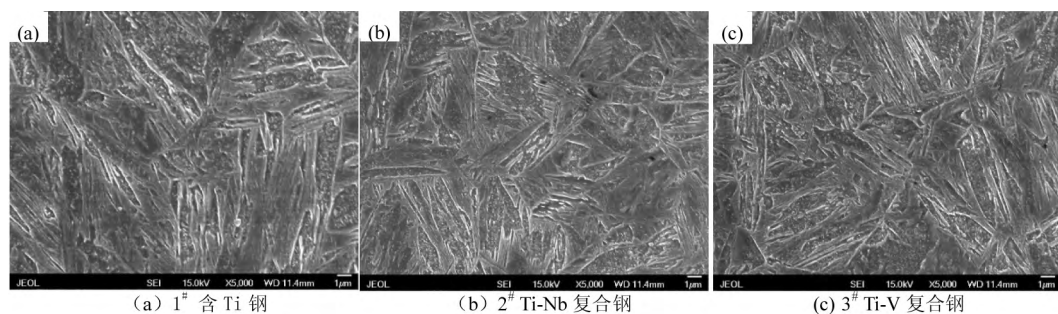


图 2 淬火+回火后的显微组织(SEM)

Fig.2 Microstructures of quenched and tempered samples (SEM)

利用透射电镜对马氏体的精细结构进行了观察,结果如图 3 所示。据统计,传统热冲压成型钢的马氏体板条尺寸较大,平均尺寸(厚度×长度)约为 $0.26\ \mu\text{m} \times 3.3\ \mu\text{m}$;添加 Nb、V 后,马氏体板条平均尺寸则分别降低至 $0.15\ \mu\text{m} \times 1.6\ \mu\text{m}$ 和 $0.09\ \mu\text{m} \times 1.1\ \mu\text{m}$ 。Nb、V 的添加不仅对马氏体板条束的长大有明显的抑制作用,而且能够有效降低马氏体板条的尺寸。有研究认为,马氏体板条尺寸的降低增加了相界密度,对提高钢的低温回火稳定性有利^[15]。

2.2 力学性能

试验钢淬一回火后力学性能如图 4 所示,和 1# 钢相比,Nb、V 微合金处理后,钢的力学性能得到明显提高。但是 $170\ ^\circ\text{C}$ 下回火时,随着时间延长,含

Nb 的 2# 钢的抗拉强度、屈服强度均有显著降低。当回火时间为 60 min 时,1# 钢的抗拉强度下降了 169 MPa,2# 钢下降了 131 MPa,经过 V 处理的 3# 钢仅下降了 54 MPa。屈服强度随着回火时间延长的变化趋势与抗拉强度相似,如图 4(b) 所示。

试验钢经不同时间回火后伸长率和屈强比的变化趋势如图 4(c)、(d) 所示,结合图 2、图 3 可知,随着显微组织的细化和回火时间的延长,钢的伸长率均出现了增加趋势。与其他试验钢相比,含 V 钢的抗拉强度、屈服强度和屈强比始终维持在较高值,在相同的淬一回火工艺下,含 V 钢体现出了优异的回火稳定性。

2.3 讨论及分析

利用 Thermo-calc 热力学软件对试验钢中 Ti、

Nb、V 的析出行为进行了热力学计算, 结果如图 5 所示。V 的临界析出温度在 840 ℃ 以下, 当淬火温度为 900 ℃ 时, V 基本上固溶在奥氏体中。由于固溶在奥氏体中的 V 对 C 有“固溶拖拽”作用, 因此可以提高过冷奥氏体的稳定性, 提高其淬透性, 使

含 V 的连退带钢在连退生产的快冷工序获得更多的马氏体、贝氏体组织。马氏体、贝氏体组织的增加, 使得二次加热时, 相界面形核位置增多, 从而提高了再结晶形核率, 对淬火组织的细化具有显著促进作用。

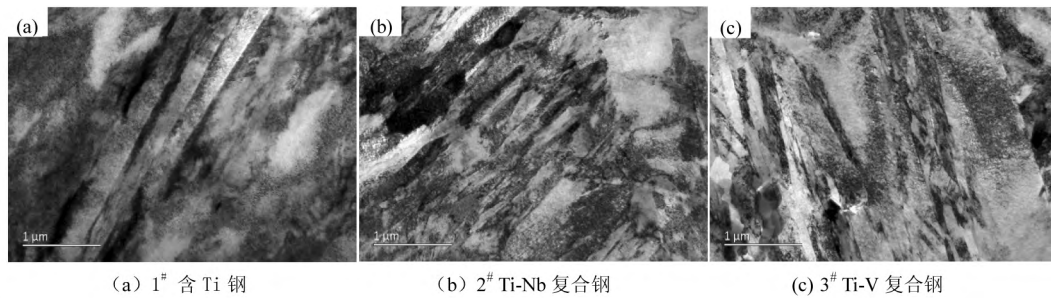


图 3 淬火+回火后的显微组织(TEM)

Fig.3 Microstructures of quenched and tempered samples (TEM)

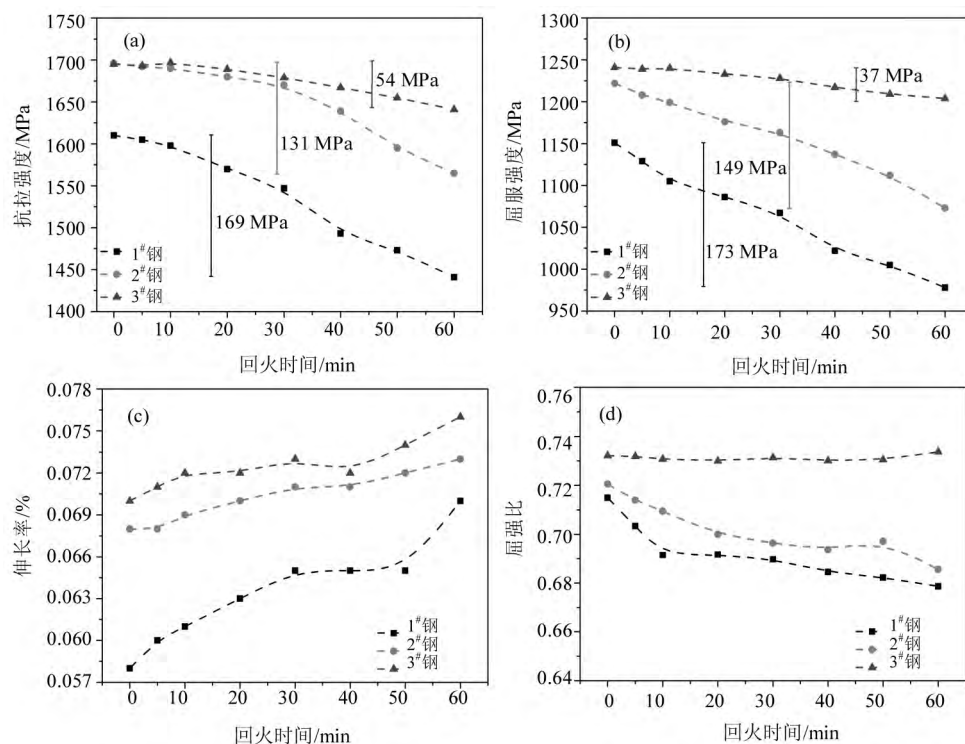


图 4 试验钢的力学性能

Fig.4 Mechanical properties of tested steels

此外, V 对带钢马氏体相变温度也会产生一定程度的影响。马氏体相变开始温度 M_s 点可以用公式(1)进行计算^[16]:

$$M_s(^\circ\text{C}) = 540 - 420[C] \quad (1)$$

式中, 合金元素为质量百分数, %; $[C]$ 为影响马氏体相变温度的碳当量, $[C] = C + \text{Mn}/12 + \text{Cr}/35 + \text{Ni}/21 + \text{Mo}/20 + \text{W}/40 + \text{Si}/40 - \text{V}/3 - \text{Al}/21$ 。

将表 1 化学成分代入公式(1)可以得到 1# ~ 3#

钢的[C]及 M_s 点如表2所示。

可以看出,含V钢的 M_s 点比无V钢提高了约23℃。一般情况下,马氏体相变点越高或者回火温度越低,钢的回火稳定性越好^[17]。含V的3#钢 M_s 点的升高,使其在170℃回火时马氏体发生分解的几率大大降低,进而使回火稳定性得到了极大提高。

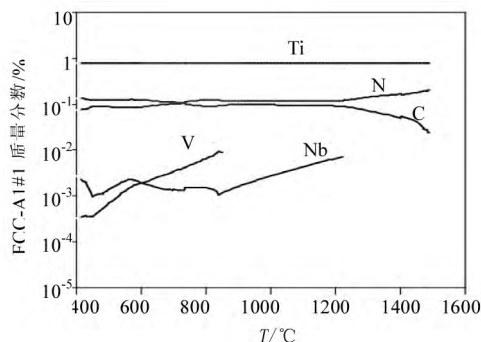


图5 微合金元素的析出行为—Thermo-calc 热力学计算
Fig.5 Microalloying elements precipitating behavior calculated by Thermo-calc

表2 Nb、V对 M_s 点的影响

Table 2 The effect of Nb, V on the M_s

编号	$w_{Nb}/\%$	$w_V/\%$	$w_{[C]}/\%$	$M_s/^\circ\text{C}$
1#			0.368 629	385.176
2#	0.02		0.370 419	384.424
3#		0.1	0.312 786	408.63

3 结论

1) 钢中添加一定量的Nb、V均可以抑制铁素体,提高马氏体、贝氏体体积分数,增加了界面形核位置,进而使重新加热时显微组织得到有效细化。经Nb、V微合金处理的试验钢经过淬—回火处理以后,抗拉强度、屈服强度显著提高。

2) V处理钢在淬—回火后的力学性能随着回火时间的延长并无显著变化,表现出优异的回火稳定性。但是含Nb钢和传统热冲压成型钢的回火稳定性比含V钢稍差,随着回火时间的延长,钢的抗拉强度、屈服强度和屈强比均有显著降低;

3) 含V钢回火稳定性的提高,不仅与含V钢淬透性提高显微组织得到有效细化有关,而且与V提高 M_s 点有关。

参考文献

- [1] Song Leifeng, Ma Mingtu, Zhang Yisheng *et al.* New boron steel development and process research of hot stamping [J]. *Engineering Sciences* 2014, 16(1): 71–75.
(宋磊峰, 马鸣图, 张宜生, 等. 热冲压成形新型B钢开发与工艺研究[J]. *中国工程科学* 2014, 16(1): 71–75.)
- [2] Maeno T, Mori K, Nagai T. Improvement in formability by control of temperature in hot stamping of ultra-high strength steel parts [J]. *CIRP Annals* 2014, 63(1): 301–304.
- [3] Li N, Lin J, Balint D S *et al.* Experimental characterisation of the effects of thermal conditions on austenite formation for hot stamping of boron steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology* 2016, 231: 254–264.
- [4] Venturato G, Novella M, Bruschi S *et al.* Effects of phase transformation in hot stamping of 22MnB5 high strength steel [J]. *Procedia Engineering* 2017, 183: 316–321.
- [5] He Xinlai, Chu Youyi, Ke Jun. The hardenability of boron steel and the segregation of boron [J]. *ACTA Metallurgica Sinica* 1983, 19(6): 459–465.
(贺信莱, 褚幼义, 柯俊. 硼钢淬透性与硼向奥氏体晶界的偏聚[J]. *金属学报* 1983, 19(6): 459–465.)
- [6] Nikraves M, Naderi M, Akbari G H *et al.* Phase transformations in a simulated hot stamping process of the boron bearing steel [J]. *Materials & Design* 2015, 84: 18–24.
- [7] Li Huiping, Hou Hongli, Zhou Weilu *et al.* Phase transformation and blanking accuracy of boron steel B1500HS during hot blanking [J]. *Chinese Journal of Engineering* 2017, 39(12): 1851–1858.
(李辉平, 侯弘历, 周卫鲁, 等. B1500HS 硼钢热冲裁过程的相变和冲裁精度[J]. *工程科学学报* 2017, 39(12): 1851–1858.)
- [8] Zhao K, Chang Y, Hu P *et al.* Influence of rapid cooling pretreatment on microstructure and mechanical property of hot stamped AHSS part [J]. *Journal of Materials Processing Technology* 2016, 228: 68–75.
- [9] Wang Hua, Yang Honglin, He Yanlin *et al.* Effect of annealing process on the performance and microstructure of 22MnB5 steel [J]. *Shanghai Metals* 2015, 37(6): 15–20.

- (王华 杨洪林 何燕霖,等.连退工艺对 22MnB5 钢性能的影响规律及显微组织分析[J].上海金属 2015 37(6): 15-20.)
- [10] Li N ,Lin J ,Balint D S *et al.*Modelling of austenite formation during heating in boron steel hot stamping processes [J].Journal of Materials Processing Technology 2016 237: 394-401.
- [11] Jiang Haitao ,Tang Di ,Mi Zhenli *et al.*Influence of processing parameters of hot stamping to mechanical properties of martensite steel and segregation of boron [J].Journal of Materials Engineering 2010 (2) : 69-73.
(江海涛 唐荻 米振莉,等.工艺参数对热冲压成型钢组织性能及硼偏聚的影响[J].材料工程 2010(2): 69-73.)
- [12] Li Yongliang ,Wang Fuming ,Li Changrong *et al.*Influence of vanadium on the microstructure refinement of high strength automobile beam steel [J].Chinese Journal of Engineering 2016 38(8) : 1108-1114.
(李永亮 王福明 李长荣,等.钒对高强度汽车大梁钢组织细化的影响[J].工程科学学报 2016 38(8): 1108-1114.)
- [13] Deng Tianyong ,Xu Yunbo ,Yuan Xiangqian *et al.*Prediction of A_{r3} for Nb-containing low carbon steels [J].Acta Metallurgica Sinica 2007 43(10) : 1091-1095.
(邓天勇 许云波 袁向前,等.含 Nb 低碳钢相变温度 A_{r3} 预测模型[J].金属学报 2007 43(10): 1091-1095.)
- [14] Song Weixi.Metallography [M].Beijing: Metallurgical Industry Press 2008: 200-205.
(宋维锡.金属学[M].第 2 版.北京:冶金工业出版社 2008: 200-205.)
- [15] Yaxu Z ,Fuming W ,Changrong L *et al.*Microstructural evolution ,coarsening behavior of precipitates and mechanical properties of boron bearing steel 25CrMoNbB during tempering [J].Materials Science and Engineering: A 2018 712: 453-465.
- [16] Li Zhichao ,Liu Pengjian ,Wang Minggang.Computation of M_s temperature in carbon equivalence method [J].Journal of Liaoning Technical University (Natural Science) ,1998 ,17(3) : 293-295
(李智超 刘鹏视 王明罡. M_s 点的碳当量算法[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版) ,1998 ,17(3): 293-295.)
- [17] Ding Hongli ,Wang Limin ,Zhang Xiuli.Effects of tempering and aging on microstructure and properties of martensitic heat-resistant steel 1Cr12Ni2WMoVNbN [J].Hot Working Technology 2010 39(14) : 166-170.
(丁宏莉 王立民 张秀丽.回火和时效对 1Cr12Ni2WMoVNbN 马氏体热强钢组织与性能的影响[J].热加工工艺 2010 39(14): 166-170.)

编辑 杨冬梅

攀钢加快“智慧矿山”建设步伐

“在一台电脑上可以控制作业区所有设备并能实时查看设备状态和运行参数,在监控屏上可看到整个作业区 94 个作业点位生产状况和设备运行情况,以前 5 个人的工作现在 1 个人就可以完成……”在攀钢矿业公司选矿厂破碎集控室内,可以看到,无人值守的破碎生产现场一览无遗。

2019 年以来,攀钢矿业公司着眼于冶金矿山未来发展方向,以促进云计算、大数据、物联网、移动互联等新一代信息技术与矿山技术深度融合为重点,完善科技创新机制,提高科技创新能力和工序工艺智能化水平,打造生产高效、管理协同、绿色经济的可持续发展“智慧矿山”。

该公司围绕安全生产、职业健康、节能减排、生态环境、降本增效、产品质量等方面的重点问题,通过生产自动化、控制智能化、管理精细化、系统全面云化、决策数据化等手段,计划建成采场自动化监控系统、选矿自动化生产系统、集中产量计量系统、胶带运输集控系统、轨道运输监控系统、集中供水供能系统等,以实现资源管理信息化、矿山采选设备自动化和智能化、工艺过程作业标准化自动化、环保安全监测监控远程可视化。

截至目前,该公司已经建成攀枝花铁矿地测地理信息管理系统、攀枝花铁矿采掘计划编制系统、密地选矿厂破碎无人值守自动化系统等 20 余项信息系统建设项目。接下来,该公司将围绕“两化融合”三年规划,进一步推进生产管理自动化、智能化进程,打造最优产线。力争集中值守和质计量管理系统在今年 3 月底前全部建成,生产管控系统今年 9 月底前全部建成,选钛厂 MES 及配套系统今年 10 月底上线。同时,加快推进密地选矿厂磁选无人值守自动化系统、攀密片区集中供水无人值守自动化系统、攀枝花铁矿采选产线工艺能耗监控系统、白马选矿厂 MES 系统建设步伐。

<http://www.pzhsteel.com.cn/NewsCenter/readnews.aspx?NewsID=020607590>