2 300 MPa级铁路桥梁用高强钢绞线盘条的开发*

赵晓敏[1],苏永华[2],石 龙[2],涛 雅[1],吕 刚[1],胡 波[3]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010;
2. 中国铁道科学研究院集团有限公司,北京 100081;
3. 内蒙古包钢钢联股份有限公司长材厂,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 包钢自主设计了铁路桥梁用BG87高强钢绞线盘条,通过轧制控冷工艺、静态CCT曲线的测定、拉伸试验以及金相检验等手段研究了其力学性能、显微组织以及拉拔性能。结果表明:开发的高碳钢盘条强度、组织性能良好,可以满足2 300 MPa级预应力钢绞线的使用要求,而且产品在昌景黄高速铁路试验桥上得到应用,实现了国内2 300 MPa高强钢绞线产品的突破。

关键词: 高强钢绞线; 铁路桥梁; 盘条
中图分类号: TG356.45 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2021)02-0062-04
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2021.02.016

Development of 2 300 MPa Grade High Strength Steel Strand Wire Rod for Railway Bridge

Zhao Xiao-min[1], *Su Yong-hua*[2], *Shi Long*[2], *Tao Ya*[1], *Lv Gang*[1], *Hu Bo*[3]

(1. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *China Academy of Railway Sciences Corp., Ltd., Beijing* 100081, *China*;
3. *Long Products Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The BG87 high strength steel strand wire rod for railway bridge is independently designed by Baotou Steel as well as its mechanical properties, microstructure and drawing property are studied through such means as controlled cooling process of rolling, determination of static CCT curve, tensile test and metallographic examination. The results showed that the strength and structure property of developed high carbon steel wire rod were good so that it could meet request for utilization of 2 300 MPa grade pre-stressed steel strand. Moreover, the product is applied on experimental bridge of Nachang-Jingdezhen-Huangshan high-speed railway so that a breakthrough of domestic 2 300 MPa high strength steel strand products is achieved.

Key words: high strength steel strand; railway bridge; wire rod

国内外应用较普遍的预应力钢绞线的强度级别有1 570 MPa、1 720 MPa、1 860 MPa[1-2],但随着高速公路、铁路、桥梁等建设项目的高速推进以及大跨度斜拉桥、悬索桥等索承式桥梁向着更大跨度方向

* 收稿日期:2021-01-13
作者简介:赵晓敏(1986-),女,内蒙古赤峰市人,硕士,高级工程师,现从事线棒材新产品研发工作。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

发展，现有强度级别的钢绞线满足不了桥梁强度的要求，需要开发推广更高强度级别的钢绞线。近年来，我国宝钢、武钢、沙钢、澄钢、邢钢、青钢等也生产超高强度高碳钢盘条，代表钢种有 B87MnQL、B90SiMn、QS87Mn、QS92Mn、SWRS82B、SWRH82BCr 等，但都是应用在桥梁悬索桥、斜拉索桥上[3]，较少应用在钢绞线铁路桥梁结构桥上。预应力钢丝和钢绞线强度级别提升可减轻自重，降低产品的用量，最大限度的减少工作量。桥梁缆索和建筑工程采用的预应力钢丝和钢绞线向超高强度级别发展将是一种必然趋势。包钢与中国铁道科学研究院联合开发了 2 300 MPa 级铁路桥梁用高强钢绞线用钢，通过转炉冶炼、连铸生产，实现了批量工业试制，制作的钢绞线在试验桥上得到应用，为 2 300 MPa 级铁路桥梁用高强钢绞线下一步推广工作奠定基础。

1　合金成分设计

国内部分高强钢绞线用盘条采用高碳、高硅来提高盘条的强度，主要是为了减少盘条拉丝后镀锌或者稳定化处理时其强度的热损失。也有高强钢绞线采用增加 Cr 的含量来保证盘条的强度，主要是为了更易形成稳定的碳化物，通过析出强化、固溶强化，提高其渗透性，提高钢丝的回火抗力，减少其强度的热损失。还有其他钢厂的高强钢绞线用盘条采用加入微量 V、Cr、Ti、Ni、B、Nb 等合金元素进行微合金化，主要目的是通过晶粒细化，提高盘条的强韧性。由于 Cr、V 是强碳化物形成元素，使钢的连续冷却转变曲线右移，存在于渗碳体片层中形成合金渗碳体，能有效地降低晶界 C 含量从而有效抑制网状渗碳体的产生[4]，因此包钢设计的 2 300 MPa 级高强钢绞线用钢采用 Cr、V 强化，从而提高盘条的强度和塑性。

2　试验材料与方法

根据以上化学成分的强化机理的设计思路，自主设计了 BG87 高强钢绞线用钢的化学成分，如表 1 所示。经过 150 t 顶底复吹转炉冶炼，采用高拉碳工艺，出钢终点成分 w[C] 含量不小于 0.10%，钢水温度 1 610 ~ 1 630 ℃。经过炉外精炼、VD 真空脱气浇注成铸坯，要求钢水 P、S 含量控制较低，保证了钢水的洁净度，再经过摩根五代轧机轧制成直径为 Φ14 mm 的盘条，对成品盘条的力学性能、金相组织、拉拔性能以及钢绞线抗拉强度进行分析讨论。

表 1　BG87 钢绞线用钢化学成分(质量分数)　　%

C	Si	Mn	P	S	V	Cr
0.85 ~ 0.95	≥0.10	≥0.30	≤0.020	≤0.020	≤0.15	≤0.15

3　试验结果与讨论

3.1　盘条力学性能

采用 Formastor - FⅡ全自动相变仪测定了该钢种的静态 CCT 曲线，将试样以 10 ℃/s 的加热速度加热到 1 000 ℃，保温 5 min，然后分别以 5.0 ℃/s、8.0 ℃/s、10.0 ℃/s、20.0 ℃/s 的速度冷却至室温，不同冷却速度得到的显微组织见图 1，试验结果表明轧后冷速在 10.0 ℃/s 时会出现马氏体组织，因此在斯太尔摩线冷却速度不能超过 10.0 ℃/s。轧制采用低温轧制，控制开轧温度 1 000 ~ 1 040 ℃，精轧入口温度为 910 ~ 940 ℃，吐丝温度控制在 840 ~ 860 ℃，轧后采用快速冷却，结合 CCT 曲线制定了轧后控冷工艺，将 1—8 架风机开启 100% 风量，9—10 架风机关闭，保温罩全开。为了研究盘条性能的稳定性，工业试制的盘条采用两种斯太尔摩线辊道速度进行试制，分别为工艺一起步辊道速度为 0.77 m/s，工艺二起步辊道速度为 0.55 m/s，具体工艺如表 2、表 3 所示。对两种工艺热轧状态和时效状态的盘条进行拉伸试验，检验的力学性能见表 4。

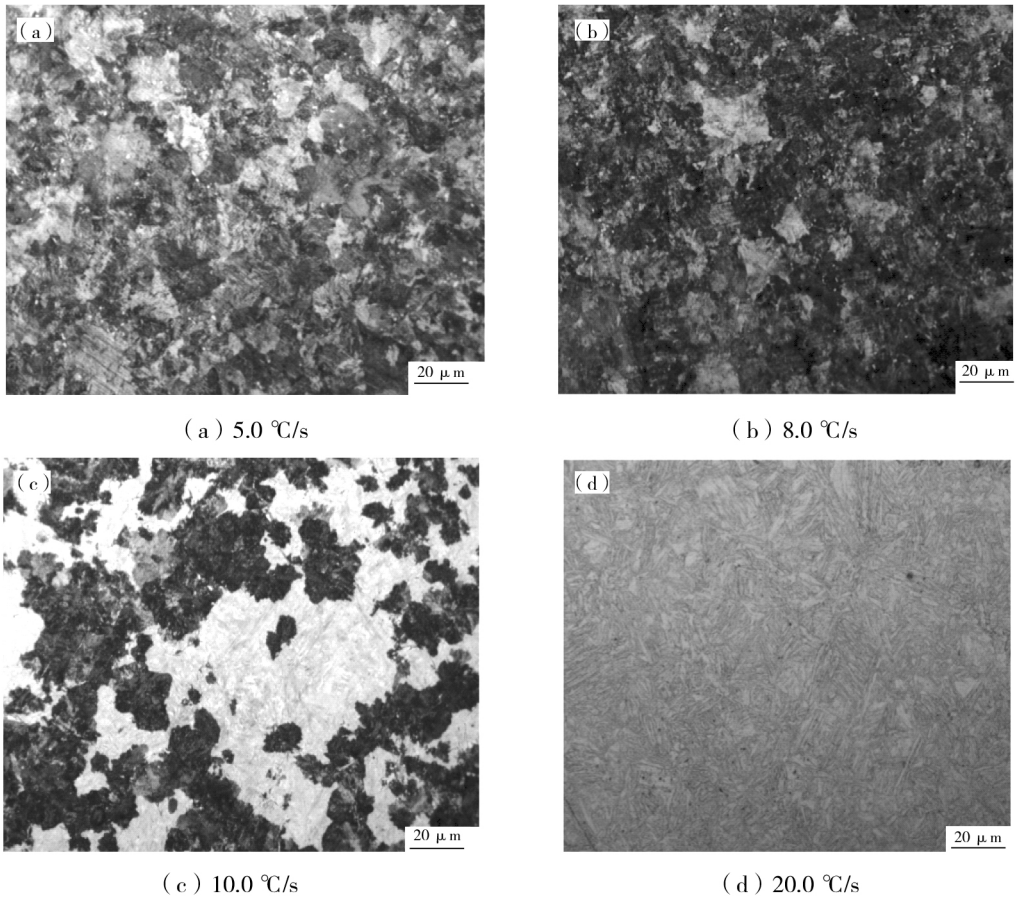
表 2　轧制控冷工艺制度

钢种	规格/mm	轧制温度/℃			斯太尔摩线设定	
		1#架出口温度	精轧入口温度	吐丝温度	风机数量及风机开启度	保温罩
BG87	Φ14	1 020 ± 20	930 ± 20	850 ± 10	1—8 架风机 100% 风量，9—10 架风机关	开

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表3 斯太尔摩线辊道速度 m/s

编号	入口	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	出口
工艺一	0.71	0.81	0.93	0.93	0.88	0.88	0.75	0.66	0.60	0.70
工艺二	0.55	0.62	0.70	0.79	0.71	0.65	0.60	0.56	0.49	0.55



(a) 5.0 ℃/s (b) 8.0 ℃/s

(c) 10.0 ℃/s (d) 20.0 ℃/s

图1 BG87高强钢绞线用盘条不同冷速下得到的显微组织

表4 盘条热轧状态和时效后力学性能

工艺	状态	抗拉强度/MPa	面缩率/%
工艺一	热轧态	1 415	22
	热轧态	1 406	21
	时效后	1 435	31
	时效后	1 405	29
工艺二	热轧态	1 423	21
	热轧态	1 436	20
	时效后	1 421	29
	时效后	1 431	30

3.2 金相组织

根据GB/T 13299标准进行金相组织评定，金相试样采用4%硝酸酒精溶液腐蚀剂进行腐蚀，经过腐蚀后，用LEICA DMIRM型光学显微镜观察BG87高强钢绞线盘条的金相组织(见图2)，右图是在500倍视野下观察组织，主要为索氏体+少量珠光体，平均索氏体化率为92%，一般钢绞线用盘条母材脱碳层深度要求不大于公称直径为1.0%，检测盘条的脱碳层深度约80~103 μm，可以满足标准要求。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

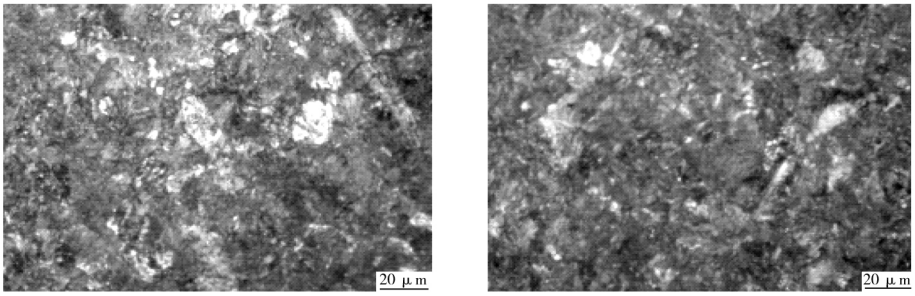


图 2　87A 高强钢绞线用盘条金相组织

3.3　拉拔性能

轧制生产的盘条在国内知名绞线厂进行试用，用户良好的拉拔工艺控制可以减小钢丝的强度波动，该用户工艺：酸洗→磷化→硼化→拉拔→捻股→稳定化处理→打捆，拉拔道次为 9 道次。经过拉拔后，工艺一半成品黑丝抗拉强度为 2 275 ~ 2 369 MPa，工艺二半成品黑丝抗拉强度 2 366 ~ 2 465 MPa，断后伸长率都大于 3.0%。半成品黑丝试验结果表明工艺一的半成品丝性能富余量较小，存在低于目标值 2 300 MPa 的现象，工艺二较佳，力学性能满足目标要求，富余量较理想。拉拔后捻股，稳定化处理后检验钢绞线的力学性能，成品钢绞线抗拉强度为 2 347 ~ 2 367 MPa，成品钢绞线应用在时速 350 公里的昌景黄高速铁路试验桥上，桥梁结构为 1 孔 32 m的简支箱梁，并开展了破坏性张拉试验，预应力值、伸长值都能满足设计要求，最大锚外张拉应力达到 2 300 MPa，而且张拉后钢/铸铁锚垫板状态正常，锚下区域和锚固传力区域混凝土受力均正常，实现了 2 300 MPa 级别高强钢绞线的突破。

4　结论

(1) 包钢自主设计的 BG87 铁路桥梁用高强钢绞线化学成分体系完全满足抗拉强度 2 300 MPa 以上的性能要求，实现了国内最高强度钢绞线的突破，为国内高速铁路桥梁用钢绞线产品做出贡献。

(2) 通过工业试制及试验结果分析得到，采用控冷工艺二生产的高碳、高硅钢绞线用盘条各项性能最优。

参　考　文　献

[1] 冷建兴. 高强预应力钢绞线试验研究 [J]. 实验力学，1998，1(13)：126 – 130.

[2] 张正基，周鸣涛，张伟君. 2 000 MPa 混凝土用预应力钢绞线的开发应用 [J]. 金属制品 2004，6(30)：9 – 10.

[3] 叶觉明，姚志安，余景绣，等. 桥梁缆索用热镀锌钢丝的性能要求与加工工艺 [J]. 金属制品，2009，35(2)：4 – 8.

[4] 胡磊，王雷，麻晗. 超高强度预应力钢丝及钢绞线用盘条的开发研究 [J]. 钢铁钒钛，2016，1(37)：142 – 147.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net