低屈强比桥梁钢 Q345qD 开发与生产

敬 鑫,董 磊,陈建华

(内蒙古包钢钢联股份有限公司稀土钢板材厂,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 文章主要阐述了利用包钢稀土钢板材厂先进的炼钢和轧钢装备,通过采用中碳 + 高锰 + 微合金化的成分设计和合理控轧控冷工艺措施,找到了生产桥梁钢产品使屈强比≤0.84 的工艺方法,形成了可批量生产具有良好的成型性能、焊接性、低温韧性特点的桥梁钢。

关键词: 桥梁钢; 屈强比; 控制轧制; 控制冷却

中图分类号: TG142.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009 - 5438(2018)05 - 0047 - 04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2018.05.014

Development and Production of Bridge Steel Q345qD with Low Yield Ratio

Jing Xin, Dong Lei, Chen Jian - hua

(*Rare Earth Steel Plate Plant of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: In the article, it is discussed the technology for producing the bridge steel products with the yield ratio no more than 0.84 is found out with the advanced steelmaking and steel rolling equipment of Rare Earth Steel Plate Plant of Baotou Steel through adopting the composition design of medium carbon + high manganese + microalloying as well as reasonable technology and measure of controlled rolling and controlled cooling. As a result, the bridge steel with such characteristics as good formability, weldability and low temperature toughness could be produced with volume production.

Key words: bridge steel; yield ratio; controlled rolling; controlled cooling

近年来,随着我国交通业的快速发展和大型钢结构桥梁向大跨度、高强度、全焊结构方向发展,同时为缓解交通压力,加快城际交流,我国大力修建跨江大桥和跨海大桥。因此,对桥梁用钢的性能提出了更高要求。

1 产品技术难点识别

为了适应和满足桥梁钢发展的要求,国家标准更新至 GB/T 714—2015[1],新标准与 GB/T 714—2008[2] 相比,对 Q345qD - 20 ℃冲击值由 47 J 提高至 120 J,加强了对元素 P、S、N 的控制,增加了对气体 H≤0.000 2%和屈强比≤0.84 的要求。因此,在产品的成分和工艺设计时,既要保证产品的力学性能、屈强比要求和较高的低温冲击要求,同时又要保证钢水的纯净度和气体含量,以满足桥梁钢产品的最终要求。

2 产品成分和生产工艺的设计

2.1 产品成分

根据桥梁钢产品标准 GB/T 714—2015[1] 的要

收稿日期: 2018 - 03 - 12

作者简介: 敬 鑫(1984 -),男,内蒙古包头市人,工程师,现从事新产品研发工作。

求,同时结合与桥梁钢终端客户前期的技术交流情况,对产品成分体系设计思路是:

(1) C 含量的变化对钢的屈服强度影响小于抗拉强度的影响,在保证产品成型和焊接性能的前提下,适当提高 C 的含量有利于降低钢的屈强比。

(2) Mn 元素的主要作用是降低奥氏体转变温度,细化铁素体晶粒,提高钢的强度和韧性,还可以消除硫对钢材的影响。特别是满足焊接要求的高锰钢种,其 Mn/C 比值越大,钢的低温韧性就越好。Mn 含量应控制上限在 1.30% ~1.50% 为宜。

(3) 为了保证产品低温冲击性能,添加了少量的 Nb、Ti 元素。Nb 可以通过细晶强化和析出强化提高钢的强度,Nb 可提高奥氏体的再结晶温度,即在较高的温度下实现奥氏体非再结晶区轧制,从而可使轧件在较高的温度下完成轧制变形,同时得到细小的相变组织。此外部分 Nb 在铁素体区析出,在钢中可以与碳、氮结合成碳化物、氮化物及碳氮化合物。Ti 的化学活泼性很大,易与钢中碳、氮、氧、硫结合形成化合物,有效地阻止了钢坯加热和钢带焊接热影响区的晶粒异常长大,同时还能使钢中硫化物夹杂变性,改善钢带各向异性。这些化合物具有在高温时溶解固溶,低温时析出的特性,因此可以在钢坯加热时阻碍原始奥氏体晶粒长大,在轧制过程中抑制再结晶及再结晶后的晶粒长大,在低温时起到析出强化作用[3]。综合考虑产品要求的力学性能、低温冲击韧性,同时还要保证较低的屈强比,产品的化学成分设计见表 1。

表 1 Q345qD 化学成分设计(质量分数) %

元素	C	Si	Mn	P	S	Nb + Ti	N	H
标准要求	≤0.15	0.15 ~0.40	1.20 ~1.70	≤0.020	≤0.006	≤0.060	≤0.008 0	≤0.000 2
成分设计	≤0.14	0.18 ~0.28	1.30 ~1.50	≤0.015	≤0.005	≤0.040	≤0.006 0	≤0.000 2

2.2 生产工艺设计

2.2.1 炼钢工艺设计

稀土钢板材厂炼钢生产线包括一套 KR 铁水脱硫预处理系统,通过添加脱硫剂和机械搅拌的方式降低入炉铁水中的硫含量(深脱硫 w[S] ≤ 0.005%);两座 240 t 顶底复吹转炉;两座 260 t 钢包精炼炉,采用带炉压控制的水冷炉盖,有利于保证炉内还原气氛,提高二次脱硫率和合金成分的收得率以及命中率;两台双流板坯连铸机,配备钢包下渣检测、动态轻压下等领先技术。先进的设备、精确的控制为冶炼优质铸坯奠定了基础。为了保证钢质纯净度和气体含量,具体工艺路线设计为:KR 脱硫→转炉→LF 炉→RH 炉→板坯连铸→堆垛冷却。

2.2.2 热轧工艺设计

包钢 2 250 mm 热轧生产线采用世界先进的 TMEIC 控制系统,主要机械设备和关键技术由德国 SMS 提供。具体的工艺流程为:板坯经加热→一次除鳞→定宽→二辊可逆轧制(附立辊)→四辊可逆轧制(附立辊)→飞剪切头尾→精轧除鳞→七机架精轧机连续轧制→加密型层流冷却→卷取成卷→打捆→称重→喷号→入库。

(1) 加热工艺。制定合理的加热温度和加热时间是非常重要的,一方面要保证奥氏体成分均匀且晶粒度适中,目的是保证最终产品组织均匀性。另一方面要考虑微合金元素的固溶,微合金元素的固溶需要一定的温度和时间。因 Q345qD 含 Nb、Ti 等微合金元素,钢中的碳氮化合物析出温度 750 ℃,如果装炉温度较高,则碳氮化合物大量析出,在加热过程中,碳氮化合物不能固溶于奥氏体中,在边界处形成裂纹源,坯料采用冷装方式入炉,一方面保证下线坯料可以进行表面的检查与清理,保证坯料表面质量;另一方面采用冷装方式入炉,加热工序中可以保证氮化物在炉时间内充分固溶。同时,为保证坯料加热后温度的均匀性和轧制过程中较低的轧制变形抗力,并结合微合金元素碳氮化合物的完全固熔温度(≥1 150 ℃),确定钢坯的最高加热温度为 1 200 ~1 250 ℃,在炉时间大于 200 min。

(2) 轧制工艺。

粗轧区域工艺:使用两阶段轧制,轧制模式为“3 +3”模式,采用了再结晶区控制轧制工艺,在再结晶区域轧制时,利用粗轧区域设备优势,在高温区通过大变形量的方式以增加奥氏体再结晶数量,使得晶粒充分再结晶,以达到细化奥氏体晶粒的目的,控制累积形变量≥70%,粗轧温度控制范围:1 050 ~1 100 ℃。精轧区域工艺:采用了未再结晶区控制轧制工艺,此阶段不再发生奥氏体再结晶过程,

通过合理的变形量和终轧温度来积累畸变能和形变位错，为材料组织转变奠定基础。通常，奥氏体的畸变能和位错密度越大，增加相变形核点，越易形成细小均匀的组织，提高材料的机械性能[4]。制定精轧开轧温度 1 000 ~ 1 060 ℃、终轧温度≤870 ℃、卷取温度≤640 ℃。同时控制精轧入口原料厚度，控制压缩比。层流冷却工艺：通过选择前部冷却的层流冷却方式，改变钢带的冷却速度以得到需要的目标卷取温度，以此实现材料强韧性的合理匹配。

3　生产结果分析

3.1　在线离线检验结果对比分析

该大桥终端客户要求产品取样组批重量为 60 t，单卷交货重量在 28 ~ 30 t 左右，也就是要求每生产两卷钢带需要对其中一卷钢带进行在线取样。这样的取样方式一方面影响生产稳定顺行，降低了小时产量；另一方面对产品的生产工艺制度有一定的影响，无法完全保证生产的产品性能符合客户要求。为了保证产品性能、生产工艺制度、生产时稳定顺行，我们采用的是部分钢带在线取样、部分钢带离线取样的方式满足产品检验要求。产品调试期间，我们对比了在线、离线产品的检验结果，同时统计了产品力学性能数据，发现了影响产品正常生产的问题。产品具体数据情况见表 2。

表 2　产品在线、离线力学性能检验结果对比

项目	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	屈强比	延伸率/%	20 ℃全尺寸 KV_2 型冲击功/J
在线	505	601	0.84	28	165
离线	482	587	0.82	31	184
差值	－23	－14	－0.02	＋3	＋19
标准要求	345 ~ 495	≥510	≤0.84	≥21	≥120

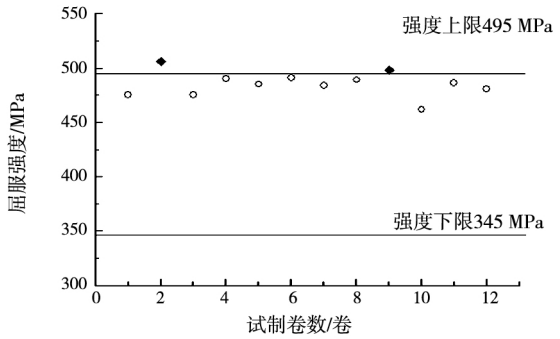


图 1　调试期间屈服强度

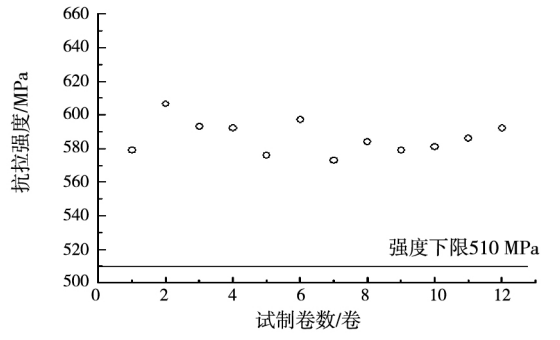


图 2　调试期间抗拉强度

从表 2 中在线、离线检验数据对比可知，屈服强度、抗拉强度、屈强比在线检验值要高于离线检验值；延伸率在线检验值要低于离线检验值。图 1、图 2分别为调试期间屈服强度与抗拉强度统计数据，从图 1、图 2 结果可以看出，在线屈服强度检验数值个别点超出了产品要求的上限。按照产品检验要求，对在线性能不合格的产品需要进行复验，而产品从复验取样到完成检验，时间一般为 3 ~ 4 天。对在线检验性能不合格的产品进行复验，一方面耽误产品交货期，再次取样会对钢卷造成二次伤害；另一方面造成了不必要的人工复检。因此，有必要对在线生产工艺进行优化，以保证在线检验全部合格，对此我们将通过优化产品生产工艺达到优化产品性能，提高生产、检验效率的目的。

3.2　优化生产

在产品调试期间，产品的屈服强度检验数据整体靠近要求上限，部分数据超出要求范围；抗拉强度满足标准要求，延伸率和 －20 ℃冲击检验数据符合标准要求。因此，优化方向主要是降低产品屈服强度，降低产品屈强比，保证在线检验性能符合标准要求。

优化工作包括：提高产品出炉目标温度 10 ℃；在原精轧开轧厚度的基础上降低了 4 ~ 5 mm；提高

精轧终轧温度 10 ℃;提高卷取温度 20 ℃[5];由前部冷却模式优化为后部冷却模式。通过以上优化措施,产品在线检验性能全部合格,具备了批量生产的能力。具体性能统计情况见表 3 与图 3—图 6。

表 3 产品优化后的性能数据情况

项目	拉伸试验				180°弯曲试验 $D=2$ t	−20 ℃全尺寸 KV_2 型冲击功/J
	屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	屈强比 R_{eL}/R_m	伸长率 A_{50}/%		
横向	408 ~ 475	530 ~ 578	0.73 ~ 0.82	31 ~ 39	合格	177 ~ 221
要求	345 ~ 495	≥510	≤0.84	≥21%	合格	≥100

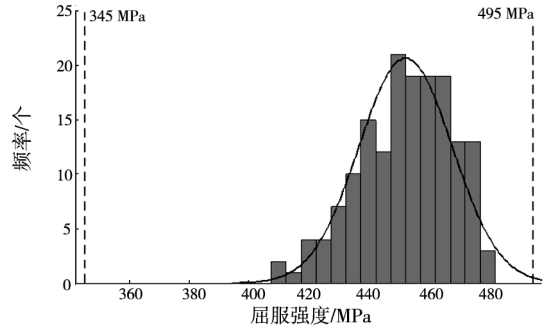


图 3 优化后的屈服强度数据统计

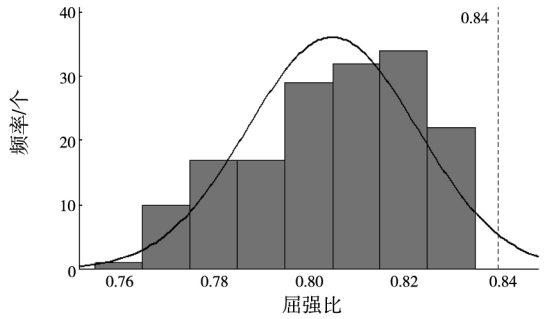


图 6 优化后的屈强比数据统计

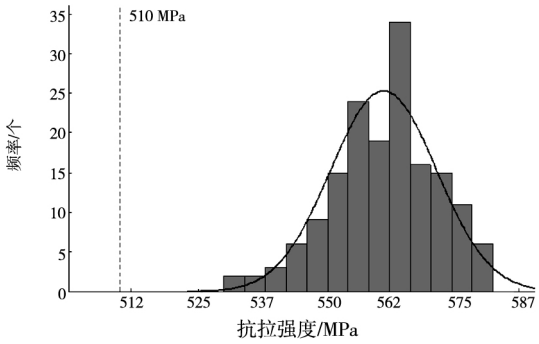


图 4 优化后的抗拉强度数据统计

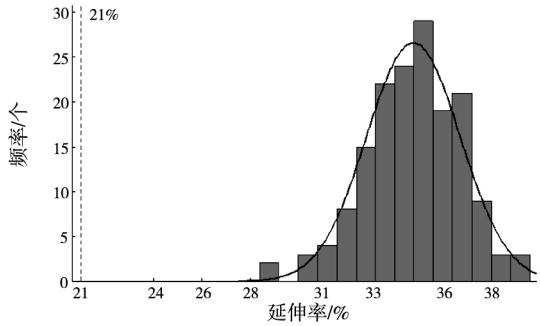


图 5 优化后的延伸率据统计

3.3 金相组织

材料金相组织为均匀分布的铁素体加少量弥散分布的珠光体,铁素体和珠光体晶粒细小,呈现隐约的带状。这是由于在较低的开终轧温度时,晶粒在轧制过程后被压扁拉长,由于微合金粒子的钉扎作用和较低的温度驱动力不足无法再结晶,在道次期间保持这种状态而未再结晶,材料的晶粒度分布在 10 ~ 11 级之间,具体产品厚度为 8.0 mm 的内部组织见图 7、图 8,晶粒度为 10 级。

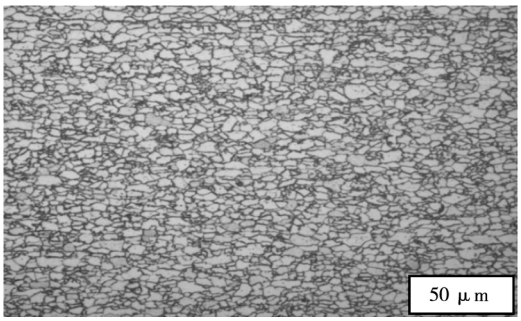


图 7 200 倍 Q345qD 金相组织

(下转第 86 页)

部滞止影响传热引起局部超温变形、氧化[1]，变形、氧化脱落最严重的地方正好发生在燃烧室出口正对釜部位。爬头爬杆的完好与否关系着反应釜壁沥青的运动速度，一旦爬头爬杆损坏将使反应釜壁沥青运行速度降低容易吸收大量的热结渣，使反应釜壁的导热性降低。所以每次倒反应釜的时候都要对爬头爬杆进行检查，发现损坏及时检修更换，以有效降低反应釜壁的结渣程度。清掏完反应釜对其做全面的检查，包括反应釜釜壁的厚度、反应釜釜壁的变形情况、主轴护套与三脚架衬套的间隙和爬头爬杆等。发现有损坏的立即更换，并做好相应记录。

3.4 合理布局测温点

在砌筑新反应釜的时候，合理布局测温点，一般在第一层烟道布置3个测温点，以炉膛的中心线为基准，左右以60°布置第一和第二个测温点，在和第一或第二个测温点成120°布置第三个测温点，这能有效地反应出烟道的实际温度，为合理调节反应釜的温度做依据。

3.5 加强操作

对职工进行培训和教育，提高操作技能和责任心，及时合理地调节炉膛内温度，使反应釜温度在操作规程规定的范围内，减少因反应釜温度过高而发生蠕变变形。

4 结束语

通过采取增加挡火板、增加反应釜、定期倒反应釜、合理布局测温点等措施，有效地解决了改质沥青反应釜使用寿命短的问题，保证了反应釜的安全稳定运行，节约了生产成本，在同类企业中具有推广价值。

参 考 文 献

[1] 张喜来，靳世平，黄素逸. 反应釜釜体变形的CFD分析及改进[J]. 工业加热，2012，41(2)：14－17.
[2] 贾凤翔，侯若明，贾晓滨. 不锈钢性能及选用[M]. 北京：化学工业出版社，2013.
[3] 陈国桓. 化工机械基础(第二版)[M]. 北京：化学工业出版社，2011.
[4] 罗迎社. 材料力学(第一版)[M]. 武汉：武汉理工大学出版社，2001.

(上接第50页)

3.4 产品应用

产品主要用于制作大桥结构件“常规U型肋”，我厂热轧钢带产品Q345qD在终端加工厂经平整矫直、开平、纵剪机组剪切分条，分条钢带经过连续滚压成型，制作成常规U型肋，将应用于国内跨度最大悬索桥大桥。

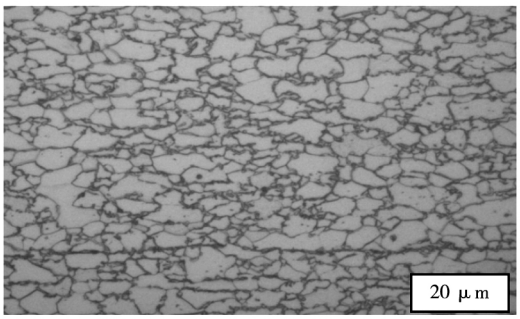


图8 500倍Q345qD金相组织

4 结论

(1) 采用中碳+高锰+微合金化的成分设计原则，合理控制轧制温度和冷却强度，开发的低屈强比桥梁结构用钢Q345qD各项性能均满足标准要求，而且富余量适中。

(2) Q345qD热轧钢带微观组织由细小且均匀分布等轴铁素体和少量弥散分布的珠光体组成，晶粒度级别10～11级。

(3) 通过改变在线热轧生产工艺、冷却模式，使得在线检验性能满足产品要求，在保证了产品性能要求的基础上，实现了批量生产，提高了生产效率。

参 考 文 献

[1] GB/T 714—2015，桥梁用结构钢[S].
[2] GB/T 714—2008，桥梁用结构钢[S].
[3] 杨公本. 桥梁用Q345qD钢板的生产实践[J]. 轧钢，2008，1(S1)：18－21.
[4] 贾单峰. 桥梁钢Q345qD低温力学性能及冲击韧性试验研究[J]. 钢结构，2017，32(5)：41－45.
[5] 宋长荣. 济钢桥梁用Q345qD钢板的生产工艺研究[J]. 金属材料与冶金工程，2009，37(3)：8－11.