



## 10B38 含硼冷镦钢的研制与开发

马立国<sup>1,2</sup>, 郭大勇<sup>1,2</sup>, 王秉喜<sup>1,2</sup>, 高航<sup>1,2</sup>, 张博<sup>1,2</sup>, 潘阳<sup>1,2</sup>

(1 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室, 鞍山 114009; 2 鞍钢集团钢铁研究院, 鞍山 114009)

**摘要:**采用高温拉伸试验方法,研究了不同高温条件下 10B38 含硼冷镦钢的强度和塑性。试验结果表明,在热强性方面,700~950 °C 时抗拉强度由 124.8 MPa 大幅下降到 22.9 MPa;950~1 150 °C 时抗拉强度为 12.7~25.5 MPa。在热塑性方面,700~750 °C 时试验钢的断面收缩率为 56%~72%;800~1 050 °C 时,试验钢的断面收缩率 $\geq$ 75%;1 050~1 150 °C 时,断面收缩率 $>$ 65%。根据以上试验数据,将连铸二次冷却水强度由比水量 1.35 L/kg 优化为 1.25 L/kg,优化后连铸坯裂纹指标有明显降低。测定了 10B38 含硼冷镦钢的过冷奥氏体连续冷却转变曲线,试验结果表明,当冷却速率为 0.2~1 °C/s,试验钢以较软的铁素体组织为主;当冷却速率为 3~10 °C/s,试验钢以珠光体组织为主;当冷却速率为 20、30 °C/s 时,试验钢为板条马氏体+珠光体组织;当冷却速率为 50 °C/s 时,室温时形成完全马氏体组织。试验及生产试制结果表明,降低冷却速率到 0.5~2 °C/s,能获得理想的铁素体和珠光体热轧组织。

**关键词:**10B38 冷镦钢; 高温拉伸; CCT 曲线

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00210 中图分类号: TG142.1

## Research and Development of 10B38 Boron Containing Cold Heading Steel

Ma Ligu<sup>1,2</sup>, Guo Dayong<sup>1,2</sup>, Wang Bingxi<sup>1,2</sup>, Gao Hang<sup>1,2</sup>, Zhang Bo<sup>1,2</sup>, Pan Yang<sup>1,2</sup>

(1 State Key Laboratory of Metal Material for Marine Equipment and Application, AnShan 114009, China;  
2 Ansteel Group Iron and Steel Research Institute, AnShan 114009, China)

**Abstract:** The strength and plasticity of 10B38 boron containing cold heading steel under different high temperature conditions were studied using high-temperature tensile testing method. The results showed that the tensile strength decreased significantly from 124.8 MPa to 22.9 MPa at temperatures ranging from 700 to 950 °C; At 950 to 1 150 °C, the tensile strength was 12.7 to 25.5 MPa. In terms of thermoplastic properties, the cross-sectional shrinkage rate at 700-750 °C was 56%-72%; When the temperature was between 800 and 1 050 °C, the cross-sectional shrinkage rate was  $\geq$  75%; When the temperature was between 1 050 and 1 150 °C, the cross-sectional shrinkage rate was greater than 65%. Based on the above experimental data, the strength of the secondary cooling water in continuous casting was optimized from a specific water content of 1.35 L/kg to a specific water content of 1.25 L/kg. After optimization, the crack index of the continuous casting slab was significantly reduced. The dynamic CCT curves of 10B38 boron containing cold heading steel were measured, The experimental results showed that when the cooling rate was 0.2-1 °C/s, the test steel was mainly composed of softer ferrite structure; When the cooling rate was 3-10 °C/s, the experimental steel was mainly composed of pearlite structure; When the cooling rate was 20 °C/s and 30 °C/s, the structure of the test steel was flat noodles martensite+pearlite; When the cooling rate was 50 °C/s, a complete martensitic structure was formed at room temperature. The experimental results showed that by reducing the cooling rate to 0.5-2 °C/s, ideal ferrite and pearlite hot-rolled structures can be obtained.

**Key Words:** 10B38 Cold Heading Steel; High-temperature Tensile; CCT Curves

10B38 含硼冷镦钢用来生产 10.9 级高强度紧固件,应用于汽车底盘、发动机缸盖、高铁安全连接件、高强度工程机械、摩托车中轴等<sup>[1-3]</sup>。然而,含硼冷镦钢的裂纹敏感性较强,在生产过程中,硼、钛等元素的微小变化容易引起连铸坯的横裂纹、纵裂纹、角部裂纹等质量缺陷问题;同时,轧制及冷却工艺控制不当,盘条易于出现魏氏体或混晶等组织不均匀的现象,造成用户球化退火组织不均匀、拉拔

断裂、打制开裂、热处理性能不达标等质量缺陷。

通过高温拉伸试验、动态 CCT(过冷奥氏体连续冷却转变)曲线的测定与分析,精确控制连铸、轧制工艺,解决了上述两个缺陷问题,成功开发出 10B38 含硼冷镦钢盘条。该盘条组织、力学性能、表面质量等指标符合 GB/T 6478—2015《冷镦和冷挤压用钢》,满足了用户的使用性能要求,并实现批量工业化生产。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

10B38含硼冷镢钢生产工艺:100 t转炉冶炼→LF精炼→280 mm×380 mm大方坯连铸→160 mm×160 mm钢坯连轧→高线轧制。

取280 mm×380 mm大方坯试验钢制备热模拟试样。将试验钢加工成 $\phi 10$  mm×120 mm、两端带有紧固螺纹的圆棒试样,在Gleeble-3800热模拟试验机进行热拉伸试验;将试验钢加工成 $\phi 6$  mm×15 mm的试样,在Gleeble-3800热模拟试验机进行动态CCT试验。10B38含硼冷镢钢化学成分见表1。

表1 10B38含硼冷镢钢的化学成分(质量分数)

| Table 1 Chemical composition of 10B38 boron containing cold heading steel |      |      |        |        |         |      |       |       |
|---|------|------|--------|--------|---------|------|-------|-------|
| %   |      |      |        |        |         |      |       |       |
| C   | Si   | Mn   | P      | S      | B       | Cr   | Ti    | Al    |
| 0.38  | 0.25 | 0.87 | ≤0.015 | ≤0.015 | 0.003 7 | 0.25 | 0.036 | 0.032 |

### 1.2 10B38含硼冷镢钢高温拉伸试验

使用Gleeble-3800热模拟试验机以15 °C/s的加热速率加热到1 350 °C并保温5 min,然后以5 °C/s冷却速率冷却至一定温度T(T为700~1 150 °C每隔50 °C的温度点),保温5 min后,以15 s<sup>-1</sup>应变速率进行高温拉伸试验。

### 1.3 10B38含硼冷镢钢动态CCT试验

使用Gleeble-3800热模拟试验机以8 °C/s的加热速率加热到1 140 °C并保温10 min,然后以7 °C/s冷却速率冷却至1 060 °C进行第1次变形,应变速率为15 s<sup>-1</sup>,变形量为30%;再以8 °C/s冷却速率冷却至950 °C进行第2次变形,应变速率为20 s<sup>-1</sup>,变形量为30%,试验采用轴向压缩,此为第一步通用工艺,即控制轧制部分;

第二步,对10B38含硼冷镢试验钢进行冷却速率的控制,采用0.2、0.5、1、3、5、10、20、30、50 °C/s等9个不同的冷却速率将试验钢冷却至室温,测得试样的温度-膨胀曲线。此为第二步工艺,即控制冷却速率部分;10B38含硼冷镢钢动态CCT试验工艺如图1所示。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 高温拉伸试验结果

采用Gleeble-3800热模拟试验机进行高温拉伸试验,获得了10B38含硼冷镢钢的热强性、热塑性曲线,如图2所示。从图2中可以看出:10B38含硼冷

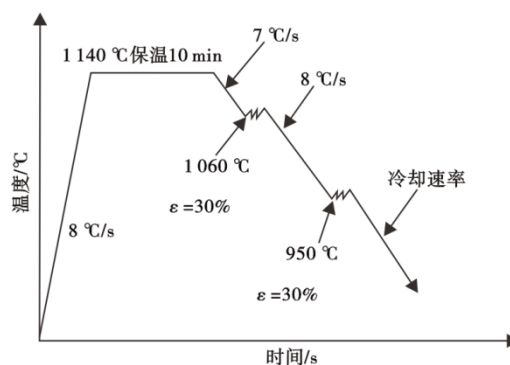


图1 10B38含硼冷镢钢动态CCT试验工艺图

Fig. 1 Dynamic CCT test process diagram of 10B38 boron containing cold heading steel

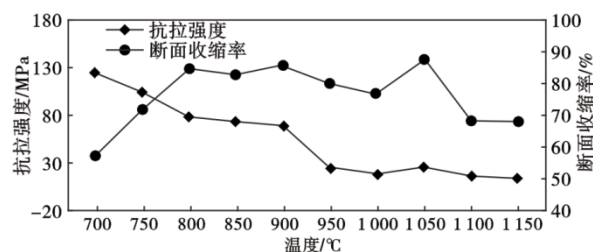


图2 10B38含硼冷镢钢热强性、热塑性曲线

Fig. 2 Thermal strength and thermoplastic curves of 10B38 boron containing cold heading steel

镢钢的热强性随温度降低而升高,温度越低,拉伸应力越大。700~950 °C时抗拉强度由124.8 MPa大幅下降到22.9 MPa;950~1 150 °C时抗拉强度为12.7~25.5 MPa。

在热强性方面,700~750 °C时断面收缩率为56%~72%,是试验钢的第III脆化温度区;800~1 050 °C时断面收缩率≥75%;1 050~1 150 °C时,断面收缩率>65%。800~1 150 °C是试验钢的第II脆化温度区。

10B38含硼冷镢钢存在自由B或溶解在奥氏体中的B元素,能有效提高钢材的淬透性,可以替代Cr、Mn等合金。然而,钢中较多的O、N容易生成氧化物或氮化物,从而降低B对钢的淬透性贡献能力<sup>[4-5]</sup>。B元素也容易在奥氏体晶粒周边形成BN(氮化硼)析出物,使钢的晶粒界面脆化,增加钢材的裂纹敏感性。在含B钢中添加Ti,钢中的N将优先析出TiN或Ti(C,N),析出开始温度一般为1 400 °C以上,远远高出BN的析出温度范围(1 280~1 100 °C)。Ti与钢中的N结合能力更强,能形成稳定的TiN析出物,固定钢中的N元素,优先消耗钢中的N,保证了B对钢的淬透性提升能力<sup>[6]</sup>,尤其保证 $\phi 13$ ~25 mm大

规格盘条淬透性要求。

综上所述,10B38 含硼冷镢钢连铸坯在高温情况下更容易产生裂纹。这就要求在连铸过程中,对二次冷却水强度、矫直段温度等进行精准控制。将原有工艺的比水量 1.35 L/kg 优化为现有工艺的比水量 1.25 L/kg,工艺优化前后的连铸坯质量对比分析见表 2 和如图 3 所示。从表 2 和图 3 可以看出,优化后 10B38 含硼冷镢钢连铸坯裂纹指标有明显降低。

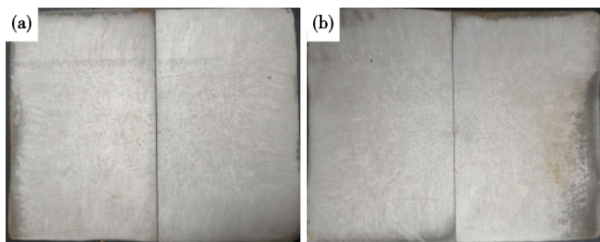


图 3 10B38 含硼冷镢钢 280 mm×380 mm 连铸坯低倍组织:  
(a)优化前,(b)优化后

Fig. 3 Macrostructure of 280 mm×380 mm continuous casting billet of 10B38 Boron-containing cold heading steel: (a) before optimization, (b) after optimization

## 2.2 10B38 含硼冷镢钢动态 CCT 试验

观察不同冷却速率下试验钢的组织形貌,当冷却速率为 0.2 ~ 1 °C/s 时,试验钢以较软的 F(铁素体)组织居多,再加上少部分的 P(珠光体)组织;当冷却速率为 3 ~ 10 °C/s 时,试验钢以较硬的 P 组织居多,再加上少量的 F 组织,并伴有少量的 W(魏氏体)组织。此冷却速率条件下生成的 W 属于异常组织,会使钢的强度,尤其是塑性和冲击韧性显著下降,在盘条轧制过程中,控制冷却速率,减少或消除 W 组织的形成,从而减轻对盘条组织和性能的不利影响;当冷却速率为 20、30 °C/s 时,奥氏体过冷度明显提高,钢中的 C、Mn 等合金原子的扩散速度缓慢,不能进行高温转变,只能以切变的行为发生马氏体转变,试验钢以板条状 M(马氏体)和 P 组织为主,随着冷却速率的提高,组织中的 M 晶粒尺寸逐渐长大,P 晶粒尺寸逐渐变小;当冷却速率为 50 °C/s 时,室温时形成完全 M 组织,M 转变量基本稳定。试验结果

如图 4 所示。

冷却过程中,过冷奥氏体相变经历形核与长大的过程<sup>[7]</sup>。在高温阶段缓慢冷却时,先共析铁素体在奥氏体晶粒边界处形核,随着温度的缓慢降低,碳原子不断扩散,铁素体不断长大。珠光体组织为铁素体+渗碳体相结合的片层状组织,它也是扩散型相变。在过冷奥氏体晶界处满足成分起伏、结构起伏等条件下,渗碳体晶核在奥氏体晶界处依附,并依靠碳原子的扩散不断长大,这样在渗碳体区域出现富碳区,形成片层状的渗碳体带;而在渗碳体两侧出现贫碳区,形成两条片层状铁素体。这样交替、往复进行,形成片层状珠光体组织。在低温阶段进行的马氏体转变,铁原子、碳原子均不能进行扩散,只能以晶格切变重组的方式完成相变,不再是扩散型转变,而是切变型转变<sup>[8-9]</sup>。

根据 9 个不同冷却速率下的相变起始点和终止点温度,结合图 4 中 9 个金相组织形貌分析,在时间-温度坐标中绘制 10B38 含硼冷镢钢在压缩变形后的连续冷却转变曲线,即动态 CCT 曲线,如图 5 所示。从图 5 可以看出,10B38 含硼冷镢钢完全奥氏体化后以不同冷却速率连续冷却时,存在三种相变区:先共析铁素体的析出、珠光体转变、马氏体转变。

对于 10B38 含硼冷镢钢盘条而言,获得均匀的 F+P 组织,可以保障盘条的力学性能指标,同时对用户的球化退火、拉拔、打制工序的顺利生产提供保障。通过动态 CCT 试验结果可以看出,控制 10B38 含硼冷镢钢盘条轧制过程中冷却速率为 0.5 ~ 2 °C/s,可以得到理想的盘条组织,低于或超过这一冷却速率范围,容易造成晶粒粗大、不均等组织缺陷。

## 3 工业生产试制及应用

根据热模拟试验获得的热强性、热塑性曲线,对炼钢、连铸生产过程进行精确控制,降低二次冷却水强度,将原来的强冷优化为中强冷,生产出高质量连铸坯。采用动态 CCT 曲线测得的试验数据,控制精轧和吐丝温度;加强对轧制过程中盘条的表面质量控制,减少表面折叠、划伤、耳子等缺陷<sup>[10-11]</sup>,进一步降低辊道速度的同时,通过加盖保温罩、减少风机送风量等措施改善冷却线上的保温效果,控

表 2 10B38 含硼冷镢钢连铸坯低倍组织检验结果

Table 2 Macrostructure inspection of 10B38 boron containing cold heading steel continuous casting billets

| 工艺  | 中心疏松/级 | 中心偏析/级 | 缩孔/级 | 角部裂纹/级 | 皮下裂纹/级 | 中间裂纹/级 | 中心裂纹/级 | 等轴晶率/% |
|-----|--------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 优化前 | 0.5    | 1.0    | <0.5 | <1.0   | 1      | 1      | 0      | 27     |
| 优化后 | 0.5    | 1.0    | 0    | 0      | 0      | 0      | 0      | 23     |

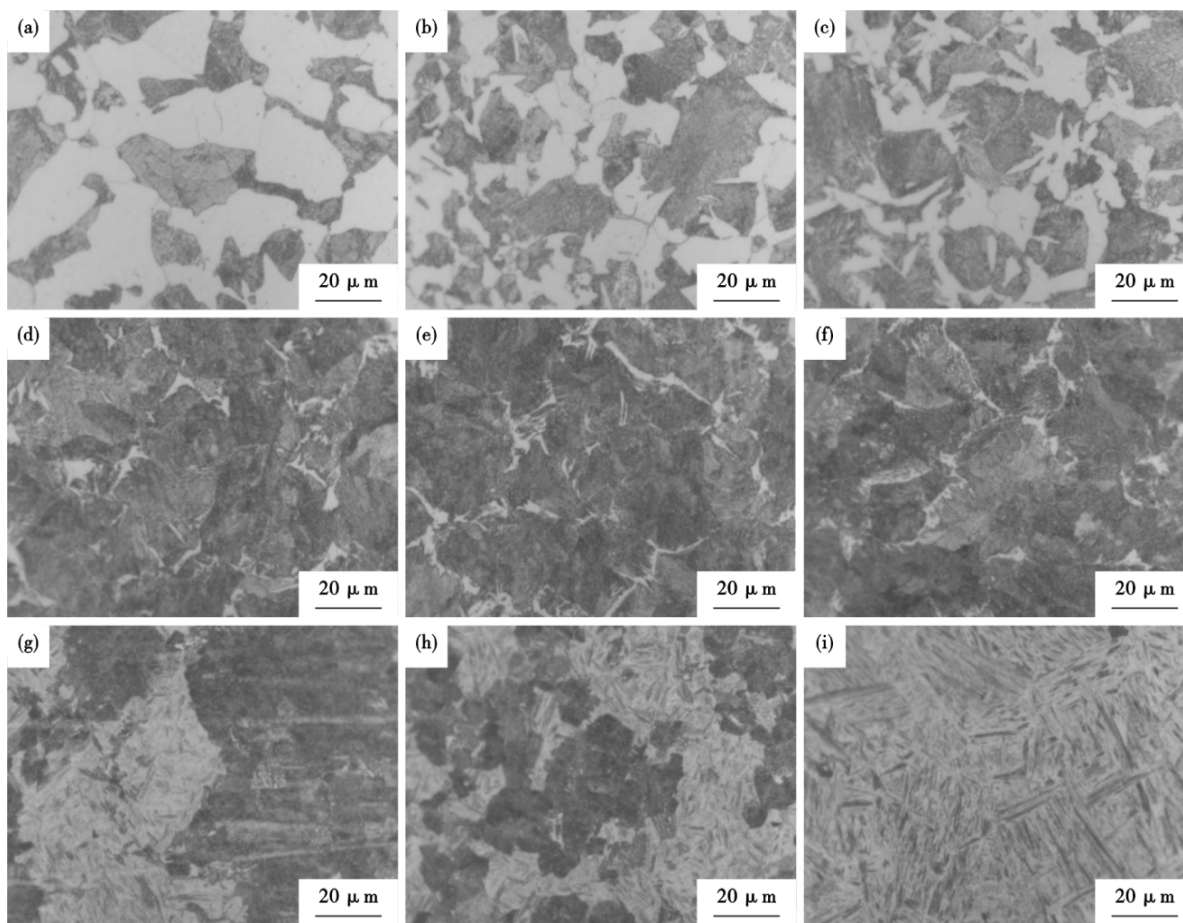


图4 不同冷却速率10B38含硼冷镢钢的显微组织:(a)0.2 °C/s, (b)0.5 °C/s, (c)1 °C/s, (d)3 °C/s, (e)5 °C/s, (f)10 °C/s, (g)20 °C/s, (h)30 °C/s, (i)50 °C/s

Fig. 4 Microstructure of 10B38 boron containing cold heading steel at different cooling rates : (a)0.2 °C/s, (b)0.5 °C/s, (c)1 °C/s, (d)3 °C/s, (e)5 °C/s, (f)10 °C/s, (g)20 °C/s, (h)30 °C/s, (i)50 °C/s

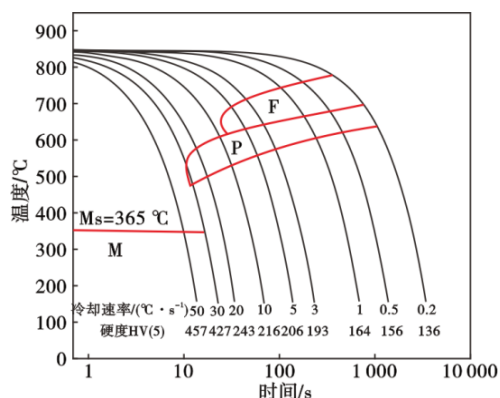


图5 10B38含硼冷镢钢动态CCT曲线

Fig. 5 Dynamic CCT curves of 10B38 boron containing cold heading steel

制盘条在辊道上的冷却速率为0.5~2 °C/s。最终,获得盘条组织为铁素体+珠光体,如图6所示。经过多轮工业试制,盘条的化学成分及力学性能结果分别见表3、表4;盘条满足用户生产10.9级紧固件的要求。

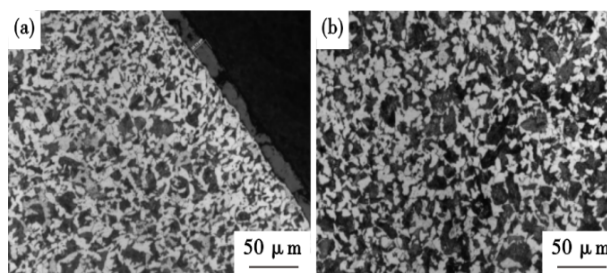


图6 10B38含硼冷镢钢φ16 mm盘条组织:(a)边部,(b)心部

Fig. 6 Microstructure of φ16 mm 10B38 boron containing cold heading steel : (a) edge part, (b) core part

表3 10B38含硼冷镢钢的化学成分(质量分数)

Table 3 Chemical composition of 10B38 boron containing cold heading steel

| 项目  | C    | Si   | Mn   | P     | S       | B       |
|-----|------|------|------|-------|---------|---------|
| 最大值 | 0.40 | 0.26 | 0.79 | 0.023 | 0.010 0 | 0.002 9 |
| 最小值 | 0.36 | 0.19 | 0.67 | 0.009 | 0.002 0 | 0.001 7 |
| 平均值 | 0.38 | 0.22 | 0.73 | 0.016 | 0.004 9 | 0.002 3 |

表 4 10B38 含硼冷镦钢盘条的力学性能

Table 4 Mechanical properties of 10B38 boron containing cold heading steel

| 直径规格/mm | 抗拉强度/MPa | 伸长率/% | 断面收缩率/% | 1/2冷顶锻 |
|---------|----------|-------|---------|--------|
| 8       | 627.0    | 23.4  | 48.0    | 合格     |
| 14      | 650.7    | 19.6  | 38.1    | 合格     |
| 18      | 637.2    | 18.7  | 36.5    | 合格     |
| 22      | 632.8    | 17.8  | 32.2    | 合格     |
| 24      | 627.4    | 15.6  | 30.4    | 合格     |

### 4 结论

(1) 研究了不同高温条件下 10B38 含硼冷镦钢的强度、塑性。试验结果表明,在热强性方面,700~950 °C时抗拉强度由 124.8 MPa 大幅下降到 22.9 MPa; 950 ~ 1 150 °C时抗拉强度为 12.7 ~ 25.5 MPa。在热

塑性方面,700 ~ 750 °C时断面收缩率为 56% ~ 72%; 800 ~ 1 050 °C时断面收缩率≥75%; 1 050 ~ 1 150 °C时断面收缩率>65%。将连铸二次冷却水强度比水量由 1.35 L/kg 优化为 1.25 L/kg,优化后连铸坯裂纹指标有明显降低。

(2) 测定了 10B38 含硼冷镦钢的动态 CCT 曲线,结果表明,当冷却速率为 0.2 ~ 1 °C/s,试验钢以较软的铁素体组织为主;当冷却速率为 3 ~ 10 °C/s,试验钢以珠光体组织为主;当冷却速率为 20、30 °C/s 时,试验钢为板条马氏体+珠光体组织;当冷却速率为 50 °C/s 时,室温时形成完全马氏体组织。

(3) 通过工业试制的控轧控冷,降低冷却速率到 0.5 ~ 2 °C/s,盘条获得了理想的铁素体和珠光体均匀混合组织。

### 参考文献

[1] 乔 淞. 低成本高强度含硼冷镦钢盘条研发[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2017: 7-16.

[2] 吴锦圆. 《汽车紧固件用冷镦钢盘条》标准浅析[J]. 冶金标准化与质量, 2023, 61(2): 13-16.

[3] 陈修君, 毕 胜, 周伟基, 等. 10B21 冷镦钢冶炼工艺优化实践[J]. 特殊钢, 2022, 43(4): 63-65.

[4] 肖广阔, 韩鹏龙, 孙晓林, 等. 10B21 含硼冷镦钢轧后结疤成因分析及工艺改进[J]. 特殊钢, 2022, 43(5): 39-42.

[5] 李 敏, 杜 帅, 李 颖, 等. 22MnB5 高强度板热塑性及断裂行为[J]. 塑性工程学报, 2022, 29(10): 202-207.

[6] 陈继平, 胡学文, 钱健清. 高耐蚀型耐候钢 S450EW 高温热塑性研究[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(10): 166-172.

[7] 吕红英, 周旭东, 陈学文. QP980 钢 CCT 曲线的测定[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(4): 139-144.

[8] 元亚莎, 石如星, 元 莎, 等. 55NiCrMoV7 钢的过冷奥氏体连续冷却转变曲线[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(3): 114-119.

[9] 阮士朋, 赵爱民, 崔 娟, 等. 硼微合金化中碳冷镦钢 10B33 的连续冷却转变行为[J]. 金属热处理, 2016, 41(9): 6-9.

[10] 孙振宇, 唐雪峰, 王洪涛, 等. 小方坯含铝冷镦钢水口结瘤分析与控制[J]. 鞍钢技术, 2020(6): 43-46.

[11] 张 欢, 尚俊男, 安绘竹, 等. 鞍钢 φ23.0 mm 冷镦钢盘条表面缺陷原因分析及优化[J]. 鞍钢技术, 2020, 6, 56-64.

欢迎全国冶金、机械、耐材  
及相关行业在《特殊钢》期刊上  
刊登工艺设备和技术、产品研  
发宣传广告