

10.9 级紧固件用热轧 10B33 钢盘条的研发实践

Research and Development Practice of Hot-rolled 10B33 Steel Wire Rod for 10.9-grade Fasteners

供稿|张炜¹, 陆继欢², 赵文渊², 袁建伟¹, 何付春¹, 汪聪³, 张超杰³ / ZHANG Wei¹, LU Jihuan², ZHAO Wenyuan², YUAN Jianwei¹, HE Fuchun¹, WANG Cong³, ZHANG Chaojie³

内容导读

紧固件是机械制造和工程建设中的关键连接件, 10.9 级高强度紧固件对原材料的综合力学性能要求极高。本文围绕含硼冷镦钢 10B33 盘条的工业化生产, 系统阐述了从冶炼到轧制的全流程工艺优化策略。在冶炼环节, 通过“高拉补吹”与“分步脱氧操作”实现精准控氧; 精炼环节重点控制合金加入顺序与喂线时机, 优化成分调控, 促进非金属夹杂物上浮, 提升钢液洁净度。连铸阶段采用恒温恒拉速控制, 结合脉冲磁致振荡、中间电磁搅拌及末端电磁搅拌联合调控, 提高铸坯的组织均匀性。轧制过程中, 严格控制吐丝温度在 $(850 \pm 10)^{\circ}\text{C}$, 并采用延迟缓冷工艺, 将冷却速率控制在 0.7°C/s , 最终获得均匀的铁素体+珠光体组织。用户试用结果表明, 所开发的 10B33 钢盘条具有优良的冷塑性变形能力和稳定的综合力学性能, 各项指标均满足 10.9 级紧固件要求, 确保了产品的高强度、高韧性及稳定的淬透性。

紧固件行业是钢铁工业的重要组成部分, 其发展与钢铁行业的整体趋势紧密相关, 二者相互促进, 共同推动工业的进步与升级^[1]。含硼冷镦钢 10B33 (以下称 10B33 钢) 是一种主要用于冷镦和冷挤压加工高强度紧固件的重要材料, 在紧固件行业广泛用于生产 10.9 级高强度调质型热轧盘条, 主要应用于制造内外六角、法兰、沉头等大变形的螺栓、螺母等紧固件。该钢种的显著特点包括高强度、高韧性、高耐磨损性、高疲劳强度及良好的焊

接性能。由于其优异的性能, 10B33 钢等含硼冷镦钢被广泛应用于汽车轮毂、铁路轨枕、石油钻杆等关键领域^[2]。

在高端紧固件制造领域, 10B33 钢的应用尤为广泛。这主要得益于其微合金化设计, 材料中添加的微量 B 元素能够显著提高淬透性, 使盘条在加工成紧固件并经过热处理后, 具备良好的冷塑性变形能力、稳定的综合力学性能和均匀的淬透性。然而, 由于含硼冷镦钢的微观组织及相变过程较为复杂,

作者单位: 1. 江阴新兴特钢有限公司, 江苏 无锡 214404; 2. 芜湖新兴铸管有限责任公司, 安徽 芜湖 241000; 3. 安徽工业大学冶金工程学院, 安徽马鞍山 243032

其组织与性能的调控仍然是影响 10B33 钢进一步发展和应用的关键技术挑战。柯炜等^[3]对 10B33 钢冷镦开裂原因的分析表明,当盘条的球化退火工艺不良,导致球状珠光体弥散不完全时,容易造成法兰面开裂,裂口呈现斜向 45°开裂形貌。王双双等^[4]在工业生产中发现,含硼冷镦钢 SAE10B33A 在生产沉头内六角螺栓过程中存在一定比例的螺头开裂,通过对开裂螺栓试样和冷镦前成品精线试样分析表明,SAE10B33A 螺栓表面开裂的主要原因是冷镦前精线表面非通条划伤和基体球化组织不良。

针对含硼冷镦钢的性能调控,众多研究人员提出了多种改进方案。邱雪等^[5]开发了在线低温大变形轧制技术,结合梯度冷却控制,有效提高了盘条的塑性;验证实验结果表明,低温轧制后硬度 HV 降低 38,铁素体比例增加 18%,晶粒度提高 1.0 级,球化率提升 0.5 级,显著提高了盘条的冷加工性。刘越表等^[6]采用连铸大方坯供料方式生产的

10B33 冷镦盘条,退火后 1/3 高度比冷顶锻合格率达 100%;进一步采用 900℃ 淬火+500℃ 回火的热处理制度,抗拉强度提高了 383 MPa,满足了用户冷镦生产的需求。

本研究旨在深入分析 10B33 钢的组织与性能调控机制,探索其在高端紧固件制造中的应用潜力,并为相关生产工艺的优化提供理论依据和技术支持。

10B33 钢盘条生产技术要求

化学成分

10B33 钢是在中碳冷镦钢的基础上通过添加微量 B 元素,以显著提升其淬透性能,从而使其在紧固件行业得到广泛应用。为了满足下游客户的使用需求,需要对该钢的化学成分及金相组织进行精细优化,以调整材料的强度和硬度,同时提高其塑性及冷成型性能,使其更适用于冷镦加工。10B33 钢的化学成分控制见表 1。

表 1 实验用 10B33 钢的化学成分(质量分数)

C	Si	Mn	P	S	Cr	B
0.30~0.36	0.10~0.40	0.70~1.00	≤0.030	≤0.030	≤0.20	0.0008~0.0030

尺寸精度要求

10B33 钢盘条作为紧固件生产的关键原材料,通常需经过球化退火、除磷、拉拔、冷镦等一系列加工工序。盘条的尺寸精度是影响其拉拔性能的重要因素之一,对最终精线的表面不圆度及加工硬化等性能具有直接影响。因此,需严格控制盘条的尺寸精度,以确保后续加工的稳定性和产品质量。10B33 钢盘条的尺寸精度要求见表 2。

表 2 10B33 钢盘条的尺寸精度要求 mm

公称直径	允许偏差	不圆度
≤10	±0.20	≤0.35
10.5~15.0	±0.24	≤0.40
15.5~24.0	±0.28	≤0.45

表面质量要求

热轧盘条的表面质量需严格控制,不得存在肉眼可见的裂缝、结疤、外来夹杂、单道或双道耳子及折叠缺陷。如发现上述缺陷,应通过修剪、打磨等手段加以清除,且清除后的缺陷深度 h (从实际尺

寸计算)应≤0.07 mm,修复宽度应≥5 h 。此外,盘条表面允许存在深度≤50 μm 的个别擦划痕和麻点,不影响后续加工性能。

冷顶锻性能要求

为确保热轧盘条的冷镦加工性能,需进行冷顶锻试验。试样经冷顶锻后,其高度应为锻前高度的 1/3,且表面不得出现肉眼可见的裂纹缺陷。

生产工艺控制

冶炼控制

> 产品质量控制

为保证产品质量,满足冶炼优质线材的要求,铁水成分质量分数需满足 $w(\text{Si})\leq 0.70\%$ 、 $w(\text{P})\leq 0.11\%$,渣层厚度≤150 mm,实际生产过程均能满足该条件。

> 冶炼终点成分控制

冶炼终点成分质量分数满足 $w(\text{C})\geq 0.08\%$ 、 $w(\text{P})\leq 0.018\%$ 。出钢时向钢包中加入合金,合金及渣

料加入顺序依次为低氮增碳剂、铝块、合金、石灰、化渣剂，确保钢水进入钢包精炼炉（LF）时的成分质量分数在以下范围内： $w(C)=0.25\%\sim 0.30\%$ 、 $w(Si)=0.10\%\sim 0.18\%$ 、 $w(Mn)=0.68\%\sim 0.74\%$ 、 $w(Cr)=0.11\%\sim 0.15\%$ 、 $w(P)\leq 0.017\%$ 。

➤ 转炉工序控制

转炉工序吹炼全程通氩气，出钢后控制氩气流量，完毕后严禁大翻，以保证炉后渣面微动达到软吹效果；出钢过程加入铝锭 80 kg，同时炉后喂铝线 100~200 m，以确保钢水脱氧效果。

➤ 精炼过程控制

精炼采用 LF 工艺，其过程关键环节包括钢中化学成分控制、精炼终渣成分控制、脱氧控制、喂线处理及软吹。白渣保持时间为 20~25 min，精炼总时长为 40~45 min，炉外软吹时间为 15~20 min，以确保钢液中非金属夹杂物充分上浮^[7]。调渣操作加入石灰 300~500 kg、精炼过程中加入适量铝粒、碳粉（碳化硅）以强化渣面脱氧。根据 LF 初样成分，控制第二样中 $[Al]$ 质量分数为 0.040%~0.055%，避免后期调整铝含量，并确保出站钢水 $w(Als)/w(Al)\geq 85\%$ 。LF 精炼终渣 $w(FeO)+w(MnO)<1.0\%$ ，碱度 $R\geq 3.0$ 。强化精炼前、中期成分调整操作，控制氮含量。精炼白渣后加入钛铁，软吹前 3 min 根据残余 B 含量将其调整至目标范围。

连铸控制

➤ 铸坯脆性区域

研究表明，当断面收缩率低于 60% 时，铸坯的裂纹敏感性显著增加，因此通常将断面收缩率为 60% 时所对应的温度定义为高塑性区和低塑性区的临界塑性温度。国内外研究进一步表明，钢在连铸冷却过程中存在 3 个脆性区，分别为：

第一脆性区（熔点至 1200℃）：该区脆性主要由非金属夹杂物以及 S、P 等对冷镦钢有害的元素在树枝晶处偏析所引起。

第二脆性区（1200~900℃）：该温区内钢材变形行为对变形条件高度敏感，主要受应变速率影响。当应变速率较高时，动态回复与动态再结晶过程受到抑制，位错密度快速累积，晶界处应力集中加剧，从而导致钢的脆化程度随应变速率的增加而

明显加剧。

第三脆性区（900~600℃）：该区的脆性主要是由于 C、N 化合物的析出，以及奥氏体晶界处铁素体薄膜的形成，导致钢材性能下降^[8]。

➤ 连铸工艺

在连铸坯矫直或轧制变形过程中，铸坯温度通常处于 750~1100℃，此温度区间属于高温脆性区。如果温度控制不当或变形条件不合理，极易引发表面缺陷。因此，需要深入研究不同钢种在高温条件下的力学性能，特别是高温热塑性，以优化连铸和轧制工艺，避免在脆性区发生变形，从而降低铸坯缺陷的风险。

为改善铸坯内部质量，在此温度区间需采用弱冷工艺，并结合恒温恒拉速控制，同时采用中间电磁搅拌（M-EMS）、末端电磁搅拌（F-EMS）及脉冲磁致振荡（PMO）组合调控技术。通过降低结晶器比水量及优化二次冷却水强度，可有效提高铸坯的均质化程度，从而改善最终产品质量。借助热塑性曲线分析，可精准指导连铸坯生产工艺，实现不同温度段的精确控制。

➤ 连铸参数控制

连铸工艺需严格控制目标过热度，确保中间包烘烤时间>3.5 h。当钢水过热度超出控制范围（15~45℃）时，需根据实际生产情况适当调整连铸拉速，但每次调整的幅度不宜超过 0.02 m/min，以维持工艺稳定性。

此外，为了提高钢水纯净度，全流程采用氩气保护浇注，具体包括中间包的气体置换、大包及中包的密封保护、确保水口垂直对中及插入液面的深度满足要求^[9]、采用整体式水口和恒温恒拉速浇注工艺。该工艺可有效降低冷镦钢中的气体（O₂、N₂、H₂）含量，减少铸坯角部裂纹及表面裂纹，从而提高产品质量。

➤ 铸坯质量检测

为确保铸坯质量，采用酸洗法进行横截面低倍组织及表面质量检验。酸洗溶液体积比为浓盐酸（HCl）和水（H₂O）按 1:1 混合，加热温度为 70~75℃，铸坯酸洗时间为 15~25 min。酸洗后铸坯的低倍组织见图 1，中心疏松为 0.5 级，一般疏松 0.5 级，无点状偏析、残余缩孔、角部裂纹和中心裂

纹等缺陷，铸坯低倍组织控制良好；酸洗后铸坯的外观见图2，表面氧化皮和保护渣残留等酸洗后未见划痕、夹渣、裂纹等缺陷，铸坯表面质量控制较好，符合高端紧固件生产要求。



图1 铸坯低倍组织



图2 酸洗后铸坯的外观

轧制控制

在不同轧制温度下开展工艺实验时，相对较低的加热温度和开轧温度能够使铸坯的晶粒尺寸均匀且细小。晶粒尺寸减小有助于增大晶界面积，使形核质点增多，从而提高铁素体形核率，因此将开轧温度控制在 $(990\pm 10)^{\circ}\text{C}$ 。轧制过程中，随着精轧温度的变化，铁素体和珠光体的晶粒尺寸也发生变化。通常精轧温度降低，形变能增大，促进形变诱导铁素体相变，使铁素体析出增多，进而细化铁素体和珠光体晶粒尺寸；且晶粒越细小，铁素体体

分数越高，因此将精轧温度控制在 $(900\pm 10)^{\circ}\text{C}$ 。在高速线材轧制过程中，吐丝温度对奥氏体晶粒尺寸起关键作用，通常吐丝温度越低，形核质点越多，铁素体形核率越高，从而使铁素体及珠光体尺寸减小，同时提高铁素体体积分数，因此需将吐丝温度控制在 $(850\pm 10)^{\circ}\text{C}$ 。

利用JMatPro软件对10B33钢进行动态过冷奥氏体连续冷却转变(CCT)曲线模拟(见图3)，测得其相变点，加热过程中珠光体开始转变为奥氏体的温度 $A_{c1}=722.8^{\circ}\text{C}$ ，完全奥氏体化的温度 $A_{c3}=797.9^{\circ}\text{C}$ 。在连续冷却过程中，随着冷速增加，10B33钢的相变产物主要为铁素体和少量珠光体；当冷速较大时，会发生少量贝氏体和马氏体相变。冷却方采用延迟缓冷工艺，通过将低辊道速度、盖保温罩、关闭风机等措施改善和控制盘条的显微组织，并将热轧盘条在斯太尔摩风冷线上的冷却速率控制在 0.7°C/s ，以获得铁素体+珠光体组织。

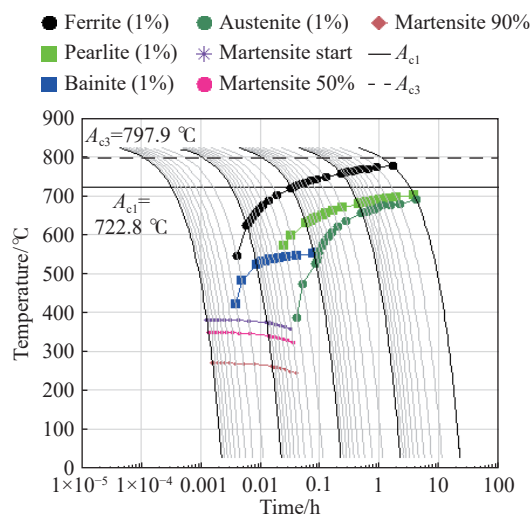


图3 10B33钢的CCT曲线图

产品质量

力学性能

10B33钢盘条的抗拉强度为585~600 MPa，屈服强度为340~365 MPa，断面收缩率为40%~50%，伸长率为25%~28%，冷顶锻1/3性能均合格，盘条横截面硬度值为HRB 81~84。盘条的具体力学性能数据见表3。

表 3 10B33 盘条力学性能

抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	延伸率/ %	断面收缩 率/%	冷顶锻 1/3性能	硬度, HRB
585~600	340~365	25~28	40~50	合格	81~84

盘圆表面质量

盘圆表面检查未发现肉眼可见的裂纹、划伤等缺陷,盘圆外观形貌见图 4;表面氧化铁皮结构较完整,无破碎脱落、氧化气泡等异常。成品盘圆的尺寸满足《热轧圆盘条尺寸、外形、重量及允许偏差》(GB/T 14981—2009)中 B 级精度要求。每批随机抽检 4 支长度为 350~400 mm 的盘圆进行酸洗检验,结果显示盘条表面质量良好,见图 5。



图 4 表面质量合格的盘圆

非金属夹杂物

非金属夹杂物通常分为内生夹杂物和外来夹杂物 2 类。外来夹杂物一般来源于冶炼过程中的二次氧化、连铸卷渣以及钢包耐材的侵蚀等,而内生非金属夹杂物主要包括冶炼脱氧产物和沉淀析出物^[10]。脱氧产物主要是由转炉出钢过程中加入的 Al、Si 等脱氧剂与钢水中的氧结合形成的 B 类、C 类、D 类非金属夹杂物,而沉淀析出物则是在钢液冷却和凝固过程中析出。非金属夹杂物的存在会导致材料疲劳



图 5 酸洗后的盘圆

强度降低、力学性能下降,并可能在冷镦过程中引发开裂,在热处理淬火时也可能导致淬火裂纹的产生。

依据《钢中非金属夹杂物含量的测定 标准评级图显微检验法》(GB/T 10561—2023)标准对盘条的非金属夹杂物进行检测分析,结果表明主要存在 A 类、B 类、D 类非金属夹杂物,具体数据见表 4。

气体含量

气体元素含量是影响含硼冷镦钢洁净度及性能稳定性的关键因素之一。氮元素易与硼结合生成 BN,从而降低钢中有效固溶硼含量,削弱其对淬透性的有利作用;同时,氮含量过高还可能在晶界处形成氮化物,降低钢材的塑性并增加冷镦开裂风险。因此,本研究中将盘条的氮质量分数控制在 $w(N) \leq 60 \times 10^{-6}$ 。氧元素是钢中非金属夹杂物形成的主要来源,氧含量过高会导致氧化物夹杂数量和尺寸增加,不利于冷镦成形性能的稳定性。通过优化冶炼与精炼工艺,盘条的氧质量分数控制在 $w(O) \leq 25 \times 10^{-6}$ 。

为抑制 BN 的生成并保证硼以固溶态存在,采用加 Ti 降 N 的成分设计思路,使钢中 Ti 优先与 N 结合形成稳定的 TiN,从而确保 $w(Ti)/w(N) > 6$ 。盘条的气体含量及 Ti/N 比控制结果见表 5。

表 4 盘条非金属夹杂物检测结果

A 细	A 粗	B 细	B 粗	C 细	C 粗	D 细	D 粗	DS
0.5/0.5	0/0	0/0	0.5/0	0/0	0/0	0.5/0.5	0.5/0.5	0/0
0.5/0.5	0/0	0/0	0/0.5	0/0	0/0	0.5/0.5	0/0.5	0/0

注:非金属夹杂物按 GB/T 10561—2023 标准进行评级,其中 A、B、C、D 及 DS 分别表示硫化物、氧化铝类、硅酸盐类、球状氧化物及单颗粒球状氧化物夹杂;“细”“粗”对应标准评级图中的细小型与粗大型夹杂。表中“x/y”分别为 2 个检验视场的评级值,0 表示未检出。

表 5 盘条的气体含量及其 Ti/N 比

公称直径/mm	w(O)/10 ⁻⁶	w(N)/10 ⁻⁶	w(Ti)	w(Ti)/w(N)
12	13.03	27.68	0.039	14.09
8	13.33	30.12	0.046	15.27
20	14.06	39.81	0.044	11.05
20	10.18	40.14	0.044	10.96

金相组织

冷镦钢 10B33 盘条在生产过程中若控制不当,容易出现魏氏组织,导致球化退火时间延长且效果变差。不良的显微组织会破坏材料内部结构的连续性,加剧变形不均匀性,造成局部区域应力集中,使盘条在冷镦、冷挤压变形时容易发生开裂^[11]。经过工艺实验验证,最终形成完整的生产工艺。目前生产的盘条金相组织均匀,为铁素体+珠光体,晶粒度达到 8~9 级(图 6)。此外,对盘条脱碳层的检验,未发现全脱碳现象,能够满足客户需求。

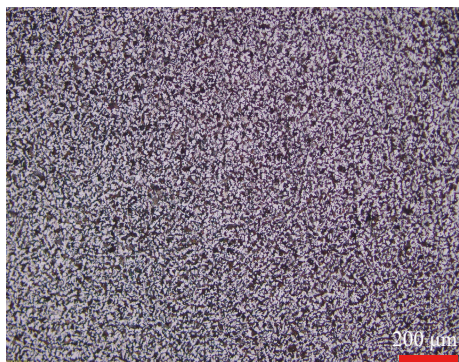


图 6 盘条显微组织

客户使用情况

10B33 钢盘条在客户端经过球化退火、酸洗、磷皂化等预处理,并以 10%~20% 的减面率拉拔后,再用于多工位冷镦加工,制造产品包括法兰螺栓、内六角螺栓、外六角螺栓等。用户反馈显示,该批 10B33 钢冷镦盘条化学成分控制稳定,力学性能稳定,尺寸精度高,冷镦成型性良好,开裂率低。最终生产的紧固件产品性能符合 10.9 级紧固件的各项要求,满足客户需求。

结束语

(1) 通过加 Ti 降 N 的成分设计方法,以优化

产品的淬透性能, $w(\text{Ti})/w(\text{N}) > 6$,实际控制均满足设计要求。

(2) 炼钢过程中采用高拉补吹、分步脱氧操作实现精准控氧;精炼环节通过合理控制合金加入和喂线时机,优化成分并促进夹杂物上浮;连铸环节通过恒温恒拉速、PMO 与 M-EMS 和 F-EMS 组合调控,提高铸坯均质化程度,使铸坯外观和内部质量良好。

(3) 轧制过程中严格控制温度,开轧温度 $(990 \pm 10)^\circ\text{C}$,精轧温度 $(900 \pm 10)^\circ\text{C}$,吐丝温度 $(850 \pm 10)^\circ\text{C}$;吐丝后采用延迟缓冷工艺,冷却速率控制在 0.7°C/s ,最终获得均匀的铁素体+珠光体金相组织,产品性能满足 10.9 级紧固件的各项要求。

参考文献

- [1] 张浩. 湘钢 SAE10B33A 铸坯角部裂纹分析及改善. 中国金属通报, 2019(2): 285
- [2] 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. 金属热处理, 2016, 41(9): 6
- [3] 柯伟, 崔贵博, 李建开, 等. 含硼冷镦钢 10B33 冷镦开裂原因分析. 金属制品, 2024, 50(3): 48
- [4] 王双双, 杨小军. SAE10B33A 螺栓表面开裂原因分析. 铸造技术, 2018, 39(10): 2410
- [5] 邱雪, 李文武. 控轧控冷技术对汽车钢 10B33 免退火性能的改善. 特钢技术, 2024, 30(3): 36
- [6] 刘越表, 吕刚, 屈文利. 10B33 冷镦盘条试制. 包钢科技, 2010, 36(4): 37
- [7] 陈修君, 毕胜, 周伟基, 等. 10B21 冷镦钢冶炼工艺优化实践. 特殊钢, 2022, 43(4): 63
- [8] 王宁涛, 王利军, 郭俊成, 等. 16MnCr5 高温热塑性及连续冷却转变曲线测定及应用. 特殊钢, 2023, 44(4): 120
- [9] 焦魁明, 张亚兵, 赵立, 等. 10B21 微合金钢生产工艺全流程洁净度分析. 连铸, 2022(5): 69
- [10] 孔祥伟, 白云, 张剑锋. 8.8 级非调紧固件用 10B21 盘条研究与开发. 特殊钢, 2024, 45(1): 23
- [11] 陈蓉, 余超, 唐佳勇. 10B33 盘条拉拔脆断原因分析. 河北冶金, 2018(9): 38

作者简介: 张炜(1983—), 男, 甘肃省平凉人, 江阴新兴特钢有限公司生产部部长, 通信地址: 江阴新兴特钢有限公司, 主要研究方向: 钢铁冶金; E-mail: kuangbiao_juan@163.com。