

## 技术发明奖项目公示

**项目名称：高强塑性贝氏体预应力精轧螺纹钢筋制造关键技术和产业化**

**一、提名单位：河北省金属学会**

**二、项目简介：**

本项目属材料学/钢铁冶金领域

**立项背景：**

高强度预应力精轧螺纹钢筋（下简称精轧钢筋）具有连接、锚固简便，张拉锚固安全可靠，施工方便等优点，被广泛地应用到公路、铁路大中跨桥梁、大型水利工程、建筑的连续梁、核电站地锚等工程，是支撑我国重大基础建设的关键结构材料；以 PSB (Pre-stressing Screw Bars) 为代号，并以屈服强度划分等级，例如 PSB1080 表示屈服强度最小值为 1080MPa 的精轧钢筋。项目立项之时，国内外高强度精轧钢筋主要采用 40Si2MnV、40Si2MnMoV、45Si2CrB 等中高碳低合金成分体系钢种，先热轧成型，后离线采用淬火（一次或多次）+中高温回火的调质热处理，使精轧钢筋形成回火马氏体或索氏体组织。然而该技术路线工艺复杂、流程长，且存在大规格精轧钢筋“淬不透”现象，此外在应用过程中存在塑韧性差，屈强比高（抗震性能差）、氢脆敏感性高、安全系数低等问题。

鉴于此，本项目旨在研发高性能低成本超高强度精轧钢筋，以满足我国重大基础建设项目的工程需求，助推我国钢筋产品升级换代、钢铁“减量化”、“双碳”战略的实施。

**主要技术内容及发明点：**

**主要技术内容：**

针对传统高强度预应力精轧螺纹钢筋生产工艺复杂、组织不均匀、塑韧性差、屈强比高等问题，本项目基于 V 微合金化 Mn 系贝氏体钢的相变规律、组织调控、强韧化机制的基础研究，创新性提出低碳 Mn-Si-Cr-V 的成分设计，实现大规格（ $\phi 25\text{mm}-50\text{mm}$ ）精轧螺纹钢筋“空冷自硬”，在热轧后自然冷却条件下形成均匀的贝氏体/马氏体复相组织，并引入薄膜状残余奥氏体和 VC 等不可逆氢陷阱，实现贝氏体精轧螺纹钢筋的强塑性和抗氢脆能力的协同改善；提出非金属夹杂物、成分微观偏析和氢含量化学物理冶金全流程调控技术。实现了  $\phi 25\text{mm}-50\text{mm}$  规格 PSB830、PSB930 和 PSB1080 贝氏体精轧螺纹钢

筋的产业化。

发明点：

(1) 基于 Mn 元素“溶质拖拽效应”原理和 V 微合金化技术，提出低碳 Mn-Si-Cr-V 的成分体系，实现了贝氏体精轧钢筋热轧后“空冷自硬”，保证了大规格精轧钢筋内外组织性能的均匀性；突破了以往只能采用调质处理生产高强度精轧钢筋的制约，解决了传统大规格精轧钢筋合金量高且“淬不透”的问题。

(2) 基于复相组织的细化强化和约束强化原理，提出贝氏体精轧螺纹钢的贝氏体/马氏体复相组织设计思路，同时控制残余奥氏体的含量、形态和稳定性，并引入纳米级 VC 析出，形成了贝氏体精轧螺纹钢的复合强韧化途径，实现贝氏体精轧螺纹钢的强塑性和抗氢脆能力的协同改善；解决了传统马氏体型精轧螺纹钢强塑性不匹配、氢脆敏感性高、安全性差的技术难题。

(3) 提出了贝氏体精轧螺纹钢的非金属夹杂物、成分偏析和氢含量控制技术，通过夹杂物改性降低夹杂物的水平和危害，基于 V 微合金化降低总合金含量，并通过电磁搅拌及优化铸坯拉速实现成分偏析控制，采用高效合金烘烤装置并优化低温回火工艺，降低氢含量；形成了化学冶金和物理冶金的全流程质量控制技术，实现了贝氏体精轧螺纹钢组织性能的稳定化控制。

**技术经济指标：**

实物精轧螺纹钢性能达到：PSB830，屈服强度  $R_{p0.2} \geq 840\text{MPa}$ ，抗拉强度  $R_m \geq 1080\text{MPa}$ ，最大力总伸长率  $A_{gt} \geq 6\%$ ，断后伸长率  $A \geq 10\%$ ；PSB930， $R_{p0.2} \geq 960\text{MPa}$ ， $R_m \geq 1130\text{MPa}$ ， $A_{gt} \geq 6\%$ ， $A \geq 10\%$ ；PSB1080， $R_{p0.2} \geq 1100\text{MPa}$ ， $R_m \geq 1280\text{MPa}$ ， $A_{gt} \geq 6\%$ ， $A \geq 10\%$ ，初始应力  $0.7R_m$  下 1000h 松弛率  $< 4.0\%$ ；获 2019 年中国钢铁工业协会冶金产品实物质量“金杯特优产品”（全国钢筋类产品唯一获奖项目）。

**三、应用情况及应用效果：**

本项目授权国家发明专利 6 项，发表论文 4 篇。开发的 830MPa 及以上级别的贝氏体精轧钢筋先后在京沈铁路、成昆铁路、中老铁路等多个国家重点基础建设项目上应用，服务了我国“一带一路”战略的实施。自 2017 年（近 5 年以来）实现了 PSB830 及以上强度级别的贝氏体精轧钢筋销售量 8.8 万余吨，新增产值 4.66 亿元，新增利税 1.7 亿元。项目提升了承钢钢筋特色优势产业整体技术水平，推动了承德国家高新钒钛

材料产业化基地建设，同时对于推动我国钢铁产品向高品质转型升级，降低钢材合金消耗、实现节能减排也具有重大的意义。

#### 四、主要知识产权和标准规范等目录：

序号	知识产权(标准)类别	知识产权(标准)具体名称	国家(地区)	授权号(标准编号)	授权(标准发布)日期	证书编号(标准批准发布部门)	权利人(标准起草单位)	发明人(标准起草人)	发明专利(标准)有效状态	是否包含河北省完成单位/完成人	所支持创新点
1	发明专利	1080MPa级无碳化物贝氏体/马氏体复相精轧钢筋及生产方法	中国	ZL201711289624X	2020年5月29日	3817602	河钢股份有限公司承德分公司	白瑞国, 白秉哲, 马海峰, 乔国平, 高古辉, 王宝华, 张俊粉, 王立军, 靳刚强	有效	是	创新点1、2和3
2	发明专利	一种贝氏体高强精轧螺纹钢回火热处理设备及其工艺	中国	ZL201710561256.3	2018年7月13日	3000394	河钢股份有限公司承德分公司	靳刚强, 马海峰, 王汝明, 乔国平, 张俊粉, 王立军, 翁玉娟	有效	是	创新点3
3	发明专利	一种1080MPa级贝氏体精轧钢筋及其生产方法	中国	ZL201710423024.1	2019年4月23日	3345021	河钢股份有限公司承德分公司	王立军, 韩春良, 张俊粉, 翁玉娟, 马海峰, 褚文龙, 靳刚强	有效	是	创新点1、2和3
4	发明专利	一种Mn-Si-Cr低碳贝氏体钢、钎杆及其制备方法	中国	ZL201510319377.8	2017年5月3日	2472000	北京交通大学	高古辉, 安佰锋, 桂晓露, 谭淳礼, 白秉哲	有效	否	创新点1和2
5	发明专利	一种无碳化物贝/马复相钢的BQ&P热处理工艺	中国	ZL201510957802.6	2018年8月10日	3028375	北京交通大学	高古辉, 张寒, 桂晓露, 谭淳礼, 白秉哲, 翁宇庆	有效	否	创新点2
6	发明专利	一种PSB1080级精轧钢筋的快速热处理方法	中国	ZL201911363676.6	2021年11月19日	4803868	河钢股份有限公司承德分公司	李亚厚, 康毅, 张贺佳, 贾元海, 靳刚强, 康爱元	有效	是	创新点3
7	论文	显微组织对贝氏体钢筋氢脆敏感性的影响	中国	50-1078/TB	2019	材料导报	北京交通大学机械与电子控制工程学院	郭浩冉, 高古辉, 桂晓露, 白秉哲	有效	否	创新点2和3
8	论文	回火温度对Nb-Ti微合金化Mn系低碳贝氏体钢强屈比的	中国	0258-7076	2018	稀有金属	北京科技大学冶金与生态工程学院, 河钢股份有限公司承	王宝华, 白秉哲, 马海峰, 张明博, 韩宇, 包阔	有效	是	创新点2和3

		影响					德分公司, 清华大学材料科学与工程系先进材料教育部重点实验室				
9	论文	Cr 对贝氏体钢连续转变规律的影响	中国	1009-6264	2016	材料热处理学报	北京交通大学机械与电子工程学院, 河钢股份有限公司承德分公司	桂晓露, 刘蓉, 高古辉, 白秉哲, 王晓东, 马海峰	有效	是	创新点1
10	论文	Enhanced ductility and toughness in an ultrahigh-strength Mn-Si-Cr-C steel: The great potential of ultrafine filmy retained austenite	美国	1359-6454	2014	Acta Materialia	北京交通大学机械与电子控制工程学院, 清华大学材料学院, 德国马普钢铁研究所	高古辉, 张寒, 桂晓露, 罗平, 谭淳礼, 白秉哲	有效	否	创新点2

### 五、主要完成人情况:

排名	姓名	技术职称	工作单位	完成单位	对该项目技术创新贡献	曾获科学技术奖励情况
1	张俊粉	正高工	承德钢铁集团有限公司	承德钢铁集团有限公司	项目总负责人, 对整体项目的研究、推进、实施应用给与技术指导, 同时为该项目提供各项有利条件, 保证项目的顺利推进实施	河北冶金科学技术一等奖
2	高古辉	副研究员	北京交通大学	北京交通大学	完成成分设计和组织优化, 参与生产工艺的优化	中国钢铁工业协会冶金科技进步二等奖
3	白秉哲	研究员	北京交通大学	北京交通大学	负责贝氏体钢研究路线制定和理论指导	国家发明二等奖
4	张明博	高工	承德钢铁集团有限公司	承德钢铁集团有限公司	在整体项目实施过程中进行了生产工艺研究及现场实施	河北省科学技术进步三等奖
5	贾元海	高工	承德钢铁集团有限公司	承德钢铁集团有限公司	制定生产工艺方案和轧钢生产技术指导	河北冶金科学技术一等奖
6	靳刚强	高工	承德钢铁集团有限公司	承德钢铁集团有限公司	在整体项目实施过程中进行了炼钢生产工艺研究及现场实施	河北冶金科学技术一等奖

## 六、完成人合作关系说明及完成人合作关系情况汇总表：

### 完成人合作关系说明

项目开展期间，张俊粉作为项目负责人，带领承德钢铁集团有限公司（张明博、贾元海、靳刚强）和北京交通大学（白秉哲、高古辉），签订了《贝氏体 PSB830 棒材性能稳定性研究》和《贝氏体 PSB1080 精轧螺纹钢研发与性能稳定化研究》技术开发项目，对高强塑性贝氏体螺纹钢制造关键技术和产业化开展了广泛合作，完成了高强塑性贝氏体螺纹钢化学成分设计、强化机理研究、产品生产试制及推广等工作，合作期间获得国家发明专利 6 项，发表相关论文 4 篇，详见下表：

### 完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者	合作时间	合作成果	证明材料	备注
1	共同知识产权	白秉哲, 高古辉, 张俊粉, 靳刚强	2015 -2020 年	1080MPa 级无碳化物贝氏体/马氏体复相精轧钢筋及生产方法	发明专利 1	
2	共同知识产权	靳刚强, 张俊粉	2015-2018 年	一种贝氏体高强精轧螺纹钢回火热处理设备及其工艺	发明专利 2	
3	共同知识产权	张俊粉, 靳刚强	2015 -2020 年	一种 1080MPa 级贝氏体精轧钢筋及其生产方法	发明专利 3	
4	共同知识产权	高古辉, 白秉哲	2015-2018 年	一种 Mn-Si-Cr 低碳贝氏体钢、钎杆及其制备方法	发明专利 4	
5	共同知识产权	高古辉, 白秉哲	2015-2020 年	一种无碳化物贝/马复相钢的 BQ&P 热处理工艺	发明专利 5	
6	共同知识产权	贾元海, 靳刚强	2015 -2018 年	一种 PSB1080 级精轧钢筋的快速热处理方法	发明专利 6	
7	论文合著	高古辉, 白秉哲	2019 年	显微组织对贝氏体钢	期刊论文	

				筋氢脆敏感性的影响	1	
8	论文合著	张明博, 白秉哲	2018 年	回火温度对 Nb-Ti 微合金化 Mn 系低碳贝氏体钢强屈比的影响	期刊论文 2	
9	论文合著	高古辉, 白秉哲	2016 年	Cr 对贝氏体钢连续转变规律的影响	期刊论文 3	
10	论文合著	高古辉, 白秉哲	2014 年	Enhanced ductility and toughness in an ultrahigh-strength Mn-Si-Cr-C steel: The great potential of ultrafine filmy retained austenite	期刊论文 4	