

高韧性 420MPa 级桥梁钢开发及强化机制分析

高彩茹¹, 刘宝喜², 潘欢¹, 高秀华¹
(1. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;
2. 唐山钢铁集团有限责任公司 技术中心, 河北 唐山 063002)

摘 要: 通过优化合金成分、改进控轧控冷工艺等手段,成功开发出屈服强度在 480 ~ 530 MPa,抗拉强度在 560 ~ 630 MPa,延伸率在 21% ~ 25%, -20 ℃冲击功全部在 200 J 以上的 Q420 桥梁钢.对透射电镜下的析出相及金相显微组织中的晶粒尺寸进行相关统计计算,得到各类强化贡献量数值,并对 Q420 桥梁钢的强化机制进行了分析.分析结果表明:在新开发的 Q420 桥梁钢中析出强化贡献量占全部强度的 10% 以下,而固溶强化量及细晶强化量分别占全部强度的 54% 及 36%,因此确认 420 MPa 级桥梁钢的强化机制以固溶强化、细晶强化为主.

关 键 词: 控轧控冷;高韧性;420 MPa 级桥梁钢;强化机制;强度计算
中图分类号: TF 142.41; TF 762 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)08-1123-04

Development and Strengthening Mechanism of 420 MPa Grade Bridge Steel with High Toughness

GAO Cai-ru¹, LIU Bao-xi², PAN Huan¹, GAO Xiu-hua¹
(1. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2. Technology Center, Tangshan Iron and Steel Group, Tangshan 063002, China. Corresponding author: GAO Cai-ru, E-mail: gaocr@ral.neu.edu.cn)

Abstract: The Q420 bridge steel with yield strength of 480 ~ 530 MPa, tensile strength of 560 ~ 630 MPa, elongation of 21 % ~ 25% and impact strength of more than 200 J at -20 ℃ was developed by optimization of alloy composition and improvement of control rolling and control cooling process. The amount of various types of strengthening contribution was obtained through analyzing the amount of precipitation by transmission electron microscopy and the grain size of metallographic microstructure. Then the strengthening mechanism of Q420 bridge steel was studied. The results showed that the contribution of precipitation strengthening accounts for less than 10% of the total strength for Q420 bridge steel, and the contribution of solid solution strengthening and fine grain strengthening are 54% and 36%, respectively. It is confirmed that solid solution strengthening and fine grain strengthening are dominated in 420 MPa grade steel.

Key words: control rolling and control cooling; high toughness; 420 MPa grade bridge steel; strengthening mechanism; strength calculation

桥梁钢是一种对品质要求较高的结构钢,与其他建筑钢材相比,在满足强度的同时,还需满足较高的韧性和焊接性能.桥梁钢使用工况复杂,不仅因承受交变载荷需要较高的疲劳性能,跨江、跨海桥梁还需要耐候性和耐蚀性^[1-4].基于力学性能与使用性能的综合考虑,桥梁钢在成分设计时就要兼顾多种要求.2016年6月,新国标颁布实

施前,Q420q钢对于韧性的要求较低,仅为47J,碳质量分数的上限值高达0.18%;而2016年实施的新标准中将钢的冲击韧性提升到120J,碳质量分数降低到0.11%^[5].对应这些变化,唐山钢铁集团有限责任公司(以下简称“唐钢”)在Q420q钢的开发过程中采用了低碳、微合金化路线.由于钢的强度对碳含量固溶强化的依赖性降

低,其他强化量会相应提高. 本文对新开发的 Q420q 钢的主要强化机制比例进行计算,确认固溶强化与细晶强化为主要强化机制. 结论对于钢的成分优化具有重要意义.

1 化学成分设计

厚度小于 30 mm 的钢板化学成分设计值和实际值见表 1.

表 1 420MPa 级桥梁钢化学成分(质量分数)											
Table 1 Design components of 420MPa grade bridge steel(mass fraction)										%	
成分	C	Si	Mn	P	S	Als	Nb	V	Ti	N	Ca
设计值	0.06 ~ 0.09	≤0.35	1.20 ~ 1.50	≤0.020	≤0.015	0.02 ~ 0.04	0.03 ~ 0.05	0.04 ~ 0.06	0.01 ~ 0.02	≤0.006	—
实际值	0.06 ~ 0.08	0.10 ~ 0.20	1.30 ~ 1.50	≤0.015	≤0.01	0.02 ~ 0.03	0.035 ~ 0.040	0.04 ~ 0.06	0.018	0.005	0.002

2 现场试制工艺

2.1 加热工艺

加热时为保证加热均匀及心部的温度,尽可能减轻 C,Mn 偏析,在炉加热时间不少于 3.5 h. 加热速度 10~12 min/cm,均热段时间≥55 min,出炉温度 1 110~1 150 ℃. 其他加热工艺参数如表 2 所示.

表 2 加热工艺参数				
Table 2 Heating process parameters				
加热过程	预热段	一加热段	二加热段	均热段
空燃比	≤1.2	≤1.1	≤0.9	≤0.8
温度/℃	≤970	≤1 080	≤1 220	≤1 200

2.2 轧制与冷却工艺

唐钢一线为两机架轧制. 粗轧在第一机架上完成,粗轧温度一般在 1 000~1 100 ℃. 利用高温时良好的塑性,达到尽快变形目的,并尽可能增加道次压下量,以保证变形渗透到心部,实现再结晶细化奥氏体晶粒,以便在相变后细化铁素体或贝氏体. 二阶段轧制开轧温度保证在 950~860 ℃范围内,不同的厚度选用不同的开轧温度,保证终轧温度在相变温度 A_{r3} 之上. 二阶段轧制压缩比尽量保证在(3~3.5) h (h 为钢板目标厚度)以上,具体轧制工艺参数如表 3 所示.

表 3 轧制工艺参数				
Table 3 Rolling process parameters				
板厚/mm	中间坯厚/mm	二次开轧温度/℃	终轧温度/℃	返红温度/℃
12~30	(3~4) h	920~950	780~810	580~650

采用新一代 TMCP 工艺——超快冷,保证在适当的冷速下得到合理含量的贝氏体组织及适当尺寸的铁素体晶粒^[6].

2.3 钢板的力学性能

经测试,钢板的力学性能见表 4.

表 4 Q420q 的力学性能					
Table 4 Mechanical properties of Q420q					
板厚/mm	屈强比	R_{eL} /MPa	R_m /MPa	A /%	冲击功/J (-20 ℃)
16	0.87	491	566	25	236
30	0.82	483	586	24.5	265

2.4 力学性能分析

2.4.1 固溶强化量

合金元素的固溶是基体强化的一种重要方式^[7]. 钢中碳含量、锰含量及各种合金元素的固溶强化量可由式(1)计算^[8]:

$$\Delta R_s = 9.8 \times \{ 12.4 + 28w_C + 8.4w_{Mn} + 5.6w_{Si} + 5.5w_{Cr} + 4.5w_{Ni} + 8.0w_{Cu} + 55w_P + [3.0 - 0.2(h-5)] \} .$$

(1)

式中: ΔR_s 为固溶强化量,MPa; h 为钢板目标厚度,mm.

将表 1 中钢的实际化学成分及厚度 $h=30$ mm 代入式(1), $\Delta R_s=257$ MPa,可见固溶强化量占屈服强度的比例为 54%.

2.4.2 细晶强化量

对试样组织(图 1,图 2)中的晶粒度进行评估,其晶粒度为 12.2~12.5 级,平均晶粒尺寸为 4.5~5 μm .

根据 Hall-Peth 关系^[8],得细晶强化量 ΔR_f 为

$$\Delta R_f = R_0 + (3.7w_{Mn} + 8.3w_{Si} + 291.8w_N + 1.51D^{-1/2}) \times 9.8 .$$

(2)

式中: D 为晶粒平均直径,mm; R_0 为单晶纯铁的屈服强度,根据桥梁钢的含碳量,按空冷考虑,取 $R_0=86.24$ MPa.

将 Mn,Si,N 等引入 Hall-Peth 关系式是考虑这些元素对位错滑动的阻力.

将表 1 中化学成分及晶粒平均直径(取 $D=$

4.5 μm)代入式(2)中,可以计算钢的细晶强化量为 $\Delta R_f = 175.6$ MPa. 可见细晶强化占屈服强度的比例为 36% .

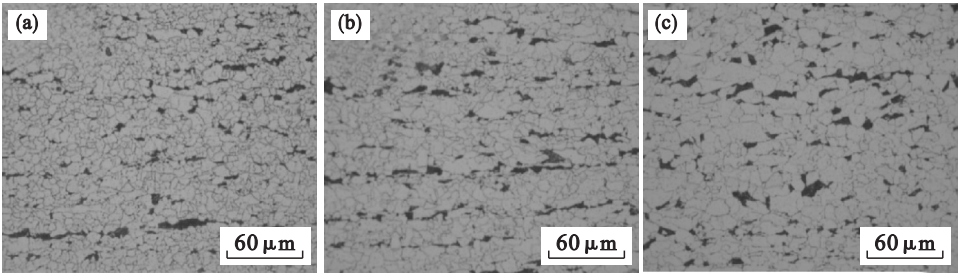


图 1 板厚为 16 mm 的 Q420q 的金相组织
Fig. 1 Microstructure of Q420q with 16 mm of thickness
(a)—上表面; (b)—1/4 处; (c)—心部.

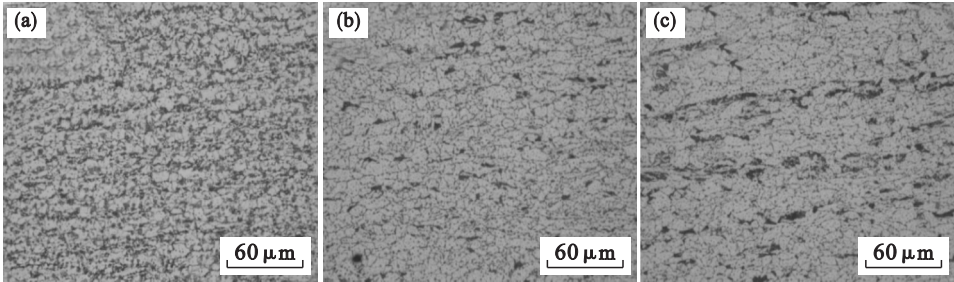


图 2 板厚为 30 mm 的 Q420q 的金相组织
Fig. 2 Microstructure of Q420q with 30 mm of thickness
(a)—上表面; (b)—1/4 处; (c)—心部.

2. 4. 3 析出强化量

在透射电镜下观察析出物形貌、尺寸、数量,对尺寸在 3 nm 以上的析出物进行统计. 钢的析出物分布情况如图 3 所示.

采用不可变形颗粒的强化理论 (Orowan 机

制)来估算第二相引起的强度增量^[9] :

$$\Delta R_p = 8.995 \times 10^3 \times \frac{\sqrt{\varphi}}{d} \ln(2.417d) . \quad (3)$$

式中: ΔR_p 为强度贡献量,MPa; d 为析出粒子平均直径,nm; φ 为析出物体积分数.

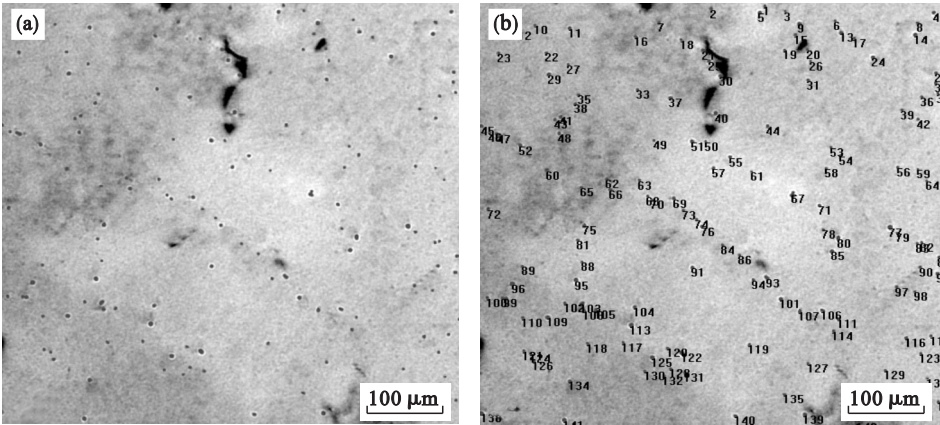


图 3 析出物形貌及数量统计图
Fig. 3 Morphology and the number of precipitates
(a)—析出物原貌; (b)—IPP 软件对析出物的统计.

利用热力学计算软件 Themo-Calc 得到 Q420q 实验钢在 500 ℃ 下的平衡态析出体积分数,然后采用 Orowan 方程计算相应的屈服强度贡献量,结果见表 5.

根据实际统计结果得出的实际粒子平均直径及强度贡献量见表 6. 其中,绝对体积分数为析出物在钢中的体积分数,相对体积分数为实际析出量与理论析出量的比值. 从析出量统计结果看,实

验钢板的表面处析出粒子直径较小,且析出量较多,为 0.003 5%;心部析出粒子最大,析出量为 0.003 8%。析出强化量最大为 34.4 MPa,占屈服强度的 7%。析出强化量占比较小是因为在急剧冷却情况下及贝氏体低温区,C 元素及 V 元素扩散能力减弱,且没有充足的时间,故析出量较少。

表 5 Q420q 实验钢在 500 ℃下的平衡态析出

Table 5 Equilibrium precipitation of Q420q steel at 500 ℃

平衡体积分数/%	ΔR_p /MPa		
	$d=3.1\text{ nm}$	$d=3.7\text{ nm}$	$d=5.2\text{ nm}$
0.176	245	223	184

表 6 三个试样析出物的定量统计

Table 6 Quantitative statistics on precipitates of three samples

取样位置	平均直径/nm	绝对体积分数/%	相对体积分数/%	ΔR_p /MPa
上表面	3.1	0.003 5	1.99	34.4
1/4 处	3.7	0.003 4	1.93	31
中心	5.2	0.003 8	2.16	27.1

综上分析,在 Q420q 桥梁钢 480 MPa 的屈服强度中,固溶强化贡献量占 54%,细晶强化贡献量占 36%,析出强化贡献量占 7%,其余强化机制如贝氏体相变强化和亚晶强化等占 3% 左右。由此看来,除固溶强化外,细晶强化所占比重最大,析出强化所占比例不到 10%。

细晶强化来源于工艺的控制^[10],因此,在优化成分前提下,重点加强对轧制工艺的控制,尤其是对终轧温度与终冷温度的控制,增加形核点,抑制相变后铁素体的长大。对于贝氏体相变,则降低轧制温度,减小贝氏体板条宽度与长度。从降低成本因素角度考量,企业还可以继续优化钢的成分,减少微合金元素 V 的用量。

3 结 论

- 1) 开发的 420 MPa 级别桥梁钢,屈服强度达 480 MPa,抗拉强度达 560 MPa,冲击功达 230 J,延伸率达 24%。
- 2) 对强度的各项强化机制的分析表明,固溶

强化机制占 54%,细晶强化机制占 36%,析出强化机制占 7%,其余强化机制如贝氏体相变强化和亚晶强化等占 3% 左右。

3) 除固溶强化外,细晶强化所占比重最大,加强对控轧控冷工艺参数的控制,对细化晶粒具有重要作用。

4) 为降低生产成本,企业还可以继续优化 Q420 钢的成分,减少微合金元素 V 的用量。

参考文献:

[1] Komizo Y. Recent progress in steels for bridge and line pipe [C]// Asia Steel International Conference 2006. Fukuoka, Japan;The Iron and Steel Institute of Japan,2006:140 – 145.

[2] Guo J,Shang C J,Yang S W,et al. Weather resistance of low carbon high performance bridge steel [J]. *Materials & Design*,2009,30(1):129 – 134.

[3] Tewary N K,Kundu A,Nandi R, et al. Microstructural characterization and corrosion performance of old railway girder bridge steel and modern weathering structural steel [J]. *Corrosion Science*,2016,113:57 – 63.

[4] Guo J,Shang C J,Yang S W,et al. Effect of carbon content on mechanical properties and weather resistance of high performance bridge steels [J]. *Journal of Iron and Steel Research,International*,2009,16(6):63 – 69.

[5] 桥梁用结构钢:GB/T 714—2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
(Structural steel for bridges:GB/T 714—2015[S]. Beijing: China Standard Press,2015.)

[6] Wang L,Gao C R,Liu X H, et al. Effect of TMCP parameters on the microstructure and properties of Q460qNH steel [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition)*,2009,24(6):917 – 921.

[7] Zhang H L,Johansson B,Ahuja R, et al. First-principles study of solid-solution hardening in steel alloys [J]. *Computational Materials Science*,2012,55:269 – 272.

[8] 王有铭,李曼云,韦光. 钢材的控制轧制和控制冷却[M]. 北京:冶金工业出版社,1995:4 – 8.
(Wang You-ming, Li Man-yun, Wei Guang. Controlled rolling and controlled cooling of steel [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,1995:4 – 8.)

[9] 雍岐龙. 钢铁材料中的第二相[M]. 北京:冶金工业出版社,2006:44 – 47.
(Yong Qi-long. The second phase in steel [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2006:44 – 47.)

[10] Takaki S,Kawasaki K,Kimura Y. Mechanical properties of ultra fine grained steel [J]. *Journal of Materials Processing Technology*,2011,117:359 – 363.