

建筑抗震用低屈服点钢 LY225 的开发

陈振业¹ 孙力¹ 王晓书² 韦明² 张海军²

(1 河钢集团钢研总院, 石家庄 050023; 2 河钢集团舞阳钢铁有限责任公司, 平顶山 462500)

摘要 试验用 LY225 钢(/% : 0.07C, 0.05Si, 0.50Mn, 0.007P, 0.008S, 0.005ON) 由 500 kg 真空感应炉熔炼, 浇铸成 210 mm 坯, 并热轧成 25 mm 和 40 mm 板, 终轧温度 790 ~ 830 °C 水冷。LY225 钢板经 880 ~ 900 °C 正火后的组织为多边形铁素体, 晶粒度为 7.5 ~ 8.5 级, 屈服强度 225 ~ 234 MPa, 0 °C 下冲击性能 285 ~ 294 J, 具有良好的高应变低周疲劳性能和焊接性能, 满足 GB/T28905-2012 对 LY225 级建筑抗震用低屈服点钢力学性能的要求。

关键词 建筑抗震用钢 LY225 低屈服点 力学性能 多边形铁素体 开发

Development of Low Yield Point Steel LY225 for Anti-Seismic Building

Chen Zhenye¹, Sun Li¹, Wang Xiaoshu², Wei Ming² and Zhang Haijun²

(1 Centre Iron and Steel Technology Research Institute, Hebei Iron and Steel Group, Shijiazhuang 050023; 2 Wuyang Iron and Steel Co Ltd, Hebei Iron and Steel Group, Pingdingshan 462500)

Abstract The tested steel LY225 (/% : 0.07C, 0.05Si, 0.50Mn, 0.007P, 0.008S, 0.005ON) is melted by a 500 kg vacuum induction furnace, cast to 210 mm slab and rolled to 25 mm and 40 mm plate, finishing temperature 790 ~ 830 °C water cooling. The structure of LY225 steel plate normalized heated at 880 ~ 900 °C, air cooling is polygonal ferrite with grain size rating 7.5 ~ 8.5, yield strength 225 ~ 234 MPa, impact energy at 0 °C 285 ~ 294 J, and has better high-strain low-cycle fatigue property and weldability to meet the requirement of GB/T28905-2012 for mechanical properties of low yield point steel LY225 for anti-seismic building.

Material Index Steel LY225 for Anti-Seismic Building, Low Yield Point, Mechanical Properties, Polygonal Ferrite, Development

与传统构件的抗震技术不同^[1], 耗能抗震技术是一种新的抗震技术, 它主要是通过消能阻尼器吸收地震能量。地震时, 这些抗震设备装置先于其他结构件承受地震载荷作用, 并首先发生屈服, 靠反复载荷滞后吸收地震能量, 保护主体结构及建筑的安全, 耗能抗震技术已经成为抗震技术的一个发展趋势^[2-3]。

低屈服点抗震用钢以其夹杂极低、超低屈服点、屈服范围窄(± 20 MPa), 高延展性、高韧性和重复疲劳特性等特点而著称, 具有良好的抗震性能^[4-5]。

1 技术要求和工艺成分设计

1.1 技术要求

根据 GB/T 28905-2012《建筑用低屈服强度钢板》的相关规定, LY225 级低屈服点抗震钢的化学成分见表 1, 力学性能及工艺性能要求见表 2。

一次强震持续时间为 10 ~ 30 s^[6], 频率多为 1 ~ 3 Hz, 造成建筑物破坏的载荷交变次数都在 200 次以下, 这些表明地震施加于建筑结构钢材的是不规则低周交变载荷, 由弯曲(横波)和拉压(纵波)引起往复变形, 从而造成钢材的塑性变形和断裂。可见,

表 1 低屈服点抗震钢 LY225 化学成分的要求、设计成分和试验钢成分 / %

Table 1 Requirement of chemical composition of low yield point anti-seismic steel LY225, design chemical composition and tested steel analysis composition / %

项目	C	Si	Mn	S	P	N
GB/T28905-2012 ⁽¹⁾	≤ 0.10	≤ 0.10	≤ 0.60	≤ 0.015	≤ 0.025	≤ 0.006
设计成分	0.04 ~ 0.08	≤ 0.06	0.40 ~ 0.60	≤ 0.010	≤ 0.010	≤ 0.006
试验钢成分	0.07	0.05	0.50	0.008	0.007	0.005

注: (1) 可根据需要添加 Nb、V、Ti、B 等元素。

表 2 GB/T28905-2012 对 LY225 级低屈服点抗震钢力学性能的要求

Table 2 Requirement of GB/T28905-2012 for mechanical properties of low yield point anti-seismic steel LY225

屈服强度 (R_{el}) / MPa	抗拉强度 (R_m) / MPa	延伸率 (A) / %	屈强比	纵向冲击功 / J
205 ~ 245	300 ~ 400	≥ 40	≤ 0.8	≥ 27

地震使建筑结构钢失效的形式属于高应变低周疲劳 (High Strain Low Cycle Fatigue)^[7]。因此, 除国标要求的力学性能外, 抗震钢还必须具有良好的抗低周疲劳特性。

1.2 工艺成分设计

根据 GB/T28905-2012 的规定和现场设备生产特点和控制能力,同时考虑到 LY225 级低屈服点抗震钢屈服强度要求范围窄(±20 MPa)、其可焊性要求高、低周疲劳特性,交货状态等要求,其化学成分设计采用“低碳、低硅、低锰”的设计思路,使得钢的基体组织为单一的多边形铁素体,其设计成分见表 1。

2 中试试验

采用河钢中试工厂 500 kg 真空感应熔炼炉冶炼 1 炉 LY225 钢,真空浇铸,得到 (mm)210 × 300 × 662 的矩形坯,经检测试验钢化学成分如表 1 所示。

将铸坯切割得到 (mm)210 × 300 × 340 和 210 × 300 × 320 两块矩形坯,参考 LY225 钢的静态 CCT 曲线,制定了轧制试验方案。在河钢中试工厂 550 mm 二辊热轧机上采用两阶段轧制工艺进行轧制,道次压下量均在 10 ~ 30 mm,成品钢板厚度分别为 25 mm 和 40 mm,轧制工艺参数如表 3 所示。

3 LY225 低屈服点抗震钢试验结果及分析

根据 GB/T228.1-2010 的要求,对沿轧制方向取两块钢板的试样,进行轧态力学性能检验(表 4)、组织观察和检测(图 1 和表 5)。

由试验数据可知,两块试制钢板的屈服强度(R_{eL})都高于 GB/T28905-2012 的要求,但是 0 °C 下冲击功都偏低;两块试验钢板的微观组织均为铁素体(F),其中返红温度高的 1# 钢晶粒度为 7.5 级,返红温度低的 2# 钢晶粒度为 8.5 级,且有混晶。

由表 6 试验数据可知,热处理后 1#、2# 试验钢板的各项力学性能均满足 GB/T28905-2012 的要求。对正火后的钢板进行金相检测,厚度 1/4 处的金相组织如图 2 所示,金相检测结果如表 7 所示。可知,正火后钢板组织类型为纯铁素体,两块钢板的晶粒度分别为 8 ~ 8.5 级和 7.5 ~ 8 级,钢水纯净度较高,只有含 Ti 化合物(D 类夹杂),颗粒细小。

图 3 为 1# 钢板和 2# 钢板正火后拉伸试样断口的 SEM 形貌,可以看出两个试样均属于韧性断裂,韧窝大小不均匀,1# 钢板韧窝大小在 10 ~ 25 μm ,2# 钢板韧窝大小在 5 ~ 15 μm 。总体上来说,2# 钢板的韧窝比 1# 钢板更加均匀细密,因此 2# 钢板的屈服强度及抗拉强度均比 1# 钢板高。

模拟实际地震情况,在 0.5% 的应变幅下,1# 和 2# 试样分别进行 1、2、3 Hz 下的低周疲劳性能测试,结果如表 8 所示。

由表 8 可知,随应变频率提高应变循环

持续时间缩短,在不同频率下试样失效循环周次都在 1 000 周以上,持续时间大于 1.5 min。而一次强

表 3 LY225 钢中试轧制工艺参数

Table 3 Parameters of pilot rolling process for steel LY225

批号	加热温度/°C	I 阶段开始轧制温度/°C	待温厚度/mm	终轧温度/°C	冷却方式	钢板厚度/mm
LY225-1#	1 240	1 120	60	830	空冷	25
LY225-2#	1 240	1 108	90	790	空冷	40

表 4 试验 LY225 钢热轧板的力学性能

Table 4 Mechanical properties of hot-rolled plate of tested steel LY225

批号	位置	R_{eL} /MPa	R_m /MPa	A/%	0 °C, 板厚 1/4 处纵向冲击功/J
LY225-1#	1/2	255	358	40.36	11.58, 9.89, 31.17
	1/4	268	375	36.80	
LY225-2#	1/2	244	347	50.34	18.63, 22.1, 18.47
	1/4	252	356	42.36	

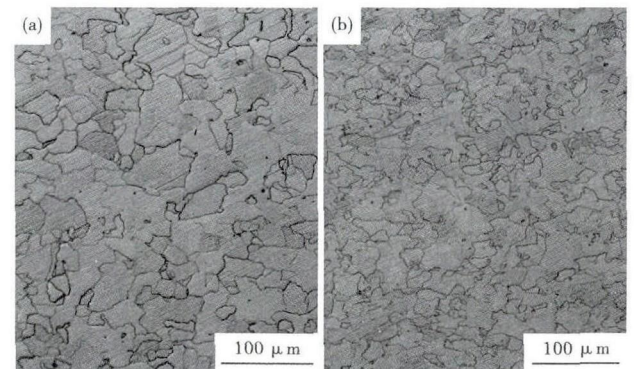


图 1 LY225 试验钢热轧板的组织形貌:(a)25 mm 板 1#(厚度 1/4 处);(b)40 mm 板 2#(厚度 1/4 处)

Fig. 1 Morphology of structure of tested steel LY225 hot-rolled plate: (a) 25 mm plate, at 1/4 thickness; (b) 40 mm plate, at 1/4 thickness

表 5 LY225 试验钢热轧板夹杂物、晶粒度和组织检测结果
Table 5 Examination results of inclusions, grain size and structure in tested steel LY225 hot-rolled plate

批号	A		B		C		D		D_s	晶粒度/级	组织
	粗	细	粗	细	粗	细	粗	细			
LY225-1#	0	0	0	0.5	0	0	0.5	1.5	0	8.5	F
LY225-2#	0	0	0	0.5	0	0	0.5	1.5	0	7.5	F

表 6 LY225 试验钢热轧板热处理后的力学性能

Table 6 Mechanical properties of heat-treated hot-rolled plate of tested steel LY225

批号	热处理工艺	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	屈强比	延伸率(A)/%	0 °C 纵向冲击功/J
LY225-1#	880 °C/50 min, 空冷	225	379	0.59	44.2	288, 290, 291
LY225-2#	900 °C/80 min 空冷	234	393	0.60	49.5	285, 294, 287
GB/T28905-2012 性能要求		205 ~ 245	300 ~ 400	≤ 0.80	≥ 40	单值 ≥ 27

表7 LY225 试验钢热轧板热处理后夹杂物、晶粒度和组织的检测结果
Table 7 Examination results of inclusions, grain size and structure in heat-treated hot-rolled plate of tested steel LY225

批号	A		B		C		D		D _s	晶粒度/级	组织	板厚位置
	粗	细	粗	细	粗	细	粗	细				
LY225-1#	0	0.5	0	0.5	0	0	0.5	1.5	0	8.0	F	1/2
	0	0	0	0.5	0	0	0.5	1.5	0	8.5	F	1/4
LY225-2#	0	0	0	0.5	0	0	0.5	1.5	0	7.5	F	1/2
	0	0	0	0.5	0	0	0.5	1.5	0	8.0	F	1/4

此外,对试验钢板进行了焊接性能分析,根据国际焊接学会推荐的碳当量(Ceq)公式:

$$Ceq = C + 1/6Mn + 1/5(Cr + Mo + V) + 1/15(Ni + Cu)$$

当 $Ceq < 0.35\%$ 时,钢板具有良好的焊接性能,当 $Ceq > 0.40\% \sim 0.50\%$ 时,钢板焊接困难。

试验钢板 $Ceq = 0.035\% + 0.43\% \times 1/6 = 0.11\%$,远小于 0.35% ,可以推断试验钢板具有优良的焊接性能。

4 结论

(1)开发的 25 mm 和 40 mm 厚 225 MPa 级建筑抗震用低屈服点钢板的微观组织为单一的多边形铁素体,晶粒度分别为 8~8.5 级和 7.5~8 级,屈服强度分别为 225 MPa 和 234 MPa,0℃ 下冲击性能在 285~294 J,钢板的各项性能均满足 GB/T28905-2012 对 225 MPa 级建筑抗震用低屈服点钢的要求。

(2)将开发的 LY225 钢板在 0.5% 的应变幅、1~3 Hz 的应变频率下进行低周疲劳试验,其失效循环次数均在 1000 周以上,循环时间均大于 1.5 min。试验钢板具有良好的低周疲劳性能和良好的焊接性能,可以用于建筑物的抗震设计。

参考文献

- [1] 宋凤明,温东辉,李白刚,等.低屈服点钢的发展及应用[J].热加工工艺,2008,37(6):85-88.
- [2] Mitsuru Sugisawa, Hideji, Nakamura, et al. Development of Earthquake-Resistant Vibration Control and Base Isolation Technology for Building Structure[J]. Nippon Steel Technical Report, 1995, 66:37-46.
- [3] 周云,徐彤,俞公骅,等.耗能减震技术研究及应用的新进展[J].地震工程与工程震动,1999,19(2):122-131.
- [4] 宋凤明,温东辉,李陈,等.极低屈服点钢低周疲劳特性[J].钢铁研究学报,2010,22(5):37-40.
- [5] 侯中宇,刘喜明,陈荣敏,等.抗震用建筑结构钢的显微组织及成分设计[J].金属热处理,2003,28(4):21-24.
- [6] Hou Zhong-yu, Liu Xi-ming, Chen Rong-min, et al. Microstructure and Composition Design of Anti-Seismic Building Structural Steels[J]. Metal heat treatment, 2003, 28(4):21-24.
- [7] 盛光敏,龚士弘,鄢如恢.工程结构钢在地震载荷下的高应变低周疲劳特性[J].钢铁钒钛,1991,12(1):31-38.

陈振业(1983-),男,硕士(2009年武汉科技大学),高级工程师,2006年武汉科技大学(本科)毕业,中厚板新产品开发及新工艺研究。E-mail:wustchenzhenye@163.com

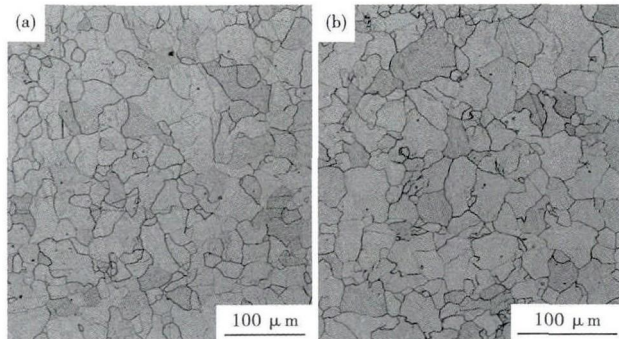


图2 LY225 试验钢 25 mm 板 1#(a)和 40 mm 板 2#(b)正火热处理后的组织形貌

Fig. 2 Morphology of structure of tested steel LY225 normalized heat-treated 25 mm plate No1 (a) and 40 mm plate No2

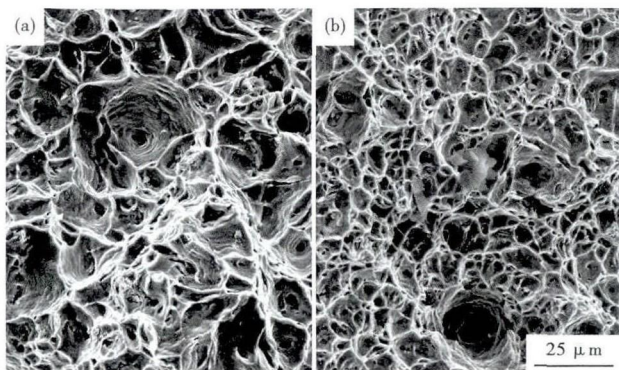


图3 热处理后 LY225 试验钢 25 mm 板 1#(a)和 40 mm 板 2#(b)拉伸断口形貌,SEM

Fig. 3 Morphology of tensile fracture of heat-treated 25 mm plate No1 (a) and 40 mm plate No2 (b) of tested steel LY225, SEM

表8 LY225 试验钢 25 mm 和 40 mm 板的低周疲劳特性
Table 8 Low cycle fatigue properties of 25 mm and 40 mm plate of tested steel LY225

应变幅 ($\pm \Delta\epsilon$)/%	频率/ Hz	应变速率/ s^{-1}	循环周次/ 周	持续时间/ s
0.5	1	2	1 204	1 204
0.5	2	4	1 429	715
0.5	3	6	1 006	335

震持续时间为 10~30 s,频率为 1~3 Hz,载荷交变次数都在 200 次以下,因此该钢完全能够抵御强震。

收稿日期:2016-10-26