

控轧控冷工艺对冷镦柳螺钢组织和力学性能的影响

胡志远 魏占山 李 壮 于 涛 李朝华
(沈阳航空航天大学材料科学与工程学院, 沈阳 110136)

摘 要 试验钢(/% : 0.19C, 0.17Si, 0.44Mn, 0.004S, 0.007P, 0.041Als), 由 60 kg 真空感应炉熔炼, 锻成 120 mm × 140 mm 坯, 轧成 80 mm × 80 mm 坯, 再轧成 4 mm × 100 mm 成品。试验了 950 °C、800 °C 终轧和轧后水冷、空冷对该钢组织和性能的影响。结果表明, 实验钢 1 000 °C 开轧, 经二道次轧制, 800 °C 终轧, 以 32.33 ~ 37.50 °C/s 的冷却速度水冷, 工艺最佳, 低碳钢珠光体为 89%, 铁素体晶粒尺寸 38 nm 达到了柳螺钢 ML45 级别。950 °C 终轧, 水冷, 力学性能达到了 ML40 级别。800 °C 终轧, 空冷钢的力学性能也能达到 ML30 级别。

关键词 控轧控冷 柳螺钢 终轧温度 水冷

Effect of Controlled Rolling and Cooling Process on Structure and Mechanical Properties of Mushroom Cold Upsetting Steel

Hu Zhiyuan, Wei Zhanshan, Li Zhuang, Yu Tao and Li Zhaohua
(College of Materials Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136)

Abstract The tested steel (/% : 0.19C, 0.17Si, 0.44Mn, 0.004S, 0.007P, 0.041Als) is melt by a 60 kg vacuum induction furnace, forged to 120 mm × 140 mm billet, rolled to 80 mm × 80 mm billet and rolled to 4 mm × 100 mm product. The effect of finished rolled at 950 °C and 800 °C water and air cooling process on structure and properties of steel has been tested. Results show that the optimum process is beginning rolling at 1 000 °C, two passes of deformation in hot rolling, finished rolled at 800 °C, water cooling with cooling speed 32.33 ~ 37.50 °C/s, best process, the performance of low carbon steel with pearlite 89% and ferrite grain size 38nm is up to rating of mushroom upsetting steel grade ML45, the mechanical properties of steel with finished rolled at 950 °C water cooling is up to steel grade ML40 and the mechanical properties of steel with finished rolled at 800 °C air cooling is up to steel grade ML30.

Material Index Controlled Rolling and Cooling Process, Mushroom Upsetting Steel, Finished Rolling Temperature, Water Cooling

柳螺钢零件, 可以直接通过冷镦成型, 省去了机加工程序, 降低了生产成本, 在各行各业中被广泛使用^[1-3]。柳螺钢一般在冷镦前采用退火处理^[4]或球化退火^[5], 以获得更好的冷镦性能。

热机械控制工艺 (Thermomechanical controlled processing) 包括控制热轧以及控制冷却在钢中被使用, 在微合金钢中能够最大限度的挖掘所添加的微合金元素的潜力^[6], 使低碳钢不经热处理, 也能获得满意的力学性能。

1 试验材料及方法

试验材料取自 60 kg 真空感应炉冶炼的 55 kg 钢锭, 经锻造, 获得断面尺寸为 120 mm × 140 mm 的锻坯, 经过 Φ450 轧机进行开坯、切割, 得到 80 mm × 80 mm × 30 mm 坯料。其化学成分如表 1 所示。

低碳柳螺钢坯料在 1 150 °C 重新加热、保温 1 h

表 1 试验柳螺钢的化学成分 / %
Table 1 Chemical composition of tested mushroom upsetting steel / %

C	Si	Mn	S	P	Als
0.19	0.17	0.44	0.004	0.007	0.041

后、开轧。经二道次轧制后获得 4 块断面尺寸为 4 mm × 100 mm 的成品坯料。通过控制道次待温时间, 获得不同的终轧温度。其中 2 块坯料分别在不同终轧温度下空冷、水冷。控轧控冷工艺示意图如图 1 所示, 控轧控冷具体参数见表 2。

对不同控轧控冷制度生产出的柳螺钢坯料, 每块取 3 个试样, 利用 INSTRON 4206 进行拉力实验。用 QUANTA600 型扫描电镜对试样进行组织分析。试样经 4% 硝酸酒精溶液腐蚀而制得。采用 Leica DMIRM 型图像分析软件对珠光体的分数和铁素体

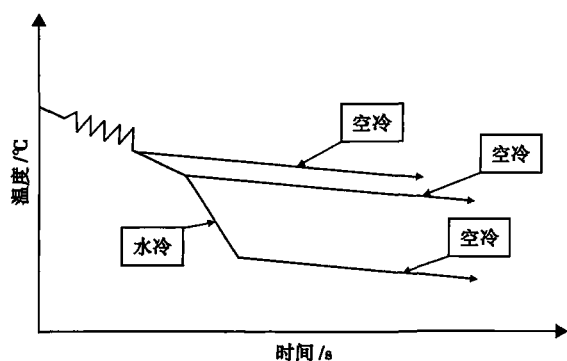


图1 柳螺钢控轧控冷工艺示意图

Fig.1 Schematics of controlled rolling and cooling process of mushroom upsetting steel

表2 试验钢控轧控冷工艺参数

Table 2 Parameters of controlled rolling and cooling process of tested steel

试样编号	开轧温度/°C	轧制道次	终轧后冷却方式	终轧温度/°C	终轧后冷却速度/(°C·s ⁻¹)
1-1					36.95
1-2			水冷	950	33.20
1-3					31.33
2-1		30 mm→			37.50
2-2	1 000	8 mm→	水冷	800	34.82
2-3		4mm			32.33
3-1, 3-2, 3-3			空冷	950	0.01
4-1, 4-2, 4-3				800	0.11

晶粒尺寸进行测定。

2 试验结果

2.1 显微组织

由表3可见,当试样在较高的终轧温度950℃以较快冷速冷却时,得到含有大量珠光体的组织,珠光体体积分数的平均值为68%,铁素体晶粒细化,铁素体晶粒的平均尺寸为47nm;当试样在较低的终轧温度800℃以较快冷速冷却时,珠光体的含量最多,珠光体体积分数的平均值达89%,铁素体晶粒尺寸最小,铁素体晶粒的平均尺寸为38nm;当试样在较高的终轧温度950℃空冷时,得到珠光体量最少,珠光体体积分数的平均值为27%,铁素体晶粒最为粗大,铁素体晶粒的平均尺寸为86nm;而当试样在较低的终轧温度800℃空冷时,得到珠光体

表3 控轧控冷试验钢的珠光体分数和铁素体晶粒尺寸
Table 3 Percentage of pearlite and size of ferrite grain in controlled rolling and cooling tested steel

试样编号	终轧温度/°C	轧后冷却	珠光体分数/%	铁素体晶粒尺寸/nm
1	950	水冷	68	47
2	800	水冷	89	38
3	950	空冷	27	86
4	800	空冷	48	39

数量适中,珠光体体积分数的平均值为48%,铁素体晶粒细化,铁素体晶粒的平均尺寸为39nm。

快速冷却导致珠光体增多,同时铁素体晶粒细化[图2(a₁, b₁)]。空冷后的最终组织均由多边形铁素体和珠光体组成。高温终轧空冷后铁素体晶粒相当粗大(图2c₁),而对于4[#]试样在相对较低的温度终轧,铁素体晶粒细化,珠光体含量增加(图2d₁)。

由于几乎相同的最终冷却温度,试样中的珠光体团的层片间距的差异不很明显[图2(a₂, b₂)]。当试样在较高的终轧温度快冷时,珠光体形貌已不再呈片状,大部分转变成退化珠光体(图2a₂)。当试样在较低的终轧温度以较快冷速冷却时,珠光体不仅含量最多,而且扫描电镜下,可以清晰的看到珠光体的层片状的形貌,尽管在放大倍率较高的扫描电镜下,仍然可以发现铁素体具有较小的晶粒尺寸(图2b₂);当试样在较高的终轧温度空冷时,扫描电镜下可以在3[#]试样中发现粗大的珠光体层片间距与粗大的铁素体晶粒的尺寸(图2c₂);而即使在空冷情况下,当终轧温度相对较低时,在扫描电镜下4[#]试样仍然可以发现较多的珠光体和相对较细的铁素体晶粒(图2d₂)。

2.2 力学性能

柳螺钢在4种工艺下,柳螺钢达到了不同级别的柳螺钢强度标准要求(表4)。将柳螺钢在同一工艺下所获得3种性能中所能达到的最低的值,与柳螺钢标准要求对照如图3所示。其中ML20, ML30, ML40和ML45钢的抗拉强度、屈服强度和伸长率的标准要求分别列于图3(a, b, c)中。1[#]试样的抗拉强度、屈服强度和伸长率均达到了ML40钢的标准要求;2[#]试样的性能均达到了ML45钢的标准要求;3[#]试样的性能最低,刚刚达到ML20钢的标准要求;4[#]试样的性能则达到了ML30钢的标准要求。

3 试验结果分析与讨论

当试样在950℃较高的终轧温度以较快冷速冷却时,铁素体晶粒被细化^[7]。所以尽管950℃的终轧温度较高,但由于水冷,1[#]试样仍获得了铁素体晶粒尺寸为47nm的较低值。

柳螺钢在950℃开轧后,终轧温度分别为950℃和800℃,属于奥氏体未再结晶区轧制,变形使奥氏体晶粒拉长,形成饼形晶粒,增大了晶界面积,在变形奥氏体中形成变形带,而这变形带也可以作为铁素体的形核部位^[8],在晶界上和变形带上铁素体晶粒能够同时成核,必然造成了铁素体晶粒的细化。

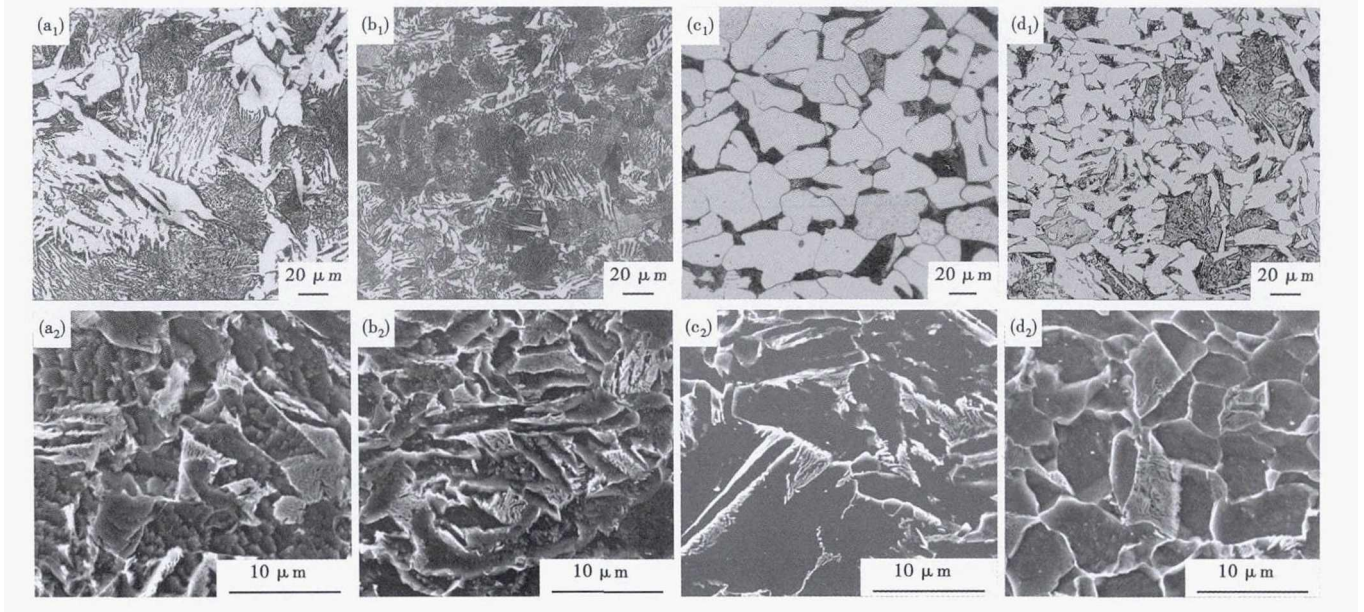


图 2 试验柳螺钢组织形貌: 试样 1- 终轧 950 °C, 水冷 (a₁) (a₂), 2- 终轧 800 °C, 水冷 (b₁) (b₂), 3- 终轧 950 °C, 空冷 (c₁) (c₂), 4- 终轧 800 °C, 空冷 (d₁) (d₂); (a₁) ~ (d₁) 光学, (a₂) ~ (d₂) SEM

Fig. 2 Morphology of structure of tested mushroom upsetting steel: specimen No1- finished rolled at 950 °C, WC (a₁) (a₂), No2- finished rolled at 800 °C, WC (b₁) (b₂), No3- finished rolled at 950 °C, AC (c₁) (c₂) and No4 finished rolled at 800 °C, AC (d₁) (d₂); (a₁) ~ (d₁) optical and (a₂) ~ (d₂) SEM

表 4 控冷控轧试验柳螺钢的力学性能

Table 4 Mechanical properties of controlled rolling and cooling tested mushroom upsetting steel

终轧温度/ °C	冷却 方式	试样 编号	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %
950	水冷	1-1	597	464	23
		1-2	587	455	23
		1-3	583	447	22
800	水冷	2-1	624	446	22
		2-2	610	440	22
		2-3	609	441	22
950	空冷	3-1	445	287	37
		3-2	444	285	37
		3-3	445	286	38
800	空冷	4-1	510	372	32
		4-2	508	368	33
		4-3	510	371	32

终轧温度越低, 过冷度越大, 增加了形变奥氏体的形变储能能, 也使形变亚结构增多, 铁素体的相变形核得到提高。铁素体的形核率增加, 同时促进了碳、氮化合物形变诱导析出, 而轧制温度越低, 奥氏体向铁素体转变的形核驱动力就越大, 应变诱导铁素体相变, 越易促使晶内成核^[9]。2[#]试样经 800 °C 终轧水冷后, 铁素体平均晶粒尺寸最细 (38 nm); 4[#]试样经 800 °C 终轧空冷后, 铁素体平均晶粒尺寸也较细 (39 nm)。根据 Hall-Petch 关系式, 晶粒尺寸的减少一般导致极限抗拉强度和屈服强度的增加。因此, 2[#]试样的抗拉强度最高, 达 624 MPa, 同时伸长率也达 22% 的较高值。而 4[#]试样其抗拉强度和伸长率也

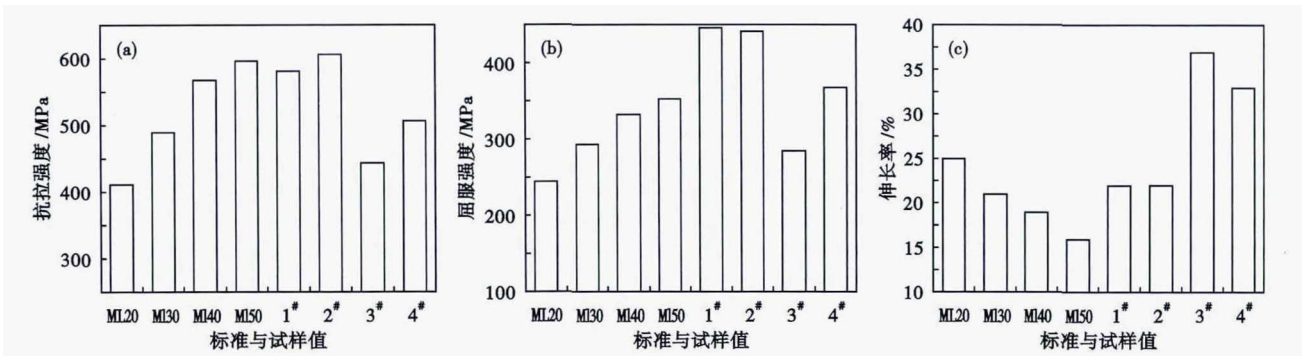


图 3 控轧控冷试验柳螺钢力学性能与 ML20, ML30, ML40 和 ML45 钢标准要求

Fig. 3 Standard requirement for steel ML20, ML30, ML40 and ML45, and mechanical properties of tested mushroom upsetting steel with different controlled rolling and cooling process

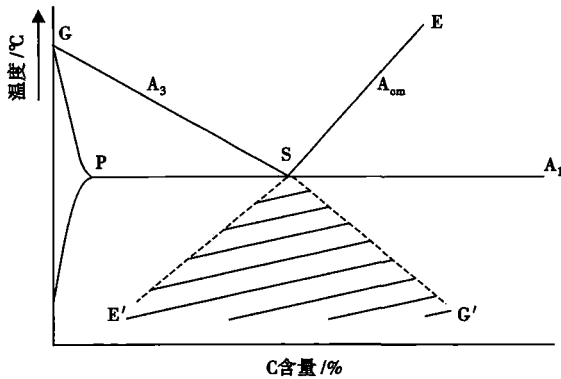


图4 先共析相析出的温度与成分范围

Fig. 4 Proeutectoid phase precipitated temperature and composition range

分别达到 510 MPa 和 32% 的较高值。

高温轧制后快冷冷却,导致了珠光体含量增多。图4中,当奥氏体快冷到SE'线和SG'线以下的影线区时,会因同时对铁素体和渗碳体所过饱和而直接进行珠光体转变。这种非共析成分的奥氏体不经过先共析转变而直接进行珠光体转变得到的珠光体,在显微组织上也是由片层状的铁素体和渗碳体组成,但两个相的相对含量以及片层相对厚度都不同于共析成分的珠光体,这种珠光体又称为伪共析体^[10]。柳螺钢终轧后快冷,导致珠光体分数增加,1#试样珠光体平均分数达68%。对低温轧制更是如此,变形后的快冷造成了珠光体分数增加,2#试样珠光体平均分数达89%。铁素体晶粒细化,大量的珠光体,造成了1#、2#试样最高抗拉强度分别达到了597 MPa和624 MPa的最高值,同时,其伸长率也较

高,分别超过了ML40钢和ML45钢的标准要求。

柳螺钢高温轧制后,不控冷,力学性能仅为ML20级别。由于控轧控冷,低碳钢的柳螺钢原料可以达到中碳柳螺钢的级别。试验用钢为低碳钢,达到了中碳钢的性能,实现了以低碳代中碳,解决了柳螺钢原料的冷镦性能不足问题。高温轧制轧制力低,轧制更容易进行,在生产现场更易于接受。由于生产工序减少,生产成本和能耗降低,低碳钢经过控轧控冷完全有可能替代甚至超越传统方法生产的ML30、ML40甚至ML45钢的级别。

4 结论

(1) 低温轧制快速冷却,铁素体晶粒较细,珠光体分数较多,力学性能指标较高。高温轧制快速冷却,铁素体晶粒较细,珠光体分数较多,力学性能达到了ML40级别。低温轧制空冷,也能细化铁素体晶粒,力学性能也达到了ML30级别。

(2) 试验钢1000℃开轧,经二道次轧制,800℃终轧,以32.33~37.50℃/s的冷却速度水冷,工艺最佳,低碳钢达到了ML45级别。

(3) 低温轧制快速冷却,由于应变诱导铁素体相变,造成铁素体晶粒细化,可以获得更好的力学性能。高温轧制快速冷却,亦细化铁素体晶粒,同时获得更多的珠光体,也可获得好的力学性能。但高温轧制轧制力低,更容易被生产现场所接受。

国家863科研项目(2015AA03A501)和沈阳航空航天大学大学生创新创业训练计划项目(X1701099)资助

参考文献

- [1] Landeta J F, Valdivielso A F and Lacalle L, et al. Wear of Form Taps in Threading of Steel Cold Forged Parts[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2015, 137(3):031002-1-031002-11.
- [2] Haksun L, Myoungpyo H and Donghwan C, et al. A Study on Process Design of Plate Cold Forging for Machinability Improvement of Piston under Drive Brake[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2017, 54(1):88-107.
- [3] Ryo M, Jinkan K and Hiroshi U. Reduction in Axial Forging Load by Low-frequency Torsional Oscillation in Cold Upsetting[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2017, 93(1-4):933-943.
- [4] 国家标准局信息分类编码研究所. GB/T6478-1986 冷镦钢技术条件[S]//全国文献工作标准化技术委员会. 文献工作国家标准汇编:3. 北京:中国标准出版社,1986:368-373.
- [5] Das T, Li J Y and Painter M, et al. Evaluation of Two AISI 4037 Cold Heading Quality Steel Wires for Improved Tool Life and Product Quality[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2002, 11(1):86-91.
- [6] Schaupp T, Schroepfer D and Kromm A, et al. Welding Residual Stresses in 960MPa Grade QT and TMCP High-strength Steels[J]. Journal of Manufacturing Process, 2017, 27:226-232.
- [7] Tomida T, Imai N and Miyata K, et al. Grain Refinement of C-Mn Steel to 1 μm by Rapid Cooling and Short Interval Multi-pass Hot Rolling in Stable Austenite Region[J]. ISIJ International, 2008, 48(8):1148-1157.
- [8] 田村今男等著. 高强度低合金钢的控制轧制与控制冷却[M]. 王国栋,刘振宇,熊尚武,译. 北京:冶金工业出版社,1992.
- [9] Weng Y Q, Sun X J and Dong H, et al. Overview on the Theory of Deformation Induced Ferrite Transformation[J]. Iron & Steel Supplement, 2005, 40:9-15.
- [10] 胡光立,谢希文. 钢的热处理[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2012:59.

胡志远(1996-),男,2018年沈阳航空航天大学(本科)毕业,金属材料组织与性能研究。E-mail:534515208@qq.com

收稿日期:2018-01-19