

高强度螺栓用 35CrMo 免退火冷镦钢热轧盘条的研制

王海华, 郑晓伟, 张剑锋, 林再勇, 孔祥伟
(江阴兴澄特种钢铁有限公司线材研究所, 江阴 214429)

摘要: 通过入减定径温度 780 °C, 入减定径减面率 42% ($\Phi 18.4$ mm \rightarrow $\Phi 14$ mm), 冷却速度 0.42 °C/s, 35CrMo 钢热轧材显微组织为 F+P, 铁素体含量 $\geq 40\%$, 实际晶粒度 10~11 级, 抗拉强度 ≤ 750 MPa, 断面收缩率 $\geq 60\%$, 硬度值 214~225HV, 实现免退火直接进行大减面率拉拔。

关键词: 35CrMo 冷镦钢; 热轧盘条; 控轧控冷; 免退火

Development of Hot-Rolled Wire Rods of 35CrMo Annealing-Free Cold Heading Steel for High-Strength Bolts

Wang Haihua, Zheng Xiaowei, Zhang Jianfeng, Lin Zaiyong, Kong Xiangwei
(Wire Rod Research Institute, Jiangyin Xingcheng Special Steel Co., Ltd., Jiangyin 214429)

Abstract: By controlling billet temperature 780 °C as entering sizing mill, sizing reducing rate 42% ($\Phi 18.4$ mm \rightarrow $\Phi 14$ mm), cooling rate 0.42 °C/s, the microstructure of 35CrMo steel hot-rolled rod is F+P, with ferrite content more than 40%, actual grain size 10-11, tensile strength 750 MPa, reduction of area $\geq 60\%$, and hardness value 214-225HV, to realize annealing-free large reduction of cross-sectional area cold drawing.

Key Words: 35CrMo Cold Heading Steel; Hot Rolled Wire Rods; Controlled Rolling and Controlled Cooling; Annealing-Free

交通领域汽车安全件高强度螺栓制造大多采用 35CrMo 钢作为原材料。当前国内 35CrMo 钢热轧盘条组织为贝氏体+铁素体+马氏体, 强度及硬度高、断面收缩率低, 拉拔前需退火以避免模具损耗大、拉拔断裂等问题, 导致生产频繁中断, 效率低下, 增加生产成本, 尽管有些深加工厂家尝试采用小减面率做第一道拉拔, 但无法避免材料内部微裂纹发生的风险。

热变形和相变有机结合, 无需后续热处理就能改善材料显微组织和力学性能, 控轧控冷这一突出优势^[1-3], 促使国内各生产厂家积极实践。但由于对技术与设备要求高, 控轧控冷技术仍仅在中低碳碳素钢和低碳合金钢上应用^[4-5]。本文探究中碳合金钢 35CrMo 轧制变形和温度控制对组织转变的影响规律, 旨在成功开发组织及力学性能优异的热轧盘

条, 实现 35CrMo 盘条免退火直接拉拔。

1 试验方法

35CrMo 钢化学成分见表 1。工艺流程: 100 t KR 铁水预处理-100 t BOF-100 t LF+100 t RH-CC 连铸(200 mm \times 200 mm)-加热-控轧控冷-斯太尔摩冷却-热轧盘条($\Phi 5.5$ ~25 mm)。

根据现有研究学者对控轧控冷技术达成的共识^[6-9]: 采用两相区轧制, 使钢中的奥氏体晶粒细化, 形变诱导铁素体大量析出; 降低冷却速度, 达到在线软化效果。

考虑线材高速轧制的特点, 试验采用低温加热, 防止为降低轧件温度采用强冷导致轧件表面和心部温度不均匀; 粗轧采用大压下量, 总减面率 $\geq 65\%$, 中精轧总减面率 $\geq 95\%$, 使形变充分渗透, 奥氏体再

表 1 试验 35CrMo 钢化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test 35CrMo steel/%

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
标准	0.33~0.38	0.15~0.35	0.60~0.90	≤ 0.025	≤ 0.025	0.90~1.20	0.15~0.30
试验钢	0.36	0.18	0.77	0.010	0.005	1.05	0.17

结晶,晶粒不断细化;合理调节水箱压力及水阀流量,使入减定机前轧件表面和心部温度均匀;入减定机温度控制在两相区内,轧件减面率 $\geq 35\%$;适当开启水箱,消除最后道次轧制后轧件温升,控制吐丝温度;不同辊道速度、保温罩开启个数设定,控制冷却速度。

2 试验结果及讨论

2.1 试验结果

试验固定因素轧制工艺参数见表 2。使用热膨胀相变仪测定 35CrMo 钢的相变点 Ar_1 为 $730\text{ }^\circ\text{C}$, Ar_3 为 $820\text{ }^\circ\text{C}$, 试验控制入减定径温度在两相区范

围内。生产过程中,为达到最大限度保温效果,保温罩全部关闭,保温罩之间用保温棉密封。试验四个工艺与常规工艺对比分析,研究入减定径温度、减面率和辊道速度对组织转变的影响,试验变量因素轧制工艺参数见表 3。

表 2 试验固定因素轧制工艺参数

2 Test fixed factors rolling process parameters

工艺	坯料加热温度/ $^\circ\text{C}$	开轧温度/ $^\circ\text{C}$	总减面率/%	进精轧温度/ $^\circ\text{C}$
常规	1 060 ~ 1 100	930 ~ 970	68(粗轧)	900 ~ 940
试验	1 010 ~ 1 050	880 ~ 920	96(中精轧)	860 ~ 900

表 3 试验变量因素轧制工艺参数

Table 3 Test variable factor rolling process parameters

试验工艺	入减定径温度/ $^\circ\text{C}$	入减定径轧件断面直径/mm	出减定径轧件断面直径/m	减定径减面率/%	吐丝温度/ $^\circ\text{C}$	辊道基准速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	冷却速度/ $(^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$
常规	850	17.4	14	35	870	0.20	0.58
工艺 1	750	17.4	14	35	760	0.20	0.50
工艺 2	780	17.4	14	35	790	0.10	0.20
工艺 3	780	18.4	14	42	788	0.10	0.20
工艺 4	780	18.4	14	42	790	0.15	0.42

考虑到低温轧制过程中,减定径机齿轮箱及电机载荷过大,有安全风险,试验工艺 1 在减面率 35% 基础上,入减定径温度控制在 $750\text{ }^\circ\text{C}$, 在安全载荷范围内,辊道速度设定基准速度 0.2 m/s 提速,冷却速度为 $0.50\text{ }^\circ\text{C/s}$; 工艺 2 在工艺 1 基础上提高入减定径温度至 $780\text{ }^\circ\text{C}$, 辊道速度设定基准速度 0.1 m/s 提速,冷却速度为 $0.20\text{ }^\circ\text{C/s}$, 基于提高罩内保温时间考虑,但辊道速度不能太小,盘条堆积会引起安全风险; 工艺 3 在工艺 2 基础上,提高减面率至 42%, 辊道速度设定基准速度 0.1 m/s 提速,冷却速度为 $0.20\text{ }^\circ\text{C/s}$; 工艺 4 在工艺 3 的基础上,辊道速度提高至 0.15 m/s , 冷却速度为 $0.42\text{ }^\circ\text{C/s}$ 。

生产过程中,全流程监测,确保各工序生产实绩达到目标值,且每个工艺进行重复性试验,确保试验结果的准确性。在实际生产过程中,热轧盘条满足均匀的铁素体+珠光体组织,抗拉强度 $\leq 800\text{ MPa}$,断面收缩率 $\geq 55\%$,硬度 $\leq 250\text{ HV}$ 可直接进行拉拔。热轧盘条强度、塑性及硬度是实现免退火直接拉拔的重要考量因素,对试验所得热轧盘条的组织、实际晶粒度、力学性能进行检测。

试验所得热轧盘条的组织、实际晶粒度结果见表 4、图 1 所示。由检测结果可知,常规工艺所得热轧盘条组织为 B + F + M 混合组织,先共析铁素体含量低至 8% 左右; 工艺 2 组织为 F + P + B 混合组织,铁素体含量相比正常工艺提高至 34% 左右; 工艺 1、

3、4 组织为 F + P, 铁素体含量 $\geq 40\%$, 实际晶粒度 ≥ 10 级。

试验所得热轧盘条的 HV 硬度值见表 5。从检测结果可知,常规工艺和工艺 2 所得热轧盘条抗拉强度在 840 MPa 以上,断面收缩率 $\leq 53\%$,硬度在 250 HV 以上; 工艺 1、3、4 抗拉强度在 750 MPa 以下,断面收缩率 $\geq 60\%$,硬度在 225 HV 以下。

通过工艺 1 与工艺 2 对比分析,在减面率 $\geq 35\%$ 基础上,入减定径温度是最关键影响因素,即使在较大的冷却速度($\leq 0.5\text{ }^\circ\text{C/s}$)条件下,入减定径温度越低,盘条性能越优异; 通过工艺 2 与工艺 3 对比分析,在入减定径温度 $780\text{ }^\circ\text{C}$ 、冷却速度 $0.2\text{ }^\circ\text{C/s}$ 基础上,增加减面率至 42% 以上,可获得 F + P 组织,力学性能得到显著提高; 通过工艺 3 与工艺 4 对比分析,在入减定径温度 $780\text{ }^\circ\text{C}$ 、减面率 42% 基础上,为获得 F + P 组织,最大冷速可达到 $0.42\text{ }^\circ\text{C/s}$, 盘

表 4 常规工艺和 1~4 试验工艺 35CrMo 钢 $\Phi 14\text{ mm}$ 热轧盘条的组织、铁素体含量和实际晶粒度

Table 4 Microstructure, ferrite content and actual grain size of 35CrMo steel $\Phi 14\text{ mm}$ hot-rolled coil by conventional process and test process 1-4

试验工艺	显微组织	铁素体含量/%	实际晶粒度/级
常规	B + F + M	8	-
工艺 1	F + P	44	11
工艺 2	F + P + B	34	-
工艺 3	F + P	42	10
工艺 4	F + P	41	10

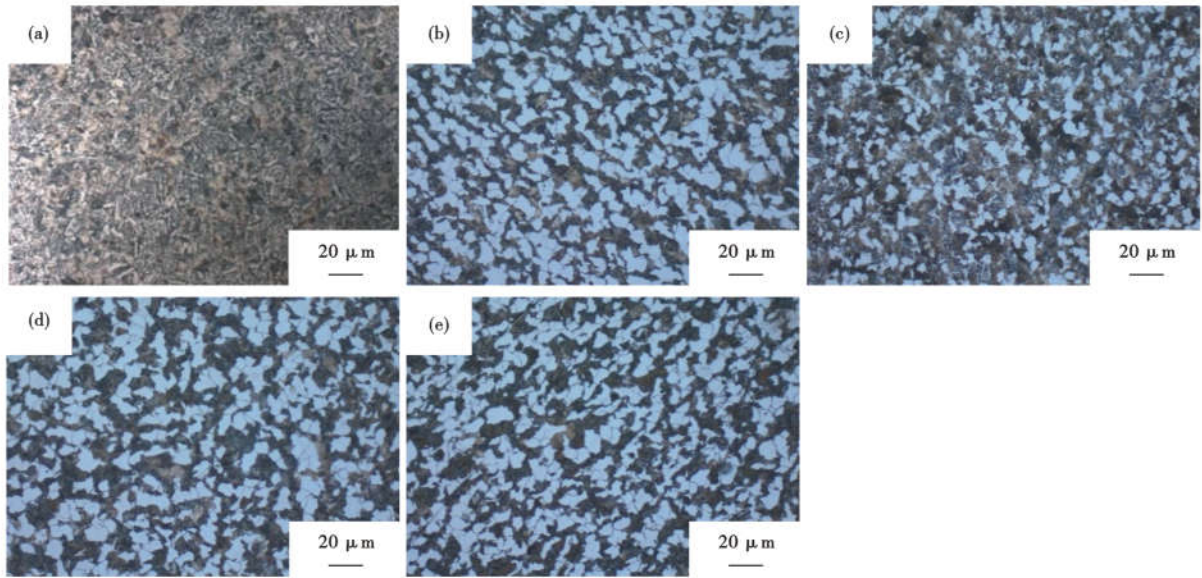


图 1 (a)常规工艺,(b)工艺 1,(c)工艺 2,(d)工艺 3,(e)工艺 4 生产的热轧盘条组织形貌

Fig.1 Structure morphology of hot rolled wire rod produced by (a) Conventional process, (b) Process 1, (c) Process 2, (d) Process 3 and (e) Process 4

表 5 HV 硬度值检测结果
Table 5 HV hardness test results

试验工艺	HV 硬度值							
常规	286	288	310	290	280	298	300	294
工艺 1	206	196	204	205	206	206	205	200
工艺 2	268	255	250	270	270	262	260	275
工艺 3	218	208	214	217	210	217	214	221
工艺 4	215	210	212	214	215	225	223	216

条在罩内时间缩短了 35% 左右,提高了生产节奏。

为考察试验所得热轧盘条的塑性变形能力,在室温下进行 1/4 冷顶锻试验,试验结果如图 2 所示。由试验结果可以看出,常规工艺和工艺 2 生产的热轧盘条发生了 45° 应力开裂,常规工艺材料的开裂程度较重,由于热轧盘条存在贝氏体和马氏体组织,

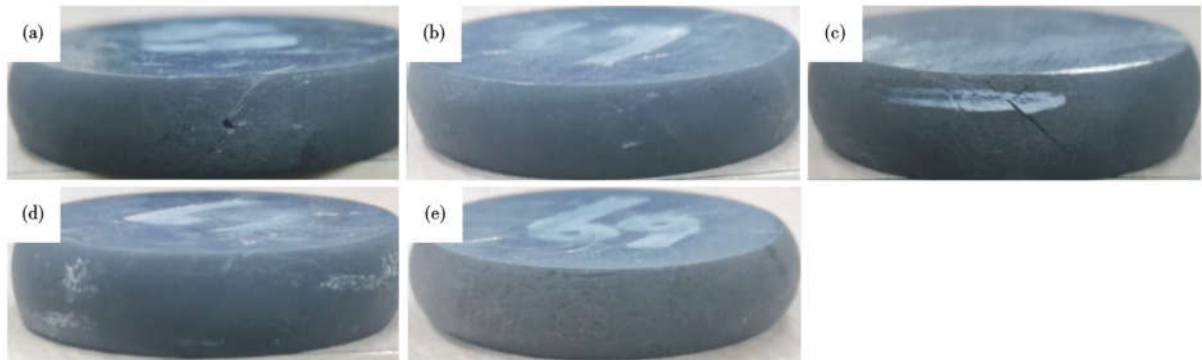


图 2 (a)常规工艺,(b)工艺 1,(c)工艺 2,(d)工艺 3,(e)工艺 4 的热轧盘条冷顶锻

Fig.2 Cold top forging of hot rolled wire rod by (a) Conventional process, (b) Process 1, (c) Process 2, (d) Process 3, and (e) Process 4

且随着其含量的提高,材料的塑性变形能力逐步降低;工艺 1、3、4 生产的热轧盘条未发现冷锻开裂。

常规工艺所得热轧盘条(Φ14 mm)进行不退火直接拉拔试验,当拉拔减面率达到 12% 时,拉拔后材料内部马氏体组织上发现“V”型微裂纹,继续增大拉拔减面率,内部裂纹会变长、变宽,材料表面会发生有规律的颈缩现象,严重时引起断裂。产生原因是由于马氏体组织塑性差,拉拔轴向应力积聚超

过材料的拉拔强度。

由上述可知,常规工艺所得热轧盘条直接拉拔有很大断裂风险。常规冷锻成型标准紧固件要求材料抗拉强度≤630 MPa,断面收缩率≥65%,硬度≤90HRB,且考虑拉拔断裂风险,拉拔厂家采用两球两拉生产钢丝。工艺 4 生产的热轧盘条强度、塑性及硬度相比工艺 1、3 稍差,选用工艺 4 所得热轧盘条进行深加工试验,采用一球两拉,省去一道退火生产

钢丝,跟常规工艺进行对比分析。球化退火均热段温度 760 ℃、均热时间 6 h、总加热时间 24 h,拉拔工艺参数见表 6,成品钢丝力学性能检测结果见表 7。

从试验结果看出,工艺 4 试验盘条省去一道退火生产的钢丝与常规工艺盘条两球两拉生产的钢丝力学性能相当。

表 6 拉拔工艺参数
Table 6 Drawing process parameters

拉拔工艺	盘条直径/mm	工艺路径	第一道拉拔(粗拉)		第二道拉拔(精拉)		总减面率/%
			中间直径/mm	减面率/%	成品直径/mm	减面率/%	
常规工艺	14	两球两拉	12.6	19	12.1	7.8	25.3
工艺 4	14	一球两拉	12.6	19	12.1	7.8	25.3

表 7 Φ12.1 mm 成品钢丝性能检测结果
Table 7 Mechanical property test results of Φ12.1 mm finished steel wire

工艺路径	抗拉强度/MPa	断面收缩率/%	HRB 硬度值
两球两拉	545	74	86
一球两拉	523	76	85

综上试验结果表明,常规工艺生产的热轧盘条显微组织为 B + F + M,工艺 2 显微组织为 F + P + B,抗拉强度、硬度较高和低的面缩,盘条不退火直接拉拔,有断裂风险;工艺 1、工艺 3、工艺 4 生产的热轧盘条显微组织为细小的 F + P,组织均匀,铁素体含量高,具有低的抗拉强度、高的断面收缩率和低的硬度,且通条性能好,后续深加工省去一道退火直接拉拔,成品钢丝性能满足零件冷锻成型要求。

2.2 结果讨论

控轧控冷技术是热变形和相变有机结合,采用两相区轧制,使钢中的奥氏体晶粒细化,形变诱导铁素体大量析出,通过缓冷降低冷却速度,最终生成均匀、细小的 F + P 组织,具有低的抗拉强度、高的断面收缩率和低的硬度,且通条性能好,可实现免退火直接拉拔。在实际大生产条件下,设备能力是首要考虑因素,随着入减定径温度降低和减定径减面率提高,减定径机齿轮箱及电机载荷将不断增大,增加

了安全风险。根据试验工艺在大生产上的应用实绩,建议入减定径温度控制在 750 ~ 780 ℃,减定径减面率 ≥ 35%,冷却速度 ≤ 0.50 ℃/s,在此基础上,若入减定径温度高,可提高减定径减面率和降低冷却速度;若提高生产效率,可降低入减定径温度,增加辊道基准速度,减少冷却时间。

3 结论

(1) 中碳合金钢 35CrMo 热轧盘条轧制,降低入减定径温度,提高入减定径减面率,降低冷却速度有利于组织向铁素体 + 珠光体转变,降低入减定径温度是最关键和有效的影响因素。

(2) 结合生产实际,控制入减定径减面率 ≥ 35%,入减定径温度 ≤ 750 ℃,冷却速度 ≤ 0.50 ℃/s,若考虑设备载荷能力,入减定径温度 780 ℃,减面率 ≥ 42%,冷却速度 ≤ 0.42 ℃/s,可获得显微组织为 F + P,组织均匀,铁素体含量 ≥ 40%,实际晶粒度 10 ~ 11 级,抗拉强度 ≤ 750 MPa,断面收缩率 ≥ 60%,硬度 ≤ 225HV,且通条性能好的热轧盘条,可实现免退火直接拉拔。免退火热轧盘条 35CrMo 钢的成功开发,证实了控轧控冷技术在 35CrMo 钢大生产上的有效应用。

参考文献

- [1] 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,2014.
- [2] 刘天佑. 金属学与热处理[M]. 北京:冶金工业出版社,2011.
- [3] 昌英雄,家口浩,下津佐正贵. 制御圧延・制御冷却による線材の高品質化[J]. 神戸製鋼技報,2000,50(1):29-32.
- [4] 涛雅,周乐育,董捷,等. 工艺参数对 SWRCH35KM 组织与力学性能的影响[J]. 钢铁研究学报,2018,30(7):581-584.
- [5] 姜婷,汪开忠,于同仁,等. 免退火冷锻钢 10B21 热轧盘条的研制[J]. 轧钢,2020,37(6):53-56.
- [6] 陈继林,冯光宏,杨栋,等. 形变量和冷却速度对 SCM435 冷锻钢形变诱导铁素体相变的影响[J]. 特殊钢,2021,42(3):12-15.
- [7] 金启邦,孙世平,王青海,等. 控轧控冷和冷床保温工艺对 42CrMo 钢 Φ50 mm 轧材力学性能的影响[J]. 特殊钢,2021,42(5):72-74.
- [8] 李拔,刘清友,贾书君,等. 临界区变形致低碳微合金钢晶粒的超细化[J]. 金属热处理,2018,43(5):133-138.
- [9] 杨斌. 高速线材生产中的控轧控冷技术探究[J]. 冶金与材料,2018,38(5):66+68.