



喷雾组合控冷技术对弹簧钢 54SiCr6 组织性能的影响

宗 浩

(江阴兴澄特种钢铁有限公司 二轧钢分厂, 江阴 214432)

摘 要:采用金相、硬度、拉伸等试验方法,研究高速线材不同控冷技术对 54SiCr6 弹簧钢组织形貌、力学性能和表面质量的影响。结果表明,54SiCr6 弹簧钢采用喷雾组合控冷的各项性能明显优于传统风冷控冷工艺。当采用传统风冷工艺时,盘卷通盘力学性能稳定性稍差,铁素体析出较多,铁素体析出增加脱碳层深度;当吐丝温度为 850 ℃,喷雾压力为 1 MPa 时显著增加冷却速度,抑制铁素体析出降低脱碳层深度,盘卷力学性能均匀性优于风冷工艺;当吐丝温度为 850 ℃,喷雾压力为 4 MPa 和 3 MPa 时,冷却速度显著提升,盘卷基体出现马氏体组织,较大降低盘卷的力学性能稳定性;当吐丝温度为 850 ℃,喷雾压力为 2 MPa 时可以显著提高盘卷力学性能和均匀性,抑制铁素体析出,从而降低脱碳层深度,同时硬度的提升降低了盘卷表面磕碰伤,提高客户拉拔表面质量和作业率。

关键词:54SiCr6 钢; 喷雾控冷; 辊道速度; 组织; 表面质量

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2023-00124 **中图分类号:**TG335. 6-3

Effect of Spray Combined Cooling Control Technology on Microstructure and Properties of Spring Steel 54SiCr6

Zong Hao

(Second rolling steel branch, Jiangyin Xingcheng Special Steel Co., Ltd., Jiangyin 214432, China)

Abstract: The effect of microstructure morphology, mechanical properties, and surface quality of 54SiCr6 spring steel under different controlled cooling techniques for high-speed wire rods was studied by metallographic, hardness, and tensile testing methods. The results show that the performance of spring steel 54SiCr6 with spray combined cooling control is obviously better than that of the traditional air cooling control process. When the traditional air cooling process is used, the mechanical performance stability of the coil is slightly worse, with more ferrite precipitation, which increases the depth of decarburization layer; When the spinning temperature is 850 ℃ and the spray pressure is 1 MPa, the cooling rate is significantly increased, and the ferrite precipitation is inhibited, and the decarburization depth is reduced. The mechanical property uniformity of coiling is better than that of air cooling process; When the spinning temperature is 850 ℃, and the spray pressure is 4 MPa and 3 MPa, the cooling rate is significantly increased, and martensite structure appears in the coiling matrix, which greatly reduces the mechanical property stability of the coiling; When the spinning temperature is 850 ℃ and the spray pressure is 2 MPa, the mechanical properties and uniformity of the wire coil can be significantly improved, the ferrite precipitation can be inhibited, and the depth of decarburization layer can be reduced. At the same time, the increase of hardness reduces the bump on the surface of the coil, and improves the surface quality and operation rate of the customer.

Key Words: 54SiCr6 Steel; Spray Cooling Control; Roller Speed; Microstructure; Surface Quality

弹簧钢是在碳素钢基础上添加多种合金元素以提高其各项使用性能,是重要的机械设备基础材料,被广泛应用于航空航天、汽车、铁路、装备制造和农业机械等领域。弹簧钢使用过程中,承受多角度交变力的同时,还要承受较大循环冲击力和恶劣条件下的腐蚀,故弹簧钢要具有较强耐疲劳、抗腐蚀、高强度等性能,对其炼钢水平和轧钢水平有着较高的要求^[1]。在弹簧钢热轧盘条生产过程中,传统控冷使用风冷冷却,造成吐丝后搭接处与中心部位冷速相差较大,造成强度和硬度有差异,客户拉

拔后产生应力差,经过后期调质处理产生应力裂纹^[2];另一方面传统风冷控冷能力有限,盘条表面硬度低,集卷和下线过程中极易产生磕碰伤、挤压伤等,造成后期客户拉拔断裂。由于弹簧钢成品工作环境恶劣,因此,弹簧钢盘条强度的均匀性和磕碰伤对弹簧钢使用有较大影响。

弹簧钢生产采用新型喷雾在线控冷技术,红钢吐丝后使用喷雾加风冷组合控冷,得到不同于传统风冷工艺的弹簧钢热轧产品。由于喷雾控冷技术采用热水喷雾,其冷却能力较强,喷雾装置经过特

殊设计,盘条搭接点喷嘴数量大于中心点,冷却更加均匀^[3];喷雾冷却工艺使盘条的氧化铁皮更加致密,对盘条表面起到保护作用;热水喷雾水采用加热炉回收蒸汽加热,做到真正的清洁绿色能源。本文将喷雾和风冷组合技术应用在 54SiCr6 弹簧钢高速线材生产上,探究喷雾和风冷组合技术对 54SiCr6 弹簧钢组织、性能、表面质量的影响,为实现大批量弹簧钢、轴承钢、紧固件钢等喷雾和风冷组合控冷生产提供依据。

1 试验材料及方法

试验用 54SiCr6 弹簧钢原材料为兴澄特钢生产的方坯,其生产工艺流程为:100 t 转炉→LF 炉精炼→连铸方坯(390 mm×510 mm)→轧钢开坯(200 mm×200 mm)→加热→轧制→喷雾冷却+风机冷却→成品,其化学成分见表 1。

高速线材分厂将经过开坯的 54SiCr6 弹簧钢方坯坯料依次按照修磨→加热炉加热→高压水除鳞→粗轧轧制→中轧轧制→预精轧轧制→减定径→

吐丝→控冷→集卷→上卷→打包→下线等工序轧制成 $\phi 15$ mm 的弹簧钢热轧盘条。组合控冷技术通过调节喷雾的压力来控制弹簧钢冷却速度,喷雾装置如图 1 所示。

在弹簧钢控冷过程中制定不同的控冷工艺,其控冷工艺见表 2,对不同控冷条件下的成品盘条进行取样,取样时将整圈样剪切 8 段,加工成标准拉拔试样,尺寸 $d=\phi 5$ mm, $L=5d$,按照 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》在 LOS-600 型力学试验机上进行拉拔试验^[4];将不同控冷条件下的试样经过切割、磨削、砂纸打磨、抛光后,用 4% 硝酸酒精溶液腐蚀后观察金相组织,再利用电镜观察组织形貌,相同打包压力条件下,检验弹簧钢盘条表面质量和客户使用报伤次数来判定合适的控冷工艺。

2 试验结果与分析

2.1 喷雾组合控冷技术对 54SiCr6 钢组织影响

将不同控冷条件下热轧盘条试样经过剪切、切割、镶嵌、磨削、抛光、腐蚀等处理后,在金相显微镜

表 1 54SiCr6 弹簧钢化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of 54SiCr6 spring steel %

C	Si	Mn	Cr	Cu	Ni	Mo	Al	P	S
0.51 ~ 0.54	1.20 ~ 1.60	0.50 ~ 0.80	0.50 ~ 0.80	≤0.08	≤0.10	≤0.10	≤0.10	≤0.015	≤0.01

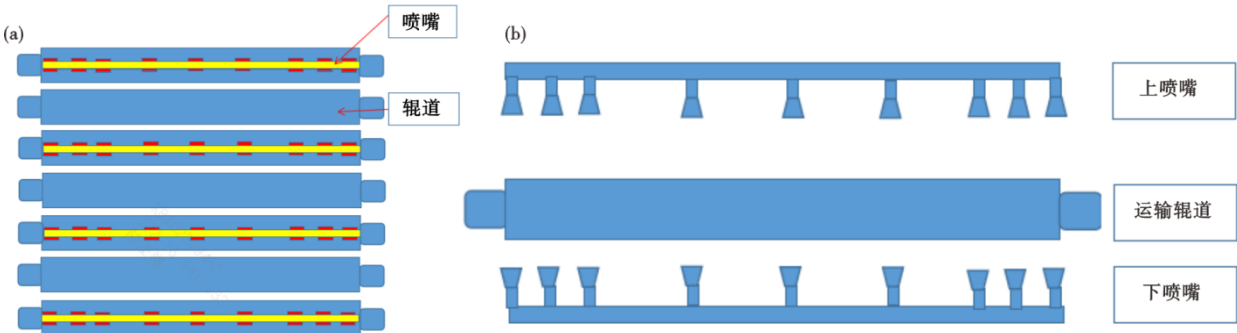


图 1 喷雾装置:(a)俯视图,(b)结构图

Fig. 1 Spray device: (a) top view, (b) structure drawing

表 2 54SiCr6 弹簧钢不同控冷工艺
Table 2 Different cooling control process for 54SiCr6 spring steel

控冷工艺	吐丝温度/℃	出风机区温度/℃	轱道速度/(m·s ⁻¹)	保温罩	风机数量/个	1 [#] ~5 [#] 风机风量/%	喷雾压力/MPa
风冷	850	608	0.60	全开	5	50+60+40+50+30	关闭
喷雾一	850	601	0.60	全开	5	20+40+30+20+10	4
喷雾二	850	595	0.60	全开	5	20+30+20+20+10	3
喷雾三	850	591	0.60	全开	5	20+30+20+20+10	2
喷雾四	850	586	0.60	全开	5	20+30+20+20+10	1

下观察不同控冷条件下盘条基体组织结果见表3。

不同控冷条件下的组织形貌如图2所示,喷雾工艺三对比风冷工艺和喷雾一、二、四,其组织珠光体更多且无异常组织,故最佳的喷雾工艺为喷雾工艺三。

2.2 喷雾组合控冷技术对54SiCr6钢力学性能影响

取不同控冷条件下整圈热轧盘条试样,将其剪切成8段,经过矫直、车削加工成标准拉伸试样,在每支钢中取多圈试样,进行拉伸试验并测量硬度,研究喷雾组合控冷技术对54SiCr6弹簧钢力学性能的影响,从各项力学数据可以看出,54SiCr6弹簧钢不同控冷工艺下的盘条力学性能有显著不同,如图3所示。

当采用风冷工艺时,综合评定风冷工艺通盘力学性能稳定性稍差;当采用喷雾工艺一、二时,由于基体组织有大量马氏体组织,在拉拔过程中出现脆

断,抗拉强度和断面收缩率不做对比,但硬度相比风冷工艺明显上升,喷雾工艺三比喷雾工艺四生产的54SiCr6弹簧钢通条力学性能均匀性有所改善;弹簧钢盘条发客户进行深加工拉拔,盘条的通盘均匀性对其拉拔较为重要,综合考虑喷雾三工艺为最佳控冷工艺。

2.3 喷雾组合控冷技术对54SiCr6钢脱碳影响

观察不同控冷条件下54SiCr6弹簧钢脱碳层深度,可以看出,不同的控冷条件下弹簧钢脱碳层深度和组成显著不同^[5]。当采用风冷控制工艺时,总脱碳层深度为0.09 mm,脱碳层由大量的铁素体加少量的珠光体组成,铁素体对脱碳层的测量产生较大影响;当采用喷雾工艺四时,脱碳层深度为0.06 mm,脱碳层区域由一半铁素体和一半珠光体组成,相比风冷工艺脱碳层区域铁素体明显下降,随之脱碳深度也下降;当采用喷雾工艺三时,脱碳层深度为0.05 mm,脱碳层区域由少量铁素体加大量的珠

表3 不同控冷工艺组织形貌
Table 3 Microstructure morphology of different cooling control process

控冷工艺	喷雾压力/MPa	组织形貌	金相图
风冷	关闭	大量珠光体(80%)+少量铁素体(20%)	图2(a)
喷雾工艺一	4	全为马氏体	图2(b)
喷雾工艺二	3	马氏体(50%)+贝氏体(50%)	图2(c)
喷雾工艺三	2	大量珠光体组织(95%)+极少铁素体组织(5%)	图2(d)
喷雾工艺四	1	大量珠光体组织(90%)+极少铁素体组织(10%)	图2(e)

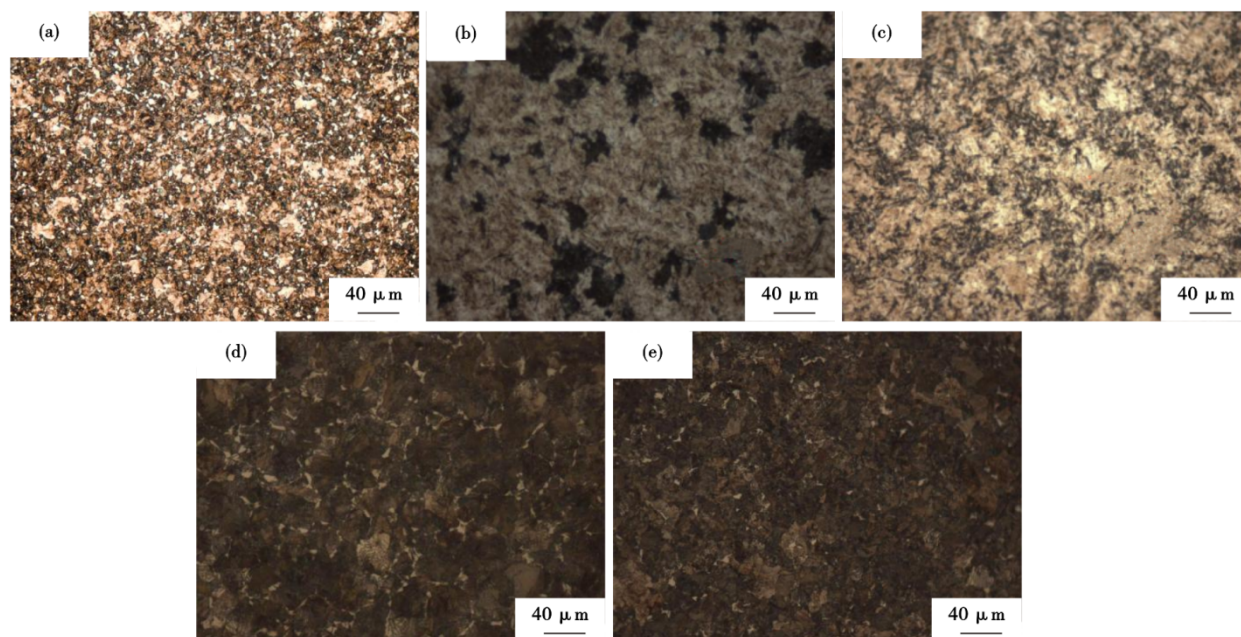


图2 不同控冷工艺的组织形貌:(a)风冷,(b)喷雾一,(c)喷雾二,(d)喷雾三,(e)喷雾四

Fig. 2 Microstructure morphology under different controlled cooling processes : (a) air-cooled, (b) spray 1, (c) spray 2, (d) spray 3, (e) spray 4

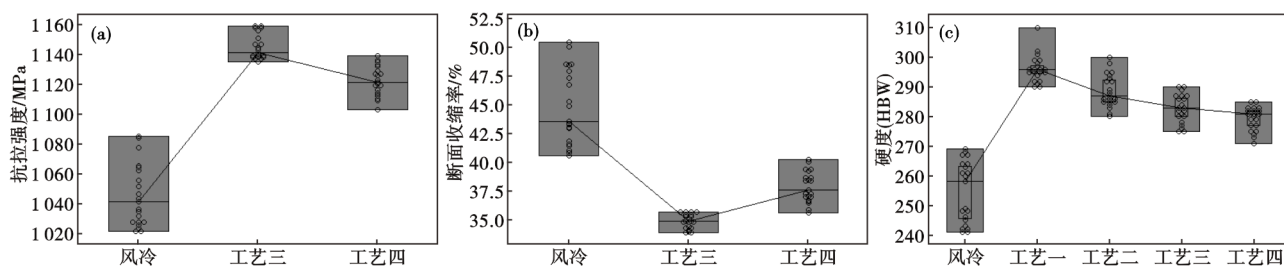


图3 不同控冷工艺下:(a)抗拉强度,(b)断面收缩率,(c)硬度

Fig. 3 Under different cooling control processes : (a) tensile strength , (b) section shrinkage rate , (c) hardness

光体组成,铁素体含量进一步下降,随之脱碳层深度下降;当采用喷雾工艺一和二时,全截面为马氏体和贝氏体组织,成品表面脱碳深度无法测量。

2.4 喷雾组合控冷技术对 54SiCr6 钢表面质量影响

弹簧钢表面缺陷会影响弹簧钢的疲劳性能,故整个弹簧钢生产流程对表面质量控制极其重要^[6]。54SiCr6 弹簧钢经过坯料处理、加热、轧制、吐丝、控冷、集卷、上钩和打包等工序完成生产,过程中存在较多产生表面缺陷的区域,特别是在集卷后。

观察不同控冷条件下 54SiCr6 弹簧钢盘条集卷下来的表面质量,再使用相同的打包压力(30 t)打包后再散开,观察盘条表面和内圈表面质量,发现不同的控冷条件下,弹簧钢表面质量状态显著不同。当采用风冷工艺时,集卷后表面能够看到明显的擦伤,经过打包后再散开发现盘条内圈和外圈有明显的挤压伤;当采用喷雾工艺四时,集卷后盘条表面的擦伤明显降低,经过打包后再散开发现盘条内圈和外圈只有较少的挤压伤;当采用喷雾工艺三时,集卷后表面看不到擦伤,经过打包后再散开未发现盘条内圈和外圈有肉眼可见的挤压伤;由于喷雾工艺一、二有大量马氏体组织,经过打包后出现脆断现象,故不做对比。

弹簧钢热轧盘条交付客户后,经过开卷、矫直、抛丸、涡流探伤、修磨和拉拔等程序生产弹簧钢钢丝^[7],如果原材料表面质量异常,客户拉拔过程中因缺陷极易发生断裂,小缺陷会造成频繁探伤报警,影响客户拉拔生产效率;

现场跟踪客户拉拔探伤报警情况得出,不同控冷条件下 54SiCr6 弹簧钢盘条探伤情况有较大差别。当采用风冷工艺时,跟踪 50 件盘条生产得出平均探伤报警次数为 11.6 个/盘,探伤底波主要分布在 0.06 mm 位置,且较杂乱;当采用喷雾工艺四时,探伤报警次数明显下降,跟踪 50 件盘条生产得出平均

探伤报警次数为 8.4 个/盘,探伤底波主要分布在 0.04 mm 位置,底波波形较均匀;当使用喷雾工艺一和二时,由于产生较多马氏体组织,客户拉拔无法使用,故未发客户使用验证。当采用喷雾工艺三时,探伤报警次数明显下降,跟踪 50 件盘条生产得出平均探伤报警次数为 5.8 个/盘,探伤底波主要分布在 0.02 ~ 0.03 mm 位置,底波波形较均匀。

客户采用对不同试样 900 °C 下保温 5 min,淬火至 150 °C 保温 20 s,再在 300 °C 下保温 10 min,最后冷却至室温的淬火方案。对喷雾工艺三、喷雾工艺四的试样进行热处理,测试其力学性能。试样的力学性能测试结果见表 4。

表 4 不同控冷工艺淬火后力学性能

Table 4 Mechanical properties after quenching of different cooling control process

控冷工艺	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/%	断面收缩 率/%
喷雾工艺三	2 225	1 301	13.5	41
喷雾工艺四	2 201	1 202	12.5	43

弹簧钢使用过程中承受交变力的同时,还要承受恶劣环境的侵蚀,故对其原材料的质量要求极高。传统的风冷控冷由于冷却强度不够,致使盘条表面硬度较低,在集卷和打包过程中极易产生擦伤和磕碰伤;吐丝后盘条搭界点与中间点冷速也有差距,使盘条通圈力学性能差别较大,对客户的拉拔产生一定的影响;当使用喷雾组合控冷时,冷速增加致使盘条表面强度和硬度明显增加,集卷和打包过程擦伤和挤压伤明显降低,盘条通圈力学性能更加均匀。

3 结论

(1) 54SiCr6 弹簧钢喷雾控冷能够较大优化组织、性能和表面质量,当吐丝温度为 850 °C,喷雾压力为 2 MPa 时为最佳工艺参数,得到组织均匀且无

马氏体组织,通圈力学性能更加均匀。

(2)54SiCr6 弹簧钢喷雾控冷能够显著增加盘条

表面硬度,盘条表面擦伤和挤压伤得到明显改善,客户探伤报警次数降低明显。

参考文献

- [1] 惠卫军,董 瀚,陈思联. 非金属夹杂物和表面状态对高强度弹簧钢疲劳性能的影响[J]. 特殊钢, 1998, 19(6): 8-14.
- [2] 张 鹏,冯光纯. 60Si2Mn 弹簧钢的控轧控冷工艺[J]. 特殊钢, 2001, 22(2): 38-40.
- [3] 王 层. 高速线材生产用水浴冷却技术的应用研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
- [4] 李和平,周 星,徐惟诚,等. GB/T 228.1—2010 中应力速率的三种理解及在宣贯和实施过程中出现的问题[J]. 理化检验(物理分册), 2013, 49(8): 489-493.
- [5] 姚 赞. 分段冷却工艺对 55SiCr 弹簧钢脱碳和组织的影响[C]. 第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会论文集 III. 上海, 2015: 1083-1088.
- [6] 曹 杰,丁朝晖. 冷拔 60Si2MnA 弹簧钢制簧过程的断裂分析[J]. 特殊钢, 2015, 36(3): 46-48.
- [7] 孙逢源,张剑锋,白 云,等. 超高强度钢丝用弹簧钢盘条及其制造方法:, CN202210237747.3[P]. 2022.

关于认准《特殊钢》网址、防范假冒网站的声明

《特殊钢》期刊由中信泰富特钢集团股份有限公司主管、大冶特殊钢有限公司主办,由《特殊钢》编辑部负责运营,是全国特殊钢行业知名的综合性科技刊物(双月刊);《特殊钢》期刊于 1980 年创刊发行,国际标准刊号为 ISSN1003-8620,国内统一刊号为 CN42-1243/TF。《特殊钢》期刊的宗旨:“构建特钢共享平台,引领行业创新发展。”

编辑部发现网络上存在大量假冒《特殊钢》期刊的网页,为维护我刊良好声誉和广大作者、读者的利益,本编辑部郑重声明如下:

(一) www.specialsteeljournal.com 为《特殊钢》期刊的唯一网址,备案号为鄂 ICP 备 2022000839 号,请广大作者、读者使用本网址进行投稿、订阅、论文免费下载等操作。

(二) 除维普、万方、知网、超星为本社授权合作网站,具有数字化复制权、发行权、汇编权、翻译权、信息网络传播权、版式设计专有权,其余网站皆未经本编辑部授权,无权从事相关内容的刊登、收费阅读,承揽稿件,承接广告等行为,请广大作者、读者提高警惕,注意甄别,谨防受骗,由此造成的一切损失和后果,本编辑部不承担任何经济 and 法律责任;同时也鼓励向本编辑部进行举报相关侵权线索。

(三) 未经授权网站请于 2024 年 3 月 30 日前自行将与《特殊钢》期刊相关的内容撤除,逾期仍存在涉嫌侵害著作权、名誉权的单位或个人,本编辑部保留进一步发函、举报、诉讼等法律手段进行维权,必要时上报公安机关依法追究刑事责任。

《特殊钢》编辑部