

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.05.009

淬火介质对耐磨铸钢组织和性能的影响

张雅静, 方胜民, 王金宝, 张国志
(东北大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 分别研究了以水和机油作为淬火介质的 42CrMo 钢和双相耐磨钢淬火 + 回火后的显微组织和性能. 确定了双相耐磨钢和 42CrMo 钢的最佳热处理工艺及性能. 结果表明: 双相耐磨钢经水淬和油淬回火后的显微组织均为板条马氏体 + 针状贝氏体 + 碳化物; 42CrMo 钢经水淬和油淬回火后的显微组织分别为回火马氏体 + 残余奥氏体和回火马氏体 + 铁素体 + 贝氏体. 经过 480h 的低应力磨料磨损实验发现, 水淬 + 280 ℃ 回火处理的 42CrMo 钢耐磨性能最好, 其相对耐磨性可达高锰钢的 1.558 倍.

关 键 词: 双相耐磨钢; 42CrMo 钢; 淬火介质; 热处理; 组织和性能; 磨料磨损

中图分类号: TG 142.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)05-0650-05

Effect of Quenching Medium on Microstructure and Properties of Wear-Resistant Casting Steel

ZHANG Ya-jing, FANG Sheng-min, WANG Jin-bao, ZHANG Guo-zhi
(School of Materials Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHANG Ya-jing, E-mail: zhangyj@smm.neu.edu.cn)

Abstract: Microstructures and properties of 42CrMo steel and dual-phase wear-resistant steel after a quenching and tempering treatment were investigated, where water and quenching oil were used as quenching medium, respectively. The results show that both microstructures of the water-quenched + tempered and oil-quenched + tempered dual-phase wear-resistant steels are lath martensite, needle-like bainite and carbide. The microstructures of the water-quenched + tempered and oil-quenched + tempered 42CrMo steels are tempered martensite and retained austenite, and tempered martensite, ferrite and bainite, respectively. The optimum heat treatment and properties of 42CrMo steel and dual-phase wear-resistant steel can be obtained after the comparison of their microstructures and properties. As a result, the wear-resistant property of 42CrMo steel after water-quenching and tempering at 280℃ treatment is the best one, which is 1.558 times higher than that of a high manganese steel in a 480h low-stress abrasive wear experiment.

Key words: dual-phase wear-resistant steel; 42CrMo steel; quenching medium; heat treatment; microstructure and property; abrasive wear

高锰钢自 1882 年由英国人 Hadfield 发明后, 因其在冲击作用下具有强大的加工硬化能力而一直被用于铁路零件、矿山、建材、冶金和能源等机械中^[1-3], 但其在低载荷下耐磨性能受到限制^[4]. 人们一直希望找到合适的钢种来替代高锰钢. 研究发现, 双相钢具有连续性屈服、屈服强度低、拉伸性能好、韧性好等特点^[5-7]. 42CrMo 钢是中碳低合金结构钢, 具有良好的高温强度、抗蠕变性

能、淬透性, 其淬火变形小, 调质后综合力学性能较好^[8].

本文通过选取马氏体 - 贝氏体双相钢和 42CrMo 钢作为实验材料, 分别选取水和机油作为淬火介质对实验材料进行淬火及不同温度下的回火处理. 观察热处理后的组织形貌并通过硬度、拉伸性能、冲击韧性及磨损性能测试得到实验材料热处理后的性能指标, 确定最佳热处理工艺.

1 实验材料及方法

实验材料为铸态马氏体 - 贝氏体双相钢和 42CrMo 钢,其化学成分如表 1 所示. 双相钢的热处理工艺为 950 ℃保温 2 h 分别进行水淬、油淬, 然后分别在 220, 260, 300, 340 ℃回火 + 保温 2 h + 空冷. 42CrMo 钢热处理工艺为 840 ℃保温 2 h 分别进行水淬、油淬, 然后分别在 240, 280, 320, 360 ℃回火 + 保温 2 h + 空冷. 热处理试样均取自浇注合格的基尔试样底部.

表 1 试样的主要化学成分(质量分数)					
Table 1 Main chemical composition of specimens (mass fraction)					
化学成分	C	Si	Mn	Cr	Mo
双相钢	0. 298	1. 291	2. 328	0. 657	0. 173
42CrMo	0. 411	0. 610	0. 690	0. 880	0. 139

采用 OLYMPUS DSX500 金相显微镜观察热处理后的金相组织, HBS - 3000 型布洛维硬度计进行硬度测试. 拉伸性能测试在 WJ - 30 万能材料试验机上进行, 在型号为 JB - 5 的冲击试验机上进行冲击试验. 通过 MSH 型腐蚀磨损试验机, 以 600 r/min 的转速来测试磨损性能, 磨损试样长

宽高分别为 55, 20 和 8 mm. 对双相钢(950 ℃水淬 + 300 ℃回火)和高锰钢进行了 480 h 的对照磨损实验.

2 实验结果及分析

2.1 淬火介质对试验钢组织的影响

双相钢和 42CrMo 钢热处理后的金相组织如图 1 所示. 由图 1 可知, 双相钢经 950 ℃水淬、油淬, 在 220 ℃和 340 ℃回火后的组织均为: 板条马氏体 + 针状贝氏体 + 少量碳化物(图 1a ~ 图 1d). 双相钢在 340 ℃回火后的组织较 220 ℃回火后的组织更均匀, 形成了平直、规则且取向更接近的板条马氏体束. 其油淬组织较水淬组织更均匀、致密和细小, 拥有更多的贝氏体, 但水淬组织中含有更多的板条马氏体. 42CrMo 钢经 840 ℃水淬, 在 240 和 360 ℃回火后的组织均为回火马氏体 + 残余奥氏体(图 1e ~ 图 1f). 360 ℃回火组织较 240 ℃回火组织相界面模糊, 残余奥氏体发生分解, 数量下降, 回火马氏体尺寸变小数量稍有增加. 经 840 ℃油淬, 在 240 和 360 ℃回火后的组织均为: 回火马氏体 + 铁素体 + 少量贝氏体(图 1g ~ 图 1h). 随回火温度升高, 回火马氏体增多, 铁素体稍有增多.

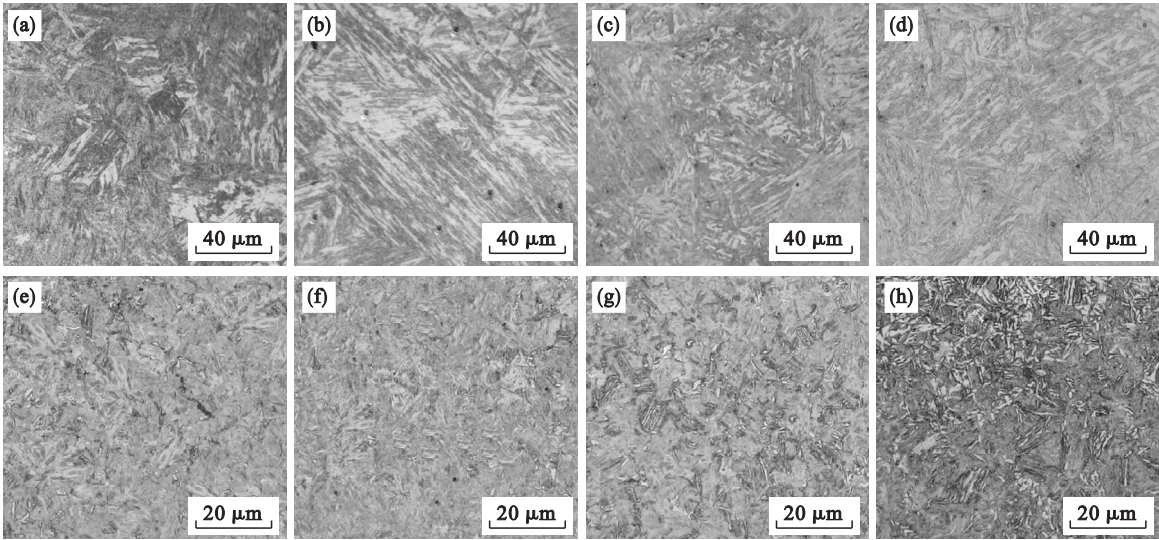


图 1 双相钢、42CrMo 钢回火后的金相组织

Fig. 1 Micro-structures of dual-phase steel and 42CrMo steel after different tempering treatments

(a) — 双相钢水淬, 220 ℃回火; (b) — 双相钢水淬, 340 ℃回火; (c) — 双相钢油淬, 220 ℃回火; (d) — 双相钢油淬, 340 ℃回火; (e) — 42CrMo 钢水淬, 240 ℃回火; (f) — 42CrMo 钢水淬, 360 ℃回火; (g) — 42CrMo 钢油淬, 240 ℃回火; (h) — 42CrMo 钢油淬, 360 ℃回火.

2.2 淬火介质对试验钢硬度的影响

热处理后试验钢硬度如图 2 所示. 由图 2 可知: 两种钢水淬回火后的硬度明显高于油淬回火

后的硬度, 双相钢水淬试样硬度最高, 42CrMo 钢油淬试样硬度最低. 水淬时冷却速度大, 淬火后马氏体含量高, 回火后回火马氏体总量多, 故水淬回

火后具有明显高于油淬回火后的硬度. 随着回火温度的升高,两种钢硬度皆呈下降趋势. 原因为低温回火时,一方面马氏体发生分解使硬度下降,另一方面残余奥氏体转变为下贝氏体或回火马氏体使硬度增加,两者共同作用使硬度下降平缓. 温度升高后, ϵ -碳化物转变成渗碳体,其格关系破坏以及渗碳体聚集长大,使硬度进一步降低^[9].

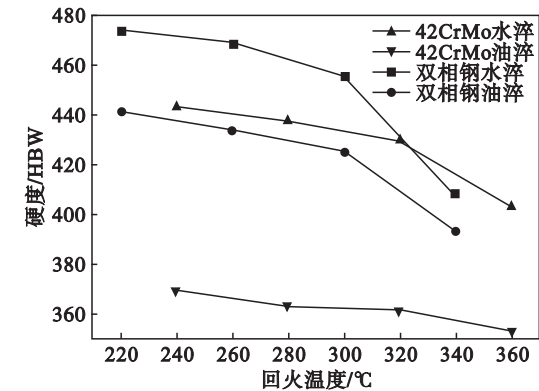


图 2 试验钢在不同回火温度的硬度曲线
Fig. 2 Hardness curves of test steel at different tempering temperatures

2.3 淬火介质对试验钢冲击韧性的影响

双相钢和 42CrMo 钢在不同回火温度下的冲击韧性曲线如图 3 所示. 由图 3 可知:42CrMo 钢油淬后冲击韧性最高,双相钢水淬后冲击韧性最低;水淬和油淬双相钢的冲击韧性都随回火温度的升高呈现先升再降的趋势. 原因是在低于 300 ℃回火时,其残余应力逐渐消除进而改善韧性,故随回火温度升高其冲击韧性得到提升. 回火温度在 300 ℃以上时,析出的碳化物增多,导致试样冲击韧性下降. 在 340 ℃回火时,出现回火脆性. 这是因为马氏体分解时沿马氏体条或边界析出薄壳状碳化物造成的^[8]. 对于水淬和油淬 42CrMo 钢,随回火温度的升高,其冲击韧性总体上也呈现出先升后降的趋势. 在 300 ℃以下回火时,残余应力逐渐消除使淬火钢的冲击韧性提高;残余奥氏体分解产生下贝氏体或等温马氏体,不会引起韧性下降,且在适当温度回火可以提高残余奥氏体的机械稳定性,提高冲击韧性^[10]. 在温度超过 320 ℃后,冲击韧性出现下降,分析为沿马氏体边界析出薄壳状碳化物所致.

2.4 淬火介质对试验钢拉伸性能的影响

拉伸性能的测试结果见图 4 和表 2. 由图 4a 和表 2 可知,相同回火温度下,油淬处理的双相钢试样其抗拉强度、屈服强度均较水淬处理的低,但延伸率却高于水淬试样. 随回火温度的升高,水淬和油淬试样的抗拉强度、屈服强度均先降低后升

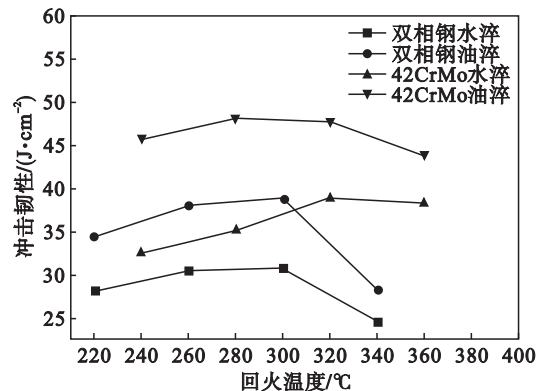


图 3 双相钢和 42CrMo 钢冲击韧性曲线
Fig. 3 Impact toughness curves of dual-phase steel and 42CrMo steel

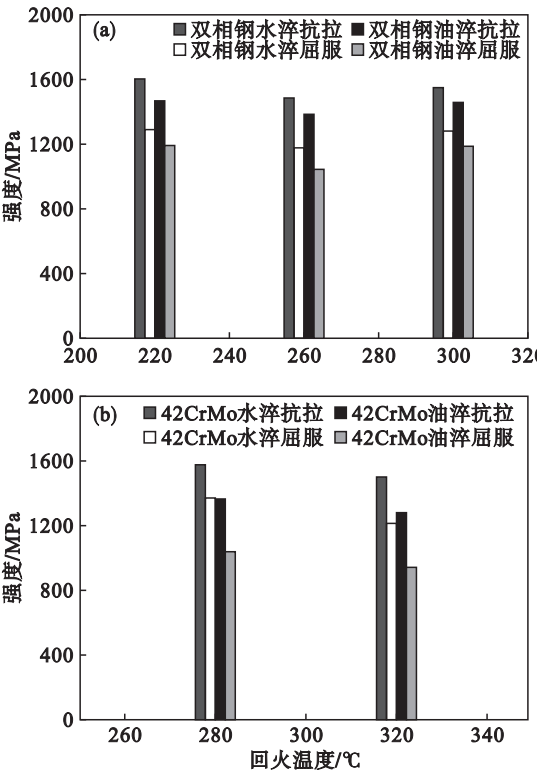


图 4 双相钢和 42CrMo 钢在不同回火温度下的抗拉强度和屈服强度

Fig. 4 Tensile strength and yield strength of dual-phase steel and 42CrMo steel at different tempering temperatures

(a)—双相钢; (b)—42CrMo 钢.

高,延伸率则先升高后降低. 在热处理过程中,水淬回火后试样具有更多板条马氏体且取向一致化程度高,所以回火强度较油淬试样高. 油淬试样较水淬试样组织中具有更多的贝氏体,这使得油淬试样具有更好的塑韧性,同时油淬试样较水淬试样具有更致密、细小、均匀的组织,二者共同作用使得油淬试样的延伸率更高. 回火过程中,既存在残余应力消除和位错密度降低的软化作用也存在碳化物沿位错线析出钉扎位错的强化作用^[9,11].

温度低于 260 ℃时,软化作用强于强化作用;而当温度高于 260 ℃时,残余应力已基本消除,而碳化物则越来越多,强化作用大于软化作用.故表现出试验钢的抗拉强度、屈服强度先降低后升高,延伸率则先升高后降低的现象.

表 2 双相钢和 42CrMo 钢在不同回火温度下的延伸率
Table 2 Elongate rate of dual-phase steel and 42CrMo steel at different tempering temperatures

回火温度/℃	220	260	280	300	320
双相钢水淬/%	6.1	7.6	—	7.3	—
双相钢油淬/%	7.6	9.7	—	9.3	—
42CrMo 钢水淬/%	—	—	8	—	10.5
42CrMo 钢油淬/%	—	—	9.5	—	11

由图 4b 和表 2 可知,随着回火温度的升高,水淬和油淬的 42CrMo 钢试样其抗拉强度和屈服强度均下降,延伸率升高.这是由于在回火的过程中,残余应力的消除和位错密度的降低使其抗拉强度、屈服强度下降,但析出的渗碳体又会使钢的强度升高.只是在回火温度低于 320 ℃时,试验钢残余应力消除和位错密度降低带来的软化效果强于渗碳体析出的强化效果,导致试验钢抗拉强度和屈服强度下降而延伸率增加^[9,11].

2.5 淬火介质对试验钢磨损性能的影响

图 5 和表 3 分别为磨损实验中试验钢磨损量随时间的变化曲线和双相钢、高锰钢对照磨损实验中的磨损数据.由图 5 知,同种试验钢经水淬处理的耐磨性能好于油淬处理的,水淬处理的 42CrMo 钢耐磨性能最好,油淬处理的 42CrMo 钢耐磨性能最差.由表 3 知双相钢水淬 + 300 ℃回火试样相对耐磨性为 1.532.换算后 42CrMo 水淬 + 280 ℃回火、42CrMo 油淬 + 280 ℃回火和双相钢油淬 + 300 ℃回火试样的相对耐磨性分别为:

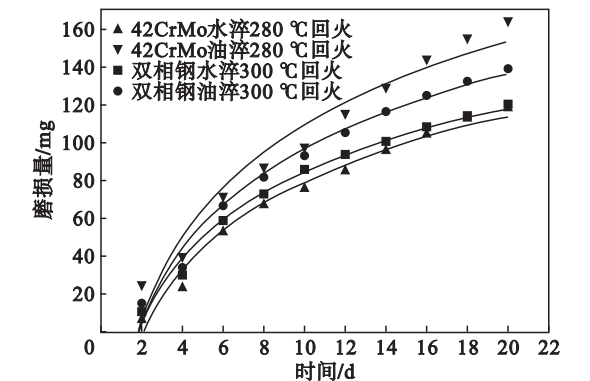


图 5 试样磨损量随时间的变化曲线

Fig. 5 Changing curves of wearing capacity of specimens at different time

1.558,1.121 和 1.314,均比高锰钢耐磨性能好.材料的耐磨性是硬度、塑韧性等多方面作用的结果^[12-13],单纯的高硬度或高韧性无法获得较高的耐磨性,只有材料具有良好的塑韧性及硬度配比时才能拥有较高的耐磨性.通过以上的数据可以发现,42CrMo 水淬 280 ℃回火试样具有良好的硬度、塑韧性配比,这是其具有最好的耐磨性的原因.

表 3 双相钢和高锰钢 480 h 磨损数据
Table 3 Abrasive wear data of dual-phase steel and high-manganese steel after 480 h

试验钢	原始质量/g	磨后质量/g	损失质量/g	相对耐磨性
双相钢	65.150	64.672	0.178	1.532
高锰钢	67.708	66.973	0.273	1.000

从综合性能分析得出:双相钢最佳热处理工艺为 950 ℃油淬 + 300 ℃回火,42CrMo 钢的最佳热处理工艺为:840 ℃水淬 + 280 ℃回火.

3 结 论

1) 经水淬、油淬处理的双相钢显微组织均为:板条马氏体 + 针状贝氏体 + 碳化物,且油淬处理的试样组织更加致密和细小.经水淬处理的 42CrMo 钢显微组织为:回火马氏体 + 残余奥氏体;油淬处理的 42CrMo 钢显微组织为:回火马氏体 + 铁素体 + 贝氏体.

2) 双相钢最佳热处理工艺为:950 ℃油淬 + 300 ℃回火.其硬度为 425HBW,冲击韧性为 38.8 J/cm²,抗拉强度、屈服强度可以达到 1 450,1 180 MPa,延伸率为 9.3%.42CrMo 钢最佳热处理工艺为:840 ℃水淬 + 280 ℃回火.其硬度为 445HBW,冲击韧性为 35 J/cm²,抗拉强度、屈服强度可以达到 1 565,1 362 MPa,延伸率为 8.0%.

3) 水淬 + 280 ℃回火处理的 42CrMo 钢耐磨性能最好,其相对耐磨性可达高锰钢的 1.558 倍.

参考文献:

[1] Elmahallawi I, Abdelkarim R, Naguib A. Evaluation of effect of chromium on wear performance of high manganese steel [J]. *Materials Science & Technology*, 2013, 17 (11) : 1385 - 1390.

[2] Ding C G. Study on the mechanical behavior and microscopic mechanism of explosive working of high-manganese steel [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 239/240/241/242 (1) : 506 - 512.

[3] Wen Y H, Peng H B, Si H T, et al. A novel high manganese austenitic steel with higher work hardening capacity and much

lower impact deformation than Hadfield manganese steel [J]. *Materials & Design*, 2014, 55(6):798–804.

[4] Kalandyk B, Tecza G, Zapala R, et al. Cast high-manganese steel the effect of microstructure on abrasive wear behavior in Miller test [J]. *Archives of Foundry Engineering*, 2015, 15(2):35–38.

[5] Seyedrezai H, Pilkey A K, Boyd J D. Effect of pre-IC annealing treatments on the final microstructure and work hardening behavior of a dual-phase steel [J]. *Materials Science & Engineering: A*, 2014, 594(2):178–188.

[6] Ahmad E, Manzoor T, Ziai M M A, et al. Effect of martensite morphology on tensile deformation of dual-phase steel [J]. *Journal of Materials Engineering & Performance*, 2011, 21(3):1–6.

[7] Shahriary M S, Koohbor B, Ahadi K, et al. The effect of dynamic strain aging on room temperature mechanical properties of high martensite dual phase (HMDP) steel [J]. *Materials Science & Engineering: A*, 2012, 550(6):325–332.

[8] 陈俊丹, 莫文林, 王培, 等. 回火温度对 42CrMo 钢冲击韧性的影响[J]. *金属学报*, 2012, 48(10):1186–1193.
(Chen Jun-dan, Mo Wen-lin, Wang Pei, et al. Effects of temperature on the impact toughness of steel 42CrMo [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2012, 48(10):1186–1193.)

[9] 崔忠圻, 刘北兴. 金属学与热处理原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007.
(Cui Zhong-qi, Liu Bei-xing. *Metallurgy and heat treatment theory* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2007.)

[10] 王平, 杨峥, 康沫狂. 等温淬火组织中残余奥氏体回火转变的研究[J]. *航空材料学报*, 1990, 2(2):8–15.
(Wang Ping, Yang Zheng, Kang Mo-kuang. The investigation of tempering transformation of retained quenching austenite in isothermal quenching microstructure [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 1990, 2(2):8–15.)

[11] Zhang H, Bai B Z, Fang H S. A Mn-series of oil-quenched super-strength bainitic steel with high harden ability [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2010, 17(5):38–43.

[12] Larbi A B C, Cherif A, Tarres M A. Improvement of the adhesive wear resistance of steel by nitriding quantified by the energy dissipated in friction [J]. *Wear*, 2005, 258(5/6):712–718.

[13] Zhang J, Li H. Influence of manganese phosphating on wear resistance of steel piston material under boundary lubrication condition [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2016, 304:530–536.

(上接第 649 页)

[3] Xie J, Fu H, Zhang Z, et al. Deformation twinning feature and its effects on significant enhancement of tensile ductility in columnar-grained Fe-6.5wt.% Si alloy at intermediate temperatures[J]. *Intermetallics*, 2012, 23:20–26.

[4] Ros-Yanez T, Houbaert Y, Fischer O, et al. Production of high silicon steel for electrical applications by thermomechanical processing [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 143:916–921.

[5] 林均品, 叶丰, 陈国良, 等. 6.5 wt% Si 高硅钢冷轧薄板制备工艺结构和性能[J]. *前沿科学*, 2007(2):13–26.
(Lin Jun-pin, Ye Feng, Chen Guo-liang, et al. Fabrication technology, micro structures and properties of Fe-6.5 wt.% Si alloy sheets by cold rolling [J]. *Frontier Science*, 2017(2):13–26.)

[6] 刘璐, 杨平, 秦镜, 等. 高硅钢温轧过程压下率及中间退火对组织和织构的影响[J]. *电子显微学报*, 2013, 32(6):459–466.
(Liu Lu, Yang Ping, Qin Jing, et al. Effects of rolling reduction and intermediate annealing on the microstructure and texture of 6.5 wt.% Si electric steel during warm rolling [J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2013, 32(6):459–466.)

[7] Sha Y H, Sun C, Zhang F, et al. Strong cube recrystallization texture in silicon steel by twin-roll casting process[J]. *Acta Materialia*, 2014, 76:106–117.

[8] Xie J, Fu H, Zhang Z, et al. Deformation twinning in an Fe-6.5 wt.% Si alloy with columnar grains during intermediate temperature compression [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 538:315–319.

[9] Inagaki H. Stable end orientations in the rolling textures of the polycrystalline iron[J]. *Zeitschrift für Metallkunde*, 1987, 78:431–439.

[10] Quadir M Z, Duggan B J. Deformation banding and recrystallization of α fibre components in heavily rolled IF steel[J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(13):4011–4021.