

冷拔应变对 304H 钢丝扭转性能的影响

彭科 刘静 袁泽喜 彭志贤

(武汉科技大学 1 省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室;
2 湖北省海洋工程材料及服役安全工程技术中心, 武汉 430081)

摘要 研究了 304H 不锈钢丝 $\Phi 2.6$ mm 至 $\Phi 0.89$ mm 冷拔过程中组织演变和缺陷对不锈钢丝扭转性能的影响。结果表明:当钢丝冷拔真应变介于 0 ~ 1.39 时,扭转性能急剧下降、扭转次数减少;当冷拔真应变介于 1.39 ~ 2.14 时,扭转性能逐步回升,扭转次数增加。随着应变的施加,加工硬化导致位错塞积致使塑性变差,是扭转性能下降的主要因素,且此阶段 $\{111\}$ //ND 织构含量增加也不利于扭转性能;随着冷拔真应变进一步增大,钢丝内部晶粒细化为超细晶粒导致强度进一步提升,塑性回复,是扭转性能回升的主要因素,且 $\{111\}$ //ND 织构含量下降也有利于扭转性能。但冷拔真应变超过 1.39 之后,夹杂物平均面密度也同时增加,阻碍了钢丝扭转性能的进一步恢复。

关键词 304H 不锈钢 扭转性能 晶粒取向 晶粒尺寸 夹杂物

Influence of Cold Drawing Strain on Torsion Properties of 304H Steel Wire

Peng Ke, Liu Jing, Yuan Zexi and Peng Zhixian

(1 State Key Laboratory of Refractory Materials and Metallurgy of Ministry of Education;
2 Hubei Engineering Technology Center for Marine Engineering Materials and Service Safety,
Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract The influence of structure evolution and defects of 304H stainless steel wire during the cold drawing process from $\Phi 2.6$ mm to $\Phi 0.89$ mm on torsion performance of stainless steel wire are studied. The results show that when the true cold drawing strain of the steel wire is between 0 and 1.39, the torsion performance decreases sharply and the number of torsion decreases; when the true cold drawing strain is between 1.39 and 2.14, the torsion performance gradually rises and the number of torsion increases. With the application of strain, work hardening leads to the deterioration of plastic toughness by dislocation plugging, which is the main factor for the decrease of torsional performance, and the increase in the content of $\{111\}$ //ND texture at this stage is also not conducive to the torsional performance; as the strain is further increased, and the internal grains of steel wire are refined into ultra-fine grains, leading to further increase in strength and recovery of plastic toughness, which are the main factors for the rebound of torsion performance, and the decrease of $\{111\}$ //ND texture content is also available to torsion performance. However, when the true cold drawing strain exceeds 1.39, the average areal density of inclusions also increases, which hinders the further recovery of the torsional performance of the steel wire.

Material Index 304H Stainless Steel, Torsion Properties, Grain Orientation, Grain Size, Inclusions

304H 不锈钢丝以其优异的力学性能、耐腐蚀性等特点,在路桥钢缆、精密仪器和医疗器械等领域有着广泛的应用。钢丝的使用寿命与扭转性能有着密切的联系,而不同道次冷拔加工往往会对扭转性能产生较大影响。

通常认为,晶粒尺寸、夹杂物、裂纹孔隙率、应力分布以及形变织构^[1-2]等均会影响钢丝的扭转性能。王宾宁^[3]等基于马氏体钢丝晶粒尺寸研究发现,冷拔钢丝的晶粒尺寸由 22.7 μm 减小到 13.8 μm 时,位错与晶粒细化使强度增加,但塑性急剧下降,扭转性能变差。Liu^[4]等人认为,当晶粒细化至 2 μm 以下,由于超细晶粒间亚结构的合并化避免了应力集中而发生失效断裂,强度及硬度提升的同时塑韧

性也得到改善,扭转性能也得到提升。另一方面,钢丝在拉拔过程中织构的演变也会对扭转性能产生影响,Lu^[5]等人通过索揽盘条扭转实验发现,扭转的最大切应力与试样的轴线(纵面)平行,当钢丝中主要滑移面所代表的织构含量越高时(FCC- $\{111\}$),试样抗扭转的能力越差,扭转次数越少。反之,扭转值较高。沈月音^[6]等人则基于钢丝尺寸研究发现,当钢丝直径 $d < 1$ mm,钢丝的强度会出现“越细越强”效应,塑性及扭转性能也得到提升。

1 实验材料及方法

304H 不锈钢丝母材盘条直径为 $\Phi 2.6$ mm 的圆形线材,化学成分见表1。经过9个道次的连续冷

表 1 试验 304H 钢化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test 304H steel/%

C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	N
0.08	0.39	1.18	0.005	0.030	7.6	8.33	0.092	0.108

表 2 304H 钢丝各冷拔道次参数、晶粒尺寸和抗拉强度

Table 2 Parameters, grain size and tensile strength of each cold drawing pass of 304H steel wire

道次	直径/mm	减面率/%	真应变(ε)	晶粒尺寸/μm	抗拉强度/MPa
0	2.60	0	0	35.20	756
1	2.32	20.10	0.22	27.30	965
2	2.09	19.28	0.44	19.81	1213
3	1.69	34.64	0.86	7.49	1510
4	1.40	31.41	1.24	2.23	1686
5	1.30	13.79	1.39	1.12	1733
6	1.16	19.58	1.61	0.73	1843
7	1.06	16.76	1.79	0.32	1892
8	0.97	16.40	1.97	0.13	1953
9	0.89	15.23	2.14	0.09	2021

拔应变,分别截取各道次的试样进行测试与分析,钢丝冷拔的道次减面率计算方法为:

$$\Delta S = [(D_0^2 - D_i^2) / D_0^2] \times 100\% \quad (1)$$

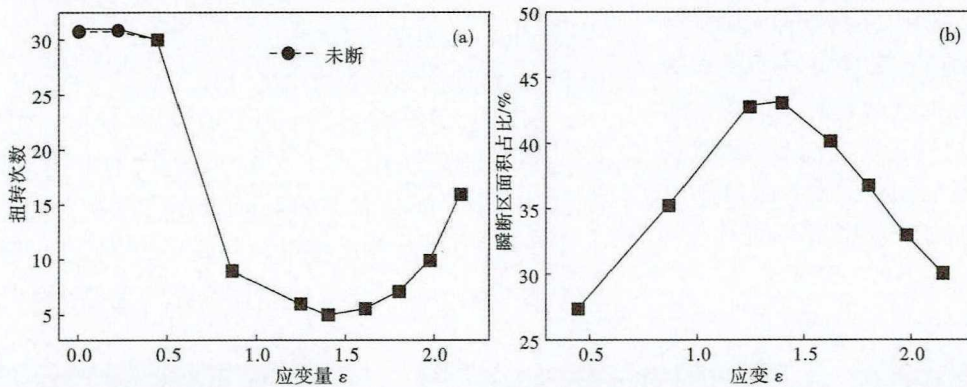


图 1 钢丝扭转次数和应变的关系 (a) 和瞬断区占比变化趋势图 (b)

Fig. 1 Relationship between number of torsion and strain (a) and trend chart of proportion of transient fracture area (b) of steel wire

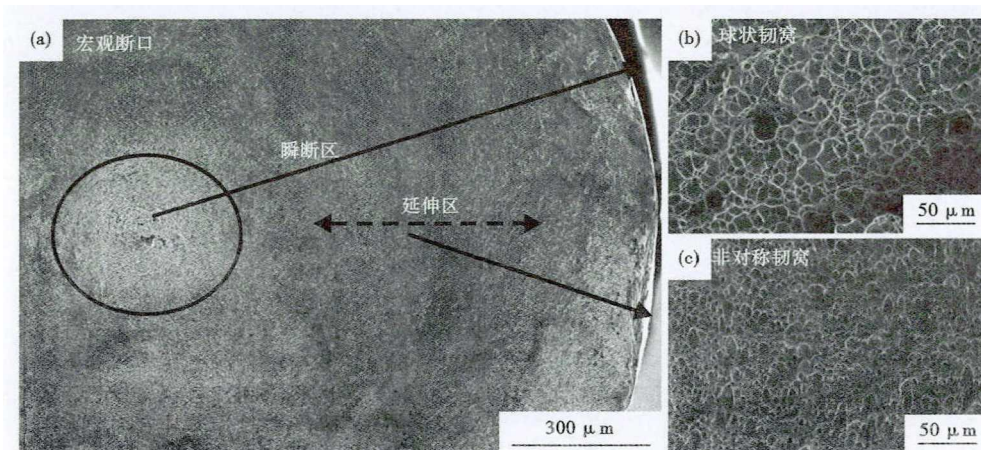


图 2 钢丝扭转断口 SEM 形貌

Fig. 2 SEM morphology of torsion fracture of steel wire

式中: D_0 - 各道次拉拔前直径; D_i - 各道次的出模直径。真应变定义为^[7]:

$$\varepsilon = \ln(d_0/d_i)^2 \quad (2)$$

式中: d_0 - 母材直径; d_i - 各道次出模直径。具体拉拔参数见表 2。

拉丝试样经砂纸打磨、机械抛光后,使用质量分数为 10% 的 $FeCl_3$ 的腐蚀水溶液腐蚀,采用扫描电镜 (SEM) 对钢丝的微观结构进行观察并统计晶粒尺寸,采用电子背散射衍射仪 (EBSD) 对钢丝试样的晶粒取向信息进行采集,用蔡司金相显微镜 (OM) 对钢丝试样中夹杂物进行观察并统计其在横截面的平均面密度,采用拉伸试验机 (INSTRON BLUEHILL) 对钢丝试样抗拉强度进行测试,采用扭转试验机对不锈钢丝的扭转性能进行测试。

2 实验结果

2.1 扭转性能及扭转断口分析

图 1 是各道次钢丝的扭转次数与应变的关系。

由于母材和一道次试样具有良好的塑性,在扭转测试中未发生扭断(扭转次数 > 30)。扭转测试的试样扭断从第二道次开始,扭转次数为 30,随着应变量的增加,钢丝试样的扭转次数急剧减少,第五道次扭转性能最差,扭转次数为 5,自第五道次之后钢丝的扭转次数缓慢回升,第九道次试样的扭转次数为 16。钢丝的扭转次数随应变的变化趋势呈钩状,见图 1 (a)。

图 2 是扭转断口的 SEM 形貌,其中图 2(a) 为钢丝扭转断口的典型宏观形貌图,可分为中心部分的瞬断区和外围部分的延伸区。瞬断区韧窝为球形,且韧窝口朝上与截面垂直(韧窝

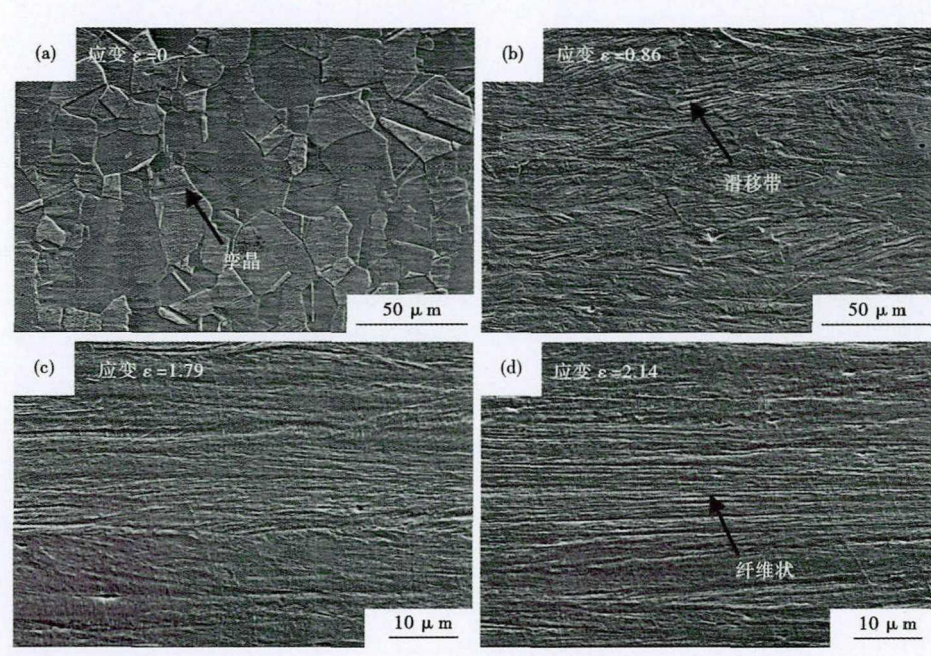


图 3 钢丝应变(ϵ):0 (a),0.86 (b),1.79 (c)和 2.14(d)的 SEM 形貌
Fig.3 SEM morphology of steel wire with strain ϵ :0 (a),0.86 (b),1.79 (c) and 2.14(d)

采用扫描电镜观察各道次出模钢丝纵截面组织,母材试样中主要为块状的等轴晶见图 3(a);随着冷拔应变的施加,如图 3(b)为应变 0.86(三道次)的钢丝试样,在晶粒内部有大量机械孪晶和滑移带出现;应变量进一步增加时,如图 3(c) (d)分别是应变量为 1.79 和 2.14(七、九道次)的试样,粗大晶粒被彻底破碎,晶界模糊不清,晶粒沿冷拔方向被拉长形成纤维状组织,晶粒内存在较为密集的滑移带。对各道次的晶粒尺寸(纤维条带间距平均值)进行统计,晶粒尺

寸平均尺寸为 $11.02 \mu\text{m}$,见图 2(b),延伸区韧窝口则朝扭转方向偏转呈半椭圆形(韧窝口平均尺寸为 $9.16 \mu\text{m}$),见图 2(c)。对各道次的瞬断区面积在断口总面积中的占比进行统计分析,呈大幅增加后逐步减小的趋势,见图 1(b)。不锈钢丝的抗拉强度随着应变的关系见表 2,应变增加,抗拉强度不断提升。

2.2 试样微观组织观察

寸(d)和抗拉强度与应变的关系见表 2。

2.3 晶粒取向随拉拔道次的变化

对钢丝的纵截面进行 EBSD 取向分析。图 4(a~e)分别是母材、一、三、五、七道次的取向成像图,由 4 图可知,母材中的取向成分随机分布;经过一个道次的拉拔,奥氏体组织开始沿拉拔方向被拉长且试样表面不可标定的黑色区域增多,表现为内

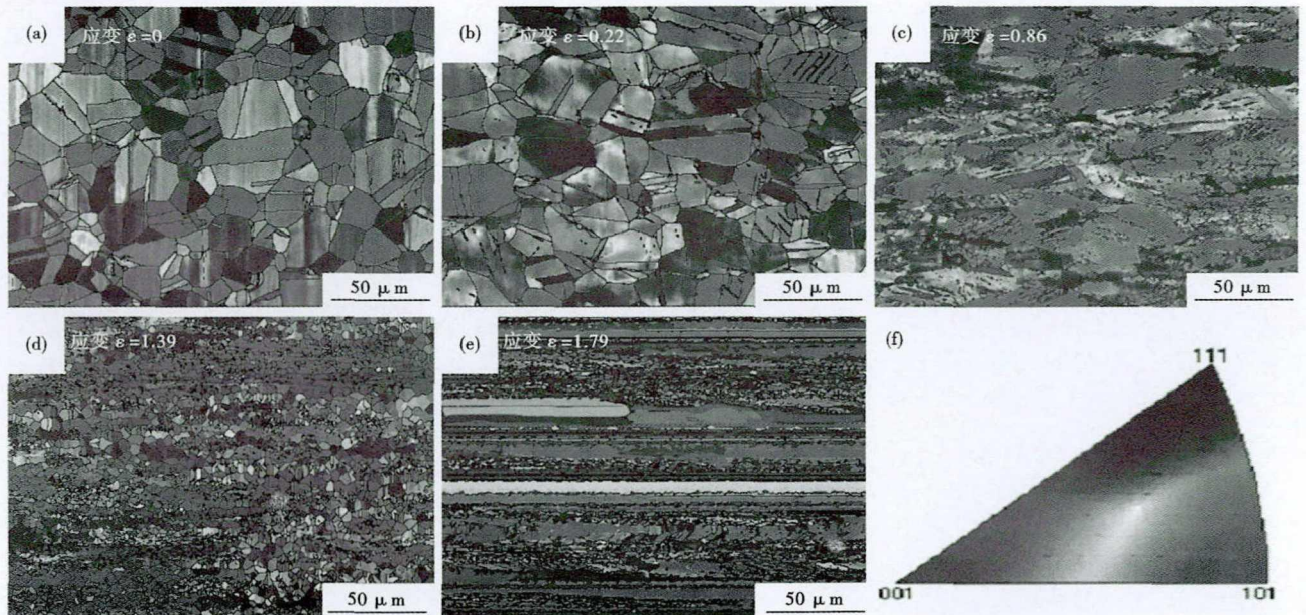


图 4 钢丝应变(ϵ):0 (a),0.22 (b),0.86 (c),1.39 (d)和 1.79 (e)取向成像图,(f)晶界取向标尺
Fig.4 Orientation imaging diagram of steel wire with strain ϵ :0 (a),0.22 (b),0.86 (c),1.39 (d) and 1.79 (e), crystal plane orientation scale (f)

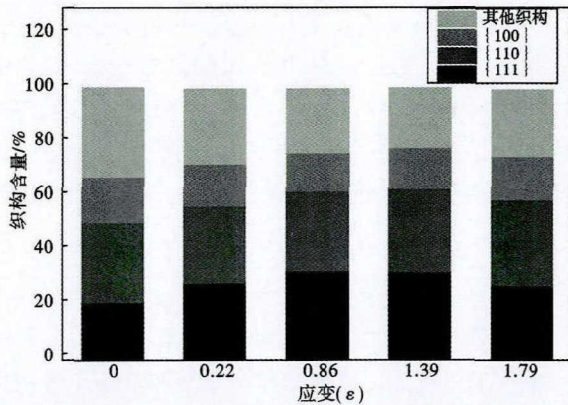


图5 钢丝应变 ε : 0、0.22、0.86、1.39、1.79 织构含量的变化
Fig. 5 Changes of texture content in steel wire with strain ε : 0, 0.22, 0.86, 1.39, and 1.79

部缺陷密度的增长。同时,可观察到钢丝 $\{111\}/\text{ND}$ 织构面积比快速增加,但 $\{110\}/\text{ND}$ 织构面积比变化较小, $\{100\}/\text{ND}$ 织构含量则出现了一定量下降;当拉拔进行到第三个道次时,形貌背底中的晶粒大量破碎细化, $\{111\}/\text{ND}$ 织构组分仍在增加,而增量较为平缓, $\{110\}/\text{ND}$ 变化仍较小, $\{100\}/\text{ND}$ 组分含量仍在下降;拉拔进行至第五和第七道次,晶粒沿拉拔方向呈纤维化,此时的 $\{111\}/\text{ND}$ 织构含量出现了下降, $\{110\}/\text{ND}$ 与 $\{100\}/\text{ND}$ 组分含量有小幅度的提升。织构含量变化趋势见图5。

2.4 夹杂物面密度随拉拔道次的演变规律

对各道次钢丝试样横截面中所有的夹杂物进行

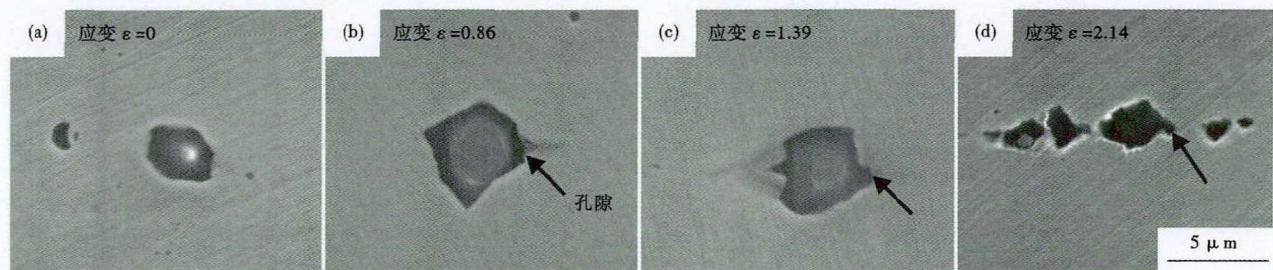


图6 钢丝应变 ε : 0 (a), 0.86 (b), 1.39 (c) 和 2.14 (d) 纵截面夹杂物 SEM 的形貌
Fig. 6 SEM morphology of inclusions at longitudinal section in steel wire with strain ε : 0 (a), 0.86 (b), 1.39 (c) and 2.14 (d)

定量统计,并根据横截面积进行平均面密度计算,夹杂物平均面密度随拉拔增长较为平缓而后有相对幅度的提升 [18.3→18.5→19.1→20→20.6→21→23.1→24.9→26.5→27.2 (/mm²)]. 经 EDS 能谱分析,夹杂物多为 Al₂O₃ (占夹杂物量 95%, 平均尺寸为 3.3 μm) 和少量的 Al Si Ca 复合夹杂 (占比 5%, 平均尺寸为 2.7 μm)。夹杂物在冷拔过程中相对于基体不易发生变形,在母材试样中夹杂物与基体较为贴合,而随着冷拔的进行,夹杂物周围沿冷拔方向逐渐有裂纹和孔隙出现,周边形貌呈纺锤状,见图6。

3 结果讨论

随着冷拔道次的递进,总冷拔减面率的不断增加,钢丝扭转性能表现出明显的差异。由图1可知,钢丝扭转性能变化可分为两阶段,当应变介于 0~1.39 时,不锈钢丝的扭转性能急剧下降,扭转次数大幅减小;而应变介于 1.39~2.14 时,不锈钢丝的扭转性能逐步回升,扭转次数小幅增加。

针对第一阶段拉拔钢丝扭转性能变化规律,结合组织及其物理性能分析结果可知,此阶段材料微观结构主要体现为晶粒尺寸及织构变化较为剧烈。

文献[8-9]指出,晶粒较大(晶粒尺寸 $d > 5 \mu\text{m}$)时,金属的流变应力(钢丝强度)与位错密度的平方根成比例。

$$\sigma_p = \alpha M G b \sqrt{\rho} \quad (3)$$

式中: α -常数; M -平均泰勒常数; G -奥氏体剪切模量; b -柏氏矢量。

因此,随着冷拔应变的增加,钢丝内部的位错密度也随之显著增加,位错的交割、缠结、塞积导致钢丝强度提升,而其塑韧性显著下降。由于位错塞积造成的应力集中,钢丝在扭转实验中易发生扭断,扭转性能变差,扭转次数减少。另外,由图5可知,冷拔真应变介于 0~1.39 时,钢丝中的 $\{111\}/\text{ND}$ 织构含量随应变不断增加, $\{100\}/\text{ND}$ 含量逐渐降低, $\{110\}/\text{ND}$ 含量变化不大。钢丝的扭转性能与晶体的滑移面数量有重要关系^[5],由扭转时所受应力可知,钢丝试样扭转过程中的最大切应力分布在与试样轴向平行的截面(纵截面)上^[10],由于面心立方金属的滑移面为(111)面,故试样中 $\{111\}/\text{ND}$ 织构含量高时,主要滑移面与最大切应力处于同一平面,扭转时易发生塑性变形,位错大量启动并塞积

造成应力集中,导致裂纹萌生而断裂,抵抗扭转变形能力变差^[11-12]。据此可推断,钢丝在真应变介于 0~1.39 阶段,位错塞积造成的应力集中和 $\{111\}$ //ND 织构的增加,是导致钢丝在此阶段扭转性能急剧下降的主要因素。

随着冷拔的进一步进行,当冷拔应变大于 1.39 时,结合显微组织结果分析可知,此阶段除晶粒尺寸与织构发生变化外,夹杂物平均面密度也发生显著变化。当形变造成的晶粒细化至 2 μm 以下时,高密度的位错在亚晶界能形成有效的交互作用,即位错的缠绕结构经过积聚、重组、湮灭以形成亚晶界^[13-15]。应变持续增加,小角度亚晶界随后逐渐演变成大角度亚晶界,晶粒被分割得更细小。亚晶内部不断重复上述过程,从而避免了应力集中,塑韧性得到一定改善,扭转性能得到提升,扭转次数增多。另外,应变介于 1.39~2.14 时, $\{111\}$ //ND 含量减少, $\{100\}$ //ND、 $\{110\}$ //ND 等含量均有小幅度升高,试样的主要滑移面与最大切应力不在同一平面,抵抗扭转变形的能力增强^[16]。还应注意到,在钢丝内存在一定量的夹杂物(图 6),根据能谱(EDS)分析,其主要为氧化铝和少量的复合氧化物夹杂。通常情况下,夹杂物相对于基体塑性变形能力差,拉拔中在夹杂物周边易形成孔隙,且钢丝尺寸减小导致夹杂物平均面密度不断增加。扭转时在夹杂物周围

造成应力集中,促进了裂纹萌生,不利于扭转性能。且钢丝拉拔直径越小,不利作用越强烈。因此,当钢丝真应变介于 1.39~2.14 时,在晶粒尺寸与织构对钢丝扭转均有利的条件下,夹杂物密度的增加使钢丝扭转性能只得到有限的提升。

4 结论

(1) 随着应变的增加,加工硬化使钢丝的强度提升而塑韧性变差,是扭转性能急剧下降的主要因素;应变超过 1.39,超细晶粒形成,强度提升塑韧性变好,是扭转性能回升的主要因素。

(2) 钢丝真应变小于 1.39 时,钢中 $\{111\}$ //ND 织构含量不断增加,扭转性能下降,应变大于 1.39 时, $\{111\}$ //ND 织构含量下降,扭转性能回升。

(3) 钢丝应变介于 0~1.39 时,加工硬化与 $\{111\}$ //ND 织构增加均不利于扭转性能,扭转次数大幅减少;真应变介于 1.39~2.14 时,超细晶粒与 $\{111\}$ //ND 织构减少均有利于扭转性能,但夹杂物密度的增加不利于扭转,阻碍了钢丝扭转性能的进一步恢复。

国家自然科学基金资助项目(51871171);江苏省科技成果转化专项重大产业创新专题(BA2018047)资助

参考文献

- [1] Sourisseau T, Ferrière D, Moser F, et al. Rotary Bending as a Mean for Improving Micro-Cleanliness of Stainless Steels for High Demanding Applications [C]//MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2018, 165: 20009.
- [2] 凌必超. 超高强度钢丝拉拔损伤过程模拟分析及扭转性能提升[D]. 南京:东南大学, 2017.
- [3] 王宾宁, 宋仁伯, 谭瑶, 等. 冷拉拔对 410 马氏体不锈钢丝组织及性能的影响[J]. 辽宁科技大学学报, 2017, 40(2): 85-90.
- [4] Liu J. Model of the Effect of Grain Size on Plasticity in Ultra-Fine Grain Size Steels [J]. Acta Metall Sinca, 2015, 51(7): 777-783.
- [5] 鲁修宇, 任安超, 蒋跃东, 等. 桥梁缆索盘条组织对钢丝扭转性能的影响[J]. 热处理技术与装备, 2017, 38(4): 34-39.
- [6] 沈月音. 316L 不锈钢丝多轴循环及疲劳性能研究[D]. 天津:天津大学, 2018.
- [7] 张春雷, 张东, 邱从怀, 等. 超高强度钢丝拉拔硬化行为的研究[J]. 现代冶金, 2015, 43(6): 23-25.
- [8] Hansen N. Boundary Strengthening in Undeformed and Deformed Polycrystals [J]. Materials Science & Engineering A, 2005, 409(1-2): 39-45.
- [9] 陈焯友, 李烈军, 邢献强, 等. 高碳钢丝冷拔中的组织演变和强化机理研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(3): 43-47.
- [10] Zhou L, Fang F, Wang L, et al. Torsion Performance of Pearlitic Steel Wires: Effects of Morphology and Crystallinity of Cementite [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 743: 425-435.
- [11] 朱家晨, 刘静, 程朝阳, 等. 盘条组织及织构对桥梁缆索钢丝扭转性能的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 045(18): 49-52.
- [12] Wei P, Zhou H, Liu H, et al. Investigation of Grain Refinement Mechanism of Nickel Single Crystal During High Pressure Torsion by Crystal Plasticity Modeling [J]. Materials, 2019, 12(3): 351-356.
- [13] Ke L. Summary and Outlook of the Major Project "Design and Preparation of Multi-Scale Structure for Strengthening and Toughening of Metallic Materials" [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2013, 27(2): 70-74.
- [14] 谢小龙, 杨军, 邹德宁, 等. 马氏体组织对 SFPB 处理双相钢表面纳米结构及力学性能的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(12): 92-98.
- [15] Song R, Ponge D, Raabe D, et al. Overview of Processing, Microstructure and Mechanical Properties of Ultrafine Grained Bcc Steels [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 441(1-2): 1-17.
- [16] 任慧平, 李一鸣, 毛卫民. 轧制过程中钢板不同晶体学变形机制的交互作用[J]. 内蒙古科技大学学报, 2019, 38(4): 337-343.

彭科(1994-),男,硕士研究生,2018年湖北工程学院(本科)毕业,不锈钢研究。E-mail: Peng-ke@foxmail.com

收稿日期: 2020-12-20