

7×7结构超高强度钢丝帘线破断力影响因素的探讨

姚丽丽^{1,2}, 王 威^{1,2}, 朱晨露^{1,2}, 陈长新^{1,2}

(1. 江苏兴达钢帘线股份有限公司, 江苏 泰州 225721; 2. 江苏省结构与功能金属复合材料重点实验室, 江苏 泰州 225721)

摘要:从生产实际出发,研究影响7×7结构超高强度钢丝帘线破断力的因素。结果表明:7×7结构超高强度钢丝帘线破断力受多因素影响,其中一个重要的因素是单丝强度,当单丝强度大于3 500 MPa时帘线破断力捻制损失急剧增大;破断力捻制损失与帘线结构有关,相同强度单丝捻制单股结构和层状结构钢丝帘线时,破断力捻制损失较小;7×7结构超高强度钢丝帘线破断力捻制损失受面股的影响较大,受芯股的影响较小,破断力捻制损失主要产生在股线合成帘线阶段,并且与合绳的捻距和放线张力稳定性有关,随着捻距越大,钢丝帘线的破断力捻制损失基本呈线性减小,张力稳定,帘线破断力捻制损失较小。

关键词:钢丝帘线;超高强度;破断力;捻制损失

中图分类号:TQ330.38⁺⁹

文献标志码:A

文章编号:2095-5448(2022)09-0426-05

DOI:10.12137/j.issn.2095-5448.2022.09.0426



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

轮胎制造技术的快速发展推动轮胎工业不断生产出更节能、更安全、成本更低、寿命更长的轮胎,开发高强度、超高强度钢丝帘线,既能有效地提高胎体、带束层的强度和轮胎的安全性能,也能减小轮胎钢丝帘线的用量,降低生产成本,节约能源和原材料^[1]。罗奕文^[2]按ISO 17832:2018钢丝帘线中钢丝的强度等级分类,设计使用超高强度(ST)钢丝帘线代替高强度(HT)钢丝帘线,可减小轮胎钢丝帘线和胶料用量。根据轮胎产品性能的发展需求,钢丝帘线向强度4 000 MPa及以上发展,不仅提高轮胎的安全性,还可减小轮胎钢丝帘线的用量,降低成本。黄宝等^[3]研究表明,高强度钢丝帘线的疲劳强度明显比普通强度钢丝帘线高。随着轮胎子午化率在新兴国家中继续增大,绿色轮胎成为全球发展趋势,要求低燃油消耗和二氧化碳排放,ST钢丝帘线已经显著减小了帘布

的质量,若要进一步减小质量则可以考虑特高强度(UT)钢丝帘线^[4]。而作为钢丝帘线产品的一个分支,工程机械子午线轮胎用钢丝帘线更需要向高强度发展,这是由于工程机械轮胎的负荷远高于普通载重轮胎,载质量高达400 t,因此传统的层状结构钢丝帘线已经不能满足要求。目前的解决方案一般是把多根传统钢丝帘线捻制在一起,形成更大规格的工程机械子午线轮胎用钢丝帘线,其中较流行的钢丝帘线结构如图1所示^[5-6]。

正是由于工程机械子午线轮胎用钢丝帘线的结构相对复杂,产品标准要求较高,在超高强度钢丝帘线开发中成品破断力常达不到标准要求,有文献指出钢丝绳拆股钢丝抗拉强度和抗扭转性能等均比捻制前钢丝对应性能有一定幅度的降低,这种冷拉钢丝捻制成钢丝绳后力学性能降低的现象称为钢丝绳的捻制损失^[7]。而钢丝绳的捻制损失一般情况下与单丝的原始强度、捻距、直径、抗扭转性能等诸多因素有关^[8-9]。本工作针对7×7 Φ2.3 mm超高强度钢丝帘线开发过程中出现的设计单丝破断力总和远大于产品标准、但最后成品破断力不达标(标准为大于7 000 N)的问题进行研

作者简介:姚丽丽(1976—),女,四川三台县人,江苏兴达钢帘线股份有限公司高级工程师,博士,主要从事博士后科研工作站专项课题研究和管理工作,并着重于功能型金属复合材料基础研究和前沿技术等探索工作。

E-mail:yll_dd@xingda.com.cn

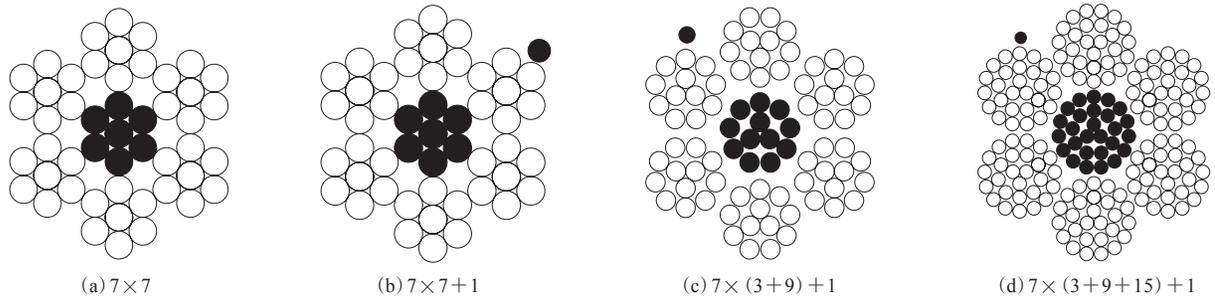


图1 工程机械子午线轮胎用钢丝绳帘线结构示意图

究,探讨影响 $7 \times 7 \Phi 2.3$ mm结构超高强度钢丝绳帘线破断力的相关因素。

1 试验材料与方法

试验原材料采用含碳量(质量分数)为0.92%,0.82%和0.72%的高碳钢镀黄铜钢丝,钢丝规格为 $\Phi 1.55$ mm, $\Phi 1.65$ mm, $\Phi 1.35$ mm和 $\Phi 1.50$ mm。不同规格、不同含碳量的镀铜钢丝在TB4型水箱湿式拉丝机上拉拔成不同规格单丝,保证拉拔的单丝强度在所需范围内。不同强度的单丝根据试验要求,经过DTU型捻股机捻制成 $1+6$ 结构的股线,最后股线经过管式机合成 7×7 结构钢丝绳帘线,试验对每一步单丝或股线的破断力进行检测,便于计算捻制损失。破断力捻制损失=(单丝初始破断力总和-捻制后破断力)/单丝初始破断力总和。 $7 \times 7 \Phi 2.3$ mm结构钢丝绳帘线的主要性能指标为:直径

(2.3 ± 0.05) mm,结构 $0.28 + 6 \times 0.26 + 6 \times (0.26 + 6 \times 0.24)$,捻向 Z/S/Z或S/Z/S,捻距 $(9.0/11.5/17.5 \pm 0.5)$ mm,破断力 > 7000 N。

试验采用德国Zwick公司的CMT6103型拉伸试验机对单丝破断力进行检测;采用上海量具厂的130型数显千分尺对单丝直径进行检测;采用德国Zwick公司的010型拉伸试验机对股线或成品钢丝绳帘线破断力进行检测。

2 结果与讨论

2.1 各阶段破断力捻制损失分析

根据 $7 \times 7 \Phi 2.3$ mm钢丝绳帘线破断力要求,使用DTU型捻股机捻制股线,最后股线经过管式机合成钢丝绳帘线。1.55ST镀铜钢丝拉拔单丝的检测结果如表1所示。

表1 1.55ST镀铜钢丝拉拔单丝的检测结果

规格	单丝直径/mm	破断力/N	强度/MPa
0.28	0.278	211	3 478
0.26	0.258	191	3 600
0.24	0.248	173	3 585

表1中单丝强度按ISO 17832:2018标准分类均已达到超高强度级别。

1.55ST镀铜钢丝拉拔生产的钢丝绳帘线的检测结果为:直径 2.259 mm,捻向 Z/S/Z,捻距 17.78 mm,破断力 6 153 N。

由此可以看出,虽然钢丝绳帘线直径、捻距均满足标准要求,但破断力只有6 153 N,远低于标准要求的大于7 000 N。

在初期试验设计中,单丝破断力总和远大于帘线所需要的破断力,对每一步捻制单丝或股线的破断力进行检测,计算每一步的捻制损失,如图2所示。

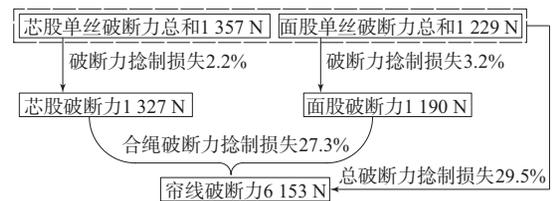


图2 1.55ST镀铜钢丝拉拔单丝捻制损失

从图2可以看出,单丝的破断力总和为8 731 N,远大于标准要求的7 000 N,但最后帘线的破断力只有6 153 N,整个帘线捻制过程中的破断力损失为29.5%。从捻制过程的每一步进行分析,可以看出拉拔的单丝不论是捻制芯股还是捻制面股,破断力的捻制损失均不大,分别是2.2%和3.2%,但在使用股线捻制帘线时破断力捻制损失急剧增大,达到27.3%,可以明显看出破断力的捻制损失主要产生在股线合成帘线阶段。

2.2 不同强度芯股对破断力捻制损失的影响

钢丝绳的强度损失与钢丝的结构、捻角及钢丝的原始强度不均匀性有关,钢丝的扭曲越大,股中钢丝的同心层越多,则钢丝绳的强度损失就越大^[10]。从这方面考虑分析,7×7结构钢丝绳帘线由1根芯股和6根面股捻制而成,在捻制过程中面股相

当于经过了两次捻制,合成工序破断力的捻制损失确实会增大。保证面股使用的单丝不变,使用不同含碳量和直径的镀铜钢丝得到不同破断力的芯股单丝,相同面股搭配不同强度芯股钢丝绳帘线的破断力捻制损失如表2所示。

从表2可以看出,芯股单丝强度在2 242~

表2 相同面股搭配不同强度芯股钢丝绳帘线破断力捻制损失

芯股单丝强度范围/MPa	芯股单丝破断力总和/N	芯股破断力/N	芯股破断力捻制损失/%	帘线破断力/N	帘线破断力捻制损失/%
2 242~2 350	955	942	1.4	6 394	23.0
2 819~2 925	1 101	1 060	3.7	6 204	26.3
2 978~3 171	1 184	1 147	3.1	6 849	19.5
3 060~3 216	1 219	1 149	5.7	6 230	26.8
3 478~3 660	1 357	1 341	1.2	6 323	27.3

注:面股破断力为1 227 N。

3 660 MPa范围内,芯股破断力捻制损失较小,在6.0%以内,单丝强度等级基本覆盖了从NT到ST的范围。相同面股与不同强度单丝捻制的芯股合成帘线这一步的破断力损失基本在20.0%以上但波动范围较小,说明破断力的捻制损失主要产生在合成帘线阶段,芯股的破断力捻制损失相对较小,成品帘线的破断力捻制损失主要受面股影响。

2.3 不同强度面股对破断力捻制损失的影响

针对面股单丝强度对帘线破断力的影响,进行进一步研究。

试验保证芯股不变,使用不同含碳量和直径的镀铜钢丝得到不同破断力的面股单丝,相同芯股搭配不同强度面股钢丝绳帘线的破断力捻制损失如表3所示。

从表3可以看出,面股单丝强度在2 500~3 750 MPa范围内,面股破断力捻制损失较小,在7%以内,单丝强度等级覆盖了从NT到ST的范围。相同芯股与不同强度单丝捻制的面股合成帘线这一步的破断力损失波动范围较大,从7.0%到26.2%,并且可以清楚地看出,随着面股单丝强度

的增大,合成帘线破断力的捻制损失也增大,特别是当面股单丝强度超过3 500 MPa时,合成帘线破断力捻制损失急剧提升,由15.0%提升到24.3%以上,说明合成帘线破断力的捻制损失还受面股单丝强度的影响,面股单丝强度越高,合成帘线时破断力捻制损失越大,而面股破断力捻制损失与芯股一样均较小。

从表3还可以看出,随着面股单丝强度的增大,面股破断力呈增大趋势,但合成帘线的破断力并不是一直增大,而是在面股单丝强度超过3 500 MPa后下降,主要原因是合成帘线时的破断力捻制损失增大,说明并不是单丝的强度越大,得到的成品帘线强度就越大。提高面股单丝强度会提高面股的破断力,但过大的面股破断力又会增大合成钢丝绳帘线的捻制损失,这其中存在单丝强度与捻制损失的平衡问题。

2.4 帘线结构对破断力捻制损失的影响

在开发7×7结构钢丝绳帘线中遇到合成帘线时破断力损失较大的情况,有文献指出随着单位长度上钢丝顺时针与逆时针扭转变形次数的增加,

表3 相同芯股搭配不同强度面股钢丝绳帘线的破断力捻制损失

面股单丝强度范围/MPa	面股单丝破断力总和/N	面股破断力/N	面股破断力捻制损失/%	帘线破断力/N	帘线破断力捻制损失/%
2 500~2 700	981	970	1.1	6 842	7.0
2 900~3 050	1 076	1 013	5.9	6 505	10.0
3 200~3 400	1 185	1 142	3.6	6 801	15.0
3 500~3 660	1 229	1 227	0.2	6 643	24.3
3 700~3 750	1 305	1 218	6.7	6 242	26.2

注:芯股破断力为1 150 N。

钢丝帘线的捻制损失逐渐增大^[11]。7×7结构钢丝帘线面股单丝就是经过了多次变形,只是超高强度的单丝在经过多次变形后破断力的损失更大,这也就是当面股单丝强度超过3 500 MPa后合成帘线破断力损失较大的原因。

使用同样强度(3 390 MPa)的单丝(规格为0.28),分别捻制0328单股结构、1+6+12层状结构及7×7绳状结构钢丝帘线的总破断力捻制损失分别为1.4%,2.1%和20.0%。

由此可见,在使用相同强度单丝捻制单股结构和层状结构帘线时破断力捻制损失相对较小,捻制7×7绳状结构钢丝帘线时破断力捻制损失急剧增大,说明破断力的捻制损失与帘线结构也有较大的关系,这种复杂绳状结构的帘线捻制时破断力损失较大。

2.5 捻距对破断力捻制损失的影响

捻距是钢丝帘线生产的重要参数,一般认为捻距越小,钢丝强度损失越大^[12],而中心股捻距越小,其相对伸长就越大,可以延迟中心股的断裂,对钢丝帘线起到整体支撑作用,从而提升钢丝帘线破断力^[13]。虽然在7×7结构钢丝帘线产品标准中成品捻距已确定为17.5 mm,为进行深入研究,在保证芯股和面股不变的前提下,在最后捻制成品帘线阶段以捻距为变量,计算不同捻距下合成帘线的破断力捻制损失,结果如图3所示。

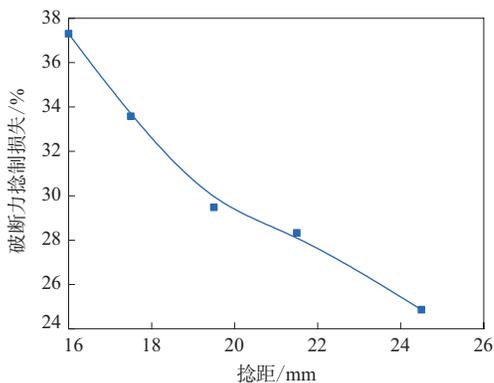


图3 不同捻距下合成帘线的破断力捻制损失

从图3可以看出,在芯股和面股均相同的前提下,随着合成帘线时的捻距增大,破断力的捻制损失基本呈线性减小。

2.6 放线张力稳定性对破断力捻制损失的影响

钢丝帘线捻制过程中放线张力稳定性直接决

定了产品的质量,在生产过程中应保证各个放线轮张力稳定。如果张力控制不稳定,造成单丝在股中或者股在钢丝帘线中松紧不一致,在破断力试验时各股或单丝之间受力不均匀,受力大的超过极限强度而断裂,测试值降低^[14-15]。任意选择5组股线,保证其他工艺参数相同,分别在放线张力稳定和相对不稳定的机床上进行帘线捻制,两种张力状态下合成帘线的破断力捻制损失对比如图4所示。

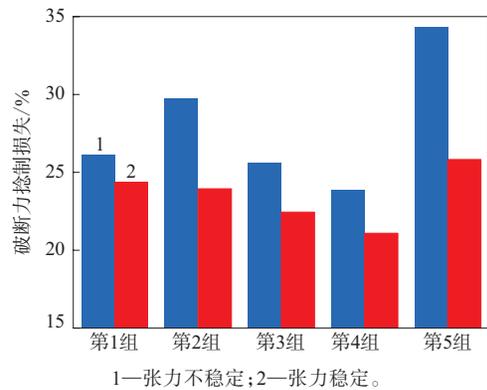


图4 不同张力状态下合成帘线破断力捻制损失对比

从图4可以看出,5组样品均是在稳定张力下破断力捻制损失较小,张力稳定状态下帘线破断力捻制损失比张力不稳定状态下平均小4.0%左右,说明在7×7结构钢丝帘线生产中通过稳定放线张力的方法可以有效减小合成帘线阶段的破断力捻制损失。

3 结论

(1) 在7×7结构超高强度钢丝帘线生产中,芯股和面股的破断力捻制损失相对较小,基本在7.0%以内,破断力捻制损失主要产生在合成帘线阶段,这一步的破断力捻制损失基本在20.0%以上,成品帘线的破断力捻制损失主要受面股影响。

(2) 合成帘线时破断力捻制损失还受面股单丝强度的影响,面股单丝强度越大,合成帘线时捻制损失越大,当单丝强度超过3 500 MPa时破断力捻制损失急剧增大,导致并不是单丝强度越大,成品帘线破断力就越大,提高面股单丝强度会提高面股的破断力,但过高的面股破断力又会增大合成钢丝帘线时的破断力捻制损失,这其中存在单

丝强度与捻制损失的平衡问题。

(3) 成品帘线破断力捻制损失与帘线结构也有较大的关系,复杂绳状结构的帘线捻制时由于单丝经过多次扭转变形,破断力捻制损失较大,简单的单股结构或层状结构钢丝帘线的破断力捻制损失较小。

(4) 捻距和放线张力稳定性也是影响破断力捻制损失的两个重要因素。随着合成帘线的捻距增大,破断力捻制损失基本呈线性减小;稳定放线张力可以有效减小合成帘线阶段的破断力捻制损失。

参考文献:

- [1] 黄兆阁,李长宇,孟祥坤,等. 235/45R18轮胎带束层帘线的优化设计[J]. 橡胶工业,2020,67(3):209-213.
- [2] 罗奕文. 高强度ST/UT钢帘线在低滚动阻力轮胎的应用[C]. 2012中国橡胶年会论文集. 北京:中国橡胶工业协会,2012:190-192.
- [3] 黄宝,何立波,高真凤,等. 亚洲钢帘线线材生产现状及发展趋势[J]. 金属制品,2011,37(6):43-47.
- [4] 惠静. 子午线轮胎及钢帘线发展趋势[C]. 2013全国橡胶工业信息发布会暨首届亚洲橡胶技术论坛论文集. 北京:中国橡胶工业协会,2013:148-153.
- [5] 单国玲,郑乾. 大型工程机械子午线轮胎钢丝帘线选用及使用中出现的的问题[J]. 轮胎工业,2008,28(10):588-590.
- [6] 钱生民. 工程机械轮胎及工程机械子午线轮胎用钢帘线的现状和发展趋势[C]. 中国橡胶工业协会第四届全国橡胶工业用织物和骨架材料技术研讨会论文集. 北京:中国橡胶工业协会,2007:35-38.
- [7] 杨程,梁益龙,黄忠渠. 钢丝绳中股在生产时“起泡”问题的分析[J]. 贵州工业大学学报 自然科学版,2006,35(1):76.
- [8] 崔影,刘震,刘艳,等. 钢丝绳捻制损失产生原因分析[J]. 金属制品,2010,36(4):14-17.
- [9] 秦万信,孙冠. 如何提高多层层压股钢丝绳破断力[J]. 金属制品,2018,44(1):1-9.
- [10] 朱维斗,胡坚石. 制绳钢丝的均匀延伸率对提高整绳破断力的作用[J]. 金属制品,1992,18(4):22-28.
- [11] 付双杰,丁文旭,曹秀岭,等. $7 \times (3+9+15 \times 0.245)$ HT钢帘线破断力优化[J]. 金属制品,2015,41(6):24-28.
- [12] 杨云,梅建强. 4V类扇形股钢丝绳捻制过程钢丝强度损失研究[J]. 金属制品,2018,44(5):8-11.
- [13] 刘红芳,陆毅. 捻制方式对钢丝绳性能的影响研究[C]. 全国金属制品信息网第24届年会论文集. 郑州:全国金属制品信息网,2016:95-100.
- [14] 刘红芳,张春雷,赵国瑞,等. 放线张力对钢丝绳性能的影响[J]. 金属制品,2017,43(6):9-13.
- [15] 郭丽红. 浅谈起重机钢丝绳破断力[J]. 冶金设备,2017(S2):443-445.

收稿日期:2022-03-06

Discussion on Factors Affecting Breaking Force of Ultra-high Tenacity Steel Cords in 7×7 Structure

YAO Lili^{1,2}, WANG Wei^{1,2}, ZHU Chenlu^{1,2}, CHEN Changxin^{1,2}

(1. Jiangsu Xingda Steel Cord Co., Ltd, Taizhou 225721, China; 2. Jiangsu Key Laboratory for Structural and Functional Metal Materials Composites, Taizhou 225721, China)

Abstract: Starting from the actual production, the factors affecting the breaking force of the ultra-high tenacity steel cords in 7×7 structure were studied. The results showed that the breaking force was affected by many factors, one of which was the strength of monofilament. When the strength of monofilament exceeded 3 500 MPa, the twisting loss of the breaking force of the steel cord increased sharply. The twisting loss of the breaking force was also related to the cord structure. When the same strength monofilaments were twisted into a single-strand structure and a layered structure steel cord, the twisting loss of the breaking force was relatively small. The twisting loss of the breaking force of the 7×7 structure was greatly affected by the surface strands, and was less affected by the core strands. The twisting loss of the 7×7 structure mainly occurred in the cord twisting stage, and was related to the twist pitch of the cord and setting out tension stability of the equipment during cord twisting process. When the twist pitch increased, the twisting loss of the breaking force of the steel cords decreased, and when the tension was stable, the twisting loss was small.

Key words: steel cord; ultra-high tenacity; breaking force; twisting loss