复合材料学报 第20卷 第6期 12月 2003年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 20 No. 6 December 2003

文章编号: 1000-3851(2003)06-0104-05

高强高模聚乙烯纤维力学性能的应变率和温度效应

熊 杰, 萧庆亮, 刘冠峰
(浙江工程学院 材料与纺织分院, 杭州 310033)

摘 要: 利用MTS810材料试验机、旋转盘式杆-杆型冲击拉伸装置和温度控制箱,在温度20℃～110℃、应变率为0.001/s～700/s范围内,对高强高模聚乙烯纤维束进行了准静态和高应变率冲击拉伸实验,得到了不同温度、不同应变率时纤维束的应力-应变曲线。结果表明:高强高模聚乙烯纤维束的初始弹性模量具有应变率和温度相关的特性,随应变率提高而增加,随温度提高而下降;在常温下,破坏应力从准静态到动态,具有明显的应变率相关性,随应变率提高而增加,但在20℃～110℃范围内、高应变率下,对应变率变化不敏感;失稳应变也具有应变率和温度相关的特性,随应变率提高而减小,随温度提高而增大。在高应变率下,断裂应变能密度主要由初始弹性模量和失稳应变共同决定,受温度效应和应变率效应的综合影响。

关键词: 高强高模聚乙烯纤维; 力学性能; 应变率效应; 温度效应
中图分类号: TB332 **文献标识码:** A

STRAIN RATE AND TEMPERATURE DEPENDENCE OF MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH AND HIGH-MODULUS POLYETHYLENE FIBER YARNS

XIONG Jie, XIAO Qingliang, LIU Guanfeng
(College of Materials and Textiles, Zhejiang Institute of Science and Technology, Hangzhou 310033, China)

Abstract: The quasi-static and high strain rate tensile impact experiments on the high-strength and high-modulus polyethylene fiber (HSM-PE) yarns were performed at 20℃～110℃ and strain rate 0.001/s～700/s by means of MTS 810, rotating disk bar-bar tensile impact apparatus and temperature-controlled box, and the stress-strain curves of fiber yarns at different temperatures and different strain rates were obtained. The experimental results indicate that the initial elastic modulus of Dyneema SK65 fiber yarns is rate-dependent and temperature-dependent: it increases with the rising of strain rate and decreases with the rising of testing temperature. The strength of the fiber yarns tested from quasi-static to dynamic is rate-dependent at the normal temperature, but it is rate-insensitive at high strain rate and at 20℃～110℃. The unstable strain is also rate-dependent and temperature-dependent: it decreases with the rising of the strain rate and increases with the rising of the testing temperature. The fracture strain energy density at the high strain rate is mainly determined by the initial elastic modulus and the unstable strain and affected by the temperature and the strain rate.

Key words: high-strength and high-modulus polyethylene fiber (HSM-PE); mechanical properties; strain rate dependence; temperature dependence

收稿日期: 2002-05-27; **收修改稿日期:** 2002-12-24
基金项目: 国家教育部科学技术研究重点项目(地方02064);浙江省教育厅资助项目(20010771)
通讯作者: 熊 杰,博士,教授,主要从事纤维及其复合材料的研究 E-mail: jxiong@zist.edu.cn

先进无机纤维, 如碳纤维、碳化硅纤维和高性能玻璃纤维等, 具有高比强度、高比刚度、蠕变小和耐热性好等优点而被作为复合材料的增强体得到了大量的应用, 然而它们的断裂变形小、韧性较低, 不能满足高韧性的应用要求。高性能有机纤维, 如芳纶和高强高模聚乙烯纤维等, 拉伸强度和模量很高、重量很轻、韧性和耐磨性能良好, 为满足不同使用要求, 特别是抗冲击应用提供了广泛的选择[1, 2]。目前, 针对抗冲击应用, 有关芳纶纤维及其复合材料的研究较多。汪洋和熊杰[3, 4]分别对 Kevlar 和 Twaron (S) 纤维束进行了冲击拉伸实验研究, 揭示了纤维束力学性能随冲击拉伸应变率变化的规律及其微观断裂机理。Morrison[5]等人研究了 Kevlar 纤维束及其复合材料受横向冲击的响应行为, 得出 Kevlar 纤维束的动态模量值与冲击速度无关, 但比静态常规实验低 30%。Zhu[6, 7]等人对 Kevlar29 织物/聚酯层压板受圆锥形弹体侵彻进行了实验研究并建立了侵彻过程唯象模型。Rodriguez[8]等人研究了芳纶和高强高模聚乙烯织物复合材料的高应变率性能, 探讨了应变率对这两种织物复合材料力学性能的影响。然而对高强高模聚乙烯纤维及其复合材料的研究相对较少。本文中就高强高模聚乙烯纤维的抗冲击应用及不耐高温的特点, 研究了它在 20℃～110℃范围内, 高应变率冲击拉伸力学性能的温度效应和应变率效应, 为抗冲击侵彻高强高模聚乙烯纤维集合体及其复合材料的设计提供参考依据。

1　实验部分

1.1　实验材料

Dyneema SK65 纤维束: 1320 dtex/1170f, 荷兰 DSM 公司生产。

1.2　冲击拉伸试验装置与测试原理

高应变率下的冲击拉伸试验在旋转盘式杆-杆型冲击拉伸试验装置[9]上进行, 根据一维应力波理论和试件中应力、应变均匀性假设, 可以得到试件试验段中的应力、应变和应变率分别为

$$e_s(t) = \frac{EA}{A_s}X(t) \tag{1}$$

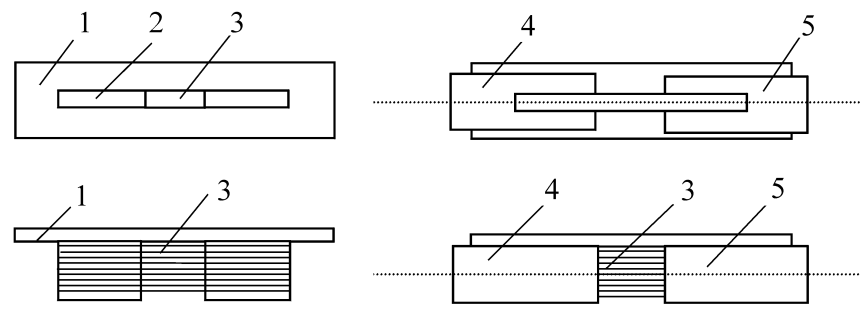
$$X(t) = \frac{2C}{l_s}\int_0[X(f) - X(f)]\,df \tag{2}$$

$$X(t) = \frac{2C}{l_s}[X(t) - X(t)] \tag{3}$$

式中: E、A、和 C 分别为输入杆和输出杆的杨氏模量、横截面积和弹性波速度; l_s 和 A_s 分别为试样测试段的长度和横截面积; X(t) 为输入杆上应变片测得的入射波应变信号, X(t) 为输出杆上应变片测得的透射波应变信号。因此, 按式(1)、式(2)和式(3)就可以由实测的入射波形和透射波形经数据处理后求得试件中的应力、应变和应变率。

1.3　试件与实验装置的连接

试件制作及其与实验装置的连接如图 1 所示。先将衬块 2 垂直地粘结在辅助板 1 上, 然后, 将纤维束平行且均匀地缠绕在衬块上, 共缠绕 6 股, 纤维束呈双排对称排列, 纤维束的试验段长度 l_s 为 8 mm。接着将缠绕了纤维束的衬块用 SA103 强力耐冲击胶粘接到输入杆和输出杆的叉口中, 进行常温固化之后, 将辅助板取下, 即可进行纤维束的冲击拉伸试验。



1- subsidiary plate; 2- lining blocks;
3- fiber bundles; 4- input bar; 5- output bar

图 1　试样及其与试验装置的连接示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the specimen and its connection

1.4　试验环境温度控制

试验环境温度由电热温度箱控制。试验时将已与入射杆和透射杆连接好的试件放入温度箱内, 通电后使试件处于一个均匀的温度场中。工作腔内的温度由热电偶测量, 当达到设定的试验温度时, 即可进行冲击拉伸试验。

1.5　准静态试验

准静态试验在 MTS 810 材料试验机上进行。为了便于比较, 准静态试件的形状和粘接方式与动态试验相同, 只是将动态时的输入、输出杆换成截面相同的两根较短的金属连杆, 并将连杆夹在 MTS 810 的夹头上, 用夹式引伸仪来测量两金属杆端部的相对位移, 并把它作为试件试验段的伸长。

2　结果与讨论

在冲击拉伸试验机上进行了两组应变率(分别为 300/s 和 700/s)、三种温度(分别为 20℃、70℃和 100℃)的实验测试; 在 MTS 810 材料试验机上进行了一组应变率(0.001/s)的准静态拉伸实验测试, 测

试所得的 Dyneema SK65 纤维束应力-应变曲线如图 2 所示。图中每条曲线都代表在相应温度、相应应变率下一组曲线(至少有三条重复性较好的应力-应变曲线)的平均结果。表 1 列出了实验测试所得到的 Dyneema SK65 纤维束的初始弹性模量 E、破坏应力 e_b(最大应力)、失稳应变 X_b(与 e_b 相对应的应变)和断裂应变能密度 U_c 在相应应变率、相应温度条件下的平均值。U_c 的定义式为 $U_c = \int_0^{X_b} e(X)\,dX$,即在应变 0～$X_b$ 范围内,应力-应变曲线下的面积。

表 1　不同温度不同应变率下 Dyneema SK65 纤维束的力学性能

Table 1　Mechanical properties of Dyneema SK65 fiber yarns at different temperatures and different strain rates

	Strain rate/ s^{-1}	E/ GPa	e_b/ GPa	X_b/ GPa	U_c/ MPa
20℃	0.001	74.15	1.89	10.58	133.41
	300	80.25	2.55	6.52	110.28
	700	82.03	2.55	6.26	106.60
70℃	300	60.89	2.47	7.54	121.9
	700	67.67	2.48	6.57	106.62
110℃	300	54.77	2.56	8.03	129.16
	700	53.50	2.51	7.42	115.92

2.1　高强高模聚乙烯纤维力学性能的应变率效应

图 3 显示了不同温度下 Dyneema SK65 纤维束的力学性能与应变率的关系。图 3(a)显示了在常温下,Dyneema SK65 纤维束的初始弹性模量具有明显的应变率相关特征,应变率从 0.001/s 增加到 700/s,初始弹性模量大约增加 10%,随着温度升高,纤维束初始弹性模量的应变率敏感特征依然存在,但当温度达到 110℃时(Dyneema SK65 纤维的熔点为 144℃～152℃),应变率对初始弹性模量的影响已变得较小。应变率对 Dyneema SK65 纤维束破坏应力的影响如图 3(b)所示。在常温下,从准静态到动态(应变率相差 5 个数量级)纤维束的破坏应力与应变率相关,然而在实验测试的温度范围内、高应变率下,纤维束的破坏应力对应变率变化不敏感。这可能是由于高度取向的聚乙烯长链分子之间主要依靠范德华力结合在一起,在准静态拉伸的条件下,当纤维拉伸断裂破坏时,将产生化学键的断裂和分子间的滑脱,这两部分共同构成纤维的破坏应力。在低应变率拉伸时,破坏应力的构成中,滑脱分子链的比例相对较高;而在高应变率拉伸时,滑脱分子链的比例相对较低,因此在宏观上表现出从准静态到动态,破坏应力随应变率提高而提高,而达到某一高应变率值以后,则受应变率的影响较小。然而纤维束的

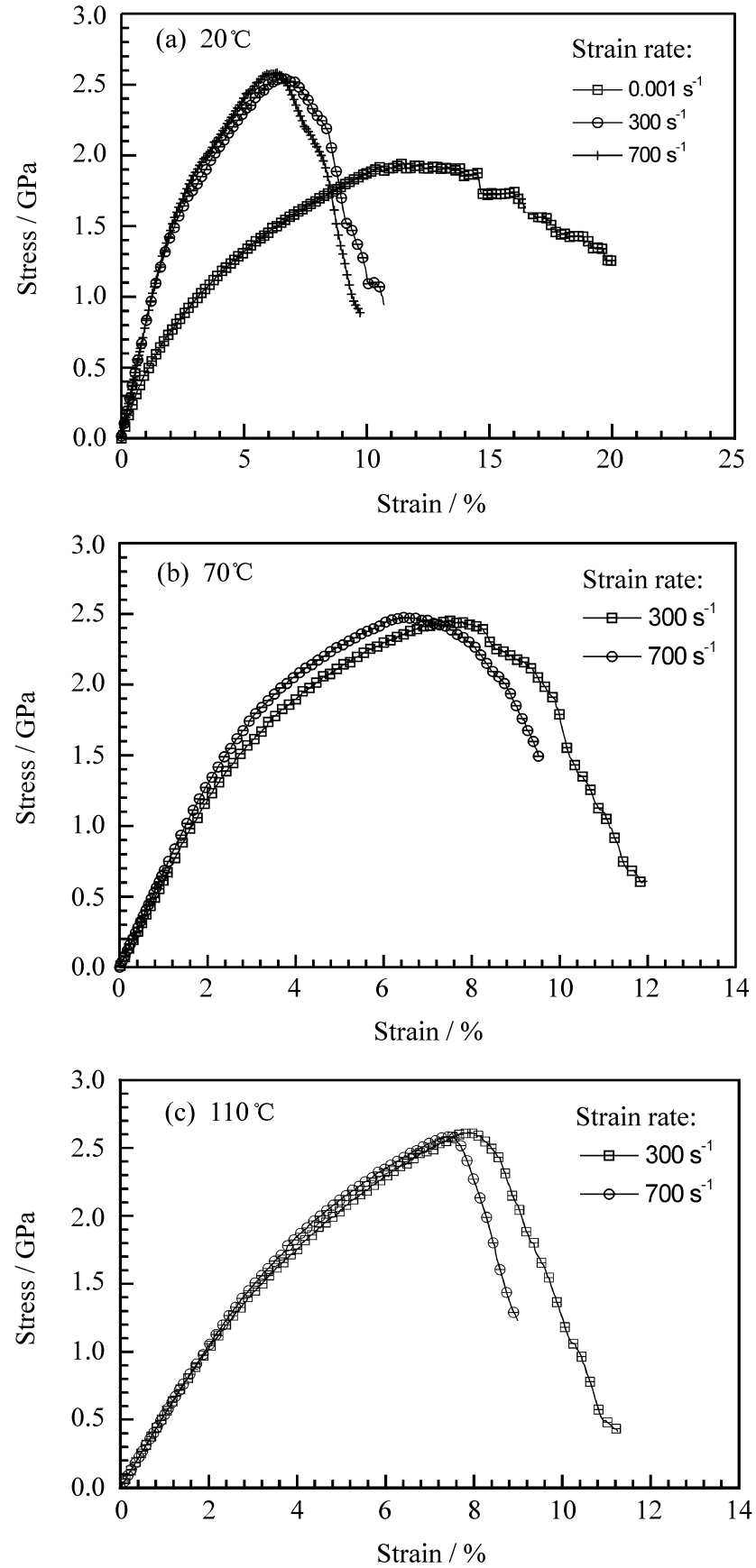


图 2　不同温度不同应变率时 Dyneema SK65 纤维束的拉伸应力-应变曲线

Fig. 2　Tensile stress-strain curves of Dyneema SK65 fiber yarns at different temperatures and different strain rates

失稳应变与应变率是相关的,如图 3(c)所示,应变率提高,失稳应变减小,因为纤维的破坏过程是一个松弛过程,应变率提高后,纤维内部高分子链段运动跟不上外力的作用,而在较小的应变下发生断裂。图 3(d)显示在不同温度下断裂应变能密度随应变率提高而减小。根据断裂应变能密度的定义式可知:断裂应变能密度与纤维束的初始弹性模量、破坏应力和失稳应变有关,显然在同一温度、高应变率下,断裂应变能密度受失稳应变影响较大。

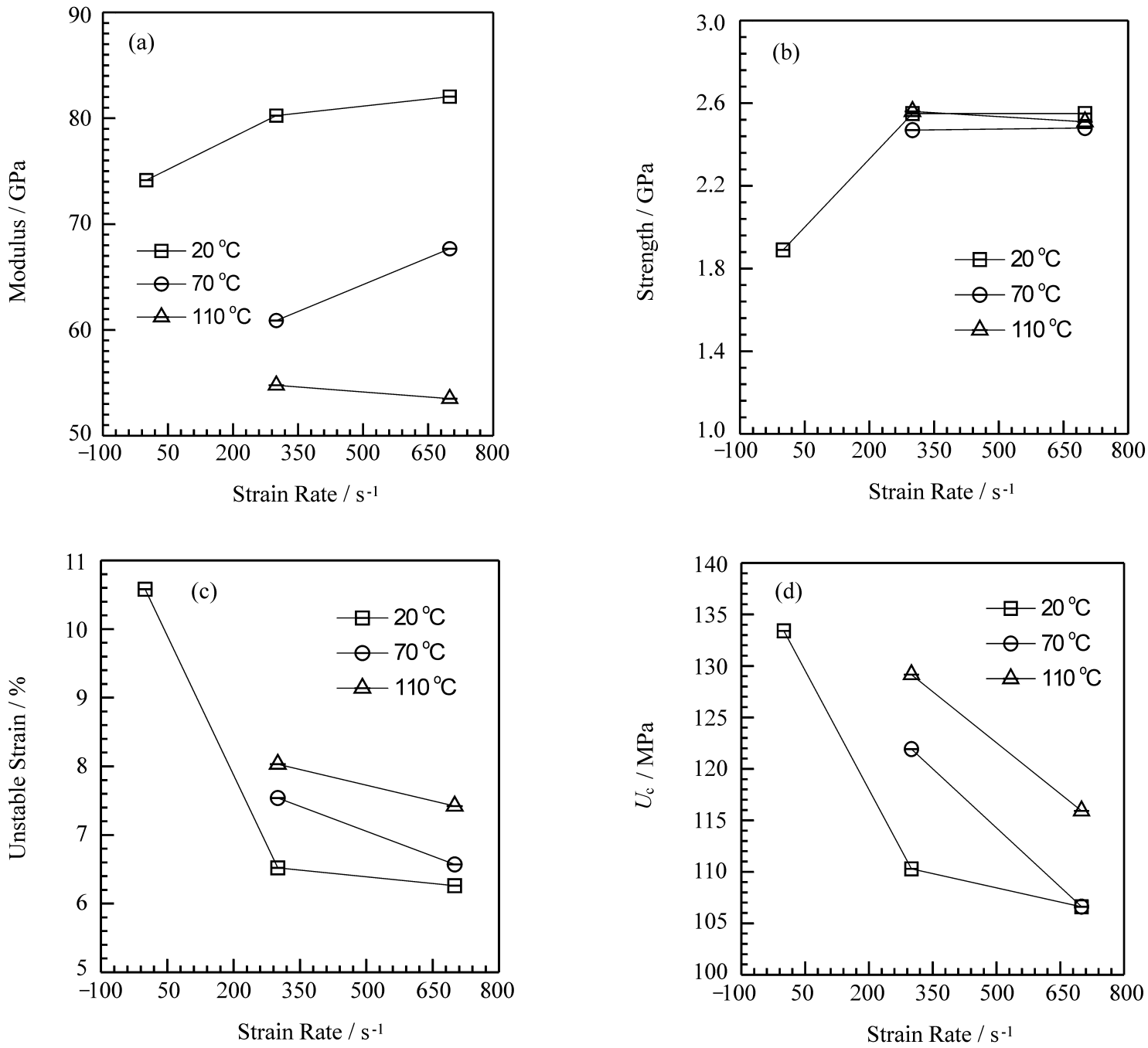


图 3　不同温度下 Dyneema SK65 纤维束力学性能与应变率的关系

Fig. 3　Effects of strain rate on mechanical properties of Dyneema SK65 fiber yarns at different temperatures

2.2　高应变率下高强高模聚乙烯纤维力学性能的温度效应

图 3(a)显示了 Dyneema SK65 纤维束的初始弹性模量在高应变率下随测试温度的升高而降低，表明初始弹性模量具有明显的温度相关性，这与不同温度条件下准静态测试结果具有相似的变化特征[10]，符合高聚物纤维材料随温度升高分子热运动能量增加并在外力作用下变形能力提高的规律。然而图 3(b)显示在高应变率下，Dyneema SK65 纤维束的破坏应力对测试温度的变化不敏感，即在实验测试的温度范围 20℃～110℃内破坏应力基本不变。这可能由于 Dyneema SK65 纤维是采用凝胶纺丝超倍热拉伸技术制得的，具有高度结晶、高度取向的结构特征，而且大部分分子都参加了伸直链结晶，非晶区和晶区原有的缺陷被分散，构成了结晶均匀和连续的基质，缺陷则呈间断分布，因此在高应变率下，形成伸直链结晶的分子都参与了高速冲击拉伸过程，并对纤维束的破坏应力作出贡献，而结构缺陷对破坏应力的影响被弱化了。虽然在高应变率下温度对破坏应力影响不大，但温度在纤维束达到破坏应力时，对纤维内部高分子长链之间的相互滑移仍具有显著的影响，如图 3(c)所示，宏观上反映出，失稳应变随温度的升高而增大。由于在高应变率下纤维束的破坏应力受温度影响很小，因此纤维束的断裂应变能密度主要由初始弹性模量和失稳应变共同决定，受应变率效应和温度效应的综合影响，如图 3(d)所示。

2.3　应变率效应与温度效应的关系

虽然 Dyneema SK65 纤维束的力学性能受应变率效应和温度效应的综合影响，但应变率效应和温度效应具有不同的作用效果。在实验测试的温度范围内，高应变率下纤维束的力学性能受温度效应和应变率效应的综合影响，以 20℃准静态拉伸时 Dyneema SK65 纤维束的力学性能为参照，70℃、

110℃时高应变率下纤维束的初始弹性模量均小于准静态拉伸时的初始弹性模量,破坏应力均大于准静态拉伸时的破坏应力,失稳应变均小于准静态拉伸时的失稳应变,断裂应变能密度也小于准静态时的断裂应变能密度,说明在实验测试的温度和应变率范围内,温度效应对初始弹性模量的影响比较显著;应变率效应对破坏应力的影响比较显著,当然仅仅相对于准静态而言,而在高应变率下,破坏应力几乎不受应变率和温度的影响;而且应变率效应对失稳应变的影响也比较显著,而断裂应变能密度受失稳应变的影响较大,也就是应变率效应对断裂应变能密度的影响更为显著。同时从实验结果初步发现,在高速冲击条件下,提高应变率与降低温度有着相似的效果,但要建立定量的关系,仍需要在实验测试的温度和应变率范围内进行更多不同温度和应变率条件下的测试。

2.4　纤维材料能量吸收与应变率效应和温度效应的关系

受到高速冲击时纤维中应力波的传播速度与纤维束的初始弹性模量有关,而断裂应变能密度则表示单位体积纤维材料所吸收的能量,因此 Dyneema SK65 纤维集合体及其复合材料的能量吸收与纤维束的初始弹性模量和断裂应变能密度密切相关。温度效应对初始弹性模量的影响比较显著,而应变率效应对断裂应变能密度的影响比较显著,显然在设计制作抗冲击侵彻的纤维集合体或复合材料时,必须同时考虑纤维束力学性能的温度效应和应变率效应。

3　结　论

高强高模聚乙烯纤维束在常温下的初始弹性模量具有明显的应变率相关特征,应变率从 0.001/s 增加到 700/s,初始弹性模量大约增加 10%。随着温度升高,纤维束初始弹性模量的应变率敏感特征依然存在,但当温度达到 110℃时,应变率对初始弹性模量的影响已变得较小。初始弹性模量在高应变率下随测试温度的升高而降低,具有明显的温度相关性。在常温下,从准静态到动态纤维束的破坏应力具有明显的应变率相关性,然而在 20℃～110℃范围内、高应变率下,纤维束的破坏应力对应变率变化不敏感。纤维束的失稳应变随应变率提高而减小,随温度的升高而增大。在相同温度下,断裂应变能密度随应变率提高而减小。断裂应变能密度随温度和应变率变化的规律,在破坏应力受温度效应和应变力效应不显著的情况下,主要由纤维束的初始弹性模量和失稳应变共同决定,受温度效应和应变率效应的综合影响。

致　谢　　本研究实验得到中国科学技术大学力学与机械工程系夏源明教授的热情支持,特致谢意!

参考文献:

[1] Dupont Company, A guide to designing and preparing ballistic protection of Kevlar aramid, Memo 440, 1993.

[2] DSM. Dyneema—— the top in high performance fibers, properties & applications, 1995.

[3] 汪　洋,夏源明. 不同应变率下 Kevlar49 纤维束拉伸力学性能的实验研究 [J]. 复合材料学报, 1999, 16(1): 45- 51.

[4] 熊　杰,施楣梧,周国泰,等. 高应变率下芳纶纤维力学性能的研究 [J]. 纺织学报, 2000, 21(6): 7- 10.

[5] Yang H H, Kevlar aramid fiber [M]. New York: John Wiley & Sons, 1993. 149- 153.

[6] Zhu G, Goldsmith W, Dharan C K H. Penetration of laminated Kevlar by projectile I: Experimental investigation [J]. Int J Solids Struct, 1992, 29(4): 399- 420.

[7] Zhu G, Goldsmith W, Dharan C K H. Penetration of laminated Kevlar by projectile II: Analytical model [J]. Int J Solids Struct, 1992, 29(4): 421- 436.

[8] Rodriguez J, Chocron I S, Martinez M A, et al. High strain rate properties of aramid and polyethylene woven fabric composites [J]. Composites Part B, 1996, 27B: 147- 154.

[9] 汪　洋,夏源明. 杆-杆型冲击拉伸试验装置一维试验有效性的论证 [J]. 实验力学, 1997, 12(1): 126- 134.

[10] 王曙中, 王庆瑞, 刘兆峰. 高科技纤维概论 [M]. 上海: 中国纺织大学出版社 1999. 377- 97.