复合材料学报 第18卷 第2期 5月 2001年
ACTA MATERIAE COMPOSITAE SINICA Vol. 18 No. 2 May 2001

文章编号: 1000-3851(2001)02-0046-04

UD75防弹板工艺参数与弹道性能的初步研究

孙志杰, 张佐光, 沈建明, 仲伟虹
(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 分析了不同温度对组成Dyneema纤维增强复合材料的超高分子量聚乙烯纤维丝束拉伸强度的影响。并对UD75防弹复合材料在不同成型压力下的弹道吸能进行了研究。在对成型压力影响的研究中, 对UD75复合材料的层间结合力、厚度和体密度进行了分析。结果表明, 温度超过123 ℃后拉伸强度有大幅的下降, 而成型压力为12.5 MPa时达到最大值。其研究结果对防弹复合材料的合理制备和优化设计提供了很好的参考依据。

关键词: 纤维复合材料; 超高分子量聚乙烯纤维; 弹道吸能
中图分类号: TB332 **文献标识码:** A

PRELIMINARY STUDY ON THE PROCESS PARAMETERS AND BALLISTIC PROPERTIES OF UHMWPE FIBER COMPOSITE LAMINATES

SUN Zhi-jie, ZHANG Zuo-guang, SHEN Jian-ming, ZHONG Wei-hong
(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: In this paper, the influence of temperature on the tensile strength of the ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fiber strands which reinforce the UD75 composites is analyzed. The variation of ballistic absorption energy as well as the adhesive bonding force between layers, the thickness and density of laminates of UD75 composites with molding pressures is studied. The results show that the tensile strength of the UHMWPE fiber strands is greatly decreased when the temperature is higher than 123 ℃, and the ballistic absorption energy is up to the highest value when the molding pressure is about 12.5 MPa. The study results would be valuable for the proper preparation and optimum design of composite armors.

Key words: fiber reinforced composite; ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fiber; ballistic property

到目前为止, 超高分子量聚乙烯纤维相对防弹领域其他纤维防弹性能是最好的一个。由于它是通过高分子量聚乙烯溶液拉丝而成, 从而使得纤维中分子链平行取向, 具有很高的取向度和结晶度, 因此这种纤维具有极高的强度。而其密度仅有0.97 g/cm^3, 比水还轻。同时由于该纤维有常规准静态条件下更高的模量造成的高的声速传播, 从而使得超高分子量聚乙烯纤维在防护子弹冲击时的能量吸收和应力波传递优于其他纤维, 成为目前防弹领域研究的热点之一[1]。

文献[2]对Dyneema UD66复合层板的相关参数与弹道性能的关系进行了初步研究。而新一代Dyneema UD75是性能更高的超高分子量聚乙烯纤维材料。本文通过在更高的成型压力(达20.5 MPa)范围内对UD75复合材料防弹板的实验研究, 揭示和分析了温度、成型压力对纤维丝束拉伸强度、防弹板弹道吸能、层间结合力、厚度与凸起高度的关系, 为UD75防弹复合材料及其装甲的制备和合理设计提供良好依据。

1 实验部分

1.1 原材料

本实验中采用的Dyneema UD75由荷兰DSM公司生产的SK75纤维所构成, 其性能见表1。

收稿日期: 2000-02-25; 收修改稿日期: 2000-08-21
作者介绍: 孙志杰(1951), 男, 博士, 副教授, 主要从事为聚合物基复合材料及胶粘剂等方面的研究。

表 1 纤维性能指标

Table 1 Performance index of fibers

纤维种类	密度 / g·cm^{-3}	拉伸强度 / MPa	拉伸模量 / GPa	断裂伸长 / %
Dyneema SK75	0.97	3400	118	3.7

1.2 靶板制备

将 Dyneema UD75 纤维无纬布预浸料按所需尺寸剪裁并正交铺叠成型至所需厚度, 置于模具中, 而后放入热压机按树脂体系规定的工艺制度固化成型为 UD75 靶板。

1.3 靶板弹道性能测试

发射枪距靶板 5～10 m, 采用前后测速。

弹道枪型号与弹体参数。

79 式 7.62 mm 弹道枪。

51 式 7.62 mm 铅心弹, 弹体形状为卵形, 全弹重 5.6 g。

弹道性能参数: 能量吸收 E_a。

$$E_a = \frac{1}{2}m_p V_i^2 - \frac{1}{2}m_p V_r^2$$

式中, m_p-弹体质量; V_i-弹体着靶前速度; V_r-弹体穿靶后速度。

2 实验结果与讨论

2.1 温度对 SK75 纤维拉伸强度的影响

对于 UD75 靶板而言, 成型温度是一个重要的工艺参数。由于 UD75 靶板在弹击时的弹道吸能主要依靠靶板中超高分子量聚乙烯纤维的拉伸破坏[3], 因此在成型过程中纤维的强度不被破坏至关重要。而温度的大小将直接影响复合材料靶板中纤维的拉伸强度, 因此, 研究温度对纤维丝束拉伸强度的影响是一项重要的工作。

实验通过在不同温度处理后, 将 SK75 纤维丝束浸胶, 固化后制成拉伸试样, 测量了纤维丝束的拉伸强度, 实验结果见图 1。

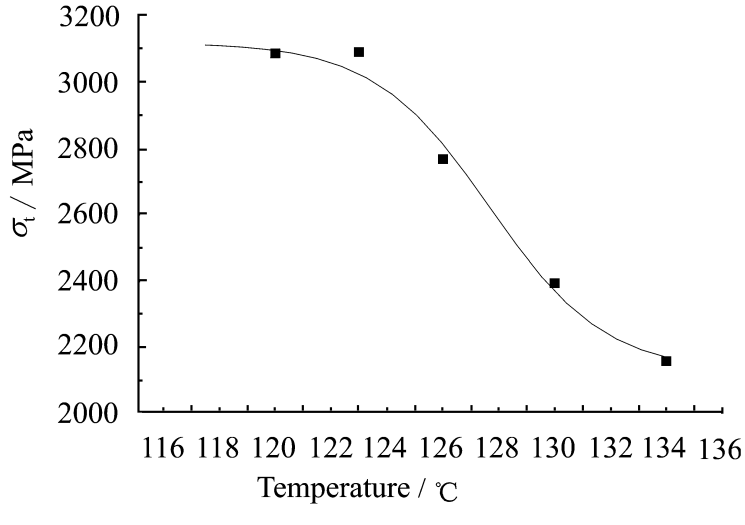

图 1 温度对 SK75 纤维拉伸性能的影响

Fig. 1 The tensile strengths of SK75 fibers under the different temperatures

从图 1 中可以看出, 对于超高分子量聚乙烯纤维来讲, 其是一种高度取向、高度结晶的纤维, 在纤维中晶区与非晶区同时存在[4]。当进行温度处理时, 当温度较高时晶区会转化为非晶区, 使得结晶度降低, 从而造成强度的降低。我们对 SK75 纤维在室温和根据 UD75 靶板的成型特征选取的温度范围内的取向度和结晶度进行了测定。在温度低于 123 ℃时, 纤维结晶度基本保持不变, 为 88 % 左右, 这样纤维丝束的拉伸强度也先是保持基本保持不变, 当温度超过 123 ℃后, 纤维的结晶度开始发生变化, 126 ℃时的结晶度为 80 %, 比 123 ℃时下降了 10 % 左右, 并随温度升高继续变小, 其在宏观上表现为强度的明显下降, 到 134 ℃时已减少为原有强度的 2/3, 在整个温度范围内, 取向度基本保持不变, 为 95 % 左右。在实验中, 曾使处理温度处理接近到纤维的熔点(约为 140 ℃), 这时纤维完全卷曲而失去承载能力。

2.2 成型压力对 UD75 靶板弹道性能的影响

众所周知, 影响复合材料防弹性能的主要原因除了原材料外, 成型工艺也是非常重要的影响因素。对于 UD75 靶板来说, 成型压力对其弹道性能的影响尤为突出。实际上成型压力不仅是一个重要的工艺参数, 而且还是一个重要的结构设计参数。因为成型压力的大小不仅会直接影响 UD75 靶板的弹道吸能机制与能力, 而且对其结构尺寸也有直接影响, 因此优化成型压力是一项很重要的研究工作。

(1) UD75 靶板弹道吸能与成型压力的关系

为优化成型压力, 考察压力对 UD75 靶板弹道吸能的影响, 实验中固定其它参数, 如面密度、含胶量、成型温度等都不改变, 只改变成型压力(P), 得到的实验结果列于图 2。

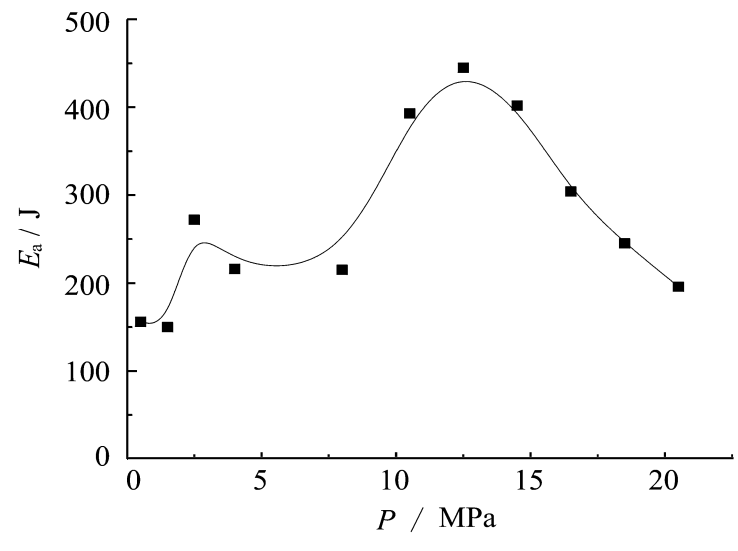

图 2 成型压力对靶板弹道吸能的影响

Fig. 2 The influence to ballistic absorption energy of UD75 laminates of molding pressures

由图 2 可看出, 弹道吸能随成型压力出现两个峰值, 一个在 2.5 MPa 左右, 一个在 12.5 Ma 左右, 12.5 MPa 时的吸能大于 2.5 MPa 时的吸能。由实际打靶的情况来看, 在 2.5 MPa 时靶板被弹击时层间分层现象较严重, 而 8 MPa 或更大压力的靶板的层间分离现象随压力升高越来越不明显。由此可以看出, 对于 UD75 靶板, 当成型压力较小(0.5 MPa～2.5 MPa) 时, 层与层之间结合不够紧密, 压力越小, 分层越严重, 吸能越小, 压力增大, 吸能增大, 到 2.5 MPa 以后, 层与层之间结合较以前紧密, 通过分层作用来消耗能量的方式减少, 但此时纤维受冲击时, 纤维的协同效应仍很差, 无法通过层件偶合与其它纤维相互作用, 不利于应力波的传播和冲击能量的耗散, 因而此后吸能降低。当压力升高到一定程度后, 层间比较紧密, 纤维间协同效用越来越强, 有利于应力波的传播和冲击能量的耗散, 压力升高, 吸能增大, 到 12.5 MPa 时, 吸能达到最大值, 此后, 随着压力的增大, 树脂向层间渗透, 导致靶板弯曲刚度提高, 不利于纤维的拉伸变形, 使得参与拉伸断裂的纤维数目减少, 剪切破坏的纤维增多, 由于子弹的动能主要是通过纤维的拉伸断裂来消耗, 因而吸能下降。

(2) 层间结合力与成型压力的关系

为了进一步弄清成型压力对 UD75 靶板弹道吸能机制的影响, 重点考察了 UD75 层板层间结合力与压力的关系。层间结合力的测定是通过 180 度剥离强度及用等高线法计算得到。试验结果列于表 2。

表 2　不同成型压力的 UD75 层板的层间结合力

Table 2　The variation of adhesive bonding force between layers of UD75 laminates with molding pressures

成型压力 P/MPa	剥离强度 /(N · m^{-1})	离散系数 /%
2.5	577	4.2
8	642	3.2
10.5	756	3.8
12.5	832	3.6
14.5	824	3.2
16.5	819	3.1
18.5	854	2.5

注: 试验机的拉伸速度为 200 mm/min。

从表 2 可以看到, 在成型压力约为 2.5 MPa 以前, 剥离强度(即层间结合力) 随压力增大上升得很快, 当压力超过 2.5 MPa 以后, 剥离强度增加的趋势变得较为缓慢, 大约到 12.5 MPa 以后, 剥离强度增加的趋势更为缓慢。这表明, 该复合材料的成型压力在 2.5 MPa 以前, 层间的紧密程度不够, 纤维的协同作用效果未能达到最佳状态, 当成型压力大于 2.5 MPa 以后, 层间结合逐步趋向密实, 因此剥离强度变化变得缓慢, 大约到 12.5 MPa 以后, 层间基本密实了, 压力继续增加, 剥离强度变化很小。

(3) UD75 靶板厚度及密度与成型压力的关系

从表 3 可以看出, 随压力的升高, 厚度减小, 当压力在约 8 MPa 以前厚度减小的速度较快, 8 MPa 后厚度减小得缓慢, 在 12.5 MPa 时, 厚度减小到最小值, 以后厚度变化不大。这同样也表明大约在 12.5 MPa下时, 层间就已经很密实了。

表 3　不同成型压力下靶板的厚度与体密度

Table 3　The variation of thickness and density of UD75 laminates with molding pressures

成型压力 P/MPa	厚度 /mm	体密度 /g · cm^{-1}
2.5	4.145	0.914
8	3.905	0.970
10.5	3.890	0.974
12.5	3.845	0.985
14.5	3.880	0.976
16.5	3.895	0.972
18.5	3.895	0.972
20.5	3.875	0.976

同理, 因为 UD75 层板的面积是恒定的, 因此厚度减小引起体密度的增加, 如图 3.4, 当 12.5 MPa 时, 体密度增加到最大值, 其变化规律与表 3 是相对应的。

(4) 靶板凸起高度和面积与成型压力的关系

成型压力对 UD75 靶板的抗弹机制有直接的影响, 由凸起高度和面积得到的表 4 进一步说明了这一点, 也可看橱, 要使靶板吸能最高, 必须有较大的变形。

表 4　不同成型压力下 UD75 靶板靶试结果

Table 4　The ballistic test results of UD75 laminates under different molding pressures

P/MPa	E_a/J	凸起高度 /mm	凸起面积 /cm^2
1.5	150	10	17
2.5	272	24	31
4.0	216	11	16
8	215	9	14
10.5	393	20	45
12.5	445	36	99
14.5	402	30	72
16.5	304	21	54
18.5	245	18	48
20.5	196	14	39

3 结 论

(1) 温度对超高分子量聚乙烯纤维的丝束拉伸强度有很大的影响，在 123 ℃以后强度有大幅下降，UD75 成型温度应严格控制。

(2) 成型压力对 UD75 靶板的弹道性能影响较大。在本实验范围内，靶板在压力为 2.5 MPa 时，分层明显，吸能出现峰值，而 12.5 MPa 左右是一个特殊点，在 12.5 MPa 时，整个靶板协同变形弹道吸能达到最大值，剥离强度、厚度和体密度在 12.5 MPa 以后变化不大，12.5 MPa 时，靶板的凸起高度和面积最大。为了控制凸起高度，成型压力可适当提高。

参考文献:

[1] Chang Lin. UHMWPE-Fiber Composites, Mater[J]. Engng, 1986, 103(9): 59.

[2] 张佐光，霍 刚，张大兴，等. 纤维复合材料的弹道吸能研究[J]. 复合材料学报, 1998, 15(2): 74—80.

[3] 霍 刚. Al_2O_3/TFRP 的工程化实验与 B_4C/UD75 的初步分析[D]. 北京：北京航空航天大学, 1997.

[4] Prevorsek D C, Kwon Y D, Harpell G A. Spectra composite armor: aynamics of absorbing the kinetic energy of ballistic projectiles[A]. 34th International SAMPE Symposium[C]. 1989. 1780- 1791.