

复合材料的结构连接

汪裕炳 张全纯 主编

国防工业出版社

责任编辑：周润芬

版式设计：任小林

封面设计：杨庆英

71.228
2.41

复合材料的结构连接

汪裕炳 张全纯 主编



(京)新登字106号

内 容 简 介

本书全面阐述高性能复合材料结构连接的设计、强度和工艺有关问题。全书共分五章：第一章介绍复合材料结构连接设计基础知识，第二章叙述适合复合材料结构连接用的新型紧固件及其制造工艺，第三章至第五章讨论复合材料结构的制孔及连接工艺问题。

本书适于从事研究复合材料结构设计、工艺、强度的技术人员参考。

复合材料的结构连接

汪裕炳 张全纯 主编

责任编辑 周润芬

*

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1163毫米 1/32 印张 6³/₄ 174千字

*

1992年4月第一版 1992年4月 第一次印刷 印数：0001—2500册

ISBN 7-118-00888-5/TG·67 定价：7.30元

前 言

复合材料是一种由多种性质极不相同的材料组成的多相材料。具有代表性的是以聚合物为基体的碳纤维复合材料。由于这种材料具有比强度、比刚度高,耐疲劳性能好及可设计性(通过改变层片的取向与顺序而改变复合材料的弹性特性和刚度特性,以满足结构的需要)等特点,近年来,在飞行器结构上得到了广泛的应用。

尽管共固化技术的应用大大提高了复合材料结构的整体性,但是,由于当前共固化技术水平的限制和复合材料构件不可避免的要与金属件相连,从使用、安装、维修的需要出发,还必须有一定的结构分离面和工艺分离面,这样,在复合材料结构上,仍存在大量的连接问题。

和金属结构相比,连接更是整个结构的薄弱环节。据统计,飞行器结构有70%以上的破坏都是发生在连接部位。因此,解决复合材料结构连接问题,对减轻结构重量、改善飞行器性能、促进复合材料在航空航天及其它民用工业上的应用具有重要意义。

虽然复合材料具有一般金属所不具备的优点,但它也存在一定弱点:脆(延伸率仅1~3%)、层间强度低、抗撞击能力差。研究复合材料结构连接问题时,必须考虑这些特点。

本书根据国内外有关资料,特别是十余年来国内研究成果编写而成。书中全面阐述了复合材料结构连接的有关问题。

参加本书编写的还有朱强、赵志、万德建。

作者希望,本书的出版能对促进复合材料在航空航天及其它民用工业上的应用尽微薄之力。

目 录

第一章 复合材料结构连接设计基础	1
§ 1 连接方法及其选择	1
1.1 胶接	1
1.2 机械连接	1
1.3 混合连接	2
§ 2 破坏模式	3
2.1 连接接头	3
2.2 胶接接头破坏模式	4
2.3 机械接头破坏模式	5
§ 3 影响机械接头强度的因素	8
3.1 纤维方向的影响	8
3.2 铺层顺序的影响	9
3.3 接头几何参数的影响	10
3.4 连接形式的影响	11
3.5 钉头头形的影响	11
3.6 拧紧力矩的影响	11
3.7 制孔质量的影响	13
3.8 温度和湿度的影响	13
3.9 多钉的影响	13
§ 4 连接设计原则	14
4.1 连接设计一般原则	14
4.2 胶接连接设计原则	14
4.3 机械连接设计原则	19
§ 5 接头应力分析和强度计算	25
5.1 胶接接头应力分析和强度计算	25
5.2 机械接头应力分析和强度计算	40
第二章 紧固件及其制造工艺	56
§ 1 紧固件选材	56
1.1 螺栓选材	56
1.2 铆钉选材	59
§ 2 复合材料结构常用的钛紧固件	62
2.1 紧固件类型选择	62
2.2 紧固件强度、质量	63
§ 3 新型紧固件	78

3.1	钛铝合金实心铆钉	78
3.2	空尾铆钉	80
3.3	双金属铆钉	81
3.4	单面抽钉	82
3.5	干涉配合钛合金环槽钉	86
3.6	自攻螺钉	87
3.7	非金属紧固件	87
3.8	钛粉末制造的紧固件	88
§ 4	钛合金紧固件制造技术和验收标准	89
4.1	钛合金紧固件的制造工艺	89
4.2	Ti-6Al-4V 螺栓的热激	94
4.3	钛合金紧固件的热处理	98
4.4	钛合金紧固件的磨削工艺	101
4.5	钛合金螺栓的滚纹加工	107
4.6	钛合金紧固件的表面处理	110
4.7	验收标准	113
第三章 复合材料制孔工艺		121
§ 1	概述	121
§ 2	碳纤维复合材料制孔工艺	122
2.1	硬质合金制孔刀具研究	122
2.2	钻削工艺参数的选择	123
2.3	镗窝工艺	124
2.4	铰孔工艺	124
2.5	防止分层的工艺措施	124
2.6	人造金刚石刀具在碳纤维复合材料加工中的应用	127
§ 3	凯芙拉纤维复合材料制孔工艺	130
3.1	钻孔过程分析	131
3.2	制孔刀具及工艺	132
3.3	切割修边工艺	137
§ 4	混杂复合材料的制孔工艺	139
§ 5	制孔质量标准	140
5.1	对复合材料分层的分析	140
5.2	轴向力对制孔质量的影响	142
5.3	复合材料孔缺陷的X光检测	146
5.4	制孔质量标准	147
§ 6	复合材料孔加工中的新工具和新设备	149
6.1	可控进给风钻	149
6.2	电动砂轮切割工具	150

6.3	专用切边机床	151
6.4	数控钻头刃磨机	151
6.5	高压水射流切割机床	153
第四章 机械连接工艺		155
§ 1	螺接工艺	155
1.1	高锁螺栓安装	155
1.2	普通螺栓安装	161
§ 2	铆接工艺	161
2.1	钉杆墩粗的实心铆钉铆接工艺	161
2.2	钉杆局部变形的半空心铆钉铆接工艺	164
§ 3	特种紧固件的安装工艺	169
3.1	环槽钉的安装工艺	169
3.2	单面大底脚螺纹抽钉安装工艺	175
§ 4	连接防腐和湿装配	179
4.1	电偶腐蚀	179
4.2	防腐和湿装配	181
§ 5	机械连接干涉配合问题	184
5.1	问题的提出	184
5.2	力学模型假设	186
5.3	安装方法	187
5.4	干涉配合机械连接孔边应力分析	188
第五章 胶接连接工艺		194
§ 1	概述	194
§ 2	胶接装配应具备的条件	195
§ 3	胶接工艺	197
3.1	胶接工艺程序	197
3.2	胶粘剂选择及复验	197
3.3	预装配	199
3.4	表面制备	199
3.5	胶接装配	201
3.6	固化	201
§ 4	胶接质量控制	203
4.1	工序检验	203
4.2	随炉试样强度测试	203
4.3	复合材料胶接结构的无损检测	203
参考资料		205

第一章 复合材料结构 连接设计基础

§ 1 连接方法及其选择

复合材料零件之间或复合材料零件与金属零件之间的连接，均与金属件之间连接一样，有三种连接方法：胶接、机械连接和混合连接。

1.1 胶 接

胶接连接是复合材料结构中普遍采用的一种连接方法。这种方法是借助胶粘剂将零件连接成不可拆卸的整体。

胶接的优点是：不会因钻孔引起应力集中；连接效率高、结构重量轻，抗疲劳性能好；能够获得光滑气动外形；密封性能好；与不同材料连接无电偶腐蚀问题。

胶接的缺点是：质量控制比较困难；胶接性能受环境（湿、热、腐蚀介质）影响大，存在一定老化问题；不能传递大的载荷；胶接后不可拆卸。

1.2 机 械 连 接

与金属相比，复合材料机械连接的主要特点是：连接结构一般采用间隙配合，不用干涉配合；制孔和安装过程中易使孔产生分层、掉渣等缺陷，影响连接强度；各向异性显著，应力集中高；对碳纤维复合材料，为防止电偶腐蚀，一般用与之电位接近的钛、钛合金、耐蚀不锈钢、蒙乃尔合金等金属材料的紧固件。

机械连接的优点是：易于质量控制，安全可靠，强度分散性小；抗剥离能力强，能传递大载荷；便于装卸。

缺点是：开孔引起应力集中，连接效率低，重量增加。

按所用紧固件及连接工艺的不同，机械连接又分为三种：铆接、螺接和专用紧固件连接。

1.2.1 铆接

铆接是一种不可拆卸连接。它是依靠铆钉钉杆镦粗形成镦头将构件连接在一起的。由于铆钉价格便宜，强度、可靠性较高，便于使用自动钻铆设备，它是一种被广泛应用的永久性连接方法。鉴于复合材料层间强度低、抗撞击能力差，安装时不宜用锤铆，须用压铆。铆钉材料通常选用韧性好、强度高的钛铝合金或纯钛。铆钉除普通实心铆钉外，还常用空尾铆钉、半管状铆钉及双金属铆钉等。

1.2.2 螺接

为传递较大载荷或便于装卸，常采用各种螺栓（普通螺栓、高锁螺栓、锥形螺栓等）进行连接，其安装工艺基本与金属结构相同。

1.2.3 特种紧固件连接

除上述两种机械连接方式外，为满足某些特殊要求（如结构不开敞难于触及，密封，迅速拆卸，结构表面曲率大等），需用专用紧固件及专用工具进行机械连接。如单面紧固件（螺纹抽钉、抽芯紧固件）、环槽钉、高抗剪铆钉、密封紧固件等。

1.3 混合连接

将胶接与机械连接结合起来，如能从工艺上严格保证二者变形一致、同时受载，承载能力和耐久性将大大提高。但是，限于目前工艺水平，不易严格保证变形一致。因此，混合连接主要用于以下场合：

- （1）提供破损—安全特性；
- （2）胶接连接的维修；
- （3）改善胶接的抗剥离性能。

在连接设计中，选用何种连接方法，主要根据使用要求确定。一般来说，当承受的载荷较大、可靠性要求较高时，宜采用机械

连接。究竟用螺接还是铆接，应视载荷大小和有无可拆卸要求而定。当载荷较小、板件较薄、环境条件不恶劣时，宜采用胶接。随着胶接工艺技术的发展，胶接连接已逐步用在高载、厚板的连接中。在某些情况下，为提高结构的破损—安全特性，而采用混合连接。

§ 2 破坏模式

2.1 连接接头

连接结构的破坏形式、破坏载荷值是设计人员所关心的。在对连接结构作强度及破坏分析时，通常从连接结构中取一典型单元——接头来研究。接头由板条、机械紧固件、胶层等组成。图

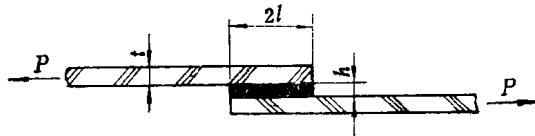


图1-1 典型胶接接头

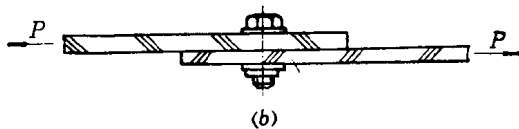
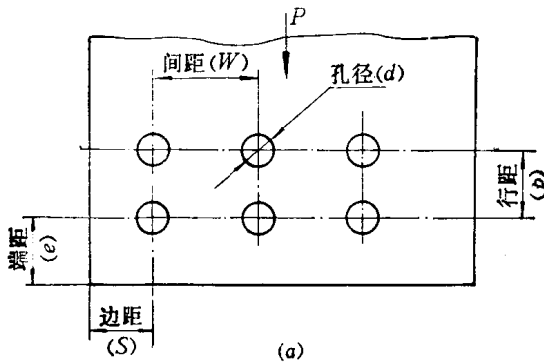


图1-2 典型机械接头

(a) 多钉；(b) 单钉。

1-1 及图 1-2 是典型的胶接接头及机械接头。

衡量接头设计优劣的重要标志是接头效率 $\rho^{(1)}$ ，即

$$\rho = \rho_p \cdot \rho_G \quad (1-1)$$

而

$$\rho_p = P_i / P_c \quad (1-2)$$

$$\rho_G = G_c / G_i \quad (1-3)$$

式中 P_i ——接头能够承受的最大载荷 (N)；

P_c ——无接头连续元件能够承受的最大载荷 (N)；

G_i ——接头质量 (kg)；

G_c ——无接头连续元件质量 (kg)。

显然， ρ_p 和 ρ_G 愈接近于 1，接头设计得愈成功。

2.2 胶接接头破坏模式

胶接接头的破坏分析，可用资料〔2〕所给方法，通过测定载荷 (P)—位移 (δ) 曲线来进行。观测表明，胶接接头在拉伸或



图1-3 胶接接头破坏模式

压缩载荷作用下，有三种破坏模式（见图1-3）：

- (1) 接头外边的胶接件拉伸（或拉弯）破坏；
- (2) 胶层剪切破坏；
- (3) 剥离破坏。

除这三种基本破坏模式外，还会发生混合破坏。接头以何种模式破坏，与接头几何参数有关。当胶接件很薄，接头强度足够，接头外边的胶接件将发生拉伸（或拉弯）破坏；当胶接件较厚，但偏心力矩尚小时，易在胶层产生剪切破坏；当胶接件厚到一定程度，搭接长度与板厚之比又不够大时，在偏心力矩作用下，将在

胶层或接头端部的胶接件层间发生剥离破坏。对于碳纤维复合材料，由于层间拉伸强度低，剥离破坏一般发生在层间（双搭接也如此）。

剥离破坏将使接头承载能力显著下降，应力求避免。

2.3 机械接头破坏模式

机械接头的破坏分析，可用资料〔3〕所给方法，通过测定载荷一位移曲线（见图1-4）来进行。

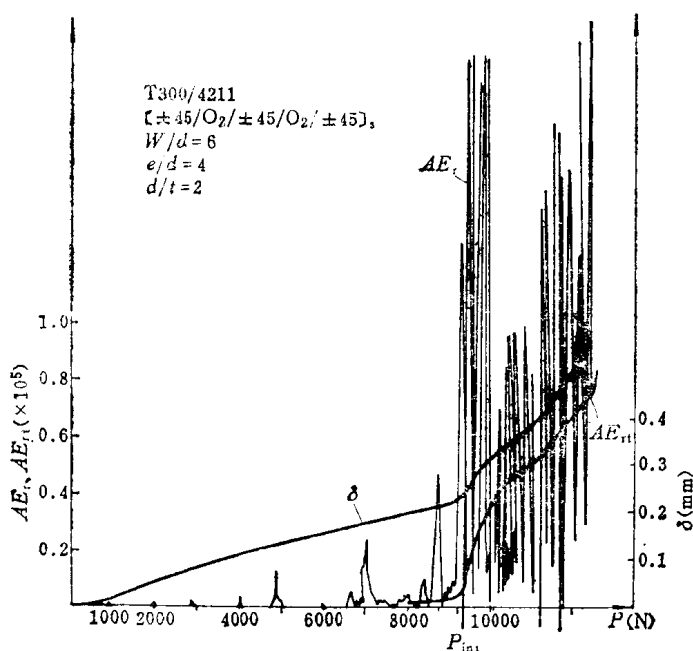


图1-4 声发射及载荷一位移曲线

如果用接头所能承受的最大载荷 P_{max} 或 σ_{max} 作为连接接头强度指标，用上述方法很容易测得。但由于复合材料结构出现初始破坏后再次使用时是不可恢复的，故设计人员更加关心的是使接头产生初始破坏的载荷 P_{ini} 或 σ_{ini} 。目前有的资料将载荷一位移曲线的第一峰值作为确定初始破坏载荷 P_{ini} 的依据^{〔4〕}，大量测量

结果表明，很多层压板的第一峰值很不明显，用声发射与载荷—位移曲线相结合的办法^[6]，能很好的解决这一问题。

利用上述方法，观测到机械接头层压板有五种破坏模式（图1-5）：拉伸破坏、剪切破坏、挤压破坏、劈裂破坏和拉脱破坏。前三种与金属材料一样，是基本破坏模式；后两种是复合材料所特有的。当然，除这五种之外，还会发生组合破坏。

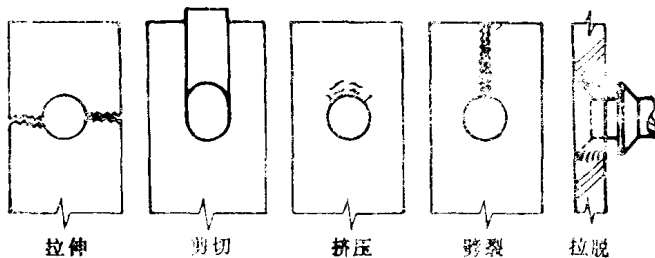


图1-5 机械接头破坏模式

2.3.1 拉伸破坏

同一般金属一样，拉伸破坏发生在带孔的净截面上，破坏载荷远低于无孔全截面值。破坏应力或破坏强度的表达式是：

$$\sigma_N = \frac{P}{(W - nd) t} \quad (1-4)$$

和

$$\sigma_G = \frac{P}{Wt} \quad (1-5)$$

式中 P —— 接头破坏载荷 (N)；

W —— 接头宽度 (mm)；

n —— 孔数；

t —— 板厚 (mm)。

这种破坏基本上是脆性破坏，不像金属那样，孔边应力进入塑性后应力将重新分布。因此，破坏载荷值取决于孔应力集中程度，而应力集中与各向异性程度有关，即与铺层有关。

2.3.2 剪切破坏

复合材料剪切强度通常与层间剪切强度有关，但由于孔边有应力集中，接头剪切强度最好是通过带有载钉孔的剪切试样来测

量。如同各向同性材料那样，剪切强度表达式为：

$$\tau = \frac{P}{2et} \quad (1-6)$$

式中 e —— 孔中心到自由端的距离（平行于载荷），即是通常所说的端距（mm）。

对于单向板，当载荷沿纤维方向，与平面剪切强度相比，接头剪切强度是很低的。这表明，孔周也存在显著的剪切应力集中现象。对于 $0^\circ/\pm 45^\circ$ 层压板，情况则大不一样，剪切强度明显提高，即应力集中较小。因此，同拉伸强度一样，铺层方向是影响剪切破坏的重要因素。

2.3.3 挤压破坏

为便于分析，复合材料挤压强度，也用一般金属材料的办法，以作用在整个孔截面上的平均应力来表示：

$$\sigma_b = \frac{P}{ndt} \quad (1-7)$$

挤压破坏一般发生在孔周载荷比较大的部位。破坏时孔壁的纤维和基体被压碎，受压一侧材料堆积凸起。影响挤压破坏的，除铺层外，主要与接头几何参数有关，一般在 W/d 、 e/d 足够大时发生这种破坏。

2.3.4 劈裂破坏

仅当非 0° 铺层所占百分比很低，即 0° 铺层所占百分比很高时才发生这种破坏。

2.3.5 拉脱破坏

在侧向载荷（如局部气动载荷等）较大的埋头钉连接部位，由于这种载荷所产生的吸力，使层压板产生剥离和弯曲，导致接头拉脱破坏。

在上述五种破坏模式中，只有挤压破坏是局部破坏，承载能力最高，设计人员应力求将连接结构设计成仅可能发生这种破坏的形式。当然，除上述五种破坏模式外，还可能发生组合破坏模式。

§ 3 影响机械接头强度的因素

接头强度除受材质影响外，还受众多因素的影响。这些因素包括接头结构参数方面的、工艺方面的及环境方面的。

3.1 纤维方向的影响

目前的飞行器结构，大都采用由 0° 、 90° 、 $\pm 45^\circ$ 四种定向层

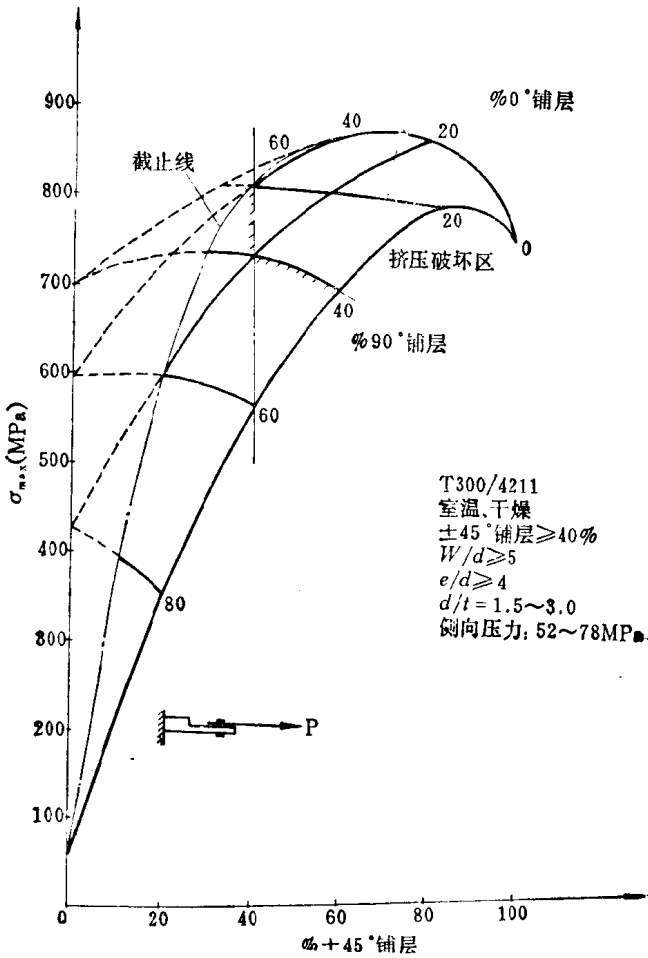


图1-6 不同铺层接头挤压强度

组合的对称层压板结构。各定向层所占比例不同，则得到不同纤维方向情况下的接头强度。图 1-6 是以 20% 为间隔，得到的 T 300/4211 21 种铺层的挤压强度曲线。该图清楚的说明纤维方向对破坏模式和破坏载荷都有很大影响。

在合适的接头几何参数下，欲使连接结构仅可能发生挤压破坏， $\pm 45^\circ$ 铺层应大于 40%， 90° 铺层应小于 40%。为了与相邻元件的热膨胀系数和泊松比不致差异太大，还应保证 90° 铺层在 10% 以上。

3.2 铺层顺序的影响

铺层顺序对销钉加载和螺栓加载孔强度的影响是不同的。资料 [6] 分析了由 8 层铺叠的层压板销钉加载的接头挤压强度问题，给出了 8 种层间应力影响比较大的测试结果，数据表明，铺叠顺序有明显影响。

表 1-1 铺层顺序对挤压强度的影响

铺层顺序	销钉试验结果		螺栓试验结果	
	最大挤压强度 σ_{\max} (MPa)	离散系数 C_v	最大挤压强度 σ_{\max} (MPa)	离散系数 C_v
[0/90/+45/-45] _s	253	12%	708.80	2.69%
[90/0/+45/-45] _s	293		725.89	
[0/+45/-45/0] _s	275		703.43	
[90/+45/-45/0] _s	358		748.24	
[0/+45/90/-45] _s	257		705.78	
[90/+45/0/-45] _s	277		738.93	
[+45/-45/90/0] _s	262		754.33	
[+45/90/0/-45] _s	294		728.93	

在实际连接结构中，一般均用螺栓连接，拧紧螺母，通过垫圈对孔周产生了侧向限制，抑制了层间应力作用，铺叠顺序无明显影响。表 1-1 给出了两种连接情况下所得到的测试结果。螺接接头的最大挤压应力是在孔径为 5mm、拧紧力矩为 3.92N·m 的

条件下得到的。

由表可见，螺接接头挤压强度因铺层顺序不同而产生的离散系数远比销钉要小，因此，对螺栓连接，铺层顺序的影响可以忽略。

3.3 接头几何参数的影响

接头几何参数主要指 e/d (端距、孔径比)、 W/d (宽度、孔径比)、 d/t (孔径、厚度比)。由于复合材料是脆性材料，它不像金属那样具有塑性阶段，因此当复合材料进入破坏阶段，孔边应力不会重新分布，应力集中对接头强度起了决定性影响。影响应力集中的，除上面提到的纤维方向外，接头几何参数也起很大作用。大量研究结果表明，当 $W/d \geq 5$ 、 $e/d \geq 3$ 、 $1.5 \leq d/t \leq 3$ ，接头强度较高，破坏模式为挤压破坏。

当结构端距无法保证 $e/d \geq 4$ 时，可按下图所给曲线修正。

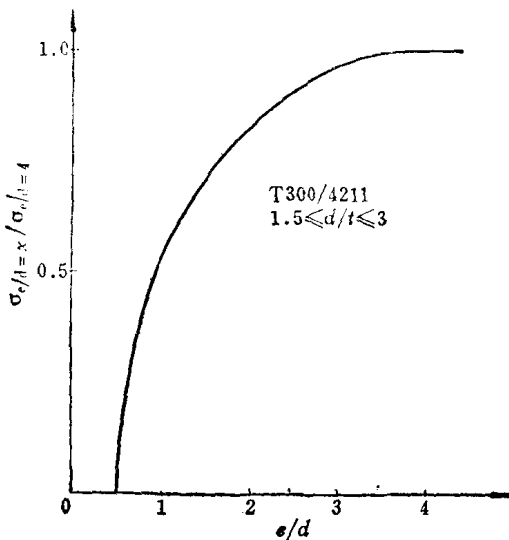


图1-7 挤压强度随 e/d 的变化