

冲击载荷下螺栓预紧力对应力波影响分析

杨璞^{1,2}, 谢若泽^{1,2}, 陈刚^{1,2}, 陈成军^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要: **目的** 研究拉伸冲击载荷作用下螺栓预紧力对应力波的影响。**方法** 针对螺栓弹性变形、塑性变形和冲击破坏 3 种情形, 对螺栓未施加预紧力及施加不同预紧力下的连接结构进行冲击数值模拟, 对比分析连接结构的测点应变及螺栓响应, 并与霍普金森拉伸实验结果进行对比。**结果** 螺栓达到断裂或塑性变形时, 预紧力对测点应变及螺栓最大应力影响较小; 螺栓弹性变形时, 预紧力对测点应变及螺栓最大应力影响较大。**结论** 螺栓达到断裂或塑性变形时, 螺栓拉伸变形远大于预紧力变形, 此时预紧力影响可忽略; 螺栓在弹性变形时, 螺栓拉伸变形与预紧力变形程度接近, 此时预紧力影响不可忽略, 且预紧力越高, 螺栓变形越大。

关键词: 冲击; 螺栓; 预紧力; 应力波

中图分类号: TJ01; O347

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)05-0113-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.05.017

Influence of Preload in Bolt on Stress Wave under Impact-load

YANG Pu^{1,2}, XIE Ruo-ze^{1,2}, CHEN Gang^{1,2}, CHEN Cheng-jun^{1,2}

(1. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. Shock and Vibration of Engineering Materials and Structures Key Laboratory of Sichuan Province, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: This paper aims to study the effect of preload in bolt on stress wave under tensile impact load. We have considered three cases involving bolt elastic deformation, plastic deformation and impact failure. Impact numerical simulation is carried out with bolt no-preload or under different preloads. Strain of measuring point and bolt response of connection structure are compared, and the results are also compared with those of Hopkinson tensile test. When bolts reach fracture or plastic deformation, the preload has little effect on the strain of the measuring point and the maximum stress of the bolt; when bolt is elastically deformed, the preload has some effect on the strain of the measuring point and the maximum stress of the bolt. When bolts reach fracture or plastic deformation, the tensile deformation of bolts is much larger than that of the preload deformation, and the influence of the pretension force can be neglected; when bolt is elastically deformed, since the tension deformation of bolts is close to that of the preload deformation, the influence of the preload can't be neglected and the bolt deformation increases with the increase of preloads.

KEY WORDS: impact; bolt; preload; stress wave

收稿日期: 2021-03-31; 修订日期: 2021-04-01

Received: 2021-03-31; Revised: 2021-04-01

作者简介: 杨璞 (1989—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为结构瞬态冲击。

Biography: YANG Pu (1989—), Female, Master, Assistant researcher, Research focus: structural transient impact.

引文格式: 杨璞, 谢若泽, 陈刚, 等. 冲击载荷下螺栓预紧力对应力波影响分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(5): 113-120.

YANG Pu, XIE Ruo-ze, CHEN Gang, et al. Influence of preload in bolt on stress wave under impact-load[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(5): 113-120.

武器在转移、运输及装卸等情况下,可能面临意外碰撞等异常环境^[1]。异常事故产生的冲击载荷可能导致武器各组件经历冲击高应力、塑性大变形破坏以及诱使炸药构件点火。因此为了合理评估异常冲击环境下武器的安全性,需充分认识冲击载荷作用下应力波在武器连接结构中的传播规律。螺栓连接是武器结构中常见的连接方式,采用螺栓连接时,一般都会施加预紧力^[2]。使螺栓连接在承受工作载荷之前,提前受到力的作用,这个预加作用力称为预紧力^[3]。螺栓预紧力可增强连接的紧密性和刚性^[4]。当结构受到冲击载荷时,螺栓会受到较大的拉应力,该状态下,螺栓预紧力可能会对结构应力波传递产生一定的影响。在实际工程分析中,常忽略螺栓预紧力,甚至将螺栓连接简化为固定连接的节点,这与实际情况有较大出入。

另一方面,针对螺栓预紧力的研究多为静力载荷下的响应分析^[5-8],冲击载荷下的响应分析较少,且未见预紧力对应力波传递影响规律的研究。史冬岩等人^[9]分析了冲击载荷下螺栓预紧力大小对螺栓强度的影响。Karpanan Nakalswamy 等人^[10]研究了冲击载荷下预紧力对结构模态的影响,另外他们还对比了不同预紧力加载方式的计算精度^[11]。目前,关于冲击载荷下螺栓预紧力对应力波传递的影响分析相对匮乏。

基于此,文中针对拉伸冲击载荷作用下螺栓预紧力对螺栓连接的影响规律进行数值模拟,对螺栓弹性变形、塑性变形和冲击破坏3种情形进行数值模拟,对比分析了螺栓没有预紧力及不同预紧力下螺栓和连接结构的响应特性。最后以霍普金森拉伸实验为基础,验证了数值模拟预紧力加载的正确性。

1 连接结构有限元模型

1.1 结构尺寸

螺栓连接结构由截锥和圆筒组成,截锥和圆筒由法兰面上的4颗螺栓连接,右端撞击杆撞击输入杆使左端结构承受拉伸载荷,螺栓受拉。模型结构如图1所示,各部分尺寸见表1。

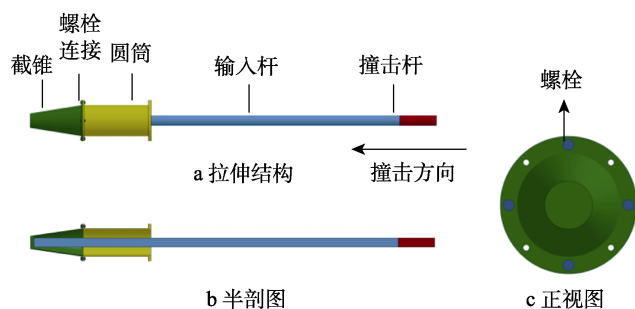


图1 连接结构受拉伸载荷

Fig.1 Connection structure subjected to tensile impact load: a) tensile structure; b) half section; c) front view

表1 连接结构尺寸
Tab.1 Size of Connection structure

部件	测量位置	直径/mm	长度/mm
截锥	小端	70	288
	大端外径	150	
	大端内径	140	
	法兰外径	200	
圆筒	外径	150	374
	内径	140	
	法兰外径	200	
输入杆	截面	50	2000
撞击杆	截面	50	200
螺栓	螺杆	8	16

1.2 材料参数

连接结构的截锥、圆筒及螺栓材料采用弹塑性模型,杆件材料采用弹性模型,具体参数见表2。使螺栓产生塑性变形及断裂时所用输入杆和撞击杆为钢材。考虑到螺栓产生弹性变形时所需的冲击力极小,故使螺栓产生弹性变形时所用输入杆和撞击杆均为铝材。

表2 连接结构、输入杆及撞击杆材料参数
Tab.2 Material parameter of connection structure, incident bar and striker bar

部件	弹性模量/GPa	密度/(g·mm ⁻³)	泊松比	屈服应力/MPa	切线模量/MPa	失效应变
截锥、圆筒	200	7.8	0.3	355	400	0.6
螺栓	200	7.8	0.3	320	267	0.3
输入杆(钢材)	200	7.8	0.3	—	—	—
输入杆(铝材)	70	2.7	0.33	—	—	—
撞击杆(钢材)	200	7.8	0.3	—	—	—
撞击杆(铝材)	70	2.7	0.33	—	—	—

2 预紧力模拟方法及入射波幅值选取

2.1 预紧力加载方式

数值模拟中可采取多种方法对螺栓施加预紧力,如初应力单元法、初始渗透法、降温等效法等^[12]。文中采用降温等效法,即先使螺栓轴向与法兰面过盈配合,其后对螺栓升温,使其轴向长度膨胀至大于法兰厚度,再对螺栓降温。由于螺栓的收缩受到紧固件的限制,使得螺杆受拉,被紧固件受压,通过这样的原理就能通过降低温度来等效施加螺栓预紧力^[6]。经典的设计惯例是螺栓的预紧力一般可达螺栓屈服强度的50%~70%^[13-14]。以此为基准设计了3组预紧力,各预紧力及螺栓过盈量见表3。

表 3 螺栓预紧力加载情况
Tab.3 Magnitude of different pre-loads

序号	螺栓过盈量/mm	预紧力/N	预应力/MPa
1	0.004	2100	70
2	0.008	4270	152
3	0.011	5950	205

2.2 入射波幅值

霍普金森杆撞击产生的入射波幅值公式为^[15]:

$$\sigma = \frac{1}{2} \rho_B C_B v_{st}$$

式中： ρ_B 为杆材料的密度； C_B 为弹性杆中的波速； v_{st} 为撞击速度。

为确定不同状态下所需入射波幅值，首先对不同撞击速度下螺栓的响应进行初步分析，得到螺栓弹性变形、塑性变形及断裂时对应的速度范围：铝杆撞击速度 $v_{st} \leq 2$ m/s 时，螺栓弹性变形；钢杆撞击速度为 2~43 m/s 时，螺栓塑性变形；钢杆撞击速度 $v_{st} \geq 43$ m/s 时，螺栓断裂。最终选取撞击速度 2、20、50 m/s 分别模拟螺栓弹性变形、塑性变形和冲击破坏 3 种情形。此时 3 种撞击速度下的入射波幅值分别为 13.5、390、975 MPa。

3 计算结果分析

3.1 截锥圆筒上测点应变分析

为分析应力波在结构中的传递规律，在截锥及圆筒上沿母线方向布置测量点，记录轴向应变。各测点

分别位于截锥壳外侧面沿母线方向锥头、中部和锥底位置，圆筒部件外侧面中部，各测点分布如图 2 所示。其中测点 1、2、3、4、5、6 与截锥部件小端面的距离分别为 20、100、185、268、380、567 mm。

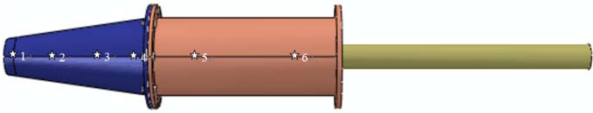


图 2 连接结构上应变测点分布
Fig.2 Position of measuring points on connection strcture

3.1.1 入射波幅值 975 MPa

入射波幅值为 975 MPa 时，螺栓最终被拉断。测点 1 在输入杆的撞击下发生塑性变形，其他测点未产生塑性变形。

无预紧力及不同预紧力下各测点的轴向应变对比如图 3 所示。图 3a—d 反映出无预紧力和有预紧力的测点应变曲线基本重合，其对应的测点 1—4 均在截锥上，应变受入射波和反射波的叠加作用。由于螺栓只对反射波产生影响，所以可见螺栓有无预紧力对反射波影响不大。图 3e、f 反映出有无预紧力测点的应变曲线峰值存在一定差异，其对应的测点 5、6 在圆筒上，其应变反映了透射波作用。可见螺栓有无预紧力对透射波有一定的影响。

3.1.2 入射波幅值 390 MPa

入射波幅值为 390 MPa 时，螺栓最终产生塑性变形。和入射波幅值 975 MPa 时一样，截锥上测点 1 发生塑性变形，其他各测点均未产生塑性变形。在撞

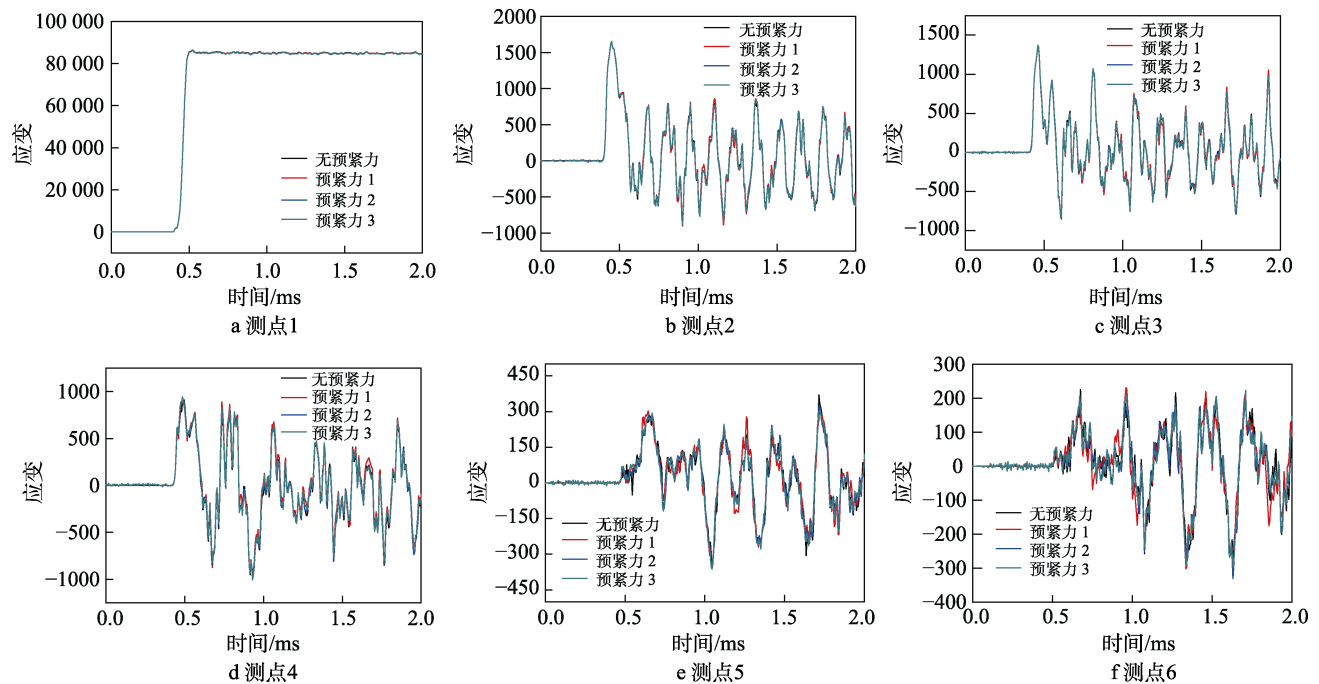


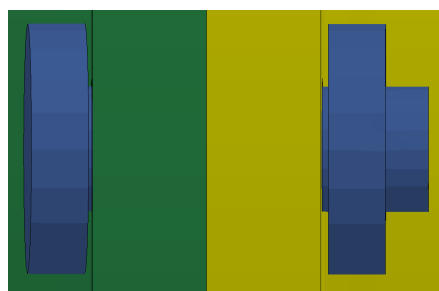
图 3 入射波幅值为 975 MPa 时各测点轴向应变对比

Fig.3 Axial strain comparison of measuring points when the incident wave amplitude is 975 MPa: a) measuring point 1; b) measuring point 2; c) measuring point 3; d) measuring point 4; e) measuring point 5; f) measuring point 6

击过程中,截锥和圆筒法兰界面先分离,直至螺栓产生最大塑性变形时,两法兰界面不再受螺栓接触力,其后两法兰界面又将重新接触,如图4所示。截锥与圆筒法兰间隙的变化历程如图5所示,其反映出两界面再次接触的时刻约为 $t=1.8$ ms。



a 法兰界面分离



b 法兰界面再次接触

图4 入射波幅值为 390 MPa 时撞击过程中连接界面运动示意

Fig.4 Indication of connection interface motion when the incident wave amplitude is 390 MPa: a) flange interface separation; b) flange interface contacts again

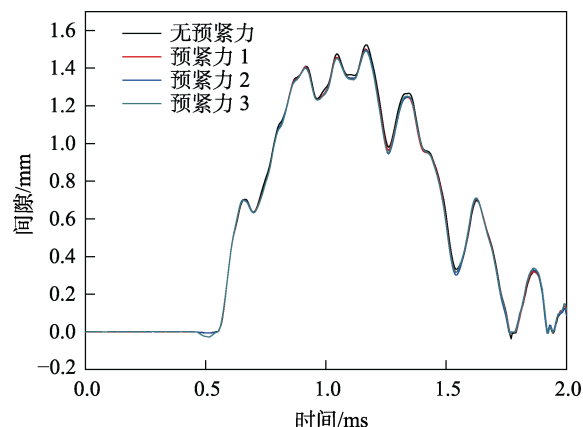


图5 入射波幅值为 390 MPa 时撞击过程中截锥与圆筒界面间隙变化历程

Fig.5 Time history of distance variation between truncated cone and cylinder when the incident wave amplitude is 390 MPa

入射波幅值为 390 MPa 时,无预紧力及不同预紧力下各测点轴向应变对比如图6所示。由图6a—d可以看出,测点应变曲线在 $t=1.8$ ms 前基本重合; $t=1.8$ ms 后,两曲线出现轻微差异,即两法兰再次接触对测点应变有影响,但影响很小。同样因为测点1—4均在截锥上,所以螺栓预紧力对反射波影响不大。图6e、f反映出测点应变曲线在 $t=1.8$ ms 前存在一定差异, $t=1.8$ ms 后差异增大。同样对应的测点5、6在圆筒上,其应变受透射波作用,再次证明螺栓有无预紧力对透射波有一定的影响。

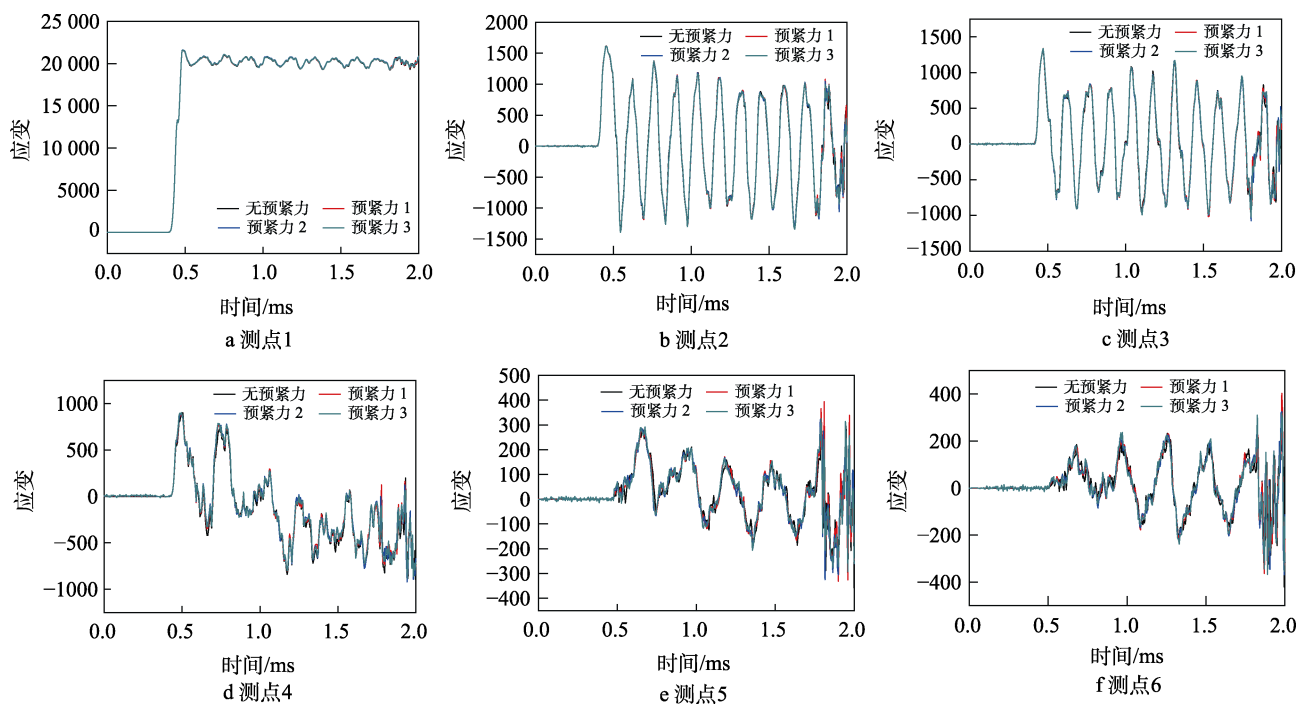


图6 入射波幅值为 390 MPa 时各测点轴向应变对比

Fig.6 Axial strain comparison of measuring points when the incident wave amplitude is 390 MPa: a) measuring point 1; b) measuring point 2; c) measuring point 3; d) measuring point 4; e) measuring point 5; f) measuring point 6

3.1.3 入射波幅值 13.5 MPa

入射波幅值为 13.5 MPa 时, 螺栓最终产生弹性变形, 截锥圆筒上各测点均未产生塑性变形。截锥与圆筒法兰间隙的变化历程如图 7 所示。由图 7 可见, 在撞击过程中, 截锥和圆筒法兰界面先分离、后接触。因为螺栓预紧力限制了两法兰分开的距离, 所以预紧力越大, 界面越早接触, 截锥和圆筒再次接触时刻分别为 0.76、0.80、0.83、0.94 ms。

无预紧力及不同预紧力下, 各测点的轴向应变如图 8 所示。图 8a—c 反映出测点 1—3 的应变曲线在 $t=0.76$ ms 前基本重合, $t=0.76$ ms 后, 两曲线出现差异, 即两法兰再次接触的时刻不同造成了应变曲线的差异。有别于前文螺栓最终断裂和产生塑性变形 2 种状态, 螺栓只产生弹性变形时, 预紧力全程作用在截锥和圆筒上, 预紧力通过影响截锥和圆筒的运动进而影响反射波传播历程。从图 8d 可以看出, 从撞击杆撞击结构时刻开始, 无预紧力及不同预紧力下, 测点 4 的应变曲线就产生差异。这是因为测点 4 离预紧力区域近, 且 2 m/s 撞击时产生的应变较小, 相对于撞击产生的变形, 预紧力在该处造成的应变不可忽略,

因此测点 4 应变曲线从一开始就表现出差异。图 8e、f 反映出测点应变曲线峰值存在一定差异, 同样是因为预紧力影响了截锥和圆筒的运动, 进而影响了透射波的传播历程。

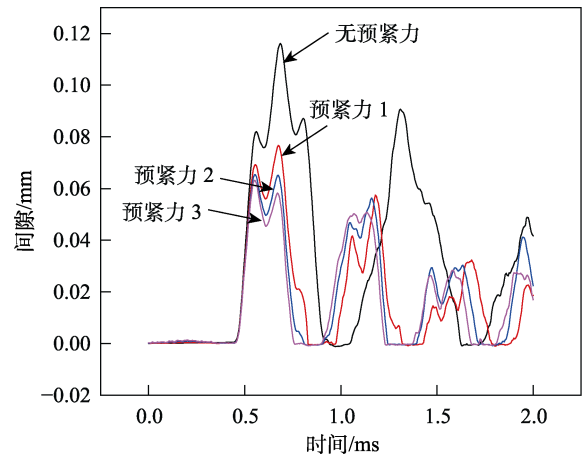


图 7 入射波幅值 13.5 MPa 时撞击过程中截锥与圆筒界面间隙变化历程

Fig.7 Time history of distance variation between truncated cone and cylinder when the incident wave amplitude is 13.5 MPa

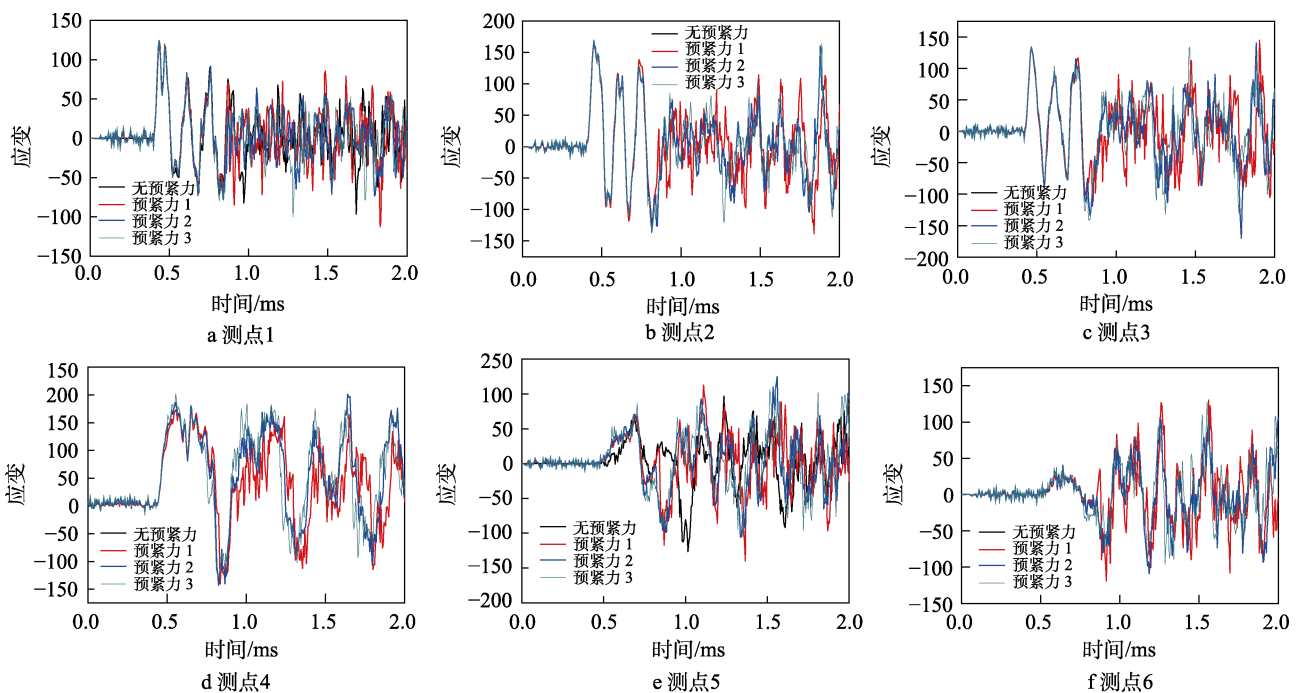


图 8 入射波幅值 13.5 MPa 撞击时不同预紧力下各测点轴向应变对比

Fig.8 Axial strain comparison of measuring points when the incident wave amplitude is 13.5 MPa: a) measuring point 1; b) measuring point 2; c) measuring point 3; d) measuring point 4; e) measuring point 5; f) measuring point 6

3.2 螺栓响应分析

3.2.1 螺栓应力

螺栓应力随时间的变化曲线如图 9 所示。对各幅值的入射波, $t=0.46$ ms 时刻, 截锥上的应力波传至螺栓, 在这之前螺栓应力维持在初始预紧力水平。

入射波幅值为 975 MPa 时, t 在 0.46~0.80 ms 为螺栓拉伸至断裂阶段。该阶段各曲线重合, 但考虑到其初始应力不同, 对应的应力增大幅值也不同, 即预紧力越大, 拉断所需的应力越小。这是因为预紧力越大, 应力值越靠近拉伸强度极限。螺栓在 $t=0.80$ ms 时刻断裂, 其后应力曲线出现震荡, 且不再重合。

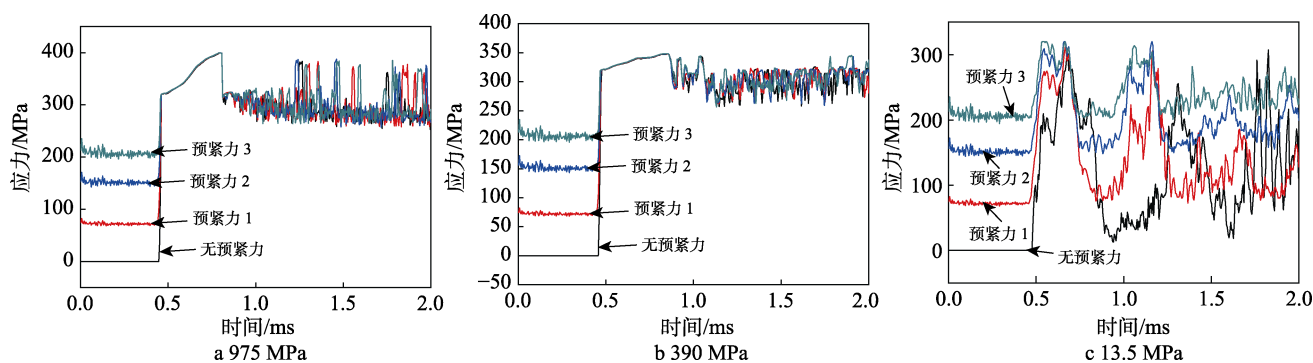


图9 3种入射波幅值时不同预紧力下的螺栓应力对比

Fig.9 Bolt stress comparison between multiple pre-loads when the incident wave amplitude is 975, 390, 13.5 MPa

入射波幅值为 390 MPa 时, t 在 0.46~0.86 ms 为螺栓拉伸至最大塑性应变阶段。该阶段各曲线重合, 是因为预紧力越大, 预应力值越靠近屈服强度, 螺栓达到最大塑性变形所需的拉伸应力越小。螺栓在 $t=0.86$ ms 时刻产生最大塑性变形, 其后螺栓与截锥圆筒的法兰面分离, 作自由运动, 应力曲线出现震荡, 且不再重合。

入射波幅值为 13.5 MPa 时, 螺栓处于弹性变形, 应力幅值先上升至屈服应力, 然后降至各自的初始应力水平。应力曲线同样遵循预应力越大, 拉伸时产生的应力越小的规律。

3.2.2 螺栓变形

各撞击速度与预紧力下螺栓的最大变形量见表 4。入射波幅值为 975 MPa 时, 螺栓断裂, 无最大变形量; 入射波幅值为 390 MPa 时, 螺栓产生塑性变形, 用最大等效塑性变形量表征; 入射波幅值为 13.5 MPa 时, 螺栓产生弹性变形, 用最大等效应变表征。由表 4 可以看出, 入射波幅值为 390 MPa 时, 螺栓预紧力对螺栓最终塑性变形影响不大; 入射波幅值为 13.5 MPa 时, 螺栓预紧力越高, 其变形越大, 这是因为该

表 4 3种入射波幅值时不同预紧力下螺栓最大变形对比
Tab.4 Maximum strain comparison of bolt between multiple pre-loads when the incident wave amplitude is 975/390/13.5MPa

入射波幅值/MPa	预紧力	最大等效塑性变形/ 最大等效变形
975	无预紧力	—
	预紧力 1	—
	预紧力 2	—
	预紧力 3	—
390	无预紧力	0.167
	预紧力 1	0.168
	预紧力 2	0.168
	预紧力 3	0.168
13.5	无预紧力	1.32×10^{-3}
	预紧力 1	1.35×10^{-3}
	预紧力 2	1.43×10^{-3}
	预紧力 3	1.57×10^{-3}

速度下螺栓因撞击产生的变形与预紧力产生的变形同量级, 螺栓变形受预紧力变形影响较大。

3.2.3 最低撞击速度

因螺栓断裂时无法用塑性变形量来分析其响应, 故以螺栓刚好断裂时所需撞击速度来表征其响应。螺栓被拉断所需的最小撞击速度见表 5。由表 5 可见, 无预紧力及不同预紧力下, 拉断螺栓所需的最小撞击速度接近, 速度差最大仅为 0.47%, 故预紧力对螺栓断裂影响较小。

表 5 不同预紧力下螺栓断裂所需最小撞击速度

Tab.5 Minimum launching velocity needed to achieve bolt failure when different pre-loads are applied

预紧力	最小速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
无预紧力	42.2
预紧力 1	42.2
预紧力 2	42.4
预紧力 3	42.4

4 实验结果

为验证数值模拟中螺栓预紧力加载方式的合理性, 将相同工况下数值模拟与霍普金森撞击实验的测点应变曲线进行对比。对比工况: 撞击杆长度为 200 mm, 撞击速度为 9.63 m/s, 撞击杆和输入杆均采用钢, 预紧力为 6000 N。实验中测点位置如图 10 所示, 测点 1、2、3、4、5、6、7 与截锥部件小端面的距离分别为 20、100、180、260、356、471、586 mm。数值模拟中在相同测点位置提取轴向应变数据。



图 10 连接结构霍普金森撞击实验装置

Fig.10 Connection structure subjected to SHPB experiment

各测点实验和数值模拟轴向应变对比结果如图 11 所示。各测点第一个波峰的波宽及波峰对比见表 6。结果表明,除测点 1、4 数值模拟与实验结果差距较大外,其他点第一个波峰数值模拟与实验结果基本一致。测点 1 和测点 4 位置接近截锥的两端受干扰较大,故数值模拟与实验结果差距较大。其他 5 个测点

数值模拟和实验结果第一个波峰基本一致,后期出现差异,原因可能是数值模拟与实验装置边界条件不同。数值模拟中,结构未固定,处于自由边界状态,实验中结构一端固定约束、一端为自由边界。数值模拟和实验结果的对比较验证了文中数值模拟螺栓预紧力加载方式的合理性。

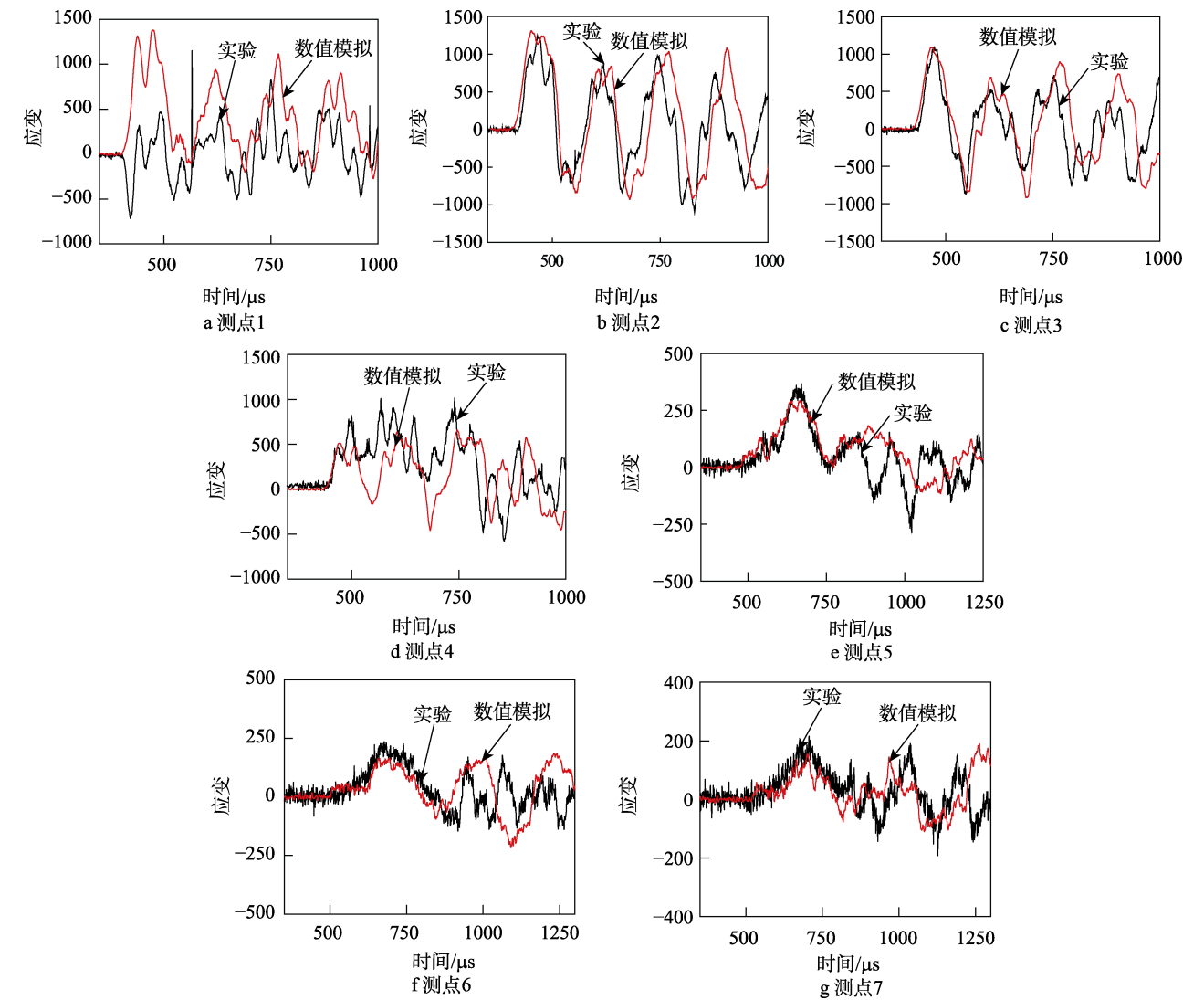


图 11 数值模拟与实验测点轴向应变曲线对比
Fig.11 Axial strain comparison between numerical simulation and experimental results

表 6 数值模拟与实验测点波宽及波峰值对比
Tab.6 Pulse width and pulse peak comparison between numerical simulation and experimental results

测点	波宽/ μs			波峰/ μe		
	实验	数值模拟	差值百分比/%	实验	数值模拟	差值百分比/%
1	71	149	110	469	1380	194
2	88	101	15	1245	1308	5
3	74	88	19	1097	1086	1
4	353	87	98	498	512	3
5	263	283	8	317	293	8
6	290	315	9	167	202	21
7	323	281	13	161	154	4

5 结论

通过对截锥和圆筒上测点轴向应变、输入杆中部轴向应力、螺栓应力、螺栓变形及被拉断的最小撞击速度的综合分析可知,螺栓达到断裂或塑性变形时,由撞击产生的拉伸变形远大于预紧力,此时预紧力的影响可以忽略;螺栓在弹性变形时,由撞击产生的拉伸变形与预紧力变形程度接近,故此时预紧力的影响不可忽略。具体结论如下:

1) 入射波幅值为 975、390 MPa 时,螺栓预紧力对反射波的影响不大,对透射波有一定的影响;入射波幅值为 13.5 MPa 时,螺栓预紧力对反射波和透射

波都有一定的影响。

2) 螺栓预紧力影响撞击过程中螺栓应力的增加幅值, 预紧力越大, 螺栓应力增加幅值越小。入射波幅值为 975、390 MPa 时, 预紧力不影响其最大应力; 入射波幅值为 13.5 MPa 时, 预紧力影响其最大应力, 且预紧力越大, 螺栓应力峰值越大。

3) 入射波幅值为 390 MPa 时, 预紧力对螺栓最大塑性变形的影响不大; 入射波幅值为 13.5 MPa 时, 预紧力对螺栓最大等效变形的影响较大, 且预紧力越大, 其变形越大。

4) 预紧力对螺栓断裂的影响不大。

5) 数值模拟与实验的测点轴向应变基本一致, 验证了数值模拟中螺栓预紧力加载方式的合理性。

参考文献:

- [1] 黄梦宏, 朱令娴, 张志勇, 等. 装备统一环境试验条件研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(8): 69-72.
HUANG Meng-hong, ZHU Ling-xian, ZHANG Zhi-yong, et al. Unified conditions of environmental test for equipment[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(8): 69-72.
- [2] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
CHENG Da-xian. Manual of mechanic design[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [3] 濮良贵, 纪名刚. 机械设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
PU Liang-gui, JI Ming-gang. Mechanic design[M]. Beijing: Tsinghu University Press, 2006.
- [4] 孙晓萌, 麦云飞. 螺栓预紧力下的应力分析[J]. 电子科技, 2017, 30(2): 65-67.
SUN Xiao-meng, MAI Yun-fei. Analysis of stress under bolt pretension[J]. Electronic science and technology, 2017, 30(2): 65-67.
- [5] 张永杰, 孙秦. 带预紧力受剪螺栓连接刚度分析[J]. 强度与环境, 2007, 34(4): 22-25.
ZHANG Yong-jie, SUN Qin. Sheared bolt joint stiffness analysis with pre-tightened force[J]. Structure and environment engineering, 2007, 34(4): 22-25.
- [6] 叶奇, 胡伟平, 孟庆春. 基于 ANSYS 受剪螺栓预紧力处理方法研究[C]// 北京力学学会第 20 届学术年会论文集. 北京: 北京力学学会, 2014.
YE Qi, Hu WEI-ping, MENG Qing-chun. The loading approaches of sheared bolt joint pre-tightening force basing on ANSYS[C]// The 20th annual conference colloquium of beijing mechanical academy. Beijing: Beijing Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2014.
- [7] 王升涛, 张建宇. 螺栓连接薄板应力的有限元分析[C]// 北京力学学会第 18 届学术年会论文集. 北京: 北京力学学会, 2012.
WANG Sheng-tao, ZHANG Jian-yu. Finite element analysis of stress in thin plate with bolt joint[C]// The 18th annual conference colloquium of beijing mechanical academy. Beijing: Beijing Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2012.
- [8] 王佳宁, 赵美英, 周银华. 预紧力对层合板螺栓连接强度的影响研究[J]. 航空工程进展, 2012, 3(2): 189-194.
WANG Jia-ning, ZHAO Mei-yin, ZHOU Yin-hua. Research of influence of pre-tightening force to laminate bolt joint strength[J]. Advance in aeronautical science and engineering, 2012, 3(2): 189-194.
- [9] 史冬岩, 张亮, 张成, 等. 冲击载荷作用下预紧力螺栓强度特性研究[J]. 船海工程, 2012, 41(2): 166-169.
SHI Dong-yan, ZHANG Liang, ZHANG Cheng, ZHANG Tong-ming. Research of strength character of the pre-loaded bolt under impact load[J]. Ship and ocean engineering, 2012, 41(2): 166-169.
- [10] KARPANAN N K. Experiment and numerical analysis of structures with bolted joints subjected to impact load[D]. Las Vegas: University of Nevada, 2010.
- [11] O'TOOLE B, KARPANAN K, MASOUD F. Experimental and finite element analysis of preloaded bolted joints under impact loading[C]// 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics, and materials conference. Newport, RI, USA: AIAA, 2006.
- [12] DEEPAK S S. Analysis of bolted joints under medium and high impact loading[D]. Los Vegas: University of Nevada, 2014.
- [13] Shigley J E, Mitchell L D. Mechanical engineering design[M]. 4th Edn. New York: McGraw-Hill, 1983.
- [14] Duffey T A. Optimal bolt preload for dynamic loading[J]. International journal of mechanical sciences, 1993, 35: 257-265.
- [15] 陈为农, 宋博. 分离式霍普金森(考尔斯基)杆设计、试验和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018.
CHEN Wei-nong, SONG Bo. Split Hopkinson (Kolsky) bar design, testing and applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018.