

钢 - 钢电阻点焊和自冲铆接接头力学性能对比研究

景力军, 韦超忠*

上汽通用五菱汽车股份有限公司, 广西 柳州

收稿日期: 2022年4月26日; 录用日期: 2022年6月9日; 发布日期: 2022年6月16日

摘要

对厚度为1.2 mm的HC420LA采用电阻点焊和自冲铆接两种不同连接方式进行连接, 并对两种不同连接接头进行准静态和中高速拉伸试验, 分析对比了两种不同接头的力学性能及失效形式。结果表明不管是哪种连接接头均表现出了对拉伸速度的正敏感性, 抗拉载荷随着拉伸速度增大而增大; 相较而言, 电阻点焊接头在拉伸和抗冲击方面的力学性能优于自冲铆接接头; 准静态拉伸条件下自冲铆接的平均峰值载荷是6.51 kN, 电阻点焊的是14.47 kN, 比自冲铆接接头高122%, 8 m/s的拉伸速度下自冲铆接的平均峰值载荷是9.68 kN, 电阻点焊的是20.20 kN, 比自冲铆接接头高108%。本文对此类材料的不同连接方式的力学性能差异进行了理论分析, 为工程应用提供了支撑, 可根据实际使用情况选择合适的连接形式。

关键词

高强度, 电阻点焊, 自冲铆接, 高速拉伸性能

Comparative Study of Mechanical Properties of Steel-Steel Resistance Spot Welded and Self-Piercing Riveted Joints

Lijun Jing, Chaozhong Wei*

Saic-GM-Wuling Automobile Co., Ltd., Liuzhou Guangxi

Received: Apr. 26th, 2022; accepted: Jun. 9th, 2022; published: Jun. 16th, 2022

Abstract

The HC420LA with a thickness of 1.2 mm was connected by two different connection methods, *通讯作者。

namely resistance spot welding and self-piercing riveting, and the two different connection joints were subjected to quasi-static and medium- and high-speed tensile tests to analyze and compare the mechanical properties and failure forms of the two different joints. The results show that all kinds of connection joints have shown a positive sensitivity to the tensile speed, and tensile load increases with increasing tensile speed; in comparison, the mechanical property of resistance spot welded joints in tensile and impact resistance is better than the self-piercing riveted joints; quasi-static tensile condition of the average peak load of self-piercing riveted is 6.51 kN, resistance spot welded is 14.47 kN, higher than the self-piercing riveted joints. The average peak load for a self-pierce riveted joint at a tensile speed of 8 m/s is 9.68 kN and for a resistance spot welded joint is 20.20 kN, 108% higher than that of the self-pierce riveted joint; the mechanical property curves exhibited by the two different joints are similar. This paper provides a theoretical analysis of the differences in mechanical properties of different connections for such materials, which provides support for engineering applications and allows the selection of the appropriate connection form according to the actual use.

Keywords

High Strength Steel, Resistance Spot Welding, Self-Piercing Riveting, High-Speed Tensile Properties

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钢是当前车身上常用的材料。目前车身上钢应用的包括车辆的底盘、汽车内部的零部件和结构件等[1]。并且出于安全性能和工艺性能考虑,在低碳钢中加入少量的 Nb、Ti 等合金元素,经过不完全退火得到的具有高屈服强度、较低屈强比的低合金高强钢深受车企的喜爱,比如冷轧钢 HC340LA 和 HC420LA 等[2]。由于车身零部件结构复杂,有些零部件无法一次成型,需要用合适的连接手段把零件连接起来再装配。

焊接和铆接是目前工业上最常用的连接手段。焊接技术有多种,比如激光焊接、氩弧焊、搅拌摩擦焊、磁脉冲焊接、电阻点焊等。其中,电阻点焊因为易操控、容易实现自动化、连接效率高、成本低等优点广泛应用在汽车行业中。据统计,目前车身生产时有 90% 是电阻点焊实现的[3]。自冲铆接是一种通过将自冲铆钉穿刺连接板从而形成互锁的机械连接的工艺[4]。与传统电阻点焊比,自冲铆接具有无污染、无飞溅、节能环保等优点,并且连接对象灵活,应用范围广[5]。因此自冲铆接也越来越受车企的关注,并已经应用在一些量产车型上。

目前有很多学者对电阻点焊和自冲铆接开展了一系列的研究。南昌大学的田义丰[6]对锰 TRIP 钢和 DP590 高强钢用电阻点焊实现了异种钢材的连接,研究了焊接的最佳工艺参数,并且对熔核区的金相组织进行分析,最后进行了失效分析。陈刚等人[7]研究了焊接电流对 M51-RM80 钢接头的力学性能影响。尤小龙[8]对高强钢的电阻点焊件的焊点熔核和力学性能进行了研究,并提出了一种基于有限元的电阻点焊接头抗剪切性能预测方法。崔俊佳等[9]对 DP780 钢的电阻点焊接头进行动态载荷下失效行为的研究,揭示了动态拉伸下电阻点焊接头的失效机理。王亚东等[10] [11] [12] [13]对不同焊接条件下的电阻点焊工艺参数进行研究,提出了针对不同目标不同环境下合适的电阻点焊的焊接参数。在自冲铆接方面,徐利利等人[14]建立了自冲铆接的有限元模型并基于有限元模型对自冲铆接工艺参数进行优化。张永超等人[15]研究了 B1500HS 高强钢和 5052 铝合金自冲铆接接头的力学性能及失效机理。潘伟涛等人[16] [17] [18]

[19]对自冲铆接的工艺参数和接头性能、服役性能等进行研究,分析自冲铆接接头的失效机理。但是目前的研究仅针对单种接头,缺少将两种不同连接接头进行力学性能方面的横向对比。

本文选取汽车上常用的 HC420LA 高强钢为连接对象,用电阻点焊和自冲铆接两种连接方式对 HC420LA 进行连接,并对两种连接接头进行了准静态和中高速拉伸试验。对比并且分析了两种不同连接方式在同样试验条件下的不同力学特点。本项研究为汽车车身安全设计和连接方式的选择提供了试验和理论上的依据。

2. 实验材料及方法:

2.1. 试样制备

本次研究所用的材料是从江苏澳洋顺昌金属材料股份有限公司采购的厚度为 1.2 mm 的 HC420LA 高强度钢板,HC420LA 的化学成分组成如表 1 所示,HC420LA 的力学性能如表 2 所示。为了连接及后期力学性能测试方便,将采购的 HC420LA 大板用剪板机裁剪为 120 mm × 40 mm × 1.2 mm 的小板件。在连接开始之前还需要将板件做以下处理:1) 将准备好的板件进行边缘打磨去毛刺处理,以便连接时两块板能紧密贴合;2) 用工业用无水乙醇将表面油污进行擦拭,避免影响连接效果;3) 将两块板件搭接并用相关的设备连接。板件接头的搭接结构尺寸如图 1 所示,其中搭接长度为 40 mm,搭接面积为 40 × 40 mm,连接点位于搭接区域的中心。

Table 1. Chemical composition of HC420LA high-strength steel

表 1. HC420LA 高强钢的化学成分[20]

材料	每种元素的含量(%)								
	C	Mn	S	P	Si	Al	Nb	Ti	N
HC420LA	0.0800	1.1100	0.0020	0.0150	0.0300	0.0400	0.0460	0.0300	0.0049

Table 2. Mechanical properties of HC420LA high-strength steel

表 2. HC420LA 高强钢的力学性能[21]

材料	试样方向	屈服强度 Rp0.2/MPa	抗拉强度 Rm/MPa	断后伸长率 A80mm/%
HC420LA	纵向	430	535	22.5
	45°	426	528	21.0
	横向	435	546	21.5

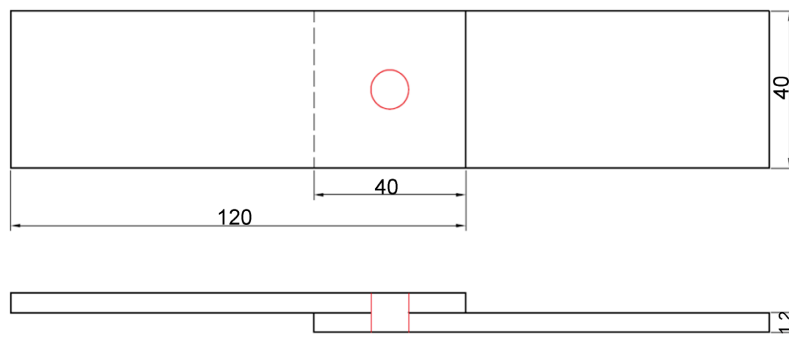
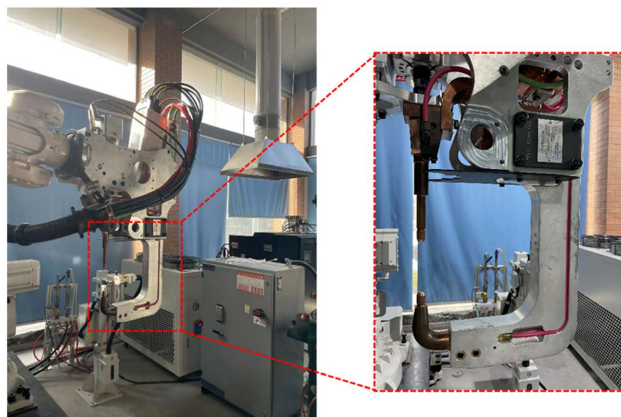


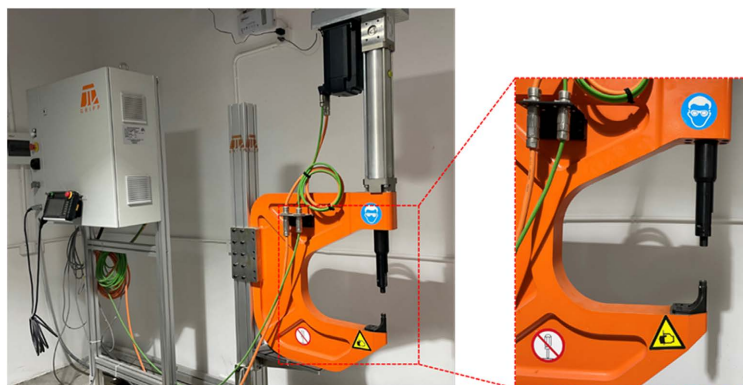
Figure 1. Schematic diagram of connection joint lap dimensions (dimension: mm)

图 1. 连接接头搭接尺寸示意图(单位: mm)

本次试验用的电阻点焊设备是由森德莱焊接技术(广州)有限公司生产的点焊平台, 焊枪型号为 Flexgun UL C 型焊枪, 如图 2(a)。经过前期多次预实验, 确定了最终的电阻点焊焊接工艺参数为两电极之间的压力是 2700 N、加压时间 180 ms、焊接电流 7.8 kA。本次试验用的自冲铆接设备是由武汉埃锐特机械制造有限公司生产的液压自冲铆接机, 如图 2(b)。前期的预实验, 确定了本次研究中采用长度为 5 mm 的 35#钢的自冲铆钉, 铆钉直径为 5.3 mm, 在液压自冲铆接机上设置铆接补偿量为 90%。



(a) 试验中用的电阻点焊接系统



(b) 试验中用的自冲铆接系统

Figure 2. Connection equipment used in this test
图 2. 试验所用的连接设备

2.2. 试验方法

2.2.1. 准静态拉伸试验

根据《GB/T 228-2002 金属材料室温拉伸试验方法》标准对两种不同连接方式的连接样件进行准静态拉伸试验。本次试验采用 LABSANS 公司生产的 LD26.105 万能试验机, 最大拉力是 100 kN。每种类型的样件进行三次重复性试验以保证试验结果的稳定及可信度。拉伸速度为 2 mm/min, 在装夹试样时将两端粘同等厚度的垫片从而保证拉力的对中性, 防止在拉伸过程中扭力的产生。准静态拉伸如图 3 所示。

2.2.2. 中高速拉伸试验

本次试验中所用到的中高速拉伸设备是 Zwick/Roell htm5020 高速拉伸机, 该拉伸机的最大拉伸速度为 20 m/s, 设备照片及安装方式如图 4。为了充分模拟多种实际环境下的接头抗冲击性能, 选用 2 m/s、4

m/s、6 m/s 和 8 m/s 四种速度进行测试试验。在中高速拉伸测试时为了保证拉力的对中性在样件两端粘上同等厚度的垫片。每种类型的样件进行三次重复性试验。

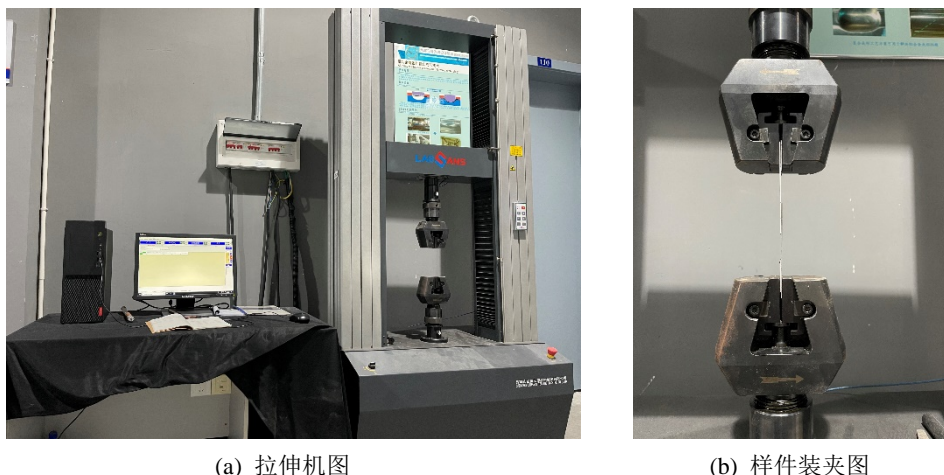


Figure 3. Connection equipment used in this test
图 3. 试验所用的连接设备

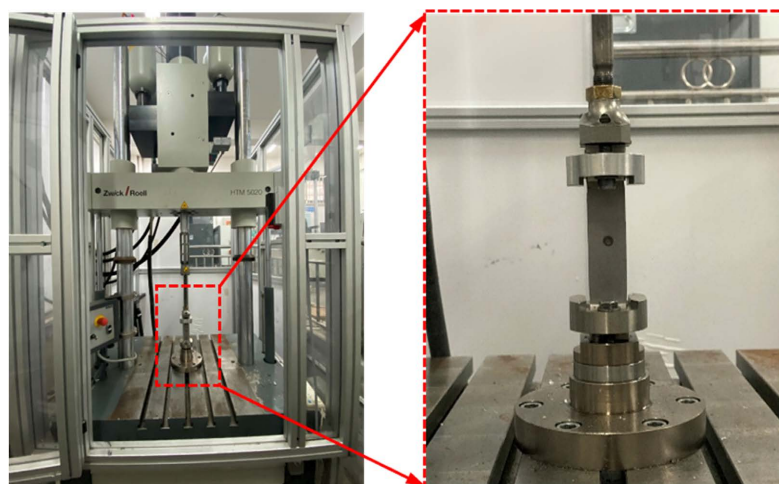


Figure 4. Zwick/Roell htm5020 high speed tensioner and clamping diagram
图 4. Zwick/Roell htm5020 高速拉伸机及装夹图

3. 试验结果及讨论

3.1. 准静态拉伸性能对比

从图 5 可以看出, 不管是那种方式的连接, 失效过程均一致。即主要可分为三个阶段: 第一个阶段的位移和载荷关系是线性的, 也就是典型的弹性阶段; 随后第二阶段曲线的斜率降低, 此时已经开始发生塑性变形, 这一阶段一直持续到峰值载荷的出现; 第三阶段是峰值载荷出现以后载荷开始下降, 此时接头已经出现失效。从失效样件的图可以看到, 自冲铆接的失效是铆钉发生变形直至脱落, 自锁结构被破坏; 电阻点焊的失效形式是母材沿着焊点周围撕裂, 导致两板失效。

三次电阻点焊和自冲铆接的 HC420LA-HC420LA 接头准静态抗拉性能如表 3 所示。从表中可以看出, HC420LA-HC420LA 的电阻点焊接头的平均抗拉载荷远远高于自冲铆接接头。其中自冲铆接接头的平均

载荷为 6.51 kN, 而电阻点焊的平均载荷为 14.47 kN, 相比于自冲铆接接头来说提升了 122%。同时为了对失效过程进一步分析, 两种不同连接方式都选取中间载荷作为分析对象, 并做力 - 位移曲线图以便对比分析, 如图 5 所示。

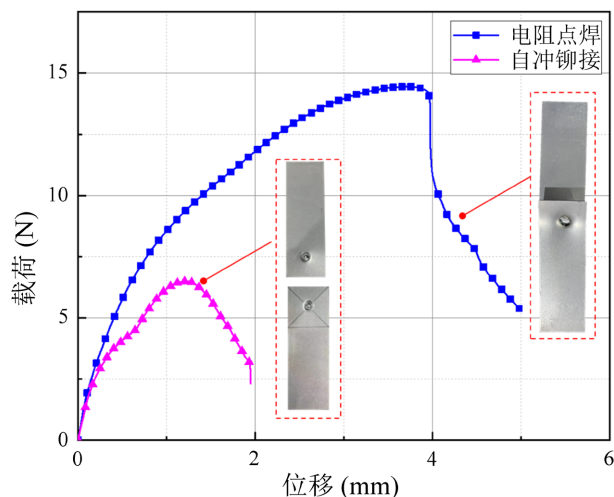


Figure 5. Comparison of quasi-static tensile curves of two different joints
图 5. 两种不同连接方式的准静态拉伸曲线对比

Table 3. Quasi-static tensile properties of resistance spot welds and self-pierce riveted joints

表 3. 电阻点焊和自冲铆接的准静态抗拉性能

连接方式	最大载荷(kN)	平均载荷(kN)
电阻点焊	14.40	14.47
	14.56	
	14.45	
自冲铆接	6.15	6.51
	6.50	
	6.89	

3.2. 中高速拉伸性能对比

HC420LA-HC420LA 的接头失效模式如图 6 所示。从图中可以看出在较高的加载速率下, 电阻点焊的失效模式都是沿着焊点周边的热影响区拔出断裂, 自冲铆接接头的失效形式也基本一致, 都是为铆钉受拉后断裂并留在了板件中。

可从图 7 明显看出不同速度拉伸时接头变化趋势: 峰值载荷随着拉伸速度的增加而增加。这是因为拉伸速率越大, 接头瞬间强度增加, 此时金属内部会产生大量位错, 使得材料抵抗塑性变形能力增强, 所以接头拉剪载荷随着拉伸速率不断增加。于电阻点焊而言, 由于失效是瞬时的, 高速拉伸下的位移远远小于准静态拉伸的位移量, 这是因为失效速度太快导致材料的塑性变形减小。而自冲铆接接头的失效都是发生在铆钉上, 所以不同拉伸速度失效时铆钉的变形量差异不明显。不管是电阻点焊还是自冲铆接, 在中高速拉伸时候的载荷 - 位移曲线都是出现波动并表现出不稳定的现象, 这是因为这是由于在这一高速加载过程中, 材料的硬化行为以及应力波在材料内部的传递等因素综合作用的结果。

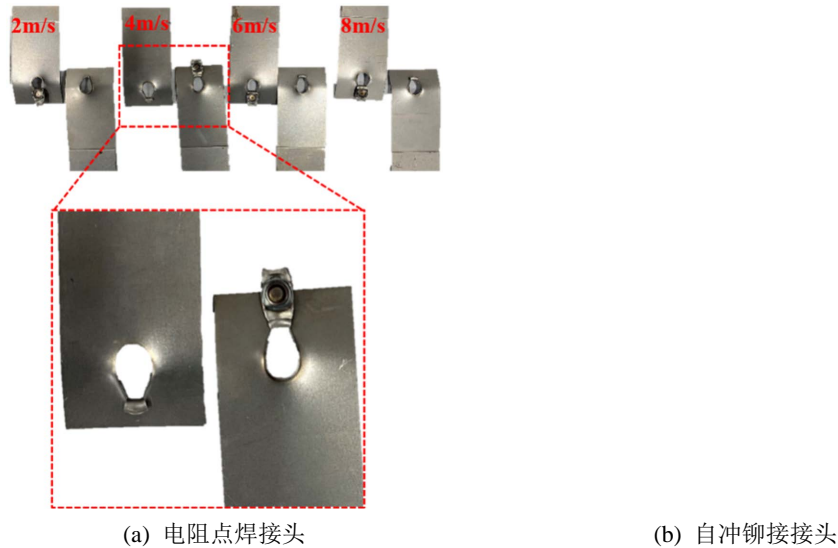


Figure 6. Forms of medium- and high-speed tensile failure of different connection methods
图 6. 不同连接方式的中高速拉伸失效形式

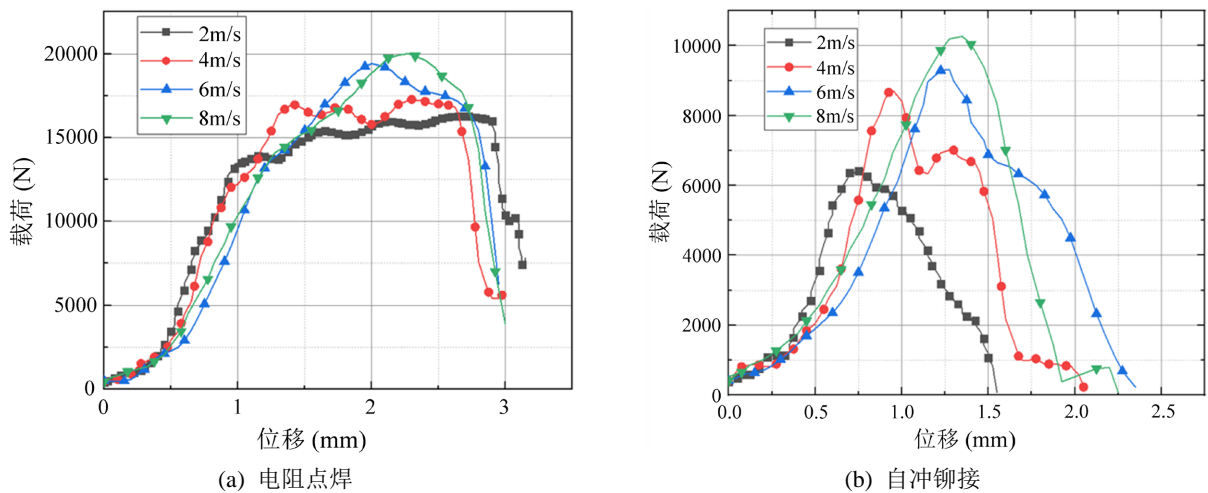


Figure 7. Load-displacement curves of two joints with different tensile speeds
图 7. 两种接头的不同拉伸速度的载荷 - 位移曲线

表 4 是两种不同接头在不同拉伸速度下的最大峰值载荷。从表中可以看出不管是电阻点焊接头还是自冲铆接接头, 都对速度表现了一定程度的正敏感性, 都随着拉伸速度的增加峰值载荷增加。其中电阻点焊接头表现了更加稳定的抗冲击性能。在 2 mm/s 的准静态拉伸条件下, 电阻点焊的平均峰值载荷是 14.47 kN, 当拉伸速度提高到 2 m/s 时, 峰值载荷提高了 13%, 为 16.4 kN; 当拉伸速度为 4 m/s 时, 峰值载荷提高了 20%, 为 17.46 kN; 当拉伸速度为 6 m/s 时, 峰值载荷提高了 33%, 为 19.24 kN; 当拉伸速度为 8 m/s 时, 提高了 40%, 为 20.20 kN。在 2 mm/s 的准静态拉伸条件下, 自冲铆接的平均峰值载荷是 6.51 kN, 在 2 m/s 的拉伸速度条件下, 峰值载荷仅提高了 1%, 为 6.58 kN; 当拉伸速度为 4 m/s 时, 峰值载荷提高了 25%, 猛增至 8.14 kN; 当拉伸速度为 6 m/s 时, 峰值载荷提高了 45%, 为 9.45 kN; 当拉伸速度为 8 m/s 时, 提高了 49%, 为 9.68 kN。从拉伸载荷数据可以看出, 电阻点焊在不同拉伸速度下的峰值载荷均高于自冲铆接。当拉伸速度分别为 2 m/s、4 m/s、6 m/s、8 m/s 时, 电阻点焊抗拉强度比自冲铆接高 149.92%、114.50%、103.60%和 108.68%。

Table 4. Peak loads of the two joints at different tensile speeds**表 4.** 不同拉伸速度下的两种接头的峰值载荷

接头形式	拉伸速度 (m/s)	峰值力(kN)	平均峰值力 (kN)	拉伸速度 (m/s)	峰值力(kN)	平均峰值力 (kN)
电阻点焊		16.04			18.78	
	2	16.29	16.40	6	19.42	19.24
		16.89			19.52	
		17.28			20.02	
	4	17.43	17.46	8	20.14	20.20
		17.66			20.44	
自冲铆接		6.43			9.32	
	2	6.63	6.58	6	9.37	9.45
		6.68			9.67	
		8.71			8.74	
	4	7.86	8.14	8	10.27	9.68
		7.84			10.02	

接头的中高速拉伸性能也代表了接头抵抗冲击载荷的能力, 在不同速度下的拉伸都会有不同的性能表现。当车辆发生事故的时候, 连接接头通常会发生断裂而失效, 由于材料本身具有应变率的敏感性, 并且连接接头材料组织和结构的不均匀性, 导致连接接头在高速下的力学性能和低速下拉伸时候表现出来的力学性能有很大的区别。因此, 在设计阶段仅以低速拉伸试验无法对接头进行准确的性能评估, 还需综合考虑材料的中高速性能。

4. 结论

本文通过对用两种不同连接方式的 HC420LA-HC420LA 接头进行了准静态(2 mm/s)和中高速(2 m/s、4 m/s、6 m/s、8 m/s)的拉伸试验, 分析、研究并总结了不同拉伸速度下接头的失效形式和力学性能, 主要研究成果如下:

- 1) 不管是电阻点焊还是自冲铆接, 抗拉力总是随着拉伸速度的增大而增大, 表明这两种接头都表现出了对拉伸速度的正敏感性;
- 2) 于 HC420LA-HC420LA 连接接头而言, 电阻点焊的接头性能优于自冲铆接的接头性能;
- 3) 在不同拉伸速度下, 电阻点焊接头表现出了较稳定的载荷变化, 这表明电阻点焊的焊接接头在抵抗冲击载荷方面稳定性优于自冲铆接;
- 4) 在进行中高速拉伸时, 由于材料的硬化行为以及应力波在材料内部的传递等因素综合作用导致接头在载荷 - 位移曲线上表现出不稳定的现象;
- 5) 由于两种接头在中高速拉伸下的力学性能与准静态下的力学性能有很大的差距, 在对车辆进行设计时应当综合考虑连接接头的抗冲击性能, 以免高速冲击下接头失效导致乘员出现意外的情况。

基金项目

柳州市科技计划项目(2020GAAD0601)。

参考文献

- [1] 杨源远, 董丽丽, 梁世胤. 冷轧高强度低合金钢 HC420LA 的连续退火工艺[J]. 金属热处理, 2020, 45(8): 166-170.
- [2] 李霞, 李春诚, 佟铁印, 王亚东. 低合金高强度钢 HC340LA 工艺优化生产实践[J]. 金属世界, 2016(2): 67-70.
- [3] 赵树国, 张庆良, 李世博. 汽车用 DP600 双相钢电阻点焊工艺研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(11): 211-213+217.
- [4] 吴丹, 韦超毅. 汽车用钢铝异种材料的自冲铆接工艺智能优化[J]. 锻压技术, 2021, 46(2): 117-123.
- [5] 王付才, 陆卫中, 杨海. 轻量化汽车自冲铆接接头腐蚀行为的研究进展[J]. 材料保护, 2021, 54(8): 132-138.
- [6] 田义丰. 汽车轻量化中锰 TRIP 钢/DP590 异种先进高强度钢电阻点焊的研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2021.
- [7] 陈刚, 唐啸天, 刘国跃, 贾寓真. 焊接电流对 M51/RM80 异种钢电阻点焊接头力学性能和断裂行为的影响[J]. 热加工工艺, 2022, 51(5): 18-22.
- [8] 尤小龙. 高强度电阻点焊接头熔核形态和力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [9] 崔俊佳, 董东营, 王琼, 李光耀. DP780 双相钢电阻点焊接头动态载荷下失效行为研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(2): 70-79.
- [10] 王亚东, 王亚芬, 张秀香, 韩丹, 杨天一, 陈虹宇. 热镀锌双相钢 DP780 电阻点焊工艺[J]. 金属世界, 2021(3): 67-70.
- [11] 江仲海, 潘志红, 周凯, 朱丹. 1800MPa 级超高强热成型钢板电阻点焊工艺优化与性能分析[C]//中国汽车工程学会. 2021 中国汽车工程学会年会论文集(5), 2021: 425.
- [12] 王鹏博, 张永强, 付参, 伊日贵, 鞠建斌, 杨建炜. HR800CP 复相高强度钢电阻点焊工艺性能研究[J]. 电焊机, 2021, 51(11): 67-71+148.
- [13] 毕宝鹏, 范坤, 蒯淑苗. 重型卡车电阻点焊合梁的质量控制研究[J]. 机械制造, 2021, 59(11): 48-50+64.
- [14] 徐利利, 汪彬, 陈光权, 董卫平, 张洪延. 基于有限元模拟的自冲铆接工艺参数优化[J]. 汽车工程学报, 2019, 9(3): 175-181.
- [15] 张永超, 黄志超, 贾颖莲. B1500HS 高强度钢与 AA5052 铝合金自冲铆接成形与力学性能分析[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(10): 122-129.
- [16] 潘伟涛. 钢铝异种材料自冲铆接工艺研究与参数优化[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [17] 靳文豪. 自冲铆接头质量预测及酸性腐蚀静力学研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- [18] 刘洋, 庄蔚敏. 碳纤维增强树脂复合材料和铝合金温热自冲铆接工艺及接头力学性能[J]. 复合材料学报, 2021, 38(11): 3563-3577.
- [19] 宋承裕. 对接自冲铆接头静力学特性及微动疲劳失效分析[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- [20] 王艳杰, 曹洋, 彭云, 赵琳, 李忠磊. 低合金高强度钢 HC420LA 激光焊接接头组织与力学性能[J]. 应用激光, 2019, 39(1): 79-86.
- [21] 叶姜, 樊雷, 余轶峰. 汽车用冷轧低合金高强度钢 HC420LA 的开发[J]. 中国钢铁业, 2018(5): 33-34.