

汽车用钢焊接技术研究进展

刘国承^{1,2} 田杰平³ 史玉升¹ 张思思²

¹华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074

²武汉钢铁(集团)公司研究院, 湖北 武汉 430080

³神龙汽车有限公司技术中心, 湖北 武汉 430056

摘要 焊接是汽车制造中最主要的工序之一,已经在实际生产中得到广泛应用,汽车用钢和焊接工艺均会对最终的焊接质量产生重要影响。从材料的强化机制和表面镀层性质两方面,阐述了汽车用钢的基本分类及其特点。详细介绍了汽车用钢的点焊、激光焊、电弧焊等常见焊接工艺的特点及应用范围,从钢板镀层特性、化学成分、焊接工艺参数、焊接的接头性能等角度,综述了国内外对汽车用钢不同焊接工艺影响因素的研究进展。结合未来第三代先进高强汽车用钢、铝合金和镁合金的研发与应用,探讨了当前汽车用钢的焊接新技术,对未来焊接技术的发展趋势进行了展望。

关键词 材料; 汽车用钢; 焊接; 镀层; 激光

中图分类号 TG47 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.010004

Review of Welding Technologies for Automotive Steel Sheets

Liu Guocheng^{1,2} Tian Jieping³ Shi Yusheng¹ Zhang Sisi²

¹State Key Laboratory of Material Processing and Die and Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

²Research and Development Center of Wuhan Iron and Steel (group) Corporation, Wuhan, Hubei 430080, China

³DEPA of Dongfeng Peugeot Citroen Automobile Company LTD, Wuhan, Hubei 430056, China

Abstract As one of main processes in automobile industry, welding technologies are widely utilized. It is important for welding quality that automotive steel sheets and welding methods are employed. Classifications and characteristics for automotive steel sheets are illustrated from the strengthening toughening mechanisms and coating types. The features and application range of many welding technologies in automotive industry, such as spot welding, laser welding and arc welding, are discussed in detail. The development of influencing factors for these welding technologies are reviewed by coating and chemical compositions of sheets, welding parameters, joint properties. Combining the research and application of the third generation advanced high strength steel, aluminum alloy and magnesium alloy for automotive industry, many new hybrid welding technologies are also investigated. The future of welding technologies for automotive steel sheets is also discussed.

Key words materials; automotive steel sheets; welding; coating; laser

OCIS codes 140.3390; 350.3850; 140.6810; 160.3900

1 引言

随着汽车工业的飞速发展,车身质量要求越来越轻,汽车用钢的种类日益多样化,高强钢、超高强钢的应用也更加广泛。在满足车身安全的前提下,汽车用钢逐渐向高强、减薄的方向发展,对汽车板的要求也越来越高。不仅要求板料具有优良的冲压成形性和油漆相容性,而且要求镀层板具有优异的防腐性以及与其的结合力。汽车板经成形工艺后,使用焊接工艺将各个零件组装成白车身,汽车用钢的焊接则是车身制造的关键技术之一,车身焊接中,经常会出现气孔、咬边、未熔合等焊接缺陷,影响焊缝品质。焊接质量将对车身安全性、密封性、舒适性等方面产生重要影响。汽车生产中使用焊接工艺有多种,但是汽车板的强度、

收稿日期: 2014-06-10; 收到修改稿日期: 2014-09-18; 网络出版日期: 2014-11-28

基金项目: 湖北省重大科技创新计划项目(2013AAB008)

作者简介: 刘国承(1981—),男,博士,主要从事汽车轻量化技术方面的研究。E-mail: hust_lgc@163.com

厚度、化学成分和镀层等方面均会对焊接质量产生影响。本文结合当前白车身制造的典型焊接工艺,分析了点焊、激光焊及电弧焊在汽车板焊接中的应用特点、适用范围及其影响因素,并探讨了未来汽车用钢焊接技术的发展趋势。

2 汽车用钢

根据强化机制不同,常用的汽车用钢可分为无间隙原子钢(IF)和软钢等深冲钢;高强度IF钢(HSIF)、烘烤硬化钢(BH)、高强度低合金钢(HSLA)、各向同性钢(IS)等普通高强钢(HSS);双相钢(DP)、复相钢(CP)、相变诱发塑性钢(TRIP)和马氏体钢(MART)等先进高强度钢(AHSS)。根据板料表面是否有涂层以及涂层类型的不同,可以分为冷轧板(CR)、热镀锌板(GI)、热镀锌合金板(GA)、电镀锌板(EG)、电镀锌合金板(EGA)以及镀锌+预涂层板。GI板具有生产工艺成熟、制造成本低廉、耐蚀性强的优点,但镀层厚度相对较厚,可焊性较差,在欧美和我国的车型中应用较广。GA板相对GI板具有更好的焊接性,且耐蚀性、涂装效果更佳,但生产成本更高,且在成形过程中镀层易产生粉化和剥落的现象,在日系车型中使用较多。EG板镀层细腻、致密、均匀,耐腐蚀性较好,但生产成本高,主要应用于欧美高端车型的外板件。EGA具有极好的耐蚀性,但镀层较硬,成形性较差,且生产成本高^[1]。汽车板的焊接是汽车生产的主要工序之一,根据焊接方法不同,汽车板最常用的焊接方法包括点焊、激光焊、电弧焊等工艺。

3 焊接工艺

3.1 点焊

点焊工艺是电阻焊的一种,具有操作快捷、生产效率高等优点,成为了白车身制造的主要焊接工艺,已经在汽车制造中得到广泛应用,也是当前汽车用高强钢的主要焊接方法^[2]。在现代汽车制造中,白车身约有4000~5000个焊点。点焊工艺参数对焊接质量有较大影响,通过正交试验研究发现,对焊点的力学性能和质量的影响最显著的是焊接时间,其次为焊接电流、焊接压力^[3]。深冲热镀锌钢具有优良的冲压性和耐腐蚀性,通过对规格为1.00 mm厚的DX53D+Z板料进行单脉冲和双脉冲两种模式的点焊试验,发现经单脉冲工艺,焊接效率可提高约20%,但是可焊接电流范围减小;在焊接范围达到下限时,相同焊接电流下,双脉冲模式的焊接质量好于单脉冲模式;受焊接输入热量的影响,单脉冲模式的晶粒尺寸大于双脉冲模式,且焊缝区显微硬度也明显高于双脉冲模式^[4]。虽然不同焊接模式对焊接性能产生影响,但是,通过探索合适的工艺参数,单脉冲模式也能满足实际生产的需要。对1.0 mm厚DC05冷轧板分别采用低频(30 Hz)和高频(60 Hz)焊接电流进行点焊,比较焊点的疲劳性。结果显示,在相同载荷下,高频焊接电流下焊点的疲劳寿命大于低频时的状态^[5]。钢板化学成分的差异,会影响材料的电阻率、热导率等物理性能,其点焊工艺性也会有差异。研究表明,780 MPa级DP钢和980 MPa级TRIP钢的可焊性电流上限值低于普通低碳钢,且其可焊性电流下限值也比普通低碳钢低,但对于材料的可焊性范围宽度,这两种高强钢和普通低碳钢基本一致^[6]。通过对不同成分的590 MPa级DP钢点焊试验研究表明,接头的抗拉强度及韧性受碳含量影响较大,碳含量越高,在接头处越易产生板条状或片状孪晶马氏体亚结构,降低接头的韧性^[7]。钢板经过点焊工艺后,热影响区形成粗大的柱状晶组织。由Hall-Petch公式可知^[8],材料的流动应力随着晶粒尺寸的增大而降低。因此,热影响区的力学性能比母材差,属于材料的薄弱区域,在冲压过程中容易产生开裂。

汽车板的镀层不同对点焊的可焊性窗口也会产生影响。由于锌层的导电性好、熔点低、硬度低,在焊接压力作用下,增大了板材间的接触面积,致使接触电阻降低,同时锌层的熔化导致电阻热的减小,影响母材熔核的形成。因此,镀锌板与裸板相比,具有接触电阻小、焊接电流密度减小、镀层表面易烧损、易产生飞溅、易出现焊接缺陷等特点^[9]。美国焊接界研究结果显示,在相同镀层厚度下,EG板所需的焊接电流最大,GI板次之,GA板最小。经试验研究发现,同等厚度的GI与CR板料进行点焊,GI板料所使用的焊接电流提高约10%~30%^[11]。在相同点焊工艺条件下,虽然GA板所需焊接电流下限稍低于GI板,但是GA板开始发生飞溅的电流值要明显高于GI板,GA板比GI板的焊接工艺窗口宽约33%,由GA板和GI板混搭的点焊工艺窗口则介于这两种材料的点焊工艺边界之间^[10]。CR板不但所需焊接电流最小,而且焊接工艺窗口区间也最大^[11]。镀锌层容易导致焊核出现柱状晶,产生明显结合面,通过增加焊接时间和焊接压力,调整工艺参数,可改善熔核的结晶形态,但是增大焊接电流,则会引起焊核晶粒粗大^[12]。

点焊中,电极的磨损增加生产成本,降低生产效率,也是焊接中面临的主要问题。电极寿命是指焊点熔核直径下降到预期的极限尺寸时所能完成的焊点数,主要受电极与被焊件的材料特性、焊接条件、电极设计及冷却方式等因素的影响。对于低碳钢 CR 板,电极寿命可远大于 5000;对于 GI 板的点焊,电极寿命为 1000~1600;而对于锌铁合金 GA 板的点焊,电极寿命则为 2000~4600^[13]。在相同的连续点焊条件下,GA 板对电极的磨损程度要比 GI 板慢约 40%,原因在于电极与镀层接触面的温度可高达 800 °C,远高于锌的熔点,锌与电极中的铜发生化合反应,而 GI 板中的纯锌镀层较 GA 板中的锌铁合金镀层更易与电极中的铜发生合金化反应^[10]。在 GA 板中,镀层中铁的含量对电极寿命有较大影响,铁的含量越高,则镀层硬度越高,钢板间的接触电阻越大,从而可以降低点焊的焊接电流。铁的质量分数在 7.0%~9.6%时,电极寿命基本相当,但是当镀层中铁的质量分数达到 11.4%时,电极的寿命则可增加 110%。这主要是因为电极的表面形成富铁的合金层,能有效阻止电极中铜元素的损失^[14]。此外,基材中添加硼元素,有助于提高 IF 钢 GA 板点焊时电极的寿命^[15]。

3.2 激光焊

汽车板的激光焊接具有高能、高速、热影响区小和焊缝质量高等优点,且焊接精度高,零件变形小,并能显著提高车身的强度和刚度,已经在白车身的制造中得到广泛应用。比如一汽大众所生产的开迪、速腾、迈腾车型共采用激光焊缝 1600 余条,焊缝累计长度近 70 m,速腾白车身采用 21 台激光焊机,焊缝长度为 9 m,整车强度提高了 30%^[16]。在车身的激光焊接中,常用的接头结构有搭接、对接等方式,如图 1 所示。

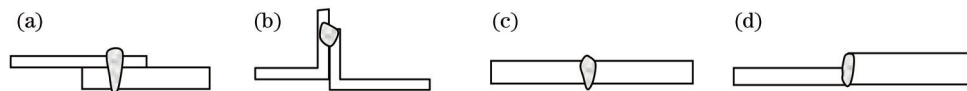


图 1 白车身典型激光焊接接头结构形式。(a) 重叠接头;(b) T 接接头;(c) 等厚对接接头;(d) 差厚对接接头

Fig.1 Various joint structures of laser welding for body-in-white. (a) Overlap joint; (b) T joint; (c) butt joint with same thickness; (d) butt joint with different thicknesses

在白车身的激光焊接中,搭接接头形式具有广泛的应用,重叠接头和 T 接接头是搭接的主要形式,有些车型中的重叠搭接焊缝总长度达到 100 m^[17-18]。重叠接头只需将激光聚焦在板材重叠区域即可,对激光焦点定位要求较低,但是锌蒸气难以溢出,容易出现气孔、未熔合、飞溅等缺陷,影响焊接质量;T 接方式则需要将激光聚焦在焊缝处,对激光焦点的定位要求较高,需专门的焊缝跟踪系统,锌蒸气易排出。目前美国福特、通用,德国奔驰、大众,上海通用等公司已经使用搭接激光焊技术来完成车顶和侧围的连接^[19]。对接接头根据板厚不同,可以分为等厚对接和差厚对接两种结构,是激光拼焊板的主要形式。汽车板的激光焊接一般采用深熔焊模式,在熔池内部产生小孔效应,获得深而窄的大深宽比焊缝。

激光拼焊板能够将不同强度等级、不同厚度、不同镀层的材料拼焊在一起,并进行整体冲压成形,可以优化选材,减少零件及模具,节约制造成本,同时还能提高零件整体刚度,提供更好的安全性能,是当前汽车轻量化的主要技术之一,已经在汽车覆盖件中得到广泛应用。激光焊接当前应用最多的激光器是 6~12 kW 的 CO₂ 激光器、3~4 kW 的 Nd:YAG 激光器和 4~6 kW 的光纤激光器,可以进行实际工业应用的激光拼焊汽车用钢的材料组合如表 1 所示^[20]。

表 1 激光拼焊汽车用钢的材料组合

Table 1 Materials combination for tailor welded blanks

Ultimate tensile strength R_m /MPa	DDQ /HSS	CP				DP			TRIP	
		<450	450	600	800/1000	450	600	800/1000	700	800
DDQ/HSS	<450	●	●	●	●	●	●	○	○	○
CP	450	●	●	●	●	●	●	○	○	○
	600	●	●	●	●	●	●	○	○	○
	800/1000	●	●	●	●	●	●	○	○	○
		450	●	●	●	●	●	●	○	○
DP	600	●	●	●	●	●	●	○	○	○
	800/1000	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		700	○	○	○	○	○	○	○	○
TRIP	800	○	○	○	○	○	○	○	○	○

“●”:生产工艺成熟;“○”:可行性待供应商确认。

影响激光拼焊板质量的因素主要包括对接间隙、激光光斑模式、激光功率、焊接速度、气体保护等。由于激光光斑直径一般小于0.5 mm,如果对接间隙过大,则激光会直接穿透,不能对板料进行有效加热而导致焊接失败;但是,由于工装、剪具的影响,两片板料对接时会存在间隙。以板厚 t 为参考,通过对DP600双相钢的等厚拼焊研究表明,当对接间隙小于 $0.18t$ 时,得到的焊缝无明显缺陷,当对接间隙小于 $0.16t$ 时,焊缝强度高于母材^[21]。在工程应用中,当 t 为0.5~3 mm时,对接间隙应低于 $0.1t$;当 t 为3~10 mm时,对接间隙应低于 $0.05t$ 。对于2 mm厚的低碳钢,对接间隙应低于 0.12 mm ^[22]。

在汽车板的CO₂激光焊中,与氮气保护相比,使用氩气保护时钢板深冲性能更佳,通过侧吹保护气体的办法,可以有效地控制镀锌板焊缝中锌的含量,并能有效避免气孔、开裂以及热影响区软化等缺陷^[23]。IF钢经过激光焊接后,由于板料的快速冷却作用,焊缝区形成铸造组织,但是熔化区的晶粒尺寸小于母材,且硬度最大,热影响区的硬度则介于母材与熔化区之间,显微组织的变化引起力学性能的差异,焊缝的屈服强度和抗拉强度增大,而延伸率却低于母材。DP钢由铁素体和马氏体组成,经过激光焊后,热影响区内形成马氏体组织的含量比母材高得多。但是,在快速的热循环作用下,热影响区的马氏体因回火作用而产生软化效应,该软化效应在热成形钢的激光焊接中更为显著。如22MnB5热成形钢经激光焊接后,热影响区的显微硬度比母材约低200 HV,该特性将对产品的实际应用产生不利影响^[24]。

通过激光拼焊后,拼焊板的成形性也发生了变化。通过球形冲头对拼焊板的成形过程研究发现,当焊缝方向与最大主应变方向平行时,在垂直焊缝处产生开裂,其最大成形高度低于相应母材成形高度的30%,成形高度随着拼焊两侧母材强度比率的增大而略有降低;当焊缝方向垂直于最大主应变方向时,两侧母材受到相同的作用力,随着厚度的降低,薄板所受的应力更大,导致薄板处产生更大的应变,发生不均匀变形,则会在靠近焊缝的弱侧母材出现开裂现象,其最大成形高度只低于母材成形高度的10%,且随着两侧母材强度比率的增大而快速降低,但当强度比率大于1.5以后,拼焊板的成形高度则基本恒定。随着激光拼焊板厚度比率的增大,由于非均匀变形的增加,引起拼焊板成形性的降低^[25-27]。

汽车板的激光焊接中,搭接激光焊也是重要的应用之一。在镀锌板激光焊接过程中,存在锌蒸气、光致等离子体和锌烧损的特点,对焊接质量产生显著影响^[18]。由于锌的熔点是420 ℃,沸点是906 ℃;而钢的熔点是1530 ℃,沸点是2861 ℃,两者物理性能差异显著^[28]。因此,当高能束激光对镀锌板进行焊接时,表面的锌层吸收能量后迅速发生气化,形成锌蒸气。镀锌板搭接焊时,上下表面的锌蒸气可以自由向空间扩散,但中间界面的锌蒸气则只能通过3种方式扩散:1)经板间间隙向外扩散;2)进入焊接小孔向外扩散;3)残留在熔池内,形成气孔缺陷^[19]。由于激光焊接的加热和冷却速率非常大,极不利于锌蒸气经小孔向外扩散。可见,设计合理的搭接间隙,对锌蒸气的排出非常重要。在工程应用中,搭接间隙一般为0.05~0.20 mm,间隙过小,则不利于锌蒸气的排除;间隙过大则会使金属熔化不足,影响接头强度^[16]。Kim等^[29]根据焊接速度、镀层厚度、板料厚度、材料系数等因素对搭接间隙进行数学建模,计算预留间隙。然而,该方法难以在实际生产中进行应用。此外,也可通过对焊缝预开排气孔或排气缝的方式,从焊接结构方面帮助锌蒸气的排除^[30-31]。在搭接激光焊时,通过控制合适的激光束入射角,可以使镀锌板焊接时的锌蒸气及时溢出,提高焊接质量。使用CO₂激光器进行搭接焊时,接头上表面熔宽最大,下表面熔宽较小,接头截面呈“Y”型;当使用光纤激光器进行搭接焊时,上下表面的熔宽基本相当,接头截面呈“I”型。这主要是由于CO₂激光焊接过程中易产生光致等离子体,光致等离子体会吸收激光能量,阻碍激光对板料的辐照,影响小孔的形成,从而对接头质量产生影响。而光纤激光波长较短,可不必考虑光致等离子体的影响。从接头的显微组织及显微硬度分析可知,CO₂激光焊熔化区的显微组织更粗大,热影响区的显微组织更不均匀;与CO₂激光焊相比,使用光纤激光的熔化区和热影响区的显微硬度更高。由于光纤激光高能量密度,在快速冷却条件下,形成了更小的热影响区,使用光纤激光对汽车板进行焊接能得到更优良的接头组织和性能^[28]。

对镀锌板的激光焊接中,由于高能束的作用,导致锌层烧损的现象,对焊缝的耐蚀性产生不利影响。实验研究表明,影响锌烧损的因素依次为焊接速度、激光功率、辅助气体流量、离焦量。焊接速度越小,激光功率越大,锌烧损越严重,焊缝的耐蚀性能也越差^[32]。在激光焊接中,设计合理的工艺参数,对减少锌烧损量具有重要意义。为降低锌蒸气和锌等离子体对激光束的阻隔效应,可以在搭接界面处添加金属粉末(如镍合金粉、铜粉等),减少锌蒸气和锌等离子体的产生,同时也降低等离子体温度及其振幅^[33]。激光钎焊作为激光焊

接的一种工艺已经在白车身制造中得到应用,典型应用于顶盖与侧围、行李箱等部位的焊接,且许多零件使用镀锌板,如标致508、雪铁龙C5、高尔夫A4、宝来A4、奥迪A6L等车型均应用该焊接工艺^[16,34-35]。该工艺能减少材料的搭边,减轻车身重量,所需的焊接能量少,激光功率低,零件变形小,具有良好的焊缝外观,不仅能提高车身安全性和密封性,还能提升车身外观品质。

3.3 电弧焊

目前,汽车的结构件焊接中,常会应用电弧焊工艺,使用较广的是CO₂气体保护焊、熔化极气体保护焊(GMAW)和钨极惰性气体保护焊(TIG)。通过对DP600热轧双相钢的CO₂气体保护焊接性研究发现,接头的抗拉强度高度母材,但比激光焊的接头抗拉强度低;冲击韧性比母材低,尤其在低温段,热影响区冲击韧性比母材低较多^[36]。GMAW中主要包括熔化极活性气体保护焊(MAG)和熔化极惰性气体保护焊(MIG)。MAG焊常使用Ar加少量CO₂或O₂作为保护气体,板厚过薄时,容易引起板料烧穿。因此,MAG在板厚大于1.0 mm的焊接中得到较多应用;而MIG焊需使用惰性气体作为保护气体,成本较高,本质上属于高温钎焊之一,主要应用于板厚小于1.0 mm的薄板焊接^[37]。MAG焊在车轮钢的焊接中应用较广,实现将轮辋和轮辐组装,焊接成轮毂。CO₂气体保护焊和MAG焊具有加热温度高、飞溅大、质量难控制等特点。对于镀锌板,由于锌的熔点和沸点低,使用MAG熔化焊时,在电弧作用下,镀锌层易气化和氧化,形成气孔、未熔合及裂纹等缺陷。可以使用MIG焊对镀层板实行电弧钎焊,选择合适的保护气体,优化焊接参数,减少热量输入,减少锌的挥发,并降低内应力,达到减小板料变形的目的^[38-39]。

为了降低镀锌板在焊接过程中锌层的挥发,最新研究结果显示,通过将GMAW焊与钎焊复合,形成熔化极气体保护钎焊(GMA)新工艺,在合适的熔化极钎料填充作用下,能为IF钢的GA板提供良好的焊接效果,接头强度达到甚至高于母材的力学性能^[40]。为了克服激光焊的不足,开发了激光-GMAW焊、激光-TIG焊等激光-电弧复合焊接技术,综合利用激光和电弧两种热源的优势,电弧的加入增加了熔深,降低了熔池冷却速度,有利于气体排除,降低气孔率,提高能量利用率,增强焊接的稳定性。通过激光-TIG复合焊接,不仅焊接速度可达激光焊的3倍,而且板间的最大允许间隙可以提高300%,该工艺主要用于薄板高速焊,也可用于差厚板的对接焊^[41-42]。激光-电弧复合焊可以对铝合金/镁合金、低碳钢/镁合金等异质金属进行焊接,大众的奥迪A8、辉腾等车型的生产都已经应用了该技术^[43-44]。

4 结 论

虽然目前汽车工业中已经应用了多种焊接方法,但是在白车身的焊接中,钢板的点焊和激光焊仍是最主要的焊接方法。随着汽车轻量化技术的发展,白车身用材的多样化,第三代先进高强汽车用钢的研发与应用,铝合金、镁合金等轻金属应用也会越来越多,钢/铝合金、钢/镁合金等异质金属间焊接的需求也越来越多。为了克服当前主流焊接工艺的不足,激光-电弧复合焊、激光钎焊、GMA、双丝MIG/MAG、搅拌摩擦焊等多种新焊接工艺的应用将日益广泛,对提高焊接质量及效率具有重要的意义,将会对汽车用钢的焊接技术提出新的挑战,推动焊接技术的发展。

参 考 文 献

- 1 Zhao Guangli, Liu Chao. Spot welding process of auto body galvanized panel[J]. Auto Engineer, 2012, (10): 55-57.
赵广力, 刘超. 车身镀锌板点焊工艺[J]. 汽车工程师, 2012, (10): 55-57.
- 2 T B Hilditch, J G Speer, D K Matlock. Effect of susceptibility to interfacial fracture on fatigue properties of spot-welded high strength sheet steel[J]. Materials and Design, 2007, 28(10): 2566-2576.
- 3 Hu Xinbin, Wan Bin, Dong Shijie. Optimization on welding parameters of resistance spot welding process for automobile galvanized steel plate[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(23): 206-207.
胡心彬, 万斌, 董仕节. 汽车用镀锌钢板电阻点焊工艺参数的优化[J]. 热加工工艺, 2010, 39(23): 206-207.
- 4 Jia Songqing, Zhang Yongqiang, Liu Xingquan, et al.. Research on resistance spot welding technology and properties of DX53D+Z hot-dip galvanized strips used in auto[J]. Electric Welding Machine, 2012, 42(4): 65-69.
贾青松, 张永强, 刘兴全, 等. 汽车用热镀锌钢板DX53D+Z电阻点焊工艺[J]. 电焊机, 2012, 42(4): 65-69.
- 5 Jia Songqing, Zhang Yongqiang, Liu Xingquan, et al.. Research on resistance point welding technology and properties of DC05 cold-rolled steel sheet used in auto[J]. Shougang Technology, 2011, (4): 25-28.

- 贾松青, 张永强, 刘兴全, 等. 汽车用DC05冷轧钢板电阻点焊工艺的研究[J]. 首钢技术, 2011, (4): 25-28.
- 6 Li Jianjun, Qiu Ranfeng. Automotive high strength steels and their formability[J]. Automobile Technology & Material, 2010, (2): 49-52.
- 李建军, 邱然锋. 汽车车身用高强度钢及其加工性能的探讨[J]. 汽车工艺与材料, 2010, (2): 49-52.
- 7 Wang Min, Wu Yixiong, Pan Hua, *et al.*. Effect of base metal chemical composition on properties of resistance spot welding joint of DP590[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(2): 33-35.
- 王敏, 吴毅雄, 潘华, 等. 母材成分对DP590钢电阻点焊接头性能的影响[J]. 焊接学报, 2010, 31(2): 33-35.
- 8 W Blum, Y J Li, J Chen, *et al.*. On the hall-petch relation between flow stress and grain size[J]. International Journal of Materials Research, 2006, 97(12): 1661-1666.
- 9 Wang Min, Yu Zhen, Cheng Xuanting. The present research for spot welding technology of new industrial materials[J]. Electric Welding Machine, 2001, 31(12): 9-11.
- 王敏, 余震, 程轩挺. 新型工业材料的点焊工艺研究现状[J]. 电焊机, 2001, 31(12): 9-11.
- 10 Lin Haolei, Shen Jie, Zhang Yansong, *et al.*. A study on the weldability of automotive galvanized steel sheet in resistance spot welding[J]. Automotive Engineering, 2011, 33(6): 549-552.
- 林浩磊, 沈洁, 张延松, 等. 汽车用镀锌钢板电阻点焊可焊性的研究[J]. 汽车工程, 2011, 33(6): 549-552.
- 11 Wei Yuansheng. Classifications of galvanized sheets and their applications[J]. Automobile Technology & Material, 2011, (9): 51-56.
- 魏元生. 镀锌板种类及其在车身上的应用[J]. 汽车工艺与材料, 2011, (9): 51-56.
- 12 Wang Min, Tang Yiming, Zhu Yanping, *et al.*. Effects of spot parameters for nugget crystalline morphology in galvanized sheets[J]. Development and Application of Materials, 1998, 13(2): 1-6.
- 王敏, 唐逸民, 朱燕萍, 等. 镀锌钢板点焊参数对熔核结晶形态的影响[J]. 材料开发与应用, 1998, 13(2): 1-6.
- 13 N T Williams, J D Parker. Review of resistance spot welding of steel sheets Part 2 Factors influencing electrode life[J]. International Materials Reviews, 2004, 49(2): 77-108.
- 14 X Hu, G Zou, S J Dong, *et al.*. Effects of steel coatings on electrode life in resistance spot welding of galvanized steel sheets[J]. Materials Transactions, 2010, 51(12): 2236-2242.
- 15 Y Tobiyama, C Kato, A Yasuda. Improvement in formability and spot weldability of galvanized steel sheet. SAE Technical Paper, 1994, 940539. <http://papers.sae.org>.
- 16 Kong Shuhua, Jia Lei, Yuan Zhongjie, *et al.*. Applications of BIW laser welding in FAW-VW[J]. Electric Welding Machine, 2010, 40(5): 19-26.
- 孔淑华, 贾磊, 袁宗杰, 等. 激光焊接技术在一汽-大众白车身焊接中的应用[J]. 电焊机, 2010, 40(5): 19-26.
- 17 M Schmidt, A Otto, C Kägeler. Analysis of YAG laser lap-welding of zinc coated steel sheets[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57(1): 213-216.
- 18 Zhang Yi, Li Shichun, Jin Xiangzhong, *et al.*. Key technology of laser welding of galvanized steel[J]. Lasers & Optoelectronics Progress, 2010, 47(7): 071401.
- 张屹, 李时春, 金湘中, 等. 镀锌钢板激光焊接关键技术研究[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(7): 071401.
- 19 Lu Bingbing. Analysis and optimization for auto roof to body-side laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(5): 1375-1379.
- 卢兵兵. 白车身车顶侧围激光焊接工艺参数分析与优化[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1375-1379.
- 20 Arcelor Mittal. Multi-thickness laser welded blanks: Tailored Blanks[DB/OL]. <http://automotive.arcelormittal.com>.
- 21 Chen Genyu, Chen Fei, Zhang Yi, *et al.*. Effect of butt joint gap to high-strength automobile steel of fiber laser welding [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(6): 0603013.
- 陈根余, 陈飞, 张屹, 等. 对接间隙对车用高强度钢光纤激光焊接的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603013.
- 22 Huang Zhijun, Hu Lunji, Liu Jianhua, *et al.*. Research on zinc distribution and corrosion resistance of laser welded joint of galvanized steel[J]. Welding & Joining, 2004, (5): 17-20.
- 黄治军, 胡伦骥, 刘建华, 等. 镀锌板激光焊接接头锌的分布及耐蚀性试验[J]. 焊接, 2004, (5): 17-20.
- 23 Q Wu, J Gong, G Chen, *et al.*. Research on laser welding of vehicle body[J]. Optics & Laser Technology, 2008, 40(2): 420-426.
- 24 Yang Xiongfei. Welding for high strength steels[J]. Automobile Technology & Material, 2008, (10): 1-5.
- 杨雄飞. 高强钢的焊接[J]. 汽车工艺与材料, 2008, (10): 1-5.

- 25 H Kusuda, T Takasago, F Natsumi. Formability of tailored blanks[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 71(1): 134-140.
- 26 M Abbasi, M Ketabchi, H R Shakeri, *et al.*. Formability enhancement of galvanized IF-steel TWB by modification of forming parameters[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, 21(4): 564-571.
- 27 M Marion, J Maren, L Michael, *et al.*. A review on tailored blanks-production, applications and evaluation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(2): 151-164.
- 28 L Mei, D Yan, J Yi, *et al.*. Comparative analysis on overlap welding properties of fiber laser and CO₂ laser for body-in-white sheets[J]. Materials & Design, 2013, 49: 905-912.
- 29 J D Kim, H Na, C C Park. CO₂ laser welding of zinc-coated steel sheets[J]. KSME International Journal, 1998, 12(4): 606-614.
- 30 W Chen, P Ackerson, P Molian. CO₂ laser welding of galvanized steel sheets using vent holes[J]. Materials and Design, 2009, 30(2): 245-251.
- 31 S Iqbal, M M S Gualini, F Grassi. Laser welding of zinc-coated steel with tandem beams: Analysis and comparison[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 184(1-3): 12-18.
- 32 Zhang Yi, Yang Xiong, Tang Junjun, *et al.*. Study of the zinc burnout in laser welding of galvanized steel[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2013, 40(9): 37-41.
张屹, 杨雄, 唐军君, 等. 镀锌钢激光焊接锌烧损研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2013, 40(9): 37-41.
- 33 Zhang Yi, Duan Linyong, Zhou Dianwu, *et al.*. Monitoring mechanism of plasma generated by laser welding galvanized steel with powder feeding[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0503005.
张屹, 段林勇, 周惦武, 等. 镀锌钢激光添粉焊接的等离子体监测机理[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0503005.
- 34 Wang Guangyong. Advanced welding technology of automobile body[J]. Electric Welding Machine, 2013, 43(2): 1-7.
王广勇. 先进的车身焊接技术[J]. 电焊机, 2013, 43(2): 1-7.
- 35 Meng Xiangwen. BIW manufacturing technique of AUDI A6L and application of digitalized plant[J]. Automobile Technology & Material, 2007, (10): 31-33.
孟详文. AUDI A6L白车身制造工艺及数字化工厂的应用[J]. 汽车工艺与材料, 2007, (10): 31-33.
- 36 Yan Qi. Weldability of hot rolled dual phase high strength steel[J]. Welding & Joining, 2008, (7): 50-52.
阎启. 热轧高强双相钢焊接性研究[J]. 焊接, 2008, (7): 50-52.
- 37 Wang Guangyong. Welding technology for body-in-white[J]. Automobile Technology & Material, 2010, (3): 5-9.
王广勇. 浅析轿车白车身焊接技术[J]. 汽车工艺与材料, 2010, (3): 5-9.
- 38 Lin Sanbao, Song Jianling. Applications and development of arc brazing[J]. Welding & Joining, 2007, (4): 19-21.
林三宝, 宋建岭. 电弧钎焊技术的应用及发展[J]. 焊接, 2007, (4): 19-21.
- 39 L Quintino, G Pimenta, I Danut, *et al.*. MIG brazing of galvanized thin sheet joints for automotive industry[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2006, 21(1): 63-73.
- 40 S Basak, T K Pal, M Shome, *et al.*. GMA brazing of galvanized interstitial-free steel[J]. Welding Journal, 2013, 92(2): S29-S35.
- 41 Xiao Rongshi, Wu Shikai. Progress on laser-arc hybrid welding[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1680-1685.
肖荣诗, 吴世凯. 激光-电弧复合焊接的研究进展[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1680-1685.
- 42 Fan Ding, Dong Bizhe, Yu Shurong, *et al.*. Technology features and progress of laser-arc hybrid welding[J]. Hot Working Technology, 2011, 40(11): 164-166.
樊丁, 董韶喆, 余淑荣, 等. 激光-电弧复合焊接的技术特点与研究进展[J]. 热加工工艺, 2011, 40(11): 164-166.
- 43 T Graf, H Staufer. Laser-hybrid welding drives VW improvements[J]. Welding Journal, 2003, 82(1): 42-48.
- 44 Wang Zhiyu, Wang Chunming, Hu Lunji, *et al.*. Application of laser-arc hybrid welding in industry[J]. Electric Welding Machine, 2006, 36(2): 38-41.
王治宇, 王春明, 胡伦骥, 等. 激光-电弧复合焊接的应用[J]. 电焊机, 2006, 36(2): 38-41.

栏目编辑: 张雁